水利学科现状、发展方向及创新前沿研究

一、目的

为适应建立创新型国家及国家中长期发展战略规划，水利（包括水电）与港航学科必须加快发展。为此应以科学发展观为武器，对该学科的现状进行剖析；从传统水利向现代水利、可持续发展水利转型的角度明确发展方向；进而由学科发展的逻辑，在强调创新和自主知识产权的前提下提出研究前沿。这项研究应对国民经济建设和社会发展有一定的支撑作用。

二、研究内容摘要

2.1 水文水资源

2.1.1 国家需求

水文水资源学科的发展与人类社会的发展及其与水相关的生产实践活动密切相关。20 世纪以来，水文水资源工作与人类社会的关系越来越密切，在经济社会可持续发展中的地位也越来越重要。在现代数学、计算机、电子信息、遥感、地理信息系统等新理论和新技术的推动下，水文水资源学科开始迅速发展和崛起，其学科交融性不断增强，研究领域不断拓宽，取得了大量有价值的科研成果，已经逐步形成一门系统和比较完整的学科体系，成为水利和经济社会发展的重要基础和支撑。近年来，水文学的研究领域主要集中在水文循环、水文统计、水文模拟、水文预报、生态水文等方面。随着全球气候变化和新技术的出现，水文学已经开始向大尺度方向发展，逐渐从局部研究发展到整体研究，从割裂研究发展到系统研究，新的交叉学科分支也不断出现。水资源学的研究领域则主要集中在水资源的评价、价值、配置、调度、管理等方面。随着水资源短缺、水生态、水环境等问题的日益突出，水资源学的研究范围逐步从小区域发展到大流域和跨流域，研究模式从传统的“以需定供”和“以供定需”模式发展到现在综合考虑供需的“可持续发展”模式，研究目标从最初简单的水量分配到目前协调考虑流域和区域经济、环境和生态各方面需求进行有效的水

量宏观调控，其重要性日益凸显。

2.1.2 研究现状

受经济社会发展阶段和科学技术发展水平的制约，目前水文水资源学科研究主要存在以下四个方面的问题：①水文基础设施建设还比较滞后，应进一步提高水文、水资源、气象、水质等基础资料监测、采集与传输的现代化水平，扩大数据共享范围，加快数据共享速度；②中长期水文气象的预测预报水平有限，水旱灾害的监测和预报能力比较落后；③全球气候变化导致气温升高，蒸发增加，降雨及径流时空分布更加不均匀，给防洪安全、水资源安全、生态安全带来了严重影响。目前，大尺度水文水资源问题的研究仍然较少，全球气候变化对水文水资源的影响及应对措施研究才刚刚起步；④在高强度人类活动作用下，人工侧支水循环的径流通量越来越大，致使流域水循环及其伴生的水环境、水生态过程均呈现出越来越明显的“自然—人工”二元特性。纵观国内外水文水资源学科相关研究的发展历程，现代水文水资源学科研究仍处于不断发展与完善时期，应进一步拓宽研究思路，革新研究范式，在研究对象、技术途径和观测实验手段等方面实现新的突破。

2.1.3 创新前沿

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源，是生态与环境的控制性要素。水资源系统与社会经济系统、生态环境系统有着非常复杂的相互依存和相互制约的关系。当前和今后一个时期，是我国全面建设小康社会、加快推进现代化进程的重要时期，也是传统水利向现代水利、可持续发展水利加快转变的关键阶段，经济社会发展和全球气候变化对水文水资源学科不断提出新的需求。水文水资源学科的发展既面临难得机遇，也面临严峻挑战。围绕水资源可持续利用这条主线，提出了“自然—人工”二元水循环模拟、应对气候变化、缺乏观测资料流域的水文观测与预报、基于气象因子的中长期水文预报方法、水循环与伴生过程相互作用机理、基于总量控制的流域水资源整体调控、复杂水利工

程群多目标联合调度、数字流域等 8 个重大的创新前沿。应立足于我国水资源的特点和水资源开发利用的发展情势，加强水文水资源学科的基础理论和实验技术研究，加强水文水资源学科与大气科学、生态学、环境科学、遥感科学、计算机科学、经济学、管理学、社会学等相关学科的多学科交叉合作研究，加强水文水资源学科领域重大创新前沿问题的研究，不断提高水文水资源领域的科学研究水平，健全和完善其学科体系，并进一步推动相关学科向前发展。

2.2 防洪抗旱减灾

2.2.1 国家需求

洪水与干旱是全球影响范围最广、对人类的生存与发展危害最为显著的自然灾害。据国际组织的统计数据，1975－2005 年期间全世界受到自然灾害影响的人口中，有 50.8%缘于洪水，33.1%缘于干旱（ADRC, 2006）。洪水与干旱具有一定的可调控性，这是水旱灾害区别于地震、火山、飓风、海啸等其它自然灾害的重要特点。防御与减轻水旱灾害历来是水利建设的重要任务。

当代社会中，尽管人类修建了规模空前的防洪抗旱工程体系，但世界各国水旱灾害损失的绝对值依然呈现上升的趋势。这不仅与气候变化及其伴随的极端事件频发密切相关，而且突显出现代社会面对水旱灾害的脆弱性。我国目前正处于经济社会迅猛发展与城市化加速的阶段，与水资源短缺、水环境恶化、生态系统修复等治水新问题交织在一起，古老的水旱灾害防治变得更为复杂、艰巨；重大灾害事件引发的次生、衍生灾害更为突出。2010 年我国洪涝灾害直接经济损失高达 3745 亿元，其中，农林牧渔业损失占 35.3%，而其他近 2/3 的损失是由工业交通运输业、水毁工程等其他类别构成的。全国县级以上受淹城市超过了 250 座，其中大多为暴雨内涝造成。因灾死亡人口中，92%由山洪、滑坡、泥石流造成。2010 年西南 5 省与 2011 年长江中下游的严重干旱亦显示出与以往不同的特点。事实表明，在经济社会发展的新形势下，我国水旱灾害风险的分布与构成已经发生了显著的变化。

2.2.2 研究现状

今后 30 年是我国全面建设小康社会的关键时期，人口增长将超过 15 亿，城市化率可能超过 60%。水旱灾害高风险区中人口资产密度进一步提高，水的危机将进一步加剧，简单延续传统的治水对策，不仅难以满足经济社会发展日益提高的安全保障需求，而且可能激化区域之间、人与自然之间基于水灾风险的利害关系，反而不利于社会和谐与可持续的发展。

新世纪中，依赖科技进步与积极推进水旱灾害风险管理已成为各国加强水旱灾害防治与治水方略调整的共同趋向。一些发达国家，为了解决可持续发展所面临的日益复杂的水问题，正在深入研究如何通过推进流域综合管理与风险管理来调整与完善治水理念，将法律、行政、经济、工程、技术、教育等手段有机地结合起来，大力促进信息共享与公众参与，为积极应对全球变化带来的挑战与压力建立更强有力的保障体系；而发展中国家，为了应对经济社会快速发展阶段日趋严重的水资源短缺、水环境恶化与水灾损失加剧等问题，也在积极探讨并实施向洪水与干旱管理的战略性转变，不断通过体制、机制的改革来增强防灾减灾的能力建设，以期在尽力抑制水旱灾害损失增长态势的同时，有效发挥洪水的资源效益与环境效益，为支撑经济社会的快速、协调发展创造必不可少的条件。

水旱灾害管理涉及到区域之间、人与自然之间基于水的复杂的利害关系，需要从灾害学、防灾学与防灾减灾技术三个层次加强自身的学科建设。21 世纪中，防洪抗旱减灾领域的科技发展必然体现出两大趋向：一是自然科学中相关学科的深入与综合；二是自然科学与社会科学（法学、经济学、社会学、管理学、心理学等）在交叉领域的开拓与交融。不同国家不同区域，自然地理条件不同，社会经济处于不同的发展阶段，洪水与干旱灾害的风险特性必然会有显著的差异，治水的需求与技术、经济实力亦有明显的不同。因此，在治水方略的制定与技术方案的选择上，必须因地制宜，既要遵循自然规律，也要顺应经

济社会的发展规律。

我国在水旱灾害风险管理、综合管理上存在许多薄弱环节。在气候变化与经济快速发展的背景下，洪水风险演变趋向的预见与评价，中小河流治理与城市型水灾害防治的对策，预警信息发布的等级、范围及应急响应的时机，防洪工程体系的优化调度及其自身的安全保障等课题需要深入研究。与防洪减灾相比，抗旱领域工作基础相对薄弱，加强干旱灾害机理、预测预报方法、干旱判别指标和等级划分标准的研究，成为提高抗旱减灾科学性、合理性和有效性的迫切需求。

我国防洪抗旱减灾体系建设的近期目标是建立适合中国国情的洪水风险管理的理论框架，明确新时期治水方略调整中促进“两个转变”行动计划，把握经济快速发展阶段人类活动与水旱灾害相互影响的规律，认识水旱灾害风险的演变趋向，提出大规模治水实践中促进人与自然之间关系向良性互动转变的运作机制，提炼出市场经济体制下防洪体系建设与管理的适宜模式；形成关键技术的自主开发能力，建立防洪抗旱减灾学科和人才培养体系；在减轻水旱灾害对国民经济发展不利影响的同时，为扭转国内生态环境恶化的趋势做出积极的贡献。

2.2.3 创新前沿

针对我国经济快速发展与社会转型期防洪抗旱减灾领域的难点、焦点和阻碍发展的瓶颈性问题，在全面协调可持续科学发展观的指导下，按照水利部党组提出的新时期治水新思路与推动防汛抗旱工作两个转变的要求，本着关注民生、突出重点、有限目标、弥补薄弱环节、促进良性互动的原则，明确防洪抗旱减灾领域战略研究的重点与重大课题，包括：新时期我国治水方略的调整与水旱灾害风险管理的基础性、宏观性、前瞻性研究，增强对水旱灾害风险演变情景的预见能力；应对重大突发性洪水与持续性特大干旱的应急管理体制、对策与能力建设；蓄滞洪区、滩区、圩垸区安全建设与发展模式的合理调整；国

家防汛抗旱指挥系统现代化与决策支持系统的建设；水旱灾害监测、预测、预报、评估、预警、调控与综合防治的对策体系；我国快速城市化背景下城市防洪与供水安全保障体系；中小河流治理与山地灾害防治；以及防洪抗旱工程体系安全管理、除险加固与合理调度运用，汛限水位调整与和洪水资源化的研究，等等。

2.3 泥沙研究与大江大河治理

2.3.1 河流泥沙研究与国家需求

随着我国社会经济和水利水电事业的发展，河流泥沙研究取得了长足的进展，已成为我国水利工程学科在国际上领先的领域之一。然而，由于自然条件变化与人类活动的影响,我国大江大河目前出现了一些新的情况和变化，特别是进入 21 世纪，随着我国经济社会的快速发展，以及新时期治水思路的转变，维持河流健康、恢复河流生态、保障水资源和防洪安全等问题愈来愈受到人们的广泛关注，已成为国家社会经济发展的重大需求，同时，江河流域综合规划的修编、大型水利水电工程的建设和大江大河的治理对河流泥沙研究也提出了更高的要求。如何实现人—水沙—自然和谐共处，保障国家经济社会的可持续发展已成为当前河流泥沙研究面临和需要解决的重大科学命题。

2.3.2 河流泥沙研究现状

河流泥沙研究作为一个学科的建立约在 20 世纪 50 年代以后，我国的泥沙专家为此做出了突出的贡献。经几十年的努力，我国在细泥沙和非均匀沙起动、非均匀不平衡输沙理论、水流挟沙能力、高含沙水流运动、异重流、泥沙运动统计理论、水库淤积与调度运用方式、河流模拟理论与技术、河床演变与河道整治等多个研究方向取得了重大进展，一些成果达到国际领先水平。在应用上成功地解决了许多重大工程泥沙问题，在我国大江大河治理、防洪安全和水资源安全等方面发挥了重要作用，促进和保障了国民经济建设的快速发展和社会的稳定。

(1)泥沙运动基本理论

泥沙起动研究方面：在细颗粒起动机理、粗细颗粒起动流速统一、非均匀沙起动规律及起动流速，以及起动与输沙率的统一等取得了突破性进展，总体达到了国际领先水平。

高含沙水流运动方面：对高含沙水流形成的条件、高含沙水流的流变特性、运动模式和运动机理等进行了系统研究和总结，建立了高含沙水流运动的理论框架，这些成果有所突破，不少内容在国外尚未见到。

泥沙运动统计理论方面：深入研究了泥沙运动具有的确定性和随机性两方面特性，建立了泥沙运动统计理论体系，达到了国际领先水平，美国流体力学百科全书曾辟专章予以介绍。同时利用高速摄影技术等手段，取得了大量实测资料，从数据全面、精度高看，在国际上名列前茅。同时对明渠挟沙水流运动的力学和统计规律进行了系统的研究。

非均匀沙不平衡输沙方面：在细颗粒高含沙水流挟沙能力、床沙质与冲泻质的相互转化、床沙质和冲泻质统一的挟沙能力关系、非均匀沙的挟沙能力、不平衡状态下的挟沙能力及其级配等方面取得了重大进展，攻破了一些前沿，处于国际领先水平。

水沙两相流研究方面：采用 Boltzmann 方程（或动理学方程）描述泥沙颗粒运动，搭建了泥沙微观运动特性和宏观平均运动特性之间的桥梁，在低浓度条件下，揭示出泥沙浓度分布的两种不同类型，开阔了河流泥沙研究的新途径。

此外，在泥沙异重流运动研究，径流、潮流、波浪共同作用下的泥沙运动机理和挟沙能力研究，流域水沙配置研究等方面也取得了较大进展。

(2)工程泥沙

水库泥沙研究方面：阐明了水库长期使用的原理，提出了“蓄清排浑”和“调水调沙”等水库运用方式，在水库淤积理论方面基本完成了由定性描述向定量表述的过渡，我国围绕大型水利枢纽工程开展的水库泥沙研究代表该领域

的国际领先水平。

河床演变研究方面：对不同河型河道的演变规律、河相关系、造床流量、河流的自动调整作用、河道的稳定性指标、各种类型河道的形成机理、水库上游的淤积与下游河道的冲刷规律、河床变形计算、河口演变规律进行了系统研究。

重大水利水电工程中的泥沙问题研究方面：小浪底水库调水调沙运用与改善下游河道研究方面有重大创新；三峡水库在泥沙淤积及处理上，做了长期深入研究，成功地解决有关泥沙问题及提出应对措施，使水库淤积平衡后，仍能保持 80%以上的防洪和调剂的静库容，获国外很高评价。

(3)河流模拟

泥沙数学模型研究方面：一、二维河流泥沙数学模型已比较成熟，其中对泥沙冲淤模拟，我国处于国际先进水平。三维数学模型以水流模型居多，基本具备了模拟大水域三维流场的能力。三维泥沙模型研究处于起步阶段，离实际应用尚有一定的距离。

泥沙实体模型方面：针对我国模型试验发展要求开展了大量的泥沙实体模型模拟理论与技术研究，建立了一整套实体模型的相似理论、设计方法和试验技术，并在研究和解决大量的工程泥沙问题中积累了丰富的经验。此外，发展了将动床实体模型和泥沙数学模型联合起来运用的合交模型。

泥沙学科存在的主要问题：现有河流泥沙理论不能满足工程实际日益提高的要求，河流泥沙理论尚属发展中的学科，经验性较强，对现象定性描述多、定量表达少、许多理论还有待完善。泥沙数学模型软件与参数需要规范化，多学科交叉研究不足，泥沙研究缺乏长期规划和系统管理。

2.3.3 河流泥沙理论和工程泥沙创新前沿

泥沙学科今后的发展趋势是：从细观上深入揭示泥沙运动机理、非均匀沙不平衡运动规律、泥沙运动理论的整合与统一、河流系统泥沙问题、注重边缘

科学与交叉科学，应加强如下基础理论和创新前沿问题的研究。

(1)大规模深入开展河流泥沙实测资料分析

我国对水文泥沙资料观测一贯十分重视，已积累了大量宝贵的实测资料，今后应加强新水沙条件下河流泥沙资料的观测，通过实测水文泥沙资料分析揭示机理，并注意引进新的分析方法。

(2)河流泥沙基础理论的深入研究

河流泥沙运动的基础理论问题需要持续不断地加强研究，泥沙起动研究包括：非均匀沙分组起动流速、起动标准与输沙率的关系、细颗粒成片（成团）起动机理等；非均匀沙床面泥沙交换研究包括：非均匀沙床面泥沙四种状态输移规律和底部紊流拟序结构及猝发对泥沙运动状态的影响等；非均匀沙推移质输沙能力研究包括：分组输沙率的表达式、推移质级配与床沙级配关系、反映来沙影响的有效床沙级配、床沙级配变化与推移质冲淤及来沙级配的关系、粗颗粒推移质平均速度的表达式等；非均匀悬移质不平衡输沙研究包括：扩散方程边界条件的定量表达式、不平衡条件下挟沙能力的多值性、挟沙能力级配与有效床沙级配、恢复饱和系数、挟沙能力在断面内分布和床沙质与冲泻质挟沙能力及异同等；两相流的理论研究；河床演变研究包括：来水来沙变化对河床变形的影响、河势演变的不同层次研究、造床流量的理论基础与平滩流量、长江和黄河不同河段河型成因、河道萎缩的特性与控制、河流的长期冲刷和维护河流健康等；河口与海岸泥沙研究包括：径、潮、波作用下泥沙运动机理与挟沙能力、不同密度分层流、海岸最大浑浊带的变化及对河口的影响和径流量变化对河口输沙及演变的影响等；水库淤积研究包括：水库变动回水区推移质与悬移质相互转化及冲淤规律、水库淤积平衡和准平衡与河流平衡形成过程对比研究、絮凝对水库淤积的影响和调水调沙的有关理论问题等；并要注意河流泥沙变化对生态环境影响研究，大力发展边缘学科与交叉学科。

(3)工程泥沙研究方向

黄河、长江等的治理仍是工程泥沙研究的重要方向，黄河综合治理措施及长期泥沙问题根治关键技术研究，长江中下游河床演变研究，主要河流流域来沙及演进的系统模拟，流域水沙优化配置理论与调控技术研究，泥沙数学模型完善与商业软件，实体模型相似理论及试验技术研究。

2.4 农田水利工程

2.4.1 农田水利工程学科的战略地位

农业是国民经济的基础，水利是农业的命脉。国家中长期科学技术规划纲要指出：我国自然资源的硬约束不断增强，人均耕地、水资源量明显低于世界平均水平；粮食、棉花等主要农产品的需求呈刚性增长，农业增产、农民增收和农产品竞争力增强的压力将长期存在。深入开展灌溉排水理论和技术的研究，确保灌溉面积上的粮食产量，对维护我国粮食安全具有重要作用。如果能维持目前 18 亿亩耕地，并保持粮食产量稳中有增，必须依靠增加单位面积的农产品产量，其中灌溉排水技术和措施，是农业稳产增产的重要手段。

农业用水量占全国总用水量的 70％左右，在西北部分地区甚至高达到 90%，全国节水的重点在农业，农业节水的关键是降低农田水分蒸发蒸腾消耗量。为了应对日趋严重的缺水形势，建立节水型社会，特别是发展节水农业是一种必然选择。

面源污染物已成为世界范围内地表水与地下水污染的主要来源，而农业是主要的面源污染来源。我国东部地区湖泊的污染负荷输入量中，农业面源污染负荷入湖量已超过 50％。发达国家的污染控制经验表明，随着对工业废水和城市生活污水等点源污染的有效控制，农业生产和生活活动引起的农业面源污染，已经成为水环境污染最重要的来源。在加强对工业和生活污水治理的同时，必须加强对农业面源污染的研究，否则水体污染不会得到根本性好转。

农田水利工程的基础理论和应用基础研究，对于我国的粮食安全、水资源高效利用、农业环境治理和水污染控制具有重要的理论支持作用，是《国家中

长期科学和技术发展规划纲要》对于本学科研究提出的重要研究方向和内容。开展节水灌溉、控制排水、面源污染防治、农业废弃物利用、作物种植结构调整等研究是落实《中共中央国务院关于切实加强农业基础建设进一步促进农业发展农民增收的若干意见》的重要技术支持。

2.4.2 近年来农田水利工程学科的研究现状和动态

我国几十年来在农田水利工程建设方面已经形成了一套具有中国特色的灌排工程系统，如：丘陵区的“长藤结瓜”式灌溉系统，多泥沙河流的引水系统，井渠结合灌溉系统，北方地区土壤盐碱化的治理，西北地区的膜下滴灌技术，缺水地区的雨水集蓄利用技术，黄淮海平原区域水盐运动和旱涝盐碱监测等成套技术等，对主要农作物的水分生产函数和非充分灌溉制度进行了大量的研究，非充分灌溉技术在灌溉用水紧张地区进行应用，取得了良好效果。

由于我国经济发展水平的限制，在节水灌溉设备研发、污水资源化利用、城市雨洪利用、精准灌溉、农业水环境和水生态研究等若干领域还存在一定的差距。特别是基础数据的长期定位观测与积累、试验仪器设备的研发、高新技术的应用等方面严重制约着我国农田水利学科领域科研水平的提高。

近年来国内外农田水利工程学科在节水灌溉、农田排水、农业水环境、灌区现代化管理等领域主要取得以下进展。

(1)农田水分、盐分、养分和污染物转化运移规律

农田水分研究逐步向多学科交叉延伸，如水、热、盐的耦合运移，冻融条件下土壤中水分和盐分的运移，土壤－植物－大气－地下水连续体中多组分物质运动的随机理论和尺度问题等。土壤水运动机理研究也更加深入，如优先流、土壤水参数确定及空间变异性等。将地面水、地下水、土壤水、大气水和作物水之间的转换作为一个整体，研究能量、化学物质和水分的转化运移是目前研究的热点。

(2)节水灌溉理论与技术

国内外学者提出了非充分灌溉条件下主要作物的灌溉制度、调亏灌溉指标、调亏灌溉模式、田间实施技术。提出了节水灌溉条件下农作物的灌溉制度、种植比例、灌溉水量分配、地区间灌溉水量调配等。节水高效的实用技术成果较少，

(3)农田排水和水盐调控

排水指标研究由静态指标发展到动态指标，由涝、渍分开发展到涝渍兼治，由一次涝渍过程的影响发展到多次涝渍过程。控制排水理论和技术提高水资源的利用效率，能有效地处理排水中的氮、磷污染物质。膜下滴灌的控盐措施等方面取得一些研究成果。总体来说，排水理论研究滞后，干旱地区和节水灌溉区的排水作用、次生盐碱化控制和环境效应需要开展基础研究。

(4)农业用水效率研究

在田间尺度、灌区尺度和区域尺度开展了农业用水效率的研究，特别是在灌区尺度上，提出了一系列可操作的测量方法。但是对于灌溉水分利用效率的评价方法、提高水分利用效率的技术方措施、不同类型地区的节水潜力的评估方法需要开展进一步研究。

(5)劣质水灌溉利用技术

劣质水灌溉主要包括微咸水和再生水灌溉。在微咸水灌溉利用方面，提出了作物的盐分响应控制指标；建立了有利于稳定土壤结构、增加土壤渗透性的技术措施；提出了适宜于咸水灌溉的灌水技术参数与模式组合。在咸水的灌溉管理研究方面，得到了保持根区土壤盐分平衡的淋洗量计算方法。长期微咸水灌溉条件下土壤盐分的循环、出路和控制措施仍是目前研究的关键课题。

在再生水的灌溉利用方面，研究和提出了灌溉水水质标准；针对再生水灌溉环境生态效应问题，研究了再生水中灌溉对作物、土壤、地表水、地下水和人体健康的影响。由于再生水灌溉中各种潜在污染物转化运移的机理复杂，现有预测分析方法的精度和可靠性有待用实验数据进行进一步验证。

(6)灌排系统水资源高效利用与优化调控

近年来国内灌排系统水资源高效利用更注重水质与水量的统一管理、水资源环境效益量化以及水资源可持续利用等方面的研究，决策支持技术、大系统多目标模拟优化模型技术和资源价值的定量方法等已开始在灌区水资源管理中得到应用。

(7)农业水环境监测与治理技术

通过技术层面与政策层面的结合，在全流域范围内广泛推行农田最佳养分管理，规范水源保护区农田作物类型、轮作方式、施肥用量、肥料品种和施肥方式，实行全流域氮、磷总量控制，削减农业面源污染排放量。将节水灌溉与农业面源污染控制相结合，研究控制面源污染的节水灌溉技术和水肥综合管理技术。目前我国主要以消化和利用国外的成功模型、重点研究模型参数的取值和模型的适用性问题为主。

(8)村清洁饮用水源及供水技术

结合农村饮水解困和农村饮水安全工程的建设，开展了饮用水源开发利用技术研究，探索了不同地质单元不同类型地下水勘查技术模式，开展了不同地层条件下地下水取水工程技术；研究了劣质地下水处理技术与设备；开发研究了雨水安全集蓄与利用技术及装置；探讨了适合于农业应用的消毒技术、装置、水质检测与水源性疾病监测技术；研究和逐步实行农村供水管网优化设计与标准化、信息化集成技术。

2.4.3 农田水利工程学科创新前沿

在未来五年农田水利学科将围绕提高农业用水效率、保护农业水环境和维持灌溉农业持续发展等主题，开展灌溉排水和农业水环境基础理论与应用技术的研究，主要包括以下几方面。

（1）节水灌溉理论和技术

主要研究环境变化条件下的农业耗水规律；灌区生态需水计算方法；灌区

水资源高效利用复杂系统理论；多水源联合优化调控技术；节水灌溉的区域水土环境效应；不同节水灌溉条件下水分转化理论及尺度效应；高效用水调控机理与非充分灌溉理论；生物节水理论技术；土壤水－植物水－光合作用－生物量－经济产量转化过程的定量描述及提高各环节转化效率的节水调控。

（2）农业排水理论及涝渍治理

主要研究节排水控制理论及技术；长期灌溉条件下的区域土壤盐分平衡理论与预测分析方法；集约化农业和设施农业的排水问题；干旱半干旱地区的排水措施和盐分控制；区域排水指标与田间排水标准的衔接技术等问题；排水泵站的优化运行及其控制理论。

（3）劣质水资源化与水盐调控技术

研究再生水灌溉条件下主要农作物生理生态特征对有害物质的响应；有害物质在作物不同部位的累积及其对农产品品质的影响；再生水储存与调蓄的方式及其规划设计理论；生活污水城镇绿化应用技术；保持微咸水灌溉区域盐分均衡的排水控盐理论、旱排盐技术及其在干旱地区的适用性；长期微咸水灌溉过程中盐分积累和富集规律；摸下滴灌条件下的盐分演化规律和控制措施；设施农业种植模式条件下控制土壤盐分积累和土壤（地下水）污染的排水技术。

（4）复杂灌排系统水循环规律与农业面源污染调控

研究和定量描述化肥、农药在大气、作物、土壤、灌水、淋滤、排水等水分转化和流动系统中的迁移转化特征，提出农业面源污染的控制措施。研究以保护和改善农村水环境的切入点，控制农业面污染源，利用农业生态系统，将污染源转化为资源，利用农田、沟道、洼地等，通过灌溉、排水等手段，调整好农业生态系统，维持系统的良性发展。

（5）极端天气对灌溉排水的影响及对策

近年来由于受人类活动的影响，全球范围内极端天气呈多发态势，严重影响农业生产和粮食安全。我国更是一个各种农业灾害频发的国家，其中干旱和

洪涝灾害表现为随机性，每年由于各种干旱和洪涝灾害造成大量的粮食减产及农民财产的损失。因此，研究极端天气对农业需水、作物耗水、农田排水、灌溉用水等的影响规律，在此基础上，制定应对的水资源调度配置策略、灌溉排水系统调度对策，对提高水资源利用效率，减轻洪涝灾害，稳定粮食生产具有重要的意义。

（6）农村饮水安全研究

过去十年间，村镇供水领域的研究仅仅是结合工程建设开展了一些应急性技术研究，理论和技术的研究都不能构成一个完整的体系，深度和广度方面也远远不够。需进一步研究：西北干旱地区、西南山丘区和环渤海劣质地下水地区村镇供水模式与关键技术；村镇供水消毒技术；村镇供水、排水及污水的水处理新技术；急供水技术与模式。

（7）中尺度农业水土环境要素的监测方法和技术

现有的土壤含水量的测量方法可应用于小尺度上的精确测量（如 TDR，中子仪），或者是大尺度上的快速估计（如遥感影像），但在点尺度到遥感尺度之间测量土壤含水量的方法还不存在，而中尺度土壤水分和盐分测量结果，是实际应用的关键指标。发展一种在 100-1000 m^2 尺度测量土壤含水量的新理论和技术，除了在这些尺度上直接进行测量外，还可以用来对遥感传感器进行率定。

（8）现代灌区信息化管理

提出适合我国不同地区不同类型的灌区管理模式，研究灌区水质水量统一管理的理论与方法；复杂灌排系统联合运用技术。研究农业灌溉用水水权问题，探讨高新技术在农业水利现代化管理中的应用，建立和完善农业水利信息化综合体系。研究水分损失小、价廉、精度高、抗干扰性强的渠系量水设备。研发工程监测管理系统，开发灌区工程设施的数据库系统和动态监测体系，建立水土保持监测与管理信息系统，为水土保持区域和小流域治理工程提供设计、咨询评价及管理和决策支持。

2.5 水工结构工程

2.5.1 国家需求

针对我国已建的大多数水工程年代较久，且在建、将建大量高坝水库，分析了我国水工程存在的关键问题。在此基础上，研究了我国对水工程的主要要求：必须进行及时安全监测、安全监控、安全预报以及病险预警；需从已运行的大量水工程中吸取科学技术经验，制定新的设计、施工和运行规范；依据已运行多年水工程的海量监测资料分析，发展现行水工结构的强度、稳定和耐久性等分析理论和方法等。

2.5.2 研究现状

（1）高坝应力分析

研究与分析了高混凝土坝、高面板堆石坝和土石坝应力分析等的研究现状。其中，分析了高混凝土坝的应力控制标准和应力仿真分析方法；研究了高面板堆石坝应力变形分析的主要研究成果；分析了土石坝有限元计算和应力应变分析常用的几种模型，分析发现，采用有限元计算方法、邓肯—张本构模型、增量法加载的综合运用，基本上能够模拟土石坝施工工程中的应力变形过程。

（2）高坝极限承载分析

对高坝抗滑稳定分析中常用的刚体极限平衡法、有限元分析法、可靠度分析法和分项系数法进行了分析，且指出了有限元法在水工程稳定分析中尚待进一步研究的问题,分析了块体单元法、不连续变形分析法 DDA 和 Meshfree Method 法等一些新的稳定分析理论和方法，并进一步研究了大坝抗滑稳定的失稳判据，

（3）高坝非线性问题

针对高坝的几何非线性、材料非线性和时间非线性，研究了分析高坝损伤的损伤力学和现代非线性科学理论；探讨了断裂力学在高混凝土坝裂缝分析中的应用，并研究了非线性理论在高混凝土坝裂缝分析的可行性；分析了高混凝土坝的粘弹性的一级工作状态，以及高混凝土坝的粘弹塑性的二级工作状态。

（4）物理模型试验

研究了结构模型试验中的正常荷载法和最终荷载试验；分析了地质力学模型试验中的常规和特殊的两种类型。

（5）高新安全监测技术

针对水工结构及其复杂，应用上述数学模型与物理模型研究水工结构的应力、极限承载力、非线性等问题时，由于计算理论与方法及其计算参数等与实际有一定缺入，使计算试验成果与实际工程有较大差别，分析了光纤传感器技术的国内外研究现状。

2.5.3 创新前沿

（1）高坝应力分析

对于高混凝土坝的应力分析，利用有限元法求解高混凝土坝应力分布时，应进一步研究并获得精确解，在此基础上，进一步确定高坝等效应力控制标准。同时，需进一步研究更合理有效的应力仿真分析方法。对于高混凝土坝的应力分析，应进一步深入研究离心模型试验的模型材料、试验量测手段、接缝位移的测量以及如何在有限的离心机容量下解决高面板坝的模型试验等方面。同时，应进一步研究堆石本构模型、混凝土面板与垫层接触面模拟、接缝模拟。对于土石坝的应力分析，应进一步研究土体本构理论，以及模型的计算参数；最后，提出了高坝应力分析的新理论。

（2）高坝极限承载分析

利用刚体极限平衡法对双斜滑动面稳定安全系数的求解，以及坝基多滑动稳定安全系数的求解都有待进一步研究；同时，有限元法的稳定性判据和分析高坝稳定的新兴数值方法也需进一步研究。

（3）高坝非线性问题

应探求非线性分析理论，结合系统论、控制论、信息论等先进的分析方法，以揭示材料的损伤破坏机理，从本质上认识和解决混凝土结构安全评价问题的

一条正确途径；同时，应充分考虑材料渐进的性能劣化与材料应力、应变之间的耦合现象分析高坝的损伤；分析和探讨了尚需进一步研究的分析理论和方法。

（4）物理模型试验

地质力学模型试验中，地质力学模型比尺与材料的选择，以及模拟技术和量测技术等有待进一步的研究。

（5）高新安全监测技术

应重点研究和发展光纤技术在水工程安全监测中的应用，其中应进一步研究以下几个方面：传感器监测空间分辨力的提高、灵敏度进一步改善、可监测物理量的进一步增多等；在混凝土中传感器的长期稳定性和耐久性、光纤与混凝土界面的粘结剂、荷载传递的微观力学以及实测规划等都有待于进一步研究探讨；大坝安全监控技术与光通讯技术、微电子技术和计算机技术等需要进一步整合；光纤或光栅传感器在水工程中的埋设技术。

将上述理论和方法转化为生产力主要通过以下几点：研究的关键是将研究成果及时应用于实际工程的设计、施工和应用中去，产生社会经济效益；为制定设计、施工和运行规范提供技术支持；撰写论著或规程，申报国内外专利等，以提高水工结构领域的科技水平；培养和造就高层次的水利科技人才。

2.6 水利水电工程技术

2.6.1 国家需求与研究现状

改革开放以来，我国水利水电工程建设突飞猛进，三峡、二滩、小浪底、龙滩、水布垭、小湾等一批大型水电站的成功建设和运行，标志着我国水利水电工程、尤其是大坝和地下电站工程技术水平已处于世界前列。

1980 年以来，我国大坝建设存在两大趋势：一是大于 100m 的高坝数量大幅增加；二是具有更安全、经济、施工快速，最有发展前景的混凝土面板堆石坝与碾压混凝土坝从无到有，150 m 以上高拱坝日益增多，一批 300m 级特高拱坝正在兴建，而且这三种坝型均迅速占据主要地位。我国大坝工程建设不但规模

巨大，而且坝高与坝型的发展引领了世界大坝的发展趋势，相应的筑坝技术、基础处理工程技术、高边坡处理、泄洪消能技术也取得了长足的进展。我国已建成地下水电站 120 座，水工隧洞 1100km；并正在建设一批装机规模巨大的地下水电站和特高水头的抽水蓄能电站，地下工程技术已经从引进、消化、吸收阶段向自主创新阶段转变，拥有了一批具有自己特色的地下工程新技术。

积极发展水电，是我国实现节能减排目标和非化石能源发展目标的重要措施，是我国能源发展的必然选择。因而开展水利水电工程关键技术攻关，进一步提升水利水电工程长期安全运行的技术途径和延长工程的正常使用寿命，以及工程建设与生态协调，全面提升我国水利水电工程的科技水平是非常必要和十分紧迫的。

2.6.2 创新前沿

根据国家经济社会发展规划，我国正在和将要建设一大批世界级的规模宏大、技术水平世界领先的水利水电工程，这些工程多具有坝高库大、地形地质条件复杂、地震烈度高、泄洪流量大及装机规模大等特点，我国水利水电工程建设必将迎来新的机遇和挑战。我国在水利水电工程建设中，尽管取得了令人瞩目的进展，但在工程基础领域、现行设计分析理论、新技术、新工艺以及高效安全施工技术等方面还有待深入研究。具体的研究方向包括：

(1)筑坝技术

超高混凝土重力坝基础处理、大坝应力、抗震设防、施工技术和工艺等深化研究；碾压混凝土筑坝技术主要在改进材料的配合比提高坝体的抗渗能力、温度应力分析和防裂措施研究、高温季度和雨天施工工艺等关键技术上要有所突破；高混凝土拱坝重点在复杂条件下特高拱坝的真实工作性态、极限承载力和长期运行安全度评价、混凝土快速施工技术、大坝抗震功能设计的内涵及分级设防水平的确定、混凝土的动态抗力特性试验与数值模拟方法及其动态破坏机理的研究；高面板坝的变形和渗流控制，混凝土面板的尺寸分缝配筋、面板

混凝土的耐久性等研究；新材料技术研究主要新型抗冲耐磨材料的开发和应用、筑坝材料的耐久性性能、新型筑坝材料的开发、外加剂等方面研究；应开发一套完整的大坝数字仿真技术，包括计算分析、可视化技术、隐患探测技术和自动化大坝安全监测和决策反馈系统，掌握大坝全寿命周期的形态，确保大坝可靠运行，延长大坝正常工作年限。

(2)大坝基础处理技术

基础理论、施工机械化、工艺方法、快速施工、高性能材料、检测手段等方面研究。

(3)高坝泄洪消能技术

基础性理论研究；高水头大流量泄流建筑物新型消能工和消能防冲安全技术研究等若干重大关键技术急待突破；尽快自主开发高速水流数值模拟计算的高水准原创性计算软件；高坝建设中环境制约因素的研究以及枢纽安全运行和科学管理技术研究。

(4)高边坡处理技术

复杂地质条件下岩体工程特性及评价方法、高陡边坡岩体失稳机制与稳定性分析方法研究；复杂地质岩体开挖工程爆破技术与安全控制标准、复杂地质条件岩体开挖工程加固综合方法与锚固安全控制以及高陡边坡安全监测技术与预警控制等。

(5)地下工程技术

根据反演分析成果改进数学模型，提高数值计算分析精度，使地下工程支护设计从经验为主向理论与实践相结合转变；岩爆机理的试验研究、岩爆监测预报与控制技术研究；目前地应力测试技术误差较大，需开发新的测试技术；工程物探技术作为传统地质勘探工作的重要补充手段，目前主要采用地球物理法和电场类比，两者各有优势，应开展相应的理论和分析方法研究，提高物探预报的准确性；地质灾害防治技术和工程安全监测技术，对工程建设的安全性

和经济性影响甚大，需要在总结经验的基础上提高技术水平。

随着技术创新体系的建设和完善，面对重大的国内需求和工程经验积累，我国水利水电工程技术的基础科学和施工关键技术将取得新的突破。

2.7 高坝大库的防止地震灾变技术

2.7.1 高坝大库的防止地震灾变技术研究的必要性

我国高坝大库的防止地震灾变技术的中长期发展战略研究，需要根据我国国情，认清当前我国高坝建设“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震安全问题及其一旦发生严重灾变“不堪设想”的次生灾害后果；认真面对高坝建设中抗震科技支撑赶不上工程发展规模和速度需求的严峻挑战，加强工程抗震的风险意识，紧密结合我国国情和工程实际，突出重点，在现有进展基础上，深化研究，确保高坝工程的抗震安全。以合理确定最大可信地震及深入研究各类坝体损伤溃决机理及其定量判别准则为主要内容。遵照结合实际工程，依托〝产、学、研〞结合创新平台；加强协作，充分发挥学科交义优势；尽量应用高新技术的技术途径。

2.7.2 高坝大库的防止地震灾变技术研究的战略意义

水和能源是人类社会发展的重要物质基础，根据我国国情，也是影响我国经社会发展的重要制约因素。通过水库大坝的建设，尽可能调节利用汛期洪水，对抗旱防洪都有重大战略意义。

我国的水能资源位居世界之首，水电作为可再生清洁能源，是集国土整治、河流开发、防洪抗旱、优化能源结构、地区经济振兴、扶贫、生态改善于一体的可持续工程。高坝大库在调节性能好、装机容量大、综合效益高的水电工程建设中，具有无可替代的重大作用。

在充分重视移民安置、生态和环境影响的前提下，积极有序的进行水库大坝建设，切合我国国情，是我国基础设施建设中不可或缺的重要组成部分。

我国是是一个多地震国家，也是世界上蒙受地震灾害最为严重的国家。而

西部地区是我国主要地震区，近代我国 82%的强震，包括最近发生的汶川大地震，都发生在该地区。

我国主要大江大河的源头和 80%的水能资源集中在西部，特别是近年来在西部修建的高坝，地震往往成为设计中的控制工况。震情严峻、是我国高坝建设中无可避让而必须面对的又一个基本国情。

地震有很大的不确定性，突发性强，很难预警。高坝大库一旦受灾溃决，在经济、社会和政治方面都将导致不堪设想的严重后果。

因此，在我国高坝大库“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震问题及其一旦发生严重灾变“不堪设想”的次生灾害后果，突显了其防止地震灾变、确保抗震安全的战略重要性。高坝大库防止地震灾变的研究，是关系我国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容，也是我国水利水电建设中的一个必须面对和急需解决的前沿性关键技术问题。

2.7.3 对我国强震区修建高坝的地震风险评估

世界不少多地震国家，在地震区都修建有众多大坝。已有一些遭受震害实例，但迄今因地震溃决的极少，仅限于设计和施工不良的低坝。就世界已有震例及汶川地震震情表明：按规范进行抗震设计、施工质量良好的大坝，其抗震安全一般能有保障。

但目前我国在西部强地震区建设的一系列具有 300m 级高坝大库工程，对此迄今国内外都既缺乏工程实践的先例，更无遭受震害的实例，其抗震性态可能有从量变到质变的本质差异。目前这些工程的抗震设计中，大多仍基本沿用基于已有工程实践经验和类比的传统理念和方法，并不能完全反映高坝在强震作用下的实际性态和很好解释震害实例。而近期我国处于水电开发高潮，前期工作常不够充分，科技支撑赶不上工程建设发展的规模和速度。对此必须清醒地加强对高坝抗震安全的风险意识。

“水库地震”是在我国强震区修建 300m 级高坝大库对环境影响的另一个风

险因素。迄今全球水库蓄水引发水库地震震例占水库总数的比例是极小的。绝大多数水库地震震例属于影响不大的非构造型的水库地震。社会和工程界最为关心的构造型水库触发地震，只有在特定的地震地质和水文地质条件下才能发生，其最大震级不可能超过被其触发断层的自然地震最大震级。至今全球仅有 4 个最大震级超过 6 级的水库地震震例，其最大震级不超过 6.5 级。

对于在我国强震区修建 300m 级高坝大库地震风险的态度，应当是：既不能“因噎废食”，也不是“盲目冒进”，但也决不能“掉以轻心”。

2.7.4 我国高坝抗震防灾能力建设的现状

近年来，在我国水利水电建设迅速发展的推动下，大坝抗震研究取得了不少前沿性进展。强调了工程结构抗震安全评价必须包括地震动输入、结构地震响应、结构抗力这三个不可或缺且相互配套的组成部分的理念。

（1）地震动输入方面

针对当前我解高拱坝抗震设计中的地震动输入中存在的一系列共性和基础性的关键技术问题，就合理确定设防水准框架、正确选择地震动参数和理解输入机制等方面，进行了全面系统的深化研究。分析和澄清了工程应用中存在的诸多基本概念上的混淆，提出和探讨了解决的途径及其理论依据，为坝址地震动输入提供了一整套紧密结合我国国情和大坝工程特点的、更合理和可操作的新的思路、方法和自主研发的确定地震动参数的软件。

（2）坝体结构地震响应方面

对混凝土坝，研发了是切近实际的大坝—地基整体系统非线性地震反应 分析方法和软件：提出了一个地震失稳判断准则的新概念及方法，以替代不能反映实际地震响应的“刚体极限平衡”传统方法；建置微机群高性能并行计算平台及研发相应软件；较系统和完整地形成了水工混凝土结构先进的抗震试验体系，开展了坝体结构抗震的动力模型试验验证。

对高土石坝，替代传展统的等效线性方法，开展了更接近实际的、将坝体

作为连续粘弹塑性介质，以时变的切线模量替代时程中采用等效的割线模量的〝真非线性〞动力分析方法，可以计入孔隙压力在空间的扩散和随时间的消散，并直接给出坝体的残余变形。

但无论是高混凝土坝或高土石坝的坝体结构地震响应，都正逐步向更接近情况的方向进展，初步发展了结合我国国情和大坝工程特点的、更合理和可操作的新的思路、方法和自主研发的动力分析软件，已在实际工程中应用并为国际坝工界所关注。

（3）大坝材料的动态特性和抗力方面

进行全级配大坝混凝土动力特性试验研究：比较全级配和湿筛试件差异及干湿条件、不同龄期影响，确证静态预载对动态弯拉强度影响，研究混凝土受拉的包括软化段的本构关系全过程；开展大坝混凝土三维动态细观力学分析研究其内部结构破损发展过程： 应用 C T 技术探索混凝土内部破坏机理：系统探索和解决混凝土 CT 试验时的试验技术问题；研制了与医用 CT 配套的便携式材料试验机，解决了动态加载、CT 图像识别和分析、重建三维裂纹图像和动画显示等关键技术问题。

对土石坝坝体材料的动态特性与本构关系，特别是近年来修建较多的面板堆石坝堆石料在高围压下的流变和动态特性也进行了多方面研究。

2.7.5 我国高坝抗震中长期发展的战略重点

水库大坝的抗震防灾战略重点应当是防止遭遇超出设计预计的最大可能的极端地震时，发生库水失控下泄、导致严重次生灾害的 “溃坝”灾变。为此，必须合理确定坝址可能发生的最大地震，即所谓的〝最大可信地震〞，以及设计中对各类坝型‘溃坝’极限状态的定量准则。

在合理确定最大可信地震方面的思路是采用与场址相关的、确定性的“设定地震”方法，取代可靠性受到质疑的取重现期为 10,000 年的方法；研究和采用有一定相似构造基础的美国〝新一代的地震动衰减关系 (NGE) ，替代目前由

烈度转换的办法；采用反映近场大震特征的‘随机有限断层法’直接生成最大可信地震的地震动时间历程；加强对余震规律的研究。

在高坝‘溃坝’灾变定量评估方面的思路是，混凝土坝用损伤力学方法，计入坝体和地基材料的应变率效应和损伤演化规律，求解坝体-地基系统变形；以系统标志性部位变形轨迹出现结构性突变的拐点，表征评估高坝 ‘溃坝’灾变接近临界状态的定量准则；土石坝的溃坝灾变定量准则以控制震动变形为核心，探索以变形指标为主的溃坝灾变的定量评估指标体系。

2.7.6 中长期发展战略研究内容

（1）坝址地震动输入的研究

● 加强我国西部、特别是邻近库坝区的强震观测台站建设；尽快建立适合我国条件的地震动衰减关系。

● 进一步完善水库地震监测台网；深化对监测资料和已有震例的分析比较，继续进行水库地震机理的探索。

● 深入研究能反映断裂面不平整性的滑动模型；根据我国强震记录，回归诸断裂参数与地震矩的关系式，以加强反映近场大震特征的有限断层法研究。

（2）坝体地震响应的研究

● 深化对混凝土高坝在地震作用下的损伤破坏机理的研究，研发相应的非线性的动态响应分析方法；积极推行高性能并行计算技术的应用。

● 在高土石坝地震响应分析中，考虑场地地形地质条件、坝基地震动输入不均匀分布和辐射阻尼等影响因素；对以坝体的震动变形分析为基础、以地震残余变形为核心指标的抗震安全评价理论、方法、评价指标体系及其定量准则取得共识。

（3）坝体和坝基材料动态特性和抗力的研究

● 加强全级配大坝混凝土和地基岩体动态特性、抗力和应变率效应的研究；发展大坝混凝土在地震作用下作为不均匀复合介质的三维细观力学分析方法。

继续深化 CT 技术在大坝混凝土内部损伤破坏机理研究中的应用；研发提高大坝混凝土抗拉强度、延性和耐久性的抗震新材料。

- 对土石坝材料本构关系的各类模型逐步形成较普遍接受的共识。

三、研究报告

3.1 水文水资源

1、学科概述

水文水资源学是水利学科最重要的基础分支之一，其历史十分悠久，主要包括水文学和水资源学两个方面。水文学是水资源学的基础，两者在发展中相互依存、相互促进、共同发展。

水文学同属于地球物理科学和水利科学两个范畴。从前者而言，它主要研究地球系统中水的存在、分布、运动和循环变化规律，水的物理化学性质、以及水圈与大气圈、岩石圈和生物圈的相互关系等。从后者而言，它主要研究水资源的形成、时空分布、开发利用和保护，水旱灾害的形成、预测预报、防治，以及水利工程和其他工程建设的规划、设计、施工、管理中的水文水利计算技术。分类的依据不同，水文学的分支学科的数量和名称不完全相同。按基础理论与应用分，可分为水文学原理和应用水文学。按研究方法分，可分为水文统计学、随机水文学、实验水文学、同位素水文学、计算水文学等。按研究对象分，可分为河流水文学、湖泊水文学、冰川水文学、河口海岸水文学、地下水文学、水文气象学等。按应用范围分，可分为工程水文学、农业水文学、森林水文学、城市水文学、生态水文学等。

水资源学是对水资源进行评价、合理配置、综合开发、合理利用和保护，为经济和社会的可持续发展提供水的保证，处理好水资源和社会经济发展及环境、生态系统间关系，以及对水资源实行科学管理和保护经验的系统总结所形成的知识体系，是指导水资源业务的理论基础。水资源学带有自然科学、技术科学和社会科学的性质，但主要是技术科学。

2、研究现状

2.1 水文学研究现状

科学水文学的概念是“理论与实验并重”，“定性与定量并重”，而真正的实验的方法和定量的方法引入水文学研究始于 17 世纪。17 世纪是科学水文学的奠基时期，该阶段水文学研

究主要集中在以河流、明渠水力学为重点的水力学基础理论、以河流和泉的起源为代表问题的水文循环机理探求、以流速仪、流量测量、蒸发测量、降雨测量等为代表的基础水文实验和基础水文测量技术等领域，重要的成果包括：佩罗德第一次通过观测和定量计算的方法提出了水量平衡这一水文学的基本研究方法，哈利第一次对蒸发进行定量观测宣告了水文循环概念的最终形成。18 世纪~19 世纪是科学水文学的发展时期，这一时期水文学知识体系得到了前所未有的完善和丰富，在应用需求的带动下和数学物理领域进步的促进下水文学飞速发展，诞生了应用水文学。该阶段水文学研究主要集中在地表水水文学、地下水水文学、水文测量仪器改进、河川径流系统观测、水文学已有成果的整理总结等方面，重要的理论成果包括伯努利方程、摩尔瓦尼的“全面汇流”概念、达西定律、谢才公式、曼宁公式、毕托管的发明、纳撒尼尔·比德莫尔的水文学手册等。20 世纪以来是科学水文学的崛起时期。该时期应用水文学取得了许多新的进展，概率随机的方法在水文学中得到应用，计算机、遥感、地理信息系统等新的技术带来了水文学的变革，水文学研究向着更大的尺度发展，并出现了大量新的交叉分支。该阶段水文学研究主要集中在水文循环、水文统计、水文模拟与预报等方面，国外水文学研究重要的里程碑事件主要包括：

①1924 年美国科学家福斯特提出皮尔逊 III 型频率曲线分析法，将概率论和数理统计方法引入水文学，把水文变量和它们出现的概率联系起来，为预估工程运行时期可能出现的水文情势开辟了新方法；

②1931 年前苏联科学家马卡维耶夫把流体扩散理论，应用到含沙水流中悬移质分布规律研究中，为研究河流动力学奠定了基础，促使河流水文学体系趋于完整；

③1932 年美国水文学家谢尔曼提出单位线的概念，根据这一方法可以由净雨推求径流过程线，这一方法为现代水文预报和水文分析计算奠定了基础；

④前苏联科学家进行了全球水热平衡研究，开创了全球大尺度水文研究的先河；

⑤1949 年美国科学家林斯雷等编写了《应用水文学》、姜斯顿等合著的《应用水文学原理》以及美国土木工程师协会编著的《水文学手册》等相继问世，总结了这一时期的水文学研究成果；

⑥1951 年美国科学家科勒和林斯雷提出了用图解方法，解决多元非线性回归的暴雨径流多变数水文特征合轴相关图，促进了各水文要素综合效应的研究；

⑦20 世纪 60 年代加拿大科学家托特提出地下水流动系统理论，他认为在一定条件下，地下水可以穿越“隔水层”，形成统一的地下水流动系统，这一理论为水文地质学的发展开拓

了新方向；

⑧1987 年英国科学家英戈兰姆在研究苏格兰泥炭地的过程中首次提出生态水文学的概念；

⑨2003 年在日本召开的第 23 届国际大地测量及地球物理学联合大会（IUGG）期间，国际水文科学协会（IAHS）专门提出未来 10 年水文科学研究的一个热点，即针对发展中国家水文观测资料不全甚至无资料流域水文预测的科学研究计划（即 PUB 计划）。

近年来，我国水文科学也有很大的变革和发展。雷达测雨、卫星遥感传递资料、中子测土壤含水、放射性示踪测流等现代技术的应用，使人们能获得使用常规方法无法取得的水文信息。一些科研院所和高等院校建立了现代化设备的水文实验室，使人们有可能对水文现象的物理过程了解得更深透。设计洪水计算理论与方法、联机实时洪水预报技术与方法、具有物理机制的分布式流域水文模型、水库洪水资源化利用关键技术、流域水资源评价与调配等都取得了适合我国需要的先进成果。随着信息论、系统论、控制论等新理论以及一些交叉学科（如随机理论、模糊数学、灰色系统理论、人工神经网络系统方法）的引进和渗入，水文科学相继出现许多新的研究方向或分支学科，诸如系统水文学、随机水文学、模糊水文学、环境水文学、水文遥感等，从而使水文科学进入一个变革与发展时期，形成百花齐放、百家争鸣的格局。

2.1.1 水文循环

1911 年 Thiessen 提出了用于计算面平均雨量的 Thiessen 多边形法。1911 年 Green 和 Ampt 提出了入渗模型。1921 年 Ross 提出了面积一时间曲线。1923 年 Meinzer 提出地下水保证产水量的概念。1931 年 BenHKaHOs 提出了等流时线的概念。同年 Richards 提出了非饱和流方程。1932 年 Sherman 提出了流域汇流的经验单位过程线。1933 年 Horton 提出了下渗经验曲线，即 Horton 下渗公式。1970 年 Eagleson 运用分离变量法，从土壤水分运动微分方程中解得这一方程。1989 年张文华在假定渗透系数 K 和扩散系数 D 均为常数的情况下采用分离变量法也导出了此方程，将 Horton 经验公式作了理论解释，使之成为理论公式。1935 年 Macarthy 提出了用于河道流量演进计算的“马斯京根法”。同年 Theis 提出水文计算机模型(Theis 井方程)。1937 年 Muskat 研究通过有孔介质的均匀流。1940 年 Jacob 提出井方程。同年 Hubbert 提出地下水运动模型。1941 年 Meyer 提出蓄滞洪峰法。1945 年 Clark 首先提出瞬时单位线的概念，并建立了单位线模型。1945 年 Horton 提出河流定律。1948 年 Penman 提出推求水面蒸发量的 Penman 方程。

1950 年 Jacob 提出非稳定流方程。1951 年 Hayami 提出扩散类推方法。1955 年 Hantush 和 Jacob 研究渗漏含水层的水流。1956 年 Leopold 等进行渠道形状研究。1957 年 Kamphuis 和 Miljukov 等提出径流演算方法。同年 Philip 提出下渗方程。1957 年 Nash 首次提出使用系统脉冲响应函数一瞬时单位线的概念。同年，Philip 与 Vries 提出土壤水势祸合运移方程。1958 年 Nash 进一步提出流域汇流可以用 n 个相同的线性串联水库来模拟，即 Nash 流域汇流系统模型。同年加里宁和米留柯夫提出用串接的一系列特征河段可以模拟河道(流域)的汇流。1959 年，Gardner 根据毛管理论，提出温度与土壤水势为正相关关系。同年 Dooge 提出用一组线性水库和渠道互相串联来模拟流域汇流的系统。1962 年，Wilkinson 和 Klute 提出水势的温度系数。1964 年 Brooks 和 Corey 建立土壤水特性模型。1966 年 Shreve 进行不规则河网研究。1967 年 Hewlett 和 Hibbert 进行森林水文学研究。1969 年 Cunge 对 Muskingum 演算方法进行改进提出 Muskingum-Cunge 河道演算法。1972 年 Priestley 和 Taylor 提出蒸发方程。1973 年 Mein 和 Larson 提出降雨入渗理论。1974 年 Korzun 等人第一次对全球水量平衡进行了较为仔细地研究。1975 年 Dunne 等提出地面饱和径流概念。

1977 年 Doorenbos 和 Pruitt 作蒸发研究报告。1979 年 Freeze 和 Cherry 提出地下水理论。同年 Rodriguez-Iturbe 和 Valdes 提出地面单位线。Hopmans 等于 1986 年、张一平等于 1990 年认为温度升高，土壤水吸力降低，土壤水势增加，土壤水分能量提高，水分特征曲线下移且变平缓。1984 年 Otterman 等、1989 年 Harvey
等研究了在植被和大气反馈下地球轨道驱动力对气候的作用。1990 年 Tyler 等利用分形方法建立了土壤水分特征曲线和水力传导率模型。1992 年，美国出版了水文手册。1995 年 R .E.Schulze 提出的农业水循环模型。1992 年 Smith 等、1998 年 Eastman 等、1997 年 Vidale 等证明在 200~2000km 尺度上地表的非均一性，能形成强烈的大气对流。1992 年 Bonan 等、1994 年 Polcher 和 Laval，1997 年 Lean 和 Rowntree，1993 年 Henderson-Sellers 等模拟研究森林砍伐的影响。Chase 等分别于 1996 年和 1999 年模拟了土地利用变化的影响。1998 年 Caopolski 等提出大气一海洋一植被耦合模型。同年，Kravchenko 和张仁铎对 Tyler-Wheatcraft 模型进行了改进，提出了根据颗粒分析资料计算表面分形维数的方法，并将其用于估计土壤水分特征曲线。1999 年 Clussen 等使用大气一海洋一植被祸合模型研究北非的沙漠化问题。

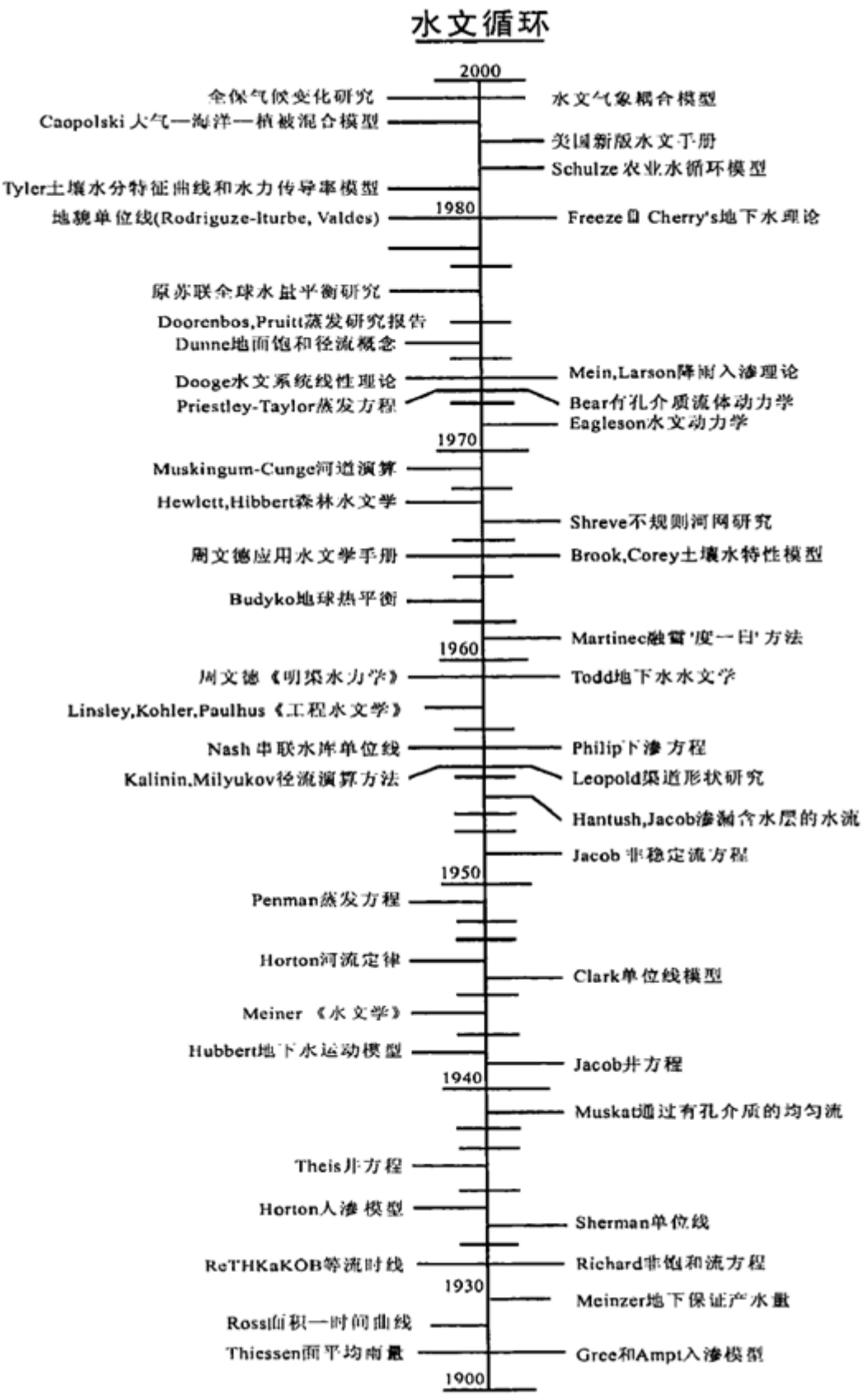


图 1　20 世纪国际水文学发展水文循环方面的研究

2.1.2 水文统计

1914 年 Hazen 首先用正态格纸选配流量频率曲线，提出了水文频率计算方法。1919 年 Mead 提出降水量频率分析法。1924 年 Foster 提出皮尔逊 III 型频率曲线分析方法。1934 年 Foster 提出历时曲线。1938 年 Kendall 提出秩相关。1939 年 Weibull 提出经验频率公式。1941 年 Gumbel, Hazen 提出水文资料频率分析中的极值分配曲线。1949 年 Langbein 进行局部年最大历史序列研究。

1951 年 Hurst 利用实测数据证明了尼罗河水系中存在长期相关性。1951 年周文德提出了频率因子法。1955 年 Jenkinson 提出了通用极值分布。1960 年 O' Donnell 将脉冲响应函数的傅里叶分析法引入水文学中。1961 年 Amorocho 等提出高阶系统响应函数这样的系统非线性数学模型也可以用于汇流模拟。1962 年 Hershfield 进行了极值降雨研究。同年 Thomas-Fiering 提出河川径流综合模型。1963 年 Gringorton 提出经验频率公式。1967 年 Matalas 建立了多站点河川径流模型。1969 年 Mandelbrot 和 Wallis 提出高斯噪音比。1962 年 Thomas、1965 年 Matheron、1967 年 Kartvelishvilii、1970 年 Kaezmarek 以及 1972 年 Fiering 和 Yevjevich 把随机过程方法应用到水文学中。1972 年 Box 和 Jenkin 进行了时间序列分析。同年 Yotsukura 和 Sayre 进行了明渠横向混合流研究。同年 Sonuga 首次将 POME(最大墒原理)应用到水文频率分析中。1973 年 Valencia 和 Schaake 提出分散模型。1975 年 Freeze 进行地下径流随机分析。1977 年 Tukey 进行调查资料分析。1978 年 Schreine 和 Riedel 提出 PMP 估计方法。1979 年 Landwehr 和 Greenwood 提出概率加权距法。1980 年 Packard, 1981 年 Takens 提出重建相空间理论，将混沌理论引入到非线性时间序列分析中。1981 年 Takens 提出嵌入理论。同年 Tung 和 May 首次将非参数统计方法应用于洪水频率分析。

1984 年，Foster 首次利用模拟细沟研究侵蚀细沟的流速分布特征。1985 年，damowski 首次将非参数核密度估计方法应用于洪水频率分析。同年，Schuster 和 Yakowitz 在洪水频率分析中，提出了一种参数与非参数混合的密度估计方法。1987 年 Guy 等、1992 年 Govers 等、19%年 Abrahams 等、1997 年 Nearing 等对坡面流流速进行系统研究。1990 年上半年水文工程中心提出 HEC-10。1993 年 Jayawardena 等、1996 年 Kugiumtzis 将混沌分析法引入水文预测中。1997 年 Hosking 定义了线性矩，并主要针对连序样本做了一系列工作。

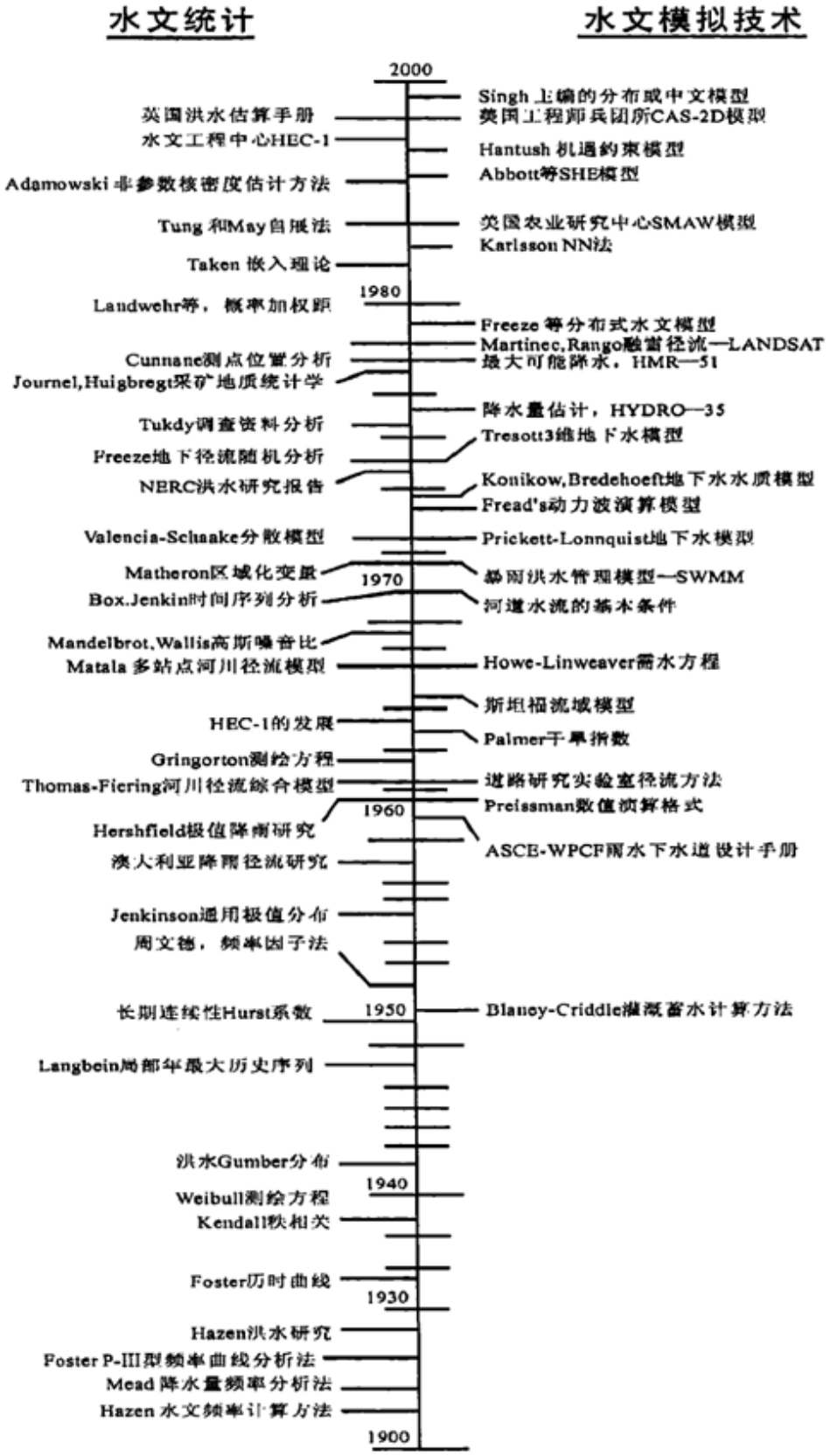


图 2　20 世纪国际水文学在水文统计和水文模拟技术方面的研究

2.1.3 水文模拟与预报

1950 年 Blaney 和 Griddle 提出 Blaney-Griddle 灌溉蓄水计算方法。1951 年 Hvorslevr 提出冲击试验方法。1960 年 ASCE(American Society of Civil Engineers，美国土木工程协会)和 WPCF(Water Pollution Control Federation，水污染控制联合会)联合出版了雨水下水道设计手册。1960 年 Crawford 和 Linsley 提出了通用的斯坦福模型，并于 1966 年提出比较完善的斯坦福Ⅳ号模型。1961 年 Preissmann 提出数值演算格式。同年营原正已建立了使用组合的水箱作为流域降雨径流的模型。1962 年 Watkins 等提出道路研究实验室径流方法。1965 年 Palmer 提出干旱指数的概念。1967 年 Howe 和 Linaweaver 提出 Howe-Linaweave 需水方程。1969 年，Revell 提出机遇约束和线性规划相结合模型。同年，Freeze 和 Harlan 提出了分布式水文物理模型的概念和框架。同年 Sittner 等将次洪 API 法改造完善为连续模拟降雨径流过程的 API 模型。1970 年 Copings 等提出河道水流的基本条件。Burnash 等从 1971 年提出萨克拉门托流域模型(第一代)到 1973 年将其完善(第八代)。1971 年 Metcalf 和 Eddy 提出暴雨洪水管理模型。1972 年 Prickett 和 Lonnquist 等提出地下水模型。1973 年 Todini 等提出了线性约束系统(CLS)模型。同年 Fread 提出动力波演算模型。1974 年 Konikow 和 Bredehoeft 提出地下水水质模型。

1975 年 Tresott 提出三维地下水模型。同年，Hewlett, Troenale 提出森林流域的变源面积模拟模型(VSAS)。1977 年 Frederick 等提出降水量估计 HYDRO-35。1978 年 Schreiner 等提出最大可能降水 HMR-51。1979 年 Martinec 和 Rango 研究融雪径流-LANDSAT。同年，Bevenh 和 Kirbby 提出变源面积模型(TOPMODEL)。1980 年，Morns 进行了 IHDM(Institute of Hydrology Distributed Model)的研究。1985 年美国农业研究中心的 Alonso 和 Coursey 考虑到土地利用与管理将会影响到一个小流域的水文循环与化学循环，于是设计了 SWAM(Small Watershed Model)模型。同年，M.Karlsson 在他的博士论文中提出了一种新的降雨径流预报模型—最近邻非参数回归方法(NN)。同年，S.Yakowitz 将 NN 法应用于洪水警报问题。1986 年，Sloiman 提出离散变量空间的优化模型。同年，Abbott, Bathurst, Cunge 等提出第一个真正的具有代表性的分布式水文物理模型—SHE(System Hydrologic European)模型。1987 年 Karlsson 和 Yakowitz 将 NN 法用于降雨径流预报问题。同年，Yakowitz 系统地研究了 NN 法。1987 年 Eeven 等、1989 年 Calver 等对 IHDM 模型进行了改进。1988 年 Mishalani 和 Palmer 研究了水文预报的不确定性对水库调度的影响。1989 年，Hantush 建立了考虑参数不确定性的机遇约束模型。1995 年，美国工程师兵团所的 Julien 等研究的 CAS-2D 模型是一个比较典型的分布式水文模型。Takeuchi 于 1995 年、1997 年详细探讨和比较了有无水文预报结果，不同预报精度和

预见期对水库调度管理的影响，建议对于中小型水库，应着重提高洪水的预报精度，而对于大型水库，则应侧重研究中长期气象和水文预报的精度。1996 年，Singh 提出用圣维南方程组来模拟降水产生的地面径流。1997 年，Jim Best 用 PDA(Phase Doppler Anemometry)测得了瞬时的泥沙浓度。

中长期水文预报是指根据前期水文气象资料，预测未来较长时期的水文状况，预见期通常为 3 天以上至 1 年以内。目前，尚不能用数学物理方程严格地描述和预报中长期水文过程，人们常采用数理统计方法（回归分析、周期分析、时间序列等）或者智能计算方法（人工神经网络、模糊数学等）来进行中长期水文预报研究。中长期水文预报研究主要存在以下几方面的问题：①受气象预报精度的限制，大多数中长期水文预报模型都未能充分利用未来的气象气候信息；②大多数中长期水文预报模型都未能有效考虑上游水库调蓄、人类耗水等人类活动的影响；③中长期水文预报模型很多，但预报精度尚不高，且预报效果不稳定，汛期的预报精度差，非汛期的预报精度相对较好，对特大的洪涝和干旱还缺乏有效的预报能力。

针对水文预报的不确定性问题，部分学者提出进行概率预报研究。概率预报是指以概率分布的形式定量描述径流预报的不确定性，并给出指定概率下的径流区间预报，以便定量估计各种决策的风险和后果。贝叶斯方法是风险型决策问题的重要分析方法之一，也是目前水文模型不确定性分析和径流概率预报研究中最常用的一种方法。基于贝叶斯理论的径流概率预报方法大多采用如下两类研究思路：一是以 Krzysztofowicz 提出的贝叶斯预报处理器为基础，用先验分布体现水文要素的自然不确定性，用似然函数体现水文模型和参数的不确定性，通过贝叶斯公式将两者耦合起来得到预报对象的贝叶斯后验密度函数，并据此进行概率预报；二是以贝叶斯定理的离散变量形式为基础，先由历史样本计算“预报因子”和“预报变量”的先验概率，再根据“预报因子”的实时信息采用贝叶斯判别分析方法对“径流量超过一定值”水文事件的后验概率进行定量预报。已有研究成果表明，贝叶斯方法能突破常规确定性水文模型在信息利用方面的局限性，能提高预报精度，实现预报与决策的有机结合，具有广泛的应用前景。另外，贝叶斯模型具有一定的独立性和灵活性，可与任意确定性水文预报模型集成。

2.2 水资源学研究现状

在相当长的一段时间里，有关水资源的知识和经验常融汇在其他已建立的学科如水文学、水利学中，没有形成水资源的专门学科。从 20 世纪中期以来，在工农业高速发展和人类物质文明不断提高的影响下，水资源问题日益突出，人们从不断出现的水资源问题中逐渐认识到

需要从资源的观点重新认识自然界的水。通过在实践中成功地与失败的经验和教训，人们开始认识到自然界的水资源并不是取之不尽、用之不竭的无限资源，需要认真进行研究并采取合理步骤开发利用，并在使用中保护资源，以达到对自然界水资源可持续开发利用的长远目的。正是如此，把水资源作为主体进行研究被提上全球的日程，并开展对水资源进行系统调查和评价活动，以作为实现合理开发利用水资源的根据。专门以水资源为对象的研究和实践在很大范围内有了发展和提高，并逐渐形成了与原有的有关水的学科内容有差别并自成体系的水资源学。国内外水资源学的主要研究内容包括水资源评价、水资源价值、水资源配置、水资源调度、水资源管理等。

2.2.1 水资源评价

水资源评价是对流域或区域水资源的数量、质量、时空分布特征和开发利用条件进行全面分析和评估的过程，是水资源规划、开发、利用、保护和管理的基础性工作，其成果是水事活动和决策的重要依据。

20 世纪中叶以前，水资源稀缺性并不突出，美国和前苏联等国家所开展的水文观测资料整编和水量统计具有水资源评价的雏形。自 20 世纪中叶以来，许多国家出现不同程度的缺水、水生态退化和水污染加剧等水资源问题，作为水资源规划和管理的基础性工作，水资源评价开始逐渐受到世界各国的重视。1968 年和 1978 年，美国完成了两次国家水资源评价，第一次侧重于天然水资源本底状态的评价，第二次侧重于水资源开发利用评价与供需预测，初步形成了以统计为主的水资源评价方法与技术。1975 年，西欧、日本、印度等国家相继提出了本区的水资源评价成果。针对日趋紧张的水资源情势，国际上逐步对水资源评价工作的重要性达成了共识。1988 年，联合国教科文组织（UNESCO）和世界气象组织（WMO）在澳大利亚、德国、加纳等国家开展的实验项目的基础上，共同制定了《水资源评价活动—国家评价手册》，促进了不同国家水资源评价方法趋向一致，有力地推动了水资源评价工作的进程。1997 年 UNESCO 和 WMO 对该手册进行了修订。

我国于 1980 年开展了第一次全国水资源评价工作，当时主要借鉴美国提出和采用的水资源评价方法，同时根据我国实际情况做了进一步发展，包括提出不重复的地下水资源概念及其评价方法等，形成了《中国水资源初步评价》和《中国水资源评价》等成果，初步摸清了我国水资源的家底。随后，由于华北水资源问题突出，国家“六五”和“七五”攻关还专门开展了华北地区水资源评价及相关问题研究。1999 年，水利部以行业标准的形式发布了《水资源评价导则》（SL/T238-1999），对水资源评价的内容及技术方法做了明确规定。2000 年，

“全国水资源综合规划”对水资源评价的技术和方法做了进一步完善。

评价对象上，国外一些国家认为地表水和地下水是重复转换的，因此以河川径流量作为水资源评价的对象，如美国等。俄罗斯和英国等国家虽然没有实施地下水资源评价，但其已将地下水动态作为水资源监测和评估的对象。UNESCO 亦开始将地下含水层可恢复的供水量纳入水资源评价的范畴。在我国，从第一次评价开始，就把河川径流量和不重复的地下水资源量作为水资源评价主体。地表水资源量评价方面，包括我国在内的一些国家只将当地地表产水量作为资源量，其他一些国家将入境的河川径流量也作为地表水资源量，联合国粮农组织（FAO）和地质矿藏局（BRGM）就采用了这种方法。

评价模式上，目前国内外在水量上仍然采取地表水-地下水分离评价的模式，或是单一的地表水评价模式，即评价地表水的时候将地下水作为源汇项，评价地下水时将地表水作为源汇项，分别进行评价。在水量-水质方面也采用分离评价的模式，国内水资源评价中对于水质的评价采取的是各类水质代表河长法。时空单元方面，国外大多均以流域、水资源分区或是行政分区作为空间单元，以年作为时间单元，我国则兼顾流域和行政区单元，以水资源分区和行政分区叠加的方式作为底层评价空间单元。

在评价手段上，早期的水资源评价方法主要是统计方法，自 20 世纪 80 年代以来，水资源评价方法逐渐发展为水量均衡方法，这种方法概念清楚，计算简便快捷，但对于降水量和蒸发量的依赖性较大。联合国粮农组织为了促进各国水资源评价的一致性，进一步提出了基于 GIS 的水均衡模型。在国内，广泛应用于水资源评价实践的主要是水量均衡方法，经过 20 多年的发展，对水资源各均衡项大多界定的比较明晰。同时水资源评价模型技术亦逐步发展起来，包括新安江模型和地表-地下水资源联合评价模型等，近年一些学者也尝试将分布式水文模型技术引入到水资源评价中来。

对于人类活动影响，国内外也充分注意到了这一点，主要进行了两方面修正，一是人工取用水对于水资源评价的影响，目前国内外多采用“统计-还原”的手段进行修正，即将人工耗用水统计计算量加到实测水资源量中，作为天然水资源量评价结果；二是下垫面变化造成的水资源演变，目前国内外常常采用“一致性”修正或是在评价模型中设置相应变量的方式进行处理。

综观国际组织和有关国家的水资源评价，具有以下四个方面的特征：①以径流性水资源为基本评价口径；②以静态天然水资源量为主要评价目标；③以分离式评价为基本评价模式；④分区集总式评价为主要手段。当前水资源评价方法主要存在的问题是：①评价口径过于狭

窄，难以全面反应资源的多元有效性；②一元静态评价方法难以获取二元驱动下的水资源系列“真值”；③分离评价模式难以适应水资源综合规划需求；④分区集总式评价难以描述水资源的分布式演化过程，评价结果也难以满足分布式开发利用实践需求；⑤缺乏统一的定量评价手段。我国在国家“十五”攻关项目“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”和国家 973 项目课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”中，提出了全口径、层次化、动态的水资源评价理论与技术。该项评价技术以“自然-人工”二元水循环模型为指导，从降水结构解析开始进行水资源评价。在国家社会公益基金项目“南水北调西线工程水源区水资源定量评估技术”中，又在水循环气-陆耦合模型的支持下，从大气水汽通量评价着手，从空中水资源和陆面水资源两个层面进行水资源评价，进一步拓宽了水资源评价口径，并与全球气候变化相结合。

2.2.2 水资源价值

水资源价值的内涵主要体现在稀缺性、资源产权、劳动投入和使用功能等四个方面。从国家层次看，水资源价值体现的是产权价值和补偿价值属性；国家的活动体现的是管理者行为，并不直接从事生产活动，往往将实际生产活动委托给生产者，水资源的开发、维护体现了水资源的劳动价值属性；而对于使用者，体现的则是水资源的使用价值属性。有关水资源价值方面的研究已经取得了一定进展，首先观念上已由水资源无价向有价转变，对水资源价值的内涵与构成有了系统的认识，国内外还尝试对天然水资源的价值和水资源的经济服务功能价值进行测算，以指导水资源管理与高效用水，在理论与实践方面都取得了一定进展，但也还存在许多问题，主要体现在：

（1）水资源价值理论有待于突破。理论上水资源价值来源问题尚无统一认识，呈现“百花齐放”的状态，理论的出发点不尽相同。

（2）水资源价值研究侧重于水资源量的供需状况，没有重视水资源是量与质的高度统一，从而淡化或忽视了水质对水资源价值的影响。

（3）水资源价值研究存在片面性。水资源具有正负两重价值特性，在水资源价值研究中，只重视水资源正价值研究，忽视了水资源给人类带来不利影响的负价值研究，这样使水资源价值研究过于片面，难以全面评估和正确掌握水资源价值。

1993 年国民核算体系（SNA）已明确把自然资源纳入资产负债表和积累账户，形成了综合环境经济核算体系（SEEA），旨在研究资源环境和经济活动之间的相互关系，注重寻求良性经济运行的环境承受能力，并将水资源核算列为主要核算内容之一。水资源核算包括水资

源价值量核算、实物量核算和水质核算三部分。自二十世纪 80 年代中期以来，世界上许多国家陆续开展了水资源核算理论、方法的研究，并通过制定实施方案进行探索和试验。目前，联合国正在制定“水资源核算手册”，确定水资源核算方法。同时，国际上一些国家已经实施了若干案例研究。从各国研究情况看，发达国家开展水资源核算的主要特点是：资源和环境核算并重；核算方法总的来讲是实行实物量核算，对价值量核算多数尚处于探索性阶段；强调可持续发展，强调政府决策的影响和政策的影响及改善。发展中国家水资源核算研究工作的特点是：大多数是受发达国家或国际组织援助，作为典型案例和合作研究而展开的；研究工作一般尚处在方法性探索阶段；侧重于提供一些资料和数据。我国作为发展中国家，虽然也曾进行过一些水资源核算研究，但仍处于起步和摸索阶段。

2.2.3 水资源配置

早期水资源配置的研究对象主要集中于水利工程。随着国民经济迅速发展和人口增长，用水量不断攀升，缺水流域普遍存在地表径流时空分布不均、水环境急剧恶化、水资源供给严重不足等特点，流域用水具有强烈的竞争性，水资源短缺已成为制约经济、社会和生态环境持续发展的“瓶颈”，从而对水资源配置提出了更高更新的要求。与此同时，随着人类认识水平、科学技术和配置实践的不断深化，对水资源合理配置的认识和理解也呈现出一个不断深化的过程。

国家“八五”科技攻关项目专题“华北地区宏观经济水资源规划管理的研究”将水资源系统与区域自然—社会—经济协同系统结合，提出基于宏观经济的水资源优化配置理论与方法，有效地克服了水资源开发利用与区域宏观经济发展脱节的现象；王浩等（2001）在《黄淮海水资源合理配置研究》中，提出水资源“三次平衡”的配置思想，以此综合评估南水北调对缓解流域水资源矛盾的功效；国家“九五”科技攻关项目“西北地区水资源合理开发利用及生态环境保护研究”针对内陆干旱绿洲生态的特点，水资源配置的范畴进一步拓展到生态环境系统，水量配置的对象也发展到同时配置国民经济用水和生态环境用水，并且衍生出具有可操作性的生态需水计算方法；国家“十五”科技攻关重大项目“黑河流域水资源调配管理信息系统”针对黑河流域水资源开发利用的实际问题，提出了基于流域二元水循环模式，面向水资源全属性功能的配置理论与方法；赵勇等（2006）在“宁夏经济生态系统水资源合理配置研究”中将水资源配置、水循环模拟和水环境模拟组合，建立广义水资源配置模型，实现了区域水资源—水环境—水循环过程的动态配置与模拟以及经济生态的后效应评价系统。

可见，水资源配置范围从小区域逐步发展到大流域，甚至是跨流域，配置模式从传统的“以需定供”和“以供定需”模式发展到现在综合考虑供需的“可持续发展”模式，配置目标从最初简单的水量分配到目前协调考虑流域和区域经济、环境和生态各方面需求进行有效的水量宏观调控，其研究日益受到重视。

数学模型是实现大规模水资源系统配置的重要手段和工具，也是配置研究的重点。从建模方法而言，水资源配置模型可以概括成模拟、优化、模拟与优化相结合三类。

（1）模拟模型。模拟模型的基本思路是，根据不同的输入信息，按照符合实际流程的逻辑推理对水资源系统中的水资源存储、传输、供给、排放、处理、利用、再利用、转换等进行定量分析和计算，以获得水资源配置结果。国内典型的水资源配置模拟模型包括长江勘测规划设计研究院等单位（2001）在《南水北调中线工程规划》中建立的多水源、多用户大系统水资源配置模拟模型和游进军等（2005）建立的基于规则的水资源系统模拟模型（ROWAS）。

（2）优化模型。优化模型由目标函数和约束条件共同组成，应根据实际需求选取配置模型的目标函数和约束条件。国家“八五”科技攻关项目专题“华北地区宏观经济水资源规划管理的研究”建立的基于宏观经济的水资源优化配置模型、赵建世等（2002）基于复杂适应系统理论建立的水资源优化配置整体模型、“宁夏经济生态系统水资源合理配置研究”建立的广义水资源配置模型都是典型的水资源优化配置模型。

（3）模拟与优化相结合。优化模型数学表述清楚，容易理解，不仅可以寻找问题最优解，也方便多目标决策均衡，但其求解过程要难于模拟模型，且求解结果难以贴近于实际。模拟技术更注重对细节过程作准确可控的描述，灵活性和适应性更强，便于结合实际情况进行相应调整，但是却可能会忽略许多可能的优解。水资源系统的复杂性决定了单纯采用模拟模型或者优化模型都会存在一些不足，部分研究者综合两种技术的各自优势，在实践中探索构建模拟与优化相结合的配置模型。例如，D. P. Sheer（1983）在华盛顿特区建立的城市配水系统，张建云等（1995）在南水北调东线工程研究中提出的适用于大型跨流域调水工程的数学模型，马宏志等（1998）提出的一种交互式宏观多目标优化与方案动态模拟相结合的决策支持规划思想和操作方法。

国外在水资源配置领域的研究起步较早，其实践经验对我国水资源配置研究具有较高的借鉴意义。同国内相比主要具有两大优势：一是模型综合性强。模型研究范围包括区域级和流域级，配置目标往往涵盖防洪、经济、水质、生态等各个方面，配置方法包括模拟、优化以及模拟与优化相结合三类，同时遥感、地理信息系统等大量新技术被广泛运用到配置模型

当中，与模型相配套的监测和调控水平、流域一体化管理水平也较高。二是模型通用性好。国外在良好科研基础上结合大量实际经验开发了一些具有较强实用性的软件产品用于水资源系统模拟，这些软件产品具有专业覆盖面宽、综合性强、可操作性好等特点。相比而言，国内研究虽然在部分领域具有一定深度并取得了研究成果，但对不同专业模块的综合和集成还存在困难，仍处于分散独立分析解决问题的阶段，在向实用性工具的转化上还存在不足。

2.2.4 水资源调度

水资源调度是协调流域及区域内部各类用水矛盾、实现水资源合理配置、充分发挥水资源利用的综合效益、促进社会经济可持续发展的有效“良方”。同水资源配置一样，水资源调度的研究进展也与人类社会的发展及其对水资源的需求密切相关。

早期水资源调度研究主要从区域的防洪、发电、农田灌溉、城市生活和工业供水、航运等需求出发，侧重于单一水库或水库群系统的调度规则研究。水库调度可分为常规调度和优化调度。常规调度是根据实测水文资料，计算和编制水库调度图，以此作为水库控制运用的工具；优化调度，是运用系统工程理论和最优化技术，借助计算机寻求最优准则达到极值的最优运行策略及相应决策。

我国关于水库优化调度的研究与应用始于 20 世纪 60 年代，1960 年中国科学院和水科院联合编译出版了《运筹学在水文水利计算中的应用》一书，谭维炎于 1963 年建立了一个长期调节水电站水库的优化调度模型，并于 1966 年用于四川狮子滩水电站水库。80 年代初以来，随着科学技术的进步、系统工程理论及计算机技术的发展，线性规划、非线性规划、动态规划、决策理论、控制理论、神经网络、专家系统、遗传算法等被广泛应用到水库调度研究中，极大地促进了水库调度理论的发展。其中代表性的成果包括：1978 年大连工学院水利系水工教研室和大伙房水库工程管理局编写的《水库控制运用》，张勇传于 1985 年主编的《优化理论在水库调度中的应用》、1987 年主编的《水电能优化管理》、1993 年主编的《水电系统最优控制》，1989 年王浩在博士论文《水库优化调度的确定性等价理论与方法》中提出的水库群随机调度的确定性等价模型，1989 年董子敖编著的《水库群调度与规划的优化理论和应用》，1990 年王本德编写的《水库模糊优化调度》，1990 年冯尚友编著的《多目标决策理论方法与应用》等。

近些年，水库优化调度方法在理论研究日渐成熟和完善的同时，更注重与生产实际相结合，注重研究成果向生产实践转化，以填补理论研究与实际应用的“鸿沟”。随着我国电力机制改革和电力市场发展，水电如何参与电力市场、水库调度如何适应电力市场发展的问题成

为人们关注和研究的重点。另外，随着水环境污染和水生态系统破坏问题的突出，大坝对生态系统的影响以及可能的生态系统修复措施也越来越受到高度重视，水库的生态调度成为水库多目标调度研究的重要组成部分。例如，2005 年全球水伙伴（GWP）等在北京召开的《通过改进水库调度以修复河流下游生态系统》研讨会旨在探讨通过改进水库调度和修改工程设计来保护恢复河流生态系统的可行性。

随着实践逐步开展和研究不断深入，以黄河流域为代表的国内流域水资源综合调度，充分吸取系统科学、控制科学和信息科学的先进理论、方法和技术，不仅在理论研究上取得了长足的进步和创新，而且在实际应用中获得了显著的经济和社会效益。“八五”期间，黄河水利委员会开展了“黄河流域水资源合理分配及优化调度”研究，对流域水量调度与管理起到了较好的示范作用。1996~2000 年，黄河水利委员会完成的“黄河三门峡以下非汛期水量调度系统研究”包括需水分析模型、径流预报模型和水量调度模型，其中水量调度模型又分为三门峡—小浪底水库联合调度模型和三门峡以下河段配水模型，该系统为黄河水量实时分配和调度奠定了技术基础，但其研究范围仅限于黄河下游。2002 年完成的“黄河水资源实时水量分配”研究将黄河干流划分为上游子系统和三门峡—小浪底子系统分别进行流域模拟，以潼关流量进行耦合，采用系统递阶、长短嵌套、滚动修正的方法模拟水量调度过程，第一次较为全面系统地研究黄河水资源实时调度问题。清华大学王光谦等在黄河和塔里木河水量调度方案编制研究中，参考各流域现行的水量调度方案编制工作，提出了流域水量调度的自适应法和适度优化法。中国水利水电科学研究院在“十五”国家科技攻关计划重大项目《黑河流域水资源调配管理信息系统研究》中提出了以“模拟—配置—评价—调度”为基本环节的流域水资源调配四层总控结构和“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”的水资源实时调度方法，建立了黑河流域水资源调配管理信息系统，不仅为黑河流域水资源统一调度与管理提供了有效手段和技术支撑，而且为流域水资源调配研究提供了较为完整的框架体系。

由于流域水资源系统的复杂性、不确定性以及传统思维和客观条件的限制，目前我国水资源综合调度研究与实践还存在以下几方面的问题。

（1）应进一步提高水文、气象、水质等基础资料监测、采集与传输的现代化水平，扩大数据共享范围，加快数据共享速度，提高预测预报水平。

（2）以往水资源调度主要集中于水库、灌区和洪水的实时调度。应加快由工程调度研究向资源调度研究转变的步伐，将水资源调度与水资源配置以及流域水循环有机联系起来，既要满足短时间的调度可行性，也要保证长期调配的合理性。

（3）综合考虑全流域社会经济发展用水和生态环境需水协调发展，进行全流域水资源统一调度的研究才刚刚起步，应加强“水资源—社会—经济—生态—环境”相耦合的水资源综合调度模型研究，在统一框架下定量计算不同调度策略导致的综合后效。

（4）流域水资源实时调度工作仍处于依靠专家经验和简化计算阶段，实时调度缺乏精确的科学计算，应充分利用高性能计算领域的研究成果，提高海量数据的存储和处理能力及大规模复杂系统的优化计算速度。

（5）水资源调度手段相对落后，需要利用现代高新技术，开发流域水资源调度决策平台，为科学决策提供支持，提高流域水资源管理水平。

2.2.5 水资源管理

水资源管理学是从学科角度对水资源管理进行系统研究的科学，是水资源管理知识体系，是建立在水文学、水资源学、管理学等诸多学科基础之上的新的交叉性综合性学科。在实际水资源管理活动中，针对水资源短缺、水环境污染等水资源危机的出现，世界上一些国家从20 世纪 60 年代开始就提出了相应的水资源管理措施。近些年来，面对不断加剧的水危机，世界各国都进行了一系列的改革活动，以建立适应可持续发展要求的现代水资源管理体系，突出表现在变水资源的“供应管理”为“需求管理”，突出水质管理和水环境保护的重要性，强调水资源综合管理的地位和作用。

水资源综合管理（Integrated Water Resources Management，简写 IWRM）概念在 1992 年 1 月于爱尔兰都柏林召开的 21 世纪水与环境发展问题国际研讨会上被首次提出。之后，IWRM 受到了社会各界广泛关注，各国都认识到，对水资源实施综合管理是解决水资源问题的重要措施。2006 年 2 月，全球水伙伴发表了以“构建变革的舞台”为标题的对世界各国制订和实施 IWRM 情况的调查报告。该调查报告把被调研的国家分为四类：①已有计划和战略的国家；②正在制订计划和战略的国家；③仅仅起步准备制订计划和战略的国家；④没有提交反馈调查表和没有被列入被调研的国家。根据该组织的调查，第一类国家在 2003 年占世界各国的比例为 13%，在 2005 年已达到 21%；第二类 2003 年为 47%，在 2005 年已达 53%；第三类 2003 年为 40%，2005 年已减少为 26%。总计世界上已有 95 个国家已完成或正在完成 IWRM 计划的制订。这项调研实际上是对水管理改革的一次评估。可以说，现在世界上几乎所有国家都认为 IWRM 是应对全球水危机的好办法，各国都处在综合管理的不同阶段。此外，世界水理事会（WCC）、联合国教科文组织（UNESCO）、联合国粮农组织（FAO）、世界银行（WB）、欧盟（EU）、国际水资源管理研究所（IWRI）等机构和组织都认可 IWRM 的基本理念，认为

IWRM 理念可以帮助世界各国按照成本效益比较和可持续发展的方式解决水问题。IWRM 已在世界范围内逐渐取代传统的水资源管理，是促进社会和谐发展、人与自然和谐相处、社会与自然可持续发展的重要支撑，是确保水资源可持续利用的新发展趋势。

但是，迄今为止 IWRM 在世界范围内尚没有一个明确、清晰且被大家广为接受的定义。按照全球水伙伴（GWP）组织给出的定义，IWRM 是一个促进水、土地和相关资源同步开发与管理的过程，它以公平的方式，在不损害人类赖以生存的生态系统可持续性的情况下，实现经济和社会福利的最大化。和传统的水资源管理相比较，IWRM 从技术和非技术、工程和非工程手段相结合的角度出发，综合考虑自然资源、生态环境、社会经济、机构、法律等不同系统来解决问题；灌溉、防洪、水电等都是孤立的工程，IWRM 要求将任何一个工程都要纳入到水资源系统中加以考察；工程可行性论证要从传统的主要只关心经济标准转到 IWRM 所要求的经济、环境、社会标准；传统上各种不同的水使用或多或少是由独立的部门控制的，IWRM 要求对所有的水进行综合管理。从技术角度看，IWRM 可称作“数字化管理”，即综合应用空间信息技术、计算机与网络技术、多媒体技术等高技术手段，对流域水资源、社会、经济、生态、环境等各种信息进行科学采集、数字化处理、综合分析与优化计算，构建可视化综合信息平台，建立全面服务于防洪减灾、水资源配置、水量调度、水土保持、工程建设与管理等功能的水资源综合调配决策支持系统。

我国关于水资源管理理论的研究开始于 20 世纪 80 年代，早期的水资源管理研究主要是对实际水资源管理活动中的管理内容简单地罗列和堆加，随着我国水危机的不断加剧以及可持续发展对现代水资源管理的要求和挑战，学术界逐渐关注水资源管理理论的探讨和框架体系的构建。目前，有关最严格水资源管理制度实施方面的研究已经成为我国水资源管理领域的研究热点。

2.3 国际水文计划简介

当代世界面临着日益严重的水资源问题。水资源问题的解决主要依靠合理管理，而合理管理水资源只能建立在坚实的科学和技术的基础上，并且要对生态的、经济的和社会的问题采取综合管理的措施。水文学是合理管理水资源的科学基础。水文循环的全球性质和水圈的全球分布状况突出了水科学的国际性质和国际合作的必要性。

联合国教科文组织从 20 世纪 60 年代开始组织各国参加国际水文十年（IHP，1965-1974）的国际水文学术活动，主要研究工作在于全球水文基本资料收集和水量平衡研究。后来考虑到十年的时间有限，不足以解决水科学发展及其实际应用的大量问题，需要有一个新的长期

的国际水科学合作计划，教科文组织第 17 次大会（1972 年）决定在国际水文十年结束时开展国际水文计划（INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME-IHP）。为此，联合国教科文组织和世界气象组织 1974 年在巴黎联合召开了国际水文会议，通过了国际水文计划第一阶段（1975～1980）计划纲要，同年经联合国教科文组织第 18 次大会批准，于 1975 年 1 月 1 日开始实施。第一阶段（1975-1980 年）着重研究人类活动影响、水资源与自然环境之间的关系；第二阶段（1981-1983 年）着重于把研究领域扩大到各个特定的地理、气候区域，并向综合利用水资源的水问题方向发展；第三阶段（1984-1989 年）定名为“为经济、社会发展合理管理水资源的水文学和科学基础”，除继续把水文科学作为重点外，把计划内容扩大到合理管理水资源；第四阶段（1990-1995 年）研究重点是大气-土壤-植被之间的水循环关系及全球气候变化对陆地水文过程的影响；第五阶段（1996-2001 年）主题是“脆弱环境中的水文水资源开发”。相对前四个阶段，它更加突出了通过水文科学的基础和知识支持可持续水资源的规划与管理。计划的核心内容有：水文过程中的尺度问题的作用、环境的脆弱性、水资源的综合集成管理、科学的教育训练与传播等；第六阶段（2002-2007 年）研究主题为“水的交互作用：处于风险和社会挑战中的系统”，从变化环境中水资源的需求与供给出发，开展不同行政区域和自然单元上的水资源研究，并从社会伦理等方面开展深入研究。迄今为止，国际水文计划已经进入第七阶段。第七阶段研究包括流域和浅层地下水系统对全球变化影响的适应性研究、加强水资源管理提高水资源利用的可持续性、面向可持续性的生态水文学、淡水与生命支撑系统、面向可持续发展开展水资源保护教育等五个主题。国际水文计划的各个发展阶段及其框架议题见表 1。

表 1 国际水文计划的发展阶段及其框架议题

发展阶段	框架议题
第一阶段（1975-1980 年）	人类活动影响、水资源与自然环境之间的关系
第二阶段（1981-1983 年）	向综合利用水资源的水问题方向发展
第三阶段（1984-1989 年）	为经济、社会发展合理管理水资源的水文学和科学基础
第四阶段（1990-1995 年）	大气-土壤-植被之间的水循环关系及全球气候变化对陆地水文过程的影响
第五阶段（1996-2001 年）	脆弱环境中的水文水资源开发
第六阶段（2002-2007 年）	水的交互作用：处于风险和社会挑战中的系统
第七阶段（2008-2013 年）	如何利用现有科学知识来发展新的研究方向和方法，以对环境变化、生态系统和人类活动做出响应

3、国家需求与发展方向

3.1 国家需求

当前和今后一个时期，我国处于全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化建设的重要时期。人多水少，水资源时空分布不均、与生产力布局不相匹配，既是现阶段我国的突出水情，也是我国将要长期面临的基本国情。发达国家 200 多年工业化过程中分阶段出现的资源与环境问题，现阶段在我国集中显现出来。发达国家在经济高度发达后花几十年解决的问题，我们必须在较短的时间内加以解决，难度之大、任务之艰巨前所未有。具体而言，我国水资源利用主要面临以下发展情势：

（1）水资源供需形势更趋紧张

近 20 年来，由于气候变化和人类活动对下垫面条件的影响，我国水资源情势发生了显著变化，北方地区变化尤其突出，大部分地区水资源数量减少明显；南方大部分地区和北方部分地区降水偏丰。比较 1956～1979 年与 1980～2000 年两个时段水文系列，全国平均降水总量变化不大，但北方黄淮海辽 4 个水资源一级区降水量平均偏少 6%，其地表水资源量减小了 18%，水资源总量减小了 13%。其中海河区水资源衰减最为突出，近 20 年降水量较以往减少 10%，地表水资源量减少达 41%，水资源总量减少 25%。南方地区近 20 年来，由于降水偏丰和下垫面条件变化影响，水资源数量略有增加。南方长江、珠江、东南诸河 3 个水资源一级

区区降水偏丰 2%，水资源量增加 6%。

（2）点源污染不断增加，非点源污染日渐突出

全国现状城镇生活和一般工业废污水排放量达 740 亿 m^3，是 1980 年的 3 倍多。其中海河区、辽河流域和太湖流域现状污径比分别高达 50%、38%和 44%。而同期工业废水排放达标率仅为 1/3 左右，城市的污水处理率仅为 34%左右，城镇更低。改革开放以来，我国农业生产、畜禽养殖、农村生活水平及其居民点，城市数量与规模均有很大的发展，由农田径流、畜禽养殖、农村居民、水土流失和城市径流等形成的非点源污染大幅度增加。以上 5 类主要非点源污染的 COD、氨氮、总氮、总磷的负荷产生量已相当于点源污染物排放量的 4～9 倍，其 COD、氨氮、总氮、总磷的现状入河比例已分别达 41%、41%、68%和 65%。

（3）洪涝与干旱发生频率增加，干旱影响与危害凸现

以增暖为主要特征的全球气候变化，大气系统能量增加，水循环速率增加，干旱、洪涝等极值天气过程发生频率越来越大，对国民经济的影响程度越来越深。我国干旱和洪涝危害呈“双上升”趋势。1951-2006 年间，我国平均每年受旱和雨涝面积分别为 2246.3 万公顷和 975 万公顷；1990-1999 年间和 2000-2006 年间年均干旱受灾面积较 1951-2006 年间分别增加了 13.5%和 17.2%;1991 年和 1998 年我国洪涝受灾面积分别达到 2460 万公顷和 2229 万公顷。

干旱在我国每年都会发生，但干旱问题越来越突出，发生频率越来越高，影响区域越来越广，经济损失越来越大。近年来平均 2～3 年就会发生一次严重的干旱灾害；1951-2006 年我国年均干旱受灾面积为 2194.3 万公顷，是同期年均雨涝受灾面积的 2.25 倍。1990 年以来，我国年均因旱灾造成的直接经济损失约占同期 GDP 的 1%以上，遇严重干旱年景，该比例超过 2%。

（4）突发性水污染事件频繁发生，水生态安全受到威胁

我国不少化工、石化等重污染行业布局在江河沿岸，有的甚至建在饮用水水源地附近和人口密集区，很多企业建厂早、设备陈旧、管理落后，水污染事故安全隐患大；从 2001 年到 2004 年，全国水污染突发性事故 3988 起，每年近 1000 起。2005 年水污染事故 693 起，占环境污染事故的 50%。2005 年以来松花江、广东北江、四川沱江、太湖蓝藻水华暴发、吉林二甲基苯酚水污染事件等近 28 起重大水环境污染事故，为中国脆弱的生态环境敲响了警钟；同时，跨界流域水污染事件引起的国际水纠纷，给我国的环境外交也带来巨大压力和挑战。水环境污染造成了巨大的经济损失，据统计 2004 年因水污染造成的损失为 2862.8 亿元，占当年 GDP 的 1.71%。

（5）水问题在全国范围内凸现，叠加和累积影响越来越严重

目前各大流域均出现了不同程度的水危机，其中西北、海河、辽河流域缺水严重，河流生态系统退化和地下水超采问题极为突出；黄河流域水资源总量不足，河道泥沙淤积导致河流生态系统萎缩；淮河流域水环境污染问题久治不愈，旱涝灾害并存；长江源头生态退化问题不容忽视，中下游太湖地区水体污染十分严重；珠江流域中下游地区污染严重，河口咸潮上溯。此外，在同一流域或区域，各类水问题并存，叠加和累积影响越来越严重。

3.2 发展方向

受经济社会发展阶段和科学技术发展水平的制约，目前水文水资源学科研究主要存在以下四个方面的问题：①水文基础设施建设还比较滞后，应进一步提高水文、水资源、气象、水质等基础资料监测、采集与传输的现代化水平，扩大数据共享范围，加快数据共享速度；②中长期水文气象的预测预报水平有限，水旱灾害的监测和预报能力比较落后；③全球气候变化导致气温升高，蒸发增加，降雨及径流时空分布更加不均匀，给防洪安全、水资源安全、生态安全带来了严重影响。目前，大尺度水文水资源问题的研究仍然较少，全球气候变化对水文水资源的影响及应对措施研究才刚刚起步；④在高强度人类活动作用下，人工侧支水循环的径流通量越来越大，致使流域水循环及其伴生的水环境、水生态过程均呈现出越来越明显的“自然—人工”二元特性。

纵观国内外水文水资源学科相关研究的发展历程，现代水文水资源学科研究仍处于不断发展与完善时期。其发展既面临难得机遇，也面临严峻挑战，应进一步拓宽研究思路，革新研究范式，在研究对象、技术途径和观测实验手段等方面实现新的突破。

3.2.1 总体思路—从“还原” 向“综合交叉” 发展

在上个世纪 90 年代之前，水文水资源学在“还原论”科学思维方式的指导下，对水循环的各要素过程乃至环节进行高度细化，将水文水资源学划分成门类众多的二级学科乃至三级学科。在上述研究思路的影响下，水文水资源学在降水、产流、汇流、入渗、土壤水运动、地下水补给与排泄、蒸发等水文环节的科学认知方面取得了长足的进步，产生了一大批新的水文理论和技术。但受到各二级学科研究思路的限制，水文水资源学的相关理论和技术难以满足区域整体水循环演变过程识别、多水源的联合配置与调度、全球气候变化影响评价以及水生态修复与水环境保护等方面实践需求。

自上个世纪 90 年代以来，水文水资源学紧密围绕到水问题解决的实践需求，从“还原细化”研究向“综合交叉”研究转变。就综合交叉研究而言，一方面体现在传统水文水资源学

的二级学科、三级学科之间的交叉研究，另一方面体现在水文水资源学与其他自然科学、社会科学的交叉融合。就第二个方面的交叉融合而言，主要包括以下 5 个方面的发展趋势：(1)面向水环境保护和饮水安全保障，水文水资源学与环境科学之间开展了大量交叉研究，为从源头治理水环境提供了大量技术支撑；（2）为进行退化生态系统修复和河流健康维持，水文水资源学与生命科学之间开展了大量交叉研究，相关研究成命题为国际研究的前沿和热点问题。生态需水评价与管理理论与方法的建立以及新兴交叉学科——生态水文学的产生，就是水文水资源与生命科学综合交叉研究新产出；（3）为提高水资源的调度管理效率，促进水利信息化和现代水利建设，水文水资源学与信息科学的交叉研究受到学术界的普遍关注，并开展了诸如数字流域及其他数学模拟与仿真方面的研究；（4）为解决水资源的综合管理问题，近年来，水文水资源学进一步融合经济学、社会学及管理学等有关社会学科新理论和新方法，构建现代水利管理的理论与技术体系；（5）为解决水文观测数据缺乏、提高水文预报精度和延长水文预报预见期的实践需求，水文水资源学与大气科学和对地观测科学进行深入合作，初步形成了气—陆耦合模式下的水文观测与预测预报技术体系。

3.2.2 研究范式—从“天然”一元向“自然-人工”二元演变

传统水文水资源研究重点关注天然水循环过程，不能满足变化环境下水安全维系的需要，水文水资源研究正从“天然”一元研究范式向“自然-人工”二元研究范式研究转变。通过水循环驱动力的分离评价，明晰天然和人工各项影响因素对水循环的影响程度及作用方式，进而提出进行水循环调控的基本切入点；通过自然、人工各项驱动力的耦合研究，从整体上明确水循环演变的驱动机制，并对变化环境下水循环的演变趋势进行科学预测，并提出面向水安全维系的综合调控措施。

3.2.3 研究对象—从单一水文环节向二元水循环过程转变

现代水文水资源研究，已经突破传统基于水循环环节的“还原”研究思路，将天然水循环和社会水循环环节进行有机整合，形成二元水循环过程。当前根据水循环发生的垂直分层，将水循环过程划分为大气过程、地表过程、土壤过程和地下水过程进行研究。在传统的水文水资源研究中，重点关注的是水循环的地表过程、土壤过程和地下水过程，在一定程度上割裂了水循环过程的整体特征。在基于过程的现代水文水资源研究中，通过气-陆耦合研究，保证了水循环四个基本过程相互作用的有机性和整体性。从社会水循环的角度来看，当前可将其划分为原水调度、原水分配、用户用水、污水排放收集和再生水配置等基本过程。在传统水文水资源研究中，重点关注的是原水调度与分配，忽略了其他过程，导致水资源的利用效

率不高、水环境难以从源头上得以保护等弊端的凸现；在现代水文水资源学研究中，从社会水循环的各要素过程和相互作用机制入手，进行水资源科学配置与调度，充分提高了水资源的利用效率和效益，也为从源头治理水污染提供了有效途径。

3.2.4 技术途径—从物理模型向“原型观测+数值模型”相结合转变

物理模型是传统水文水资源研究的关键技术途径。但受到样品采集、实验环境条件控制、模型比例缩放等诸多环节的影响，物理模型往往难以客观描述水循环的真实过程。为客观描述变化环境下水循环的演变规律，在现代水文水资源研究中，高度注重野外原型观测实验，在大量原型观测实验数据的知识挖掘的基础上，获取水循环客观演变规律。与此同时，在计算技术的支持下，水循环的数值模拟成为现代水文水资源学最为关键的技术途径。数值模拟可对历史系列的水循环过程进行有效再现；同时，还可根据驱动机制及其他条件的变化，对水循环的未来演变趋势进行有效预测，为有关决策提供依据。同时，为克服原型观测工作量偏大、成本偏高和模型模拟不确定性的不足，在现代水文水资源学研究中，还充分发挥原型观测与数值模拟各自优点，进行两种技术途径的有机结合；在提高工作效率的同时，有效保障水循环描述的真实性与客观性。

3.2.5 观测实验手段—从“点”、“面”监测过渡到“立体”原型观测

传统的水文水资源观测实验主要依托于地面水文站网、地下水观测井（群）、气象台站、水质监测站/断面等四大体系构成，其中水文站网又包括水位站、水文站和雨量站等。受到部门管理权限和分工的制约，我国水文水资源观测实验主要依托于水利部门管辖的地面水文站网（点），难以与其他观测体系所获得实验观测数据进行综合应用。对于水文要素的空间分布而言，除河道产流和汇流具有“线状”特征外，其他水文过程均具有“面状”分布；为此，需要将依托于地面观测台站所获得的点状信息通过空间插值（或摄布）转化成面状信息。然而，由于地形地貌、土壤和植被等自然因素和人类活动影响，在点状信息向面状信息的转化过程中，往往会带来很大的误差。随着遥感技术在水利观测与监测中的应用，获取面状水文要素信息成为可能。然而，在将遥感所获得的光谱信息向水文水资源信息转化的过程的中，需要通过下垫面的观测信息进行定量识别。传统的“点”状水文水资源观测逐渐向“点”、“面”结合的水文观测实验模式转变。需要指出的是，在现代水文水资源研究中，需要有水循环的大气过程、地表过程、土壤过程和地下水过程的监测实验信息做支撑，水文水资源的观测实验手段也逐渐从“点”、“面”监测过渡到“天-地”一体化的立体原型观测转变。在《中国气候观测系统》和《中国地球观测十年规划》中，构建了“天地一体化”的多圈层立体观测方

案。

4、创新前沿

水是基础性的自然资源和战略性的经济资源，是生态与环境的控制性要素。水资源系统与社会经济系统、生态环境系统有着非常复杂的相互依存和相互制约的关系。当前和今后一个时期，是我国全面建设小康社会、加快推进现代化进程的重要时期，也是传统水利向现代水利、可持续发展水利加快转变的关键阶段，经济社会发展和全球气候变化对水文水资源学科不断提出新的需求。水文水资源学科的发展既面临难得机遇，也面临严峻挑战。围绕水资源可持续利用这条主线，从“自然-人工”二元水循环模拟、应对气候变化等方面提出了水文水资源领域 8 个重大的创新前沿问题。

4.1 “自然-人工”二元水循环模拟

由于人类社会的发展，用水量不断增加。各类用水不外由地表水体和地下水体中取水，经过使用后一部分消耗于蒸发并返回大气，另一部分则以废污水形式回归于地表或地下水体，这就形成另一个小循环，可称作是用水的侧支循环（陈家琦，1986）。在高强度人类活动作用下，人工侧支循环的径流通量越来越大，致使流域水循环及其伴生的水环境、水生态过程均呈现出越来越明显的“自然—人工”二元特性，集中体现在以下三方面：一是驱动力的二元化，即流域水循环的内在动力已由过去一元自然驱动演变为现在的“自然—人工”二元驱动；二是循环结构和参数的二元化，即人类聚集区的水循环过程由“大气—坡面—地下—河道”自然循环和“取水—输水—用水—排水”人工侧支循环耦合而成，变化环境下流域水循环对于降水输入的总体响应不仅取决于自然的陆面、土壤和地下等水文与地质参数，还取决于水资源开发利用及相关的社会经济参数；三是水资源服务功能的二元化，即水分在其循环转化过程中，同时支撑了同等重要的经济社会系统和生态环境系统。这种“二元”模式导致流域水资源形势加速演变，洪涝与旱灾发生的机率与不确定性增加，同样规模的洪水造成的损失急剧增大。

在分析水资源系统的天然与人工耦合关系方面，自 20 世纪 80 年代以来国内已经做了大量研究，近年来更是得到了快速的发展。王浩（2000）首先提出了“自然—人工”水循环二元模式的概念；“973”项目“黄河流域水资源演变规律与可再生性维持机理”第二课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”研究首次提出了分布式水循环模拟模型和集总式水资源调配模型耦合的建模思路，自主研发黄河流域二元水资源演化模型，实现了“坡面—河道”天然循环和“供—用—耗—排”人工侧支水循环的统一模拟，取得了流域水资源全口径

层次化动态评价方法、流域水资源二元化模型与人类活动影响下的流域水资源演变规律等三项重要原创成果；“十五”国家科技攻关计划重大项目“水安全保障技术研究”第二课题“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”将二元水资源演化模型与黑河流域水资源管理的重大实践问题相结合，对流域二元水资源调配模式与方法进行了较为深入的研究。目前为止，二元水循环模拟的理论研究和实践应用还处于探索阶段，正在不断发展和深入之中。

4.2 应对气候变化

全球气候变化对自然生态系统和人类社会可持续发展已经构成严重威胁，积极有效地应对气候变化是当前人类社会面临的共同挑战。我国人多水少，水资源时空分布不均，水利基础设施建设仍相对滞后，水资源利用方式还比较粗放，防汛抗旱减灾综合体系还不完善，水资源领域应对气候变化能力相对较弱。全球气候变化导致气温升高，蒸发增加，降雨及径流时空分布更加不均匀，给防洪安全、水资源安全、生态安全带来了严重影响。例如：高纬度地区和某些热带地区年平均河流径流量和可用水量将因气候变化而增加，而在中纬度区域和热带干旱地区则减少；储存在冰川和积雪中的水的供应将会下降；降水强度和变率的增加将加大许多地区发生洪水和干旱的风险；较高的水温和极端事件的变化（包括洪水和干旱）将会影响水质并使许多水污染形式加重；气候变化引起的水量和水质的变化将会影响粮食的供给、稳定、获取和使用；气候变化影响了现有用水基础设施的功能和运行—包括水力发电、防洪、排涝和灌溉系统，以及影响水管理的措施。全球气候变化也对水资源开发利用提出了新的要求。为增加能源供应、改善能源结构、保护生态环境、减少温室气体排放，减缓气候变化，需要在低碳发展模式下开发利用水资源，增加水电能源的供应。而与此同时，随着人口增长，各类用水需求还在持续增加。

气候变化对水资源支撑我国经济社会可持续发展的能力提出了新的挑战。为有效应对气候变化，努力提高水资源领域应对气候变化的能力，应加强下述几个科学问题的研究。

（1）气候变化与水循环、水资源开发利用的相互影响关系研究。应在现有气候变化影响评估模型基础上，根据我国区域影响评估的特点和需求，深入研究我国气候变化—陆地水循环—人类活动之间的相互影响机理，研制具有自主知识产权的区域气候—陆地水文—人类活动三向耦合模型，并从防洪、水资源、生态安全等角度出发，预估气候变化与水资源开发利用相互影响的发展趋势。

（2）气候变化的减缓对策与关键技术研究。从水土保持与水生态修复、合理开发水电资源、低碳发展模式下的水资源开发利用、蒸散发的监测与总量控制等方面着手，以增加能源

供应、改善能源结构、保护生态环境、减少温室气体排放为目标，深入研究水资源领域气候变化的减缓对策与关键技术，为减缓气候变化做出水利行业的新贡献。

（3）气候变化的适应对策与关键技术研究。研究提出气候变化条件下水资源评价及配置的适应对策及关键技术，使经济发展规划、水资源规划、跨流域调水规划都能适应气候变化的要求；从长期、短期、实时等多时间尺度，研究气候变化条件下流域的洪水预报技术与枯水预报技术，特别是加强极端天气气候事件与灾害的形成机理研究，提高预报预测能力；根据气候变化对洪水频率、强度以及时空分布的影响，深入研究气候变化条件下南方典型洪涝灾害高风险区水利工程群防洪调度关键技术；综合考虑发电、航运、灌溉、城市供水、生态等多种调度目标，深入研究气候变化条件下水资源脆弱地区水利工程群枯水期统一调度的关键技术；研究海平面上升条件下我国海岸防护工程运行调度的关键技术；深入研究气候变化条件下节水防污型社会建设、需水管理、水环境综合治理、气候变化影响敏感脆弱区风险管理的适应对策与关键技术。

4.3 缺乏观测资料流域的水文观测与预报

水文预报从经验公式、集总式模型走到分布式模型，已经取得了丰硕的成果。回顾水文预报研究，一个共同点是大部分研究均着眼于有资料流域。如何解决缺乏观测资料流域的水文预测预报问题，一直是困惑水文界的难题。国际水文科学协会（IAHS）于 2003 年 7 月在日本札幌召开的第 23 届国际地球物理和大地测量大会暨第六届 IAHS 科学大会期间，正式启动了一个简称为 PUB（Prediction in Ungauged Basins）的国际水文计划。PUB 意译成中文的意思是缺乏观测资料流域的水文观测。PUB 是一项挑战性水文科学研究计划，其主要研究任务是：在无观测资料或缺乏观测资料的流域，使用气象输入（包括观测、预报和其它方法推定）、土壤、植被和地形数据（包括对未来气象与土地利用变化的预测或预计），但无法使用过去的观测资料（即不可能或不允许进行模型调试或校正），预测或预报各种水文反应（如径流、水质和泥沙等）。

IAHS PUB10 年科学与实施计划分为基础研究计划和目标性研究计划两部分。基础研究计划涉及 6 个科学问题：①不均匀性与预测不确定性之间的关联特征；②地形特征的获取和气象输入的不均匀性识别；③过程研究和世界范围性中尺度现场实验；④遥感和其它观测新技术的应用及观测数据同化；⑤优化水文过程的表述；⑥解释现存数据并同化观测及遥感数据。目标性研究计划的着重点是减小“预测的不确定性”。

我国尚存在较大范围的水文无资料或缺乏资料区域。加强缺乏观测资料流域的水文预测

研究，对解决我国目前面临的洪灾、干旱、水质状况恶化、生态环境退化等与水有关的紧迫问题具有重要意义。

4.4 基于气象因子的中长期水文预报方法

受气候气象、下垫面、人类活动等诸多因素的综合影响，流域的中长期径流过程本身具有一定的时空不确定性。特别是在全球气候变化和大规模经济开发双重因素的交织作用下，我国水资源情势正在发生新的变化。最新水资源评价成果显示，1980~2000 年水文系列与 1956~1979 年水文系列相比，黄河、淮河、海河和辽河 4 个流域降水量平均减少 6%，地表水资源量减少 17%，海河流域地表水资源量更是减少了 41%，北少南多的水资源格局更加明显。

我国自 20 世纪 50 年代以来开展中长期水文预报工作。50 多年来，中长期水文预报应用范围不断扩展，预报准确率明显提高，学科发展逐步深入，但总体而言，中长期水文预报技术还处于探索与发展阶段，生产实践中采用的预报方法还比较传统，预报成果的稳定性和可靠性不好。随着经济社会发展和科学技术水平提升，我国的水资源调度和调控能力明显提高，从而对中长期水文预报的精度也提出了更高的要求。目前，气象气候部门已经可以利用全球大气环流模式和持续的海温异常，进行月尺度的气候预测，预测产品包括月平均的地面温度、降水、海平面气压、环流特征量及其异常等。考虑气象因子与水文序列在物理成因上的密切联系，采取物理成因分析与数理统计分析相结合的思路，从年际变化、年内月和旬等多时间尺度研究中长期水文预报主要影响因子的识别方法，进而深入研究基于气象因子的中长期水文预报方法，是提高中长期水文预报成果稳定性和可靠性的关键。

4.5 水循环与伴生过程相互作用机理

流域水环境、生态系统与水循环三大系统之间互相作用，关系密切（见图 3）。水循环为水环境系统和生态系统提供水分条件，水环境系统与生态系统之间有复杂的物质交换与转化，生态系统的演化造成水循环系统下垫面等外部环境的变化。在三大系统错综复杂的关系中，水是最为活跃的因素，水循环系统的演化对其他两大系统的演化起到至关重要的驱动作用。研究流域水循环过程与水生态及水化学过程之间的相互作用关系，开展流域水循环及其伴生过程的综合模拟与预测研究，既是水文水资源学科发展的重要理论需求，又是流域资源、环境、生态和经济社会和谐发展的重大实践需求。

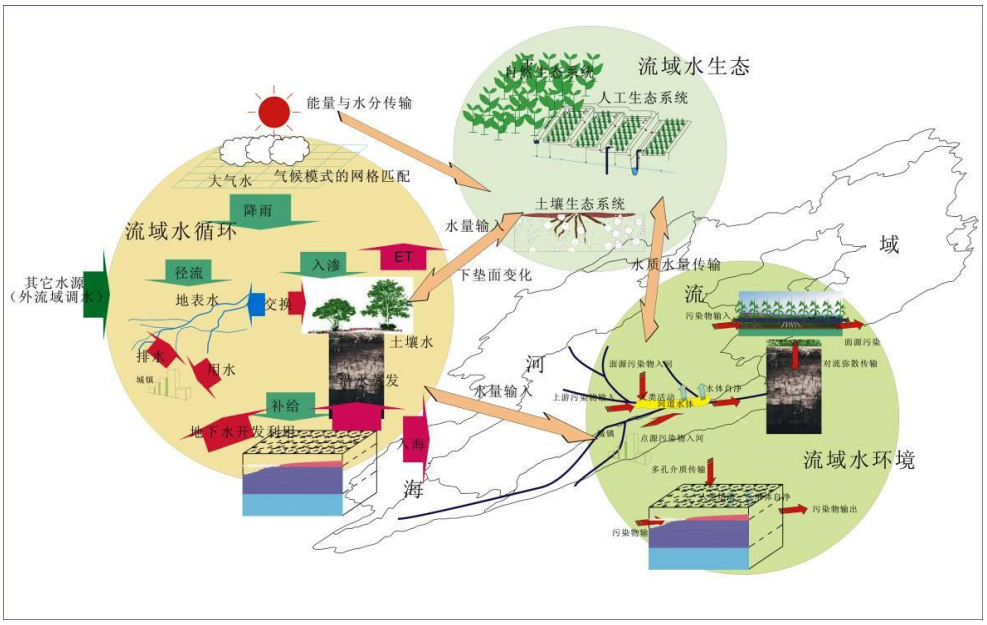


图 3 水循环、水环境及生态三大系统相互作用关系图

4.6 基于总量控制的流域水资源整体调控

水资源系统良性循环和可持续利用的实现须将供水、用水、排水和污染防治等与水有关的各个方面有机结合起来，具体体现在以下八大总量控制指标：地表水总量控制、地下水总量控制、国民经济用水总量控制、生态用水总量控制、ET 总量控制、排污总量控制、入河泥沙总量控制、出入境水质水量控制。基于总量控制的流域水资源整体调控是实现流域最严格水资源管理的有效手段，其总体框架如图 4 所示，包括信息集成、模型构建、过程模拟、仿真评价、决策支持等不同层面的研究。要加强以耗水为中心的水平衡机制、以可持续为中心的生态决策机制、以公平为核心的社会决策机制、以边际成本和社会净福利为中心的经济决策机制、以水量水质联合调控为中心的环境决策机制等方面的研究。

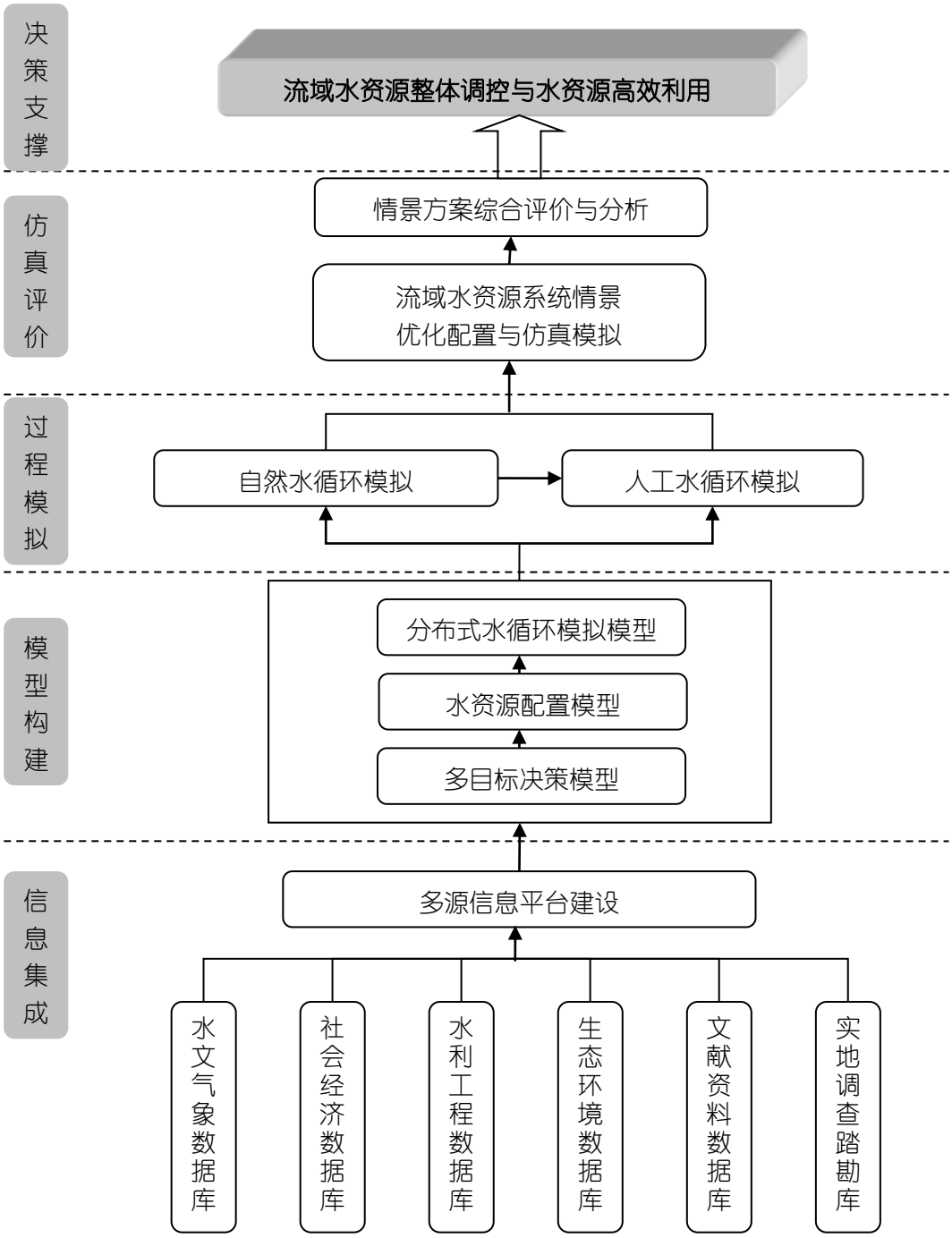


图 4 流域水资源整体调控框架

4.7 复杂水利工程群多目标联合调度

近年来，我国按照可持续发展治水思路的要求，成功实施了以黄河、黑河和塔里木河为代表的多项流域水量统一调度，在维护经济社会可持续发展、生态修复和保护、发展民生水利等方面发挥了显著作用。在流域水量调度蓬勃开展的同时，跨流域调水也成为缓解缺水流域水资源供需矛盾、支撑缺水流域可持续发展的必然选择。目前，我国已经规划选定了南水北调工程东线、中线、西线的调水水源、调水线路和供水范围，与长江、黄河、淮河和海河

四大江河相互连接，形成了“四横三纵”的工程总体布局，东线、中线的工程已经开始建设。国内著名的调水工程还包括江苏省的“江水北调”、广东省的“东深供水”、天津市的“引滦济津”、山东省的“引黄济青”等。随着科学技术的发展及调配实践需求的逐步提高，我国水资源调度已呈现出五个较为明显的变化趋势（如图 5 所示），即从应急调度发展到常规调度，从单纯考虑水量到水量与水质统筹考虑，从单纯服务生产生活到为兼顾改善生态环境调水，从单纯地表水调度到地表水与地下水联合调度，从单一水利工程调度到全流域甚至跨流域水量统一调度。全流域和跨流域的水资源调度问题已经引起社会各界的广泛关注。水资源调度问题涉及因素多，环境复杂，影响范围大，是一个非常典型的多目标复杂群决策问题，其研究涉及到气象、水文、水资源、水力学、水利工程、水电、河流泥沙、经济、生态、环境、系统工程、信息科学、控制科学等诸多学科。综合应用各学科的知识，根据流域水资源开发利用的实际需求，深入开展复杂水利工程群多目标联合调度的基础理论和关键技术研究，对于支撑流域可持续发展具有重要的理论与现实意义。

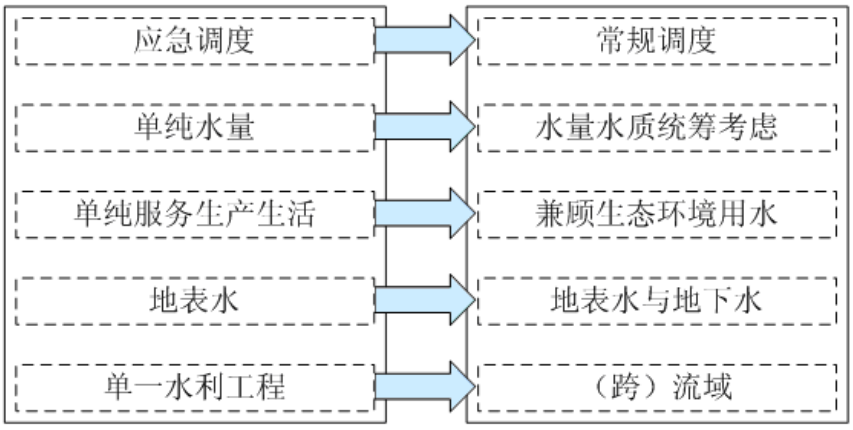


图 5 水资源调度实践的发展趋势

4.8 数字流域

“数字流域”是指用数字化的手段刻画整个流域，以覆盖全流域的整体模型作为基础，模拟流域运动变化的现象和过程，处理大量的流域信息，揭示河流运动变化的规律，预测河流某些特定行为，服务于流域管理实践。1998 年 1 月，美国前副总统戈尔在加州科学中心作了题为《数字地球》的演讲，标志着美国“数字地球”战略计划出台。由“数字地球”衍生出来的“数字中国”、“数字城市”、“数字流域”等，是对不同领域（区域）信息的描述。国内“数字流域”的概念由张勇传首先提出，此后研究逐渐增多，主要集中在数字流域框架研究、基础平台建设、数字流域模型及相关技术、数字流域应用系统建设等方面。进入 21 世纪以来，我国水利界先后提出了“数字海河”、“数字黄河”、“数字长江”等一系列数字河流

的建设规划，其中“数字黄河”工程已经付诸实施。“数字流域”的建设为我国研究和解决江河水利与水害问题提供了高科技手段。

数字流域的框架层次包括数据层、模型层和应用层。国际上少数发达国家已经建立了完善的数据采集和处理系统，研制了一些基于 DEM 的分布式水文模型，开发了适合本国或本流域的应用系统，如实时监测系统、河流水情预报系统、水量分配调度系统等。这些系统已在实际工程和管理中发挥了重要的作用，收到了巨大的效益。在我国，20 世纪 90 年代各大江河流域都建立了水文水情数据库，这一时期数据采集系统也在不断完善，由手工、半手工阶段逐渐过渡到自动化采集阶段，采集监测站网不断健全，采集数据的种类更加齐全。随着国家空间信息基础设施建设的发展，不同比例尺的空间地理数据库相继建成；遥感卫星从无到有，实现了自主研制、发射和图像接收。“伽利略”定位系统在 2008 年已经投入使用；全国范围的雷达测雨系统正在筹建之中。数字流域在数据层的建设目前已经初见规模。模型层是数字流域研究的核心，目前对数字流域的模型研究已有一定进展，研究区域的范围逐渐从小流域扩展到大流域。应用层是数字流域的顶层，也是数字流域研究的目标，目前在该层的研究主要是提供数据服务以及一些专题的决策支持服务，并且大多数的决策支持服务都还是建立在传统模型的基础之上，即是用传统模型的结果来为决策支持提供依据。这种专题的决策支持服务并不能充分发挥数字流域的优势。

数字流域的数据层、模型层和应用层的研究都与水文水资源领域的研究内容和实践需求密切相关。因此，数字流域的相关基础研究也是水文水资源领域重要的创新前沿之一，需要继续加强该方面的基础理论和关键技术研究，为水利行业及国民经济发展提供更有力的技术支撑。

参考文献

[1]Adil Al Radif. Integrated water resources management (IWRM): an approach to face the challenges of the next century and to avert future crises, Desalination, 1999, 124(1-3): 145-153.

[2]N. F. Madulu. Integrated water supply and water demand for sustainable use of water resources, Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(20-27): 759-760.

[3]Thomas G. Huntington. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, Journal of Hydrology, 2006, 319(1-4): 83-95.

[4]Jaroslav Mysiak, Carlo Giupponi, Paolo Rosato. Towards the development of a decision support system for water resource management, Environmental Modelling & Software, 2005, 20(2):203-214.

[5]Kang B, Ramfrez J A. Response of streamflow to weather variability under climate change in the

Colorado rockies. Journal of Hydrologic Engineering, 2007, 12(1):63-72.
[6]水利部国际合作与科技司. 当代水利科技前沿. 北京：中国水利水电出版社，2006.
[7]钱正英，张光斗.中国可持续发展水资源战略研究（综合报告及各专题报告）.北京：中国水利水电出版社，2001.
[8]陈志恺.中国水利百科全书•水文与水资源分册.北京：水利水电出版社，2004.
[9]陈家琦，王浩，杨小柳. 水资源学. 北京：科学出版社，2002.
[10]芮孝芳. 水文学原理. 北京：中国水利水电出版社，2004.
[11]王光谦，魏加华. 流域水量调控模型与应用. 北京：科学出版社，2006.
[12]贾仰文，王浩，倪广恒,等. 分布式流域水文模型原理与实践. 北京：中国水利水电出版社，2005.
[13]蒋云钟，鲁帆，雷晓辉,等. 水资源综合调配模型技术与实践. 北京：中国水利水电出版社，2009.
[14]裴源生，赵勇，陆垂裕，等. 经济生态系统广义水资源合理配置. 郑州：黄河水利出版社，2006.
[15]汪林，甘泓，倪红珍,等. 水经济价值及相关政策影响分析. 北京：中国水利水电出版社，2009.
[16]汤成友，官学文，张世明. 现代中长期水文预报方法及其应用. 北京：中国水利水电出版社，2008.
[17]姜文来，唐曲，雷波，等. 水资源管理学导论. 北京：化学工业出版社，2005.
[18]胡四一. 水文学及水资源的学科前沿和研究需求.水文，2006，26(3)：1-4.
[19]王浩，秦大庸，王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论.水利学报，2002(8)：1-6.
[20]王浩，王建华，秦大庸. 流域水资源合理配置的研究进展与发展方向.水科学进展，2004，15(1)：123-128.
[21]王浩,王建华,秦大庸,等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法.水利学报,2006，37(12)：1496-1502.
[22]王浩，张小娟，蒋云钟. 水务一体化管理与数字流域建设. 南水北调与水利科技,2006,4(3)：1-3.
[23]夏军，左其亭. 国际水文科学研究的新进展.地球科学进展，2006，21(3)：256-261.
[24]芮孝芳，石朋. 数字水文学的萌芽及前景.水利水电科技进展，2004，24(6)：55-58.
[25]张金存，芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评.水科学进展，2007，18(2)：286-292.
[26]胡和平,田富强.物理性流域水文模型研究新进展.水利学报，2007，38(5)：511-517.
[27]王中根，刘昌明，吴险峰. 基于 DEM 的分布式水文模型研究综述.自然资源学报，2003，18(2)：168-173.
[28]邓伟，潘响亮，栾兆擎. 湿地水文学研究进展.水科学进展，2003，14(4)：521-527.

[29]丁晶，王文圣，金菊良. 论水文学中的尺度分析.四川大学学报（工程科学版），2003，35(3)：9-13.
[30]严登华，王浩，王建华,等. 国际水文计划发展与中国水资源研究体系构建.地理学报，2004，59(2)：249-259.
[31]周砺,刘金平，陈丽芳，等.当前国际水文学科技术领域的研究方向.水文，2005，25(4)：30-32，59.
[32]严登华，王浩，王芳,等. 我国生态需水研究体系及关键研究命题初探.水利学报，2007，38(3)：267-273.
[33]鲁帆，蒋云钟，王浩，等. 水资源综合调配概念与关键技术问题浅析[J]. 水利水电技术，2010，41(1)：11-14.
[34]游进军，王浩，甘泓. 水资源系统模拟模型研究进展.水科学进展，2006，16(3)：129-133.
[35]刘家宏，王光谦，王开. 数字流域研究综述.水利学报，2006，37(2)：240-246.
[36]彭定志，熊立华，郭生练，等. MODIS 在水文水资源中的应用与展望.水科学进展，2004，15(5)：683-688.
[37]张利平，陈小凤，赵志鹏，等. 气候变化对水文水资源影响的研究进展.地理科学进展，2008，27(3)：60-67.
[38]张学文，杨青，杨莲梅. 大气水文学初探.水科学进展，2004，15(5)：679-682.
[39]中国水利水电科学研究院科学技术委员会.浅论建设节水防污型社会的科学基础.中国水利水电科学研究院学报，2004，2（4)：237-241
[40]庞忠和. 同位素水文学领域的国际科研合作与发展援助[J]. 水文地质工程地质，2004，(2)：114-116.

3.2 防洪抗旱减灾

防洪抗旱减灾的科技发展趋向

1 概述

洪水与干旱是全球影响范围最广、对人类的生存与发展危害最为显著的自然灾害。随着灾害信息管理系统的发展，对全球灾害进行分析评价已经成为可能。图 1 显示了来自国际组织的统计数据，1975－2005 年期间全世界受到自然灾害影响的人口中，有 50.8％缘于洪水，33.1%缘于干旱（ADRC, 2006）。

水旱灾害具有自然与社会的双重属性（周魁一等，1997）。水旱灾害的风险特性不仅取决于特定的自然地理环境与极端天气形势的出现，而且与人类活动密切相关。随着经济社会的发展，一方面，在洪水与干旱风险区中，人口与资产密度不断提高及其脆弱性日益显现会导致灾害损失的增长，而无节制与盲目的开发行为还会导致生态环境的破坏，人为加剧水旱灾害的风险；另一方面，洪水与干旱具有一定的可调控性，这是水旱灾害区别于地震、火山、飓风、海啸等其它自然灾害的重要特点。防御与减轻水旱灾害历来是水利建设的重要任务。然而水利工程体系需做到布局合理、维护良好与调度运用科学，否则水利也会转变为水害。

在 20 世纪，尤其是二战结束后的半个多世纪中，社会文明与科技进步，为人口增长、经济繁荣突破了种种的制约，使得世界人口爆炸式地从 16 亿增长到了 60 亿，世界城市人口占总人口的比值奇迹般地从 10%上升到了 50%。为了满足生存、发展与保障安全的需求，人类借助工业革命以来蓬勃发展的水利科学知识与工程技术手段，大规模兴库筑堤，修闸建泵，整治河道，发展水文测报与洪水预报调度系统，形成了前所未有的防洪工程体系；同时，建设大型灌区，开采地下水源，发展喷灌、滴灌，直至跨流域调水引水等等，亦形成了前所未有的灌溉与城乡供水体系；进而借助新技术的发展，建立起了相应的监控、调度系统，空前地提高了调控洪水、抗御干旱，除害兴利的能力，为 20 世纪人类社会的繁荣与发展，发挥了重要的支撑与保障作用。

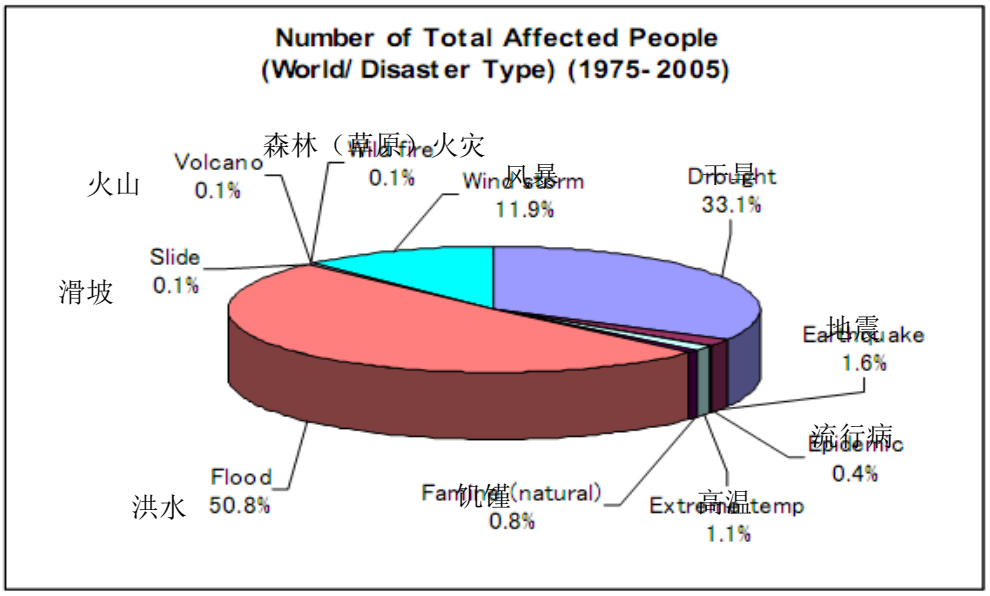


图 1 全球受自然灾害影响人口分灾种所占百分比（1975－2005）

20 世纪的防洪抗旱是以工程建设为主要手段的。大规模防洪抗旱工程体系的建设，带动了水利科技的蓬勃发展。主要江河流域水旱灾害特性与发生规律，大江大河整治与治水方略，流域规划理论，大型水利枢纽工程的设计计算方法、施工规范与建造技术，洪水预报调度的理论与技术等成为这个时期有代表性的重大科技问题。支撑水利科技发展的基础学科以自然科学中的理、工科为主，并显现出学科越分越细的特点(董哲仁等，2006)。

20 世纪下半叶以来，人类治水的理念逐步发生了重大的改变。首先，人类社会突飞猛进的发展对利用自然、改造自然提出了更高的需求；同时，随着技术经济实力的增强，人类逐渐从敬畏自然转向征服自然，一度相信“人定胜天”、誓让“山山水水听安排”。随后，生态环境的恶化与大自然的报复引起人类社会的反思，意识到人类不可能也不应该主宰自然、征服自然，而是应该尊重自然，寻求与自然和谐的发展道路，在谋求自身发展的同时，注重生态环境的保护，并对子孙后代负起责任，从而形成了可持续发展的理念。但是，在追求人与自然和谐相处的实践中，从理想到现实，人类又经历了一个认识上的波折，问题再次回归到了如何坚持以人为本，如何明确人类的责任，如何建立起人与自然之间良性互动的关系，如何既利用自然又降低灾害的风险，如何公正处理人类社会内部分享自然资源与分担灾害风险的矛盾等（程晓陶，2002）。

当代社会中，加强水旱灾害管理成为各国治水方略调整的共同趋向。20 世纪最后 10 年联合国发起的“国际减灾十年”活动及新世纪以来后续的“国际减灾战略”行动，充分说明在社会经济空前发展的时代，防灾、减灾问题不仅引起了人类普遍的重视，而且在治水的模

式上，也需要做出战略性的调整。面对近十余年来全球出现的水旱灾害并重的局面，联合国、各相关国际组织、各国政府与非政府组织机构已经积极行动起来，在推动水旱灾害管理的研究与治水战略的转移、防灾意识的普及、减灾体系的完善，新技术在防灾减灾领域中的应用与推广，以及促进国际社会的交流与合作等方面发挥了积极的作用，促使世界各国从治水的理念、方略、管理体制、运作机制到技术手段及对策措施等，都在不断完善与深化(John Porter et al, 2006；Philip Buckle，2007)。

2000 年 3 月在海牙召开的第二次世界水大会上发表了部长宣言《21 世纪的水安全》，确定将“风险管理”（针对洪水、干旱、污染及其它与水相关的灾害）列为 7 个挑战领域之一。在 2000 年 8 月联合国组织启动的《世界水的评价计划》中，“风险管理”也被列为重点领域之一。2002 年关于可持续发展的世界政府首脑峰会（WSSD）的执行计划认识到，为了减轻重大水旱灾害的影响，需要有计划地给予援助。而在 2003 年 3 月第三次世界水大会上，部长宣言的题目就定为《减灾与风险管理》。宣言指出：“水旱灾害的影响日趋严重，表明需要采取综合的途径，包括加强工程措施，如水库与堤防的建设；与非工程措施，如土地利用管理，灾害预报与警报系统与国家风险管理体系……”，“……为了减轻灾害损失，国际社会通过共享与交流资料、信息、知识与经验……，加强科学家、水管理者与利害相关者之间的合作，以减少脆弱性……”(Erich J. Plate, 2006)。

目前，全球已经加强了共同应对水旱灾害风险的努力。如世界气象组织（WMO）与全球水伙伴(GWP)2001 年 8 月启动了一个《洪水管理联合计划》(the Associated Programme on Flood Management），目前已进入项目的第二个实施阶段(WMO & GWP, 2003)。联合国科教文组织（UNESCO）为了响应全球加强风险管理的行动，经过多年的积极筹办，2006 年成立了国际水灾害与风险管理中心，该中心设在日本的土木研究所，积极推进国际间的交流与合作。

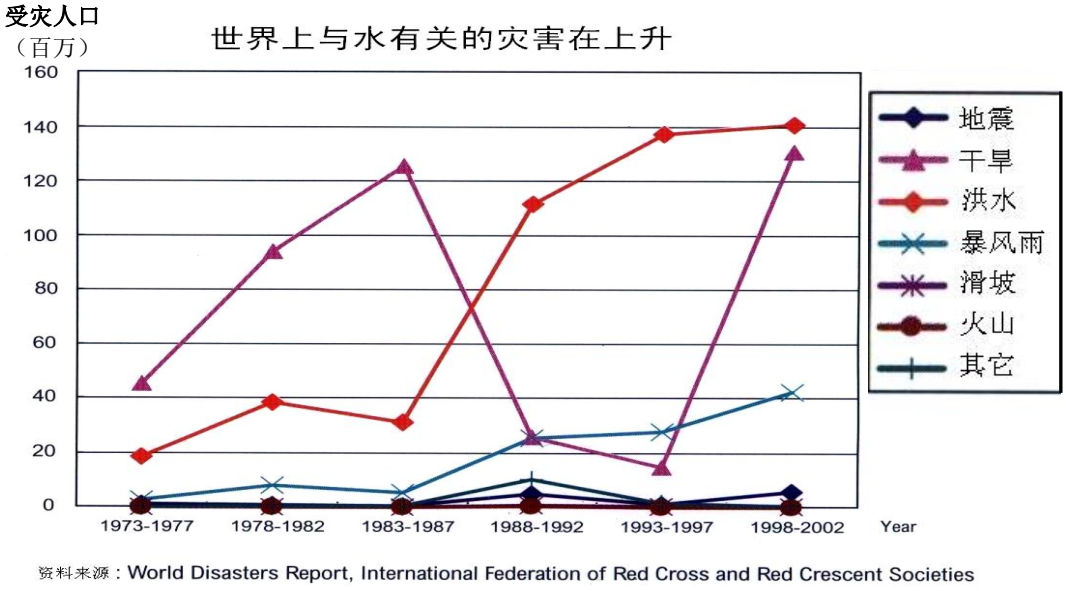
2000 年以来，我国水利部与国家防汛抗旱总指挥部办公室在科学发展观指导下，提出了促进人与自然和谐的治水新思路（汪恕成，2001）。2003 年开始，积极推动我国的防汛抗旱工作“从控制洪水向洪水管理转变”、“从单一抗旱向全面抗旱转变”，以为经济社会的快速发展提供支撑与保障（鄂竟平，2004），在防洪抗旱中以人为本，适度承受风险与洪水资源化的理念与思路逐步清晰。实践证明，“两个转变”符合科学发展观的要求，适应我国经济社会发展的新形势，是对我国防汛抗旱方略的总结和提升，必须在实践中进一步坚持并不断丰富和发展（陈雷，2007）。近年来，水利部将解决好直接关系民生的水利问题放在更加突出的位置，强调要以保障人民群众生命安全、生活条件、生产发展、生态改善等基本的水利需求为重点，突出解决好人民群众最关心、最直接、最现实的水利问题，形成保障民生、服务

民生、改善民生的水利发展格局，让广大人民群众共享水利发展成果（陈雷，2008）。在近期水利工作的安排中，认真做好防汛抗旱工作、加快实施病险水库除险加固、全力抓好农村饮水安全、继续加强重点工程建设、大力加强农田水利基础设施建设、全面推进水资源节约保护、积极推进水土保持工作、进一步加快农村水电建设步伐等被列为突出的重点。这些对于防洪抗旱减灾领域的科技进步都构成了新的压力与需求。

2 防洪抗旱减灾形势的变化趋向与科技发展需求

2.1 世纪之交全球防洪抗旱形势日趋严峻

来自国际组织不完全的统计资料表明，20 世纪 90 年代后期以来，世界进入了一个水旱灾害频发并重的阶段，与水相关的自然灾害，包括洪水、干旱与暴风雨，是世界上对人类影



资料来源：World Disasters Report, International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies

图 2 世界自然灾害的变化趋向

响最为显著的自然灾害（图 2, IFRC & RCS, 2003）。

从国际红十字联盟与红新月协会公布的全球受自然灾害影响的人口变化可以看出，20 世纪 70 年代至 80 年代中期，世界上旱灾的影响最为严重；80 年代后期至 90 年代初期，旱灾的影响明显下降，水灾的影响急速上升；90 年代后期至 2002 年，不仅水灾的影响居高不下，而且旱灾的影响再攀新高。同时，暴风雨的影响也逐渐加重。水旱灾害频发并重现象已经引起了世界各国的高度重视。

2.2 水旱灾害损失增长的成因分析

尽管 20 世纪中，人类修建了规模空前的防洪抗旱工程体系，但是，即使在发达国家，水旱灾害损失的绝对值依然呈现上升的趋势。水旱灾损失的增长不仅与气候变化及其伴随的极

端事件频发密切相关，而更重要的原因是社会面对水旱灾害的脆弱性日趋显现。

自 19 世纪末期以来，全球气温处于上升的总趋势中。大量观测资料表明，在此背景下 ，一方面局部地区因高强度暴雨袭击引发稀遇洪水的事件有明显增加的趋势；另一方面，受干旱影响的范围在扩展，一些降水量超过 1000mm 的地区，近年来也频频发出干旱的警报（Cheng Xiaotao, 2006）。

气候变化对未来的影响目前正在成为世界各国关注的热点。研究的内容从对区域水资源平均可用水量的长期变化趋向，已逐步扩展为对洪水与干旱等极端事件的影响分析；从对典型小区域案例研究与评价，延伸为气候变化对大陆整体未来水旱风险分布规律的情景分析。Bernhard Lehner 等人(2006)运用全球整体水模型 WaterGAP 对欧洲大陆的研究成果表明，在各种提议的气候变化情景下，北欧与欧州的东北部将更加易于遭受洪水的袭扰，而在欧洲的南部和东南部，干旱将发生得更为频繁。在变化最显著的地区，目前百年一遇的洪水与干旱，到 2070 年前后，将变为 10～50 年一遇的事件。

从社会面对水旱灾害的脆弱性来看，在人口激增、快速城市化、工业化、信息化、老龄化等背景下，社会正常生产、生活对生命线系统（供水、供气、供电、交通、通讯、网络等）的依赖性日益增加，一旦遭遇水旱灾害，易于引发次生灾害，构成灾害链，影响范围远远超出受灾范围，间接损失甚至超过直接损失。社会的脆弱性还表现为人们面临灾难时的应急能力。由于水灾风险意识淡漠，平时缺少必要的准备，一旦遭受稀遇的水旱灾害，往往难以采取适当的自保互救措施。

社会的水灾脆弱性已成为水旱灾害管理研究的重要课题。图 3、图 4 表明，美国 1937 年大洪水，直接经济损失仅 50 多亿美元，相对损失为 0.48%；1993 年密西西比河流域大洪水，直接经济损失超过 160 亿美元，但相对值降为 0.26% (Eugene Z. Stakhiv,2006)。值得注意的是，2005 年袭击美国的卡特里那飓风达到了罕见的 5 级，新奥尔良市因堤防决口，水灾损失超过 250 亿美元，死亡 1209 人(Hemant Shah, 2005)。事实表明，一座现代化大都市遭受灭顶之灾，其经济损失甚至比流域性洪水的损失还要大。

日本自 1960 年以来，连续实施了 9 个治山治水计划，逐步形成了高标准的防洪工程体系，水灾受淹面积不断减少，有效抑制了水灾损失上升的趋势。但是近十年来，水灾损失再度抬头，除受极端气象事件频发的影响之外，主要原因是社会的水灾脆弱性在加速增长（图 5）。

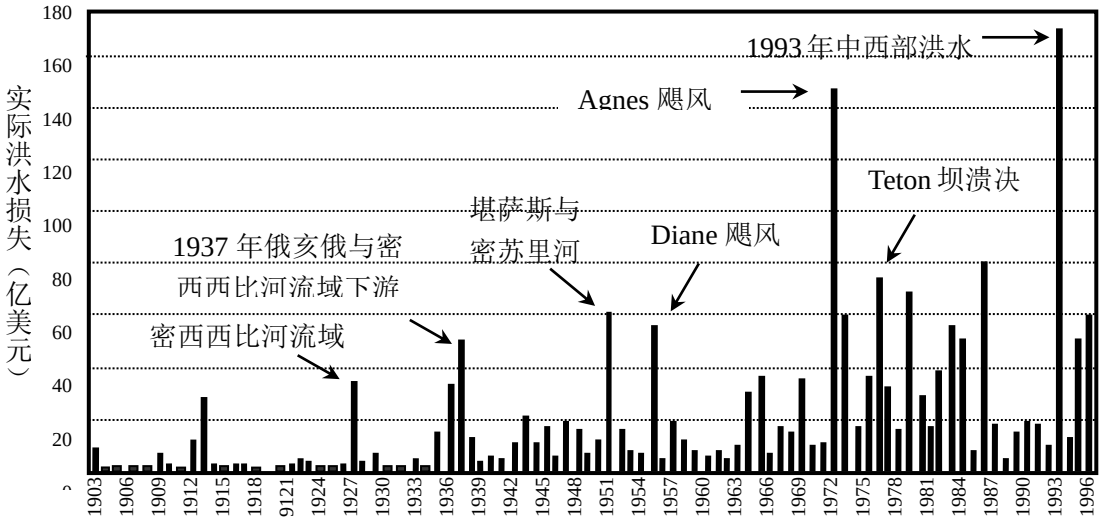


图 3 美国水灾损失的变化趋向

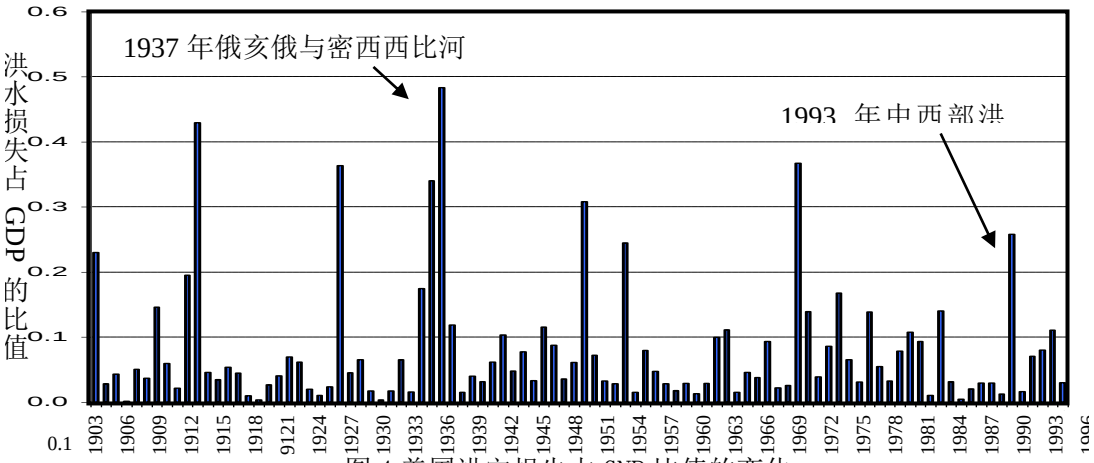


图 4 美国洪灾损失占 GNP 比值的变化

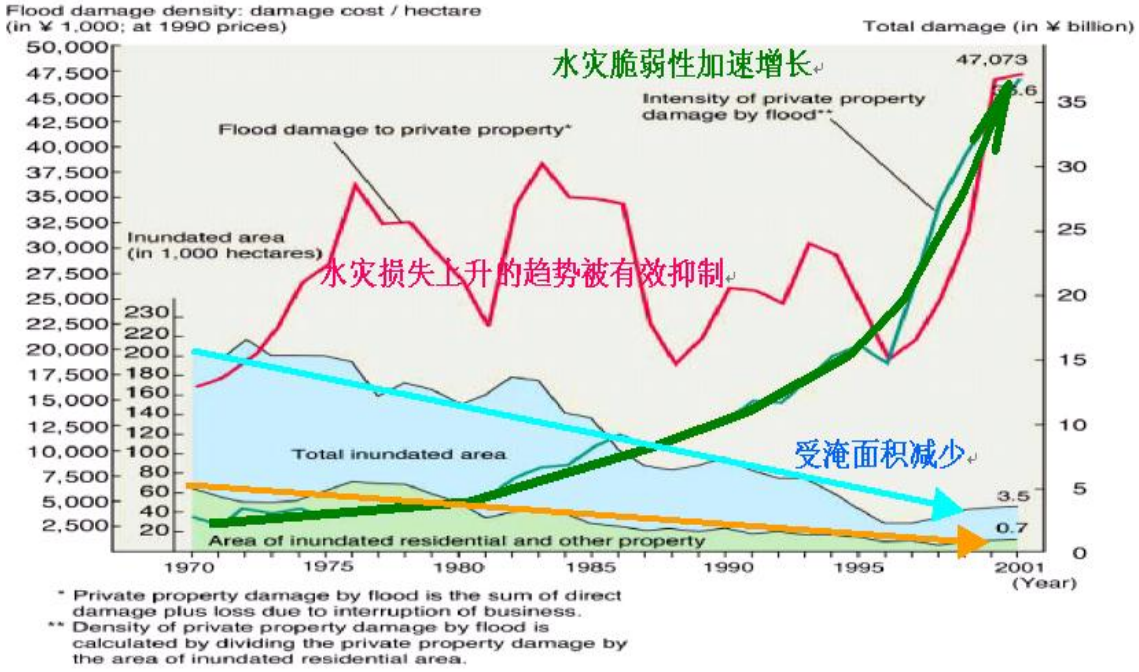


图 5 日本水灾损失与成因变化趋势

从社会面对水旱灾害的脆弱性来看，在人口激增、快速城市化、工业化、信息化、老龄化等背景下，社会正常生产、生活对生命线系统（供水、供气、供电、交通、通讯、网络等）的依赖性日益增加，一旦遭遇水旱灾害，易于引发次生灾害，构成灾害链，影响范围远远超出受灾范围，间接损失甚至超过直接损失。社会的脆弱性还表现为人们面临灾难时的应急能力。由于水灾风险意识淡漠，平时缺少必要的准备，一旦遭受稀遇的水旱灾害，往往难以采取适当的自保互救措施。

在发展中国家，贫困也是导致水灾风险增加的基本原因之一。在快速城市化的进程中，大量农村贫困人口涌入沿江沿海的城市。他们居住的环境往往风险较大，而自身的承灾能力又相对较低。美国国外灾害救援办公室公布的数据表明,在 1990-2001 年间，全球发生了与水相关的自然灾害 2200 起,其中半数为洪水,11%为干旱。这些灾害，35%发生在亚洲，29%在非洲，20%在美洲，13%在欧洲，其余在大洋洲。

我国 1950 年以来尽管进行了大规模的防洪抗旱体系建设，然而统计资料显示，水旱灾的成灾面积并无显著减少的趋势（图 6）。这一方面与气候的波动有关，20 世纪 50 年代至 60 年代初与 90 年代，是全国降水量总体偏多的两个时期；而新世纪以来，受干旱影响的范围显著增大，同时，受高强度暴雨袭击的局部区域依然频繁。随着人口增加、城镇扩展与粮食安全保障压力的增大,许多湖泊湿地陆续被围垦,受干旱影响的荒地被开垦成粮田,也是原因之一。

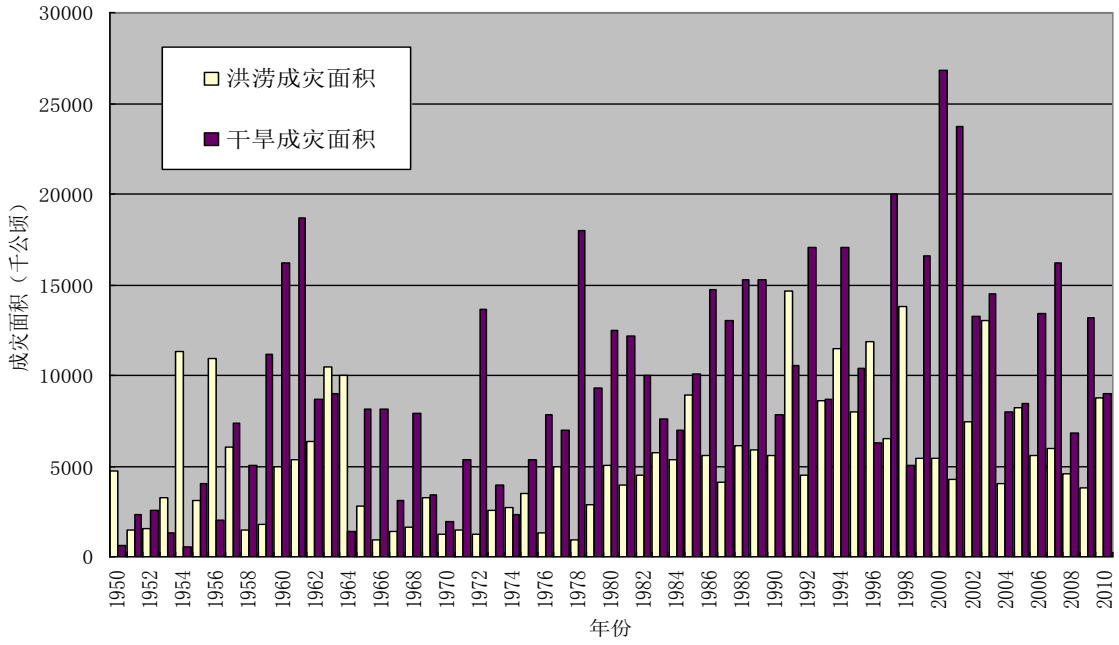


图 6 我国水旱灾害成灾面积变化趋向

一个更为不可忽视的因素,是我国农田水利基本建设投入的严重不足。在农村青壮劳力大

量进城务工的情况下,我国长期以来以农民义务投工投劳进行农田水利及中小河流水利基础设施建设与维护的模式已经难以为继。近年来,虽然各级政府逐年增大了农村水利的投资，但远不及农民义务投工投劳折算资金的量级。结果导致我国现有水库及配套灌区水利设施病险严重，大型灌区骨干工程损坏率近 40%，中小型灌区干支渠完好率只有 50%左右(赵雪、唐婷，2011)。在现行模式下，许多地方中小河流与农田水利基础设施欠账不是在缩小而是在扩大!

统计数据表明，我国洪涝灾害直接经济损失也呈现出了与美国类似的特点（图 7）。2010 年我国洪涝灾害直接经济损失高达 3745 亿元，其中，农林牧渔业损失占 35.3%，而其他近 2/3 的损失是由工业交通运输业、水毁工程等其他类别构成的。全国县级以上受淹城市超过了 250 座，其中大多为暴雨内涝造成。因灾死亡人口中，92%由山洪、滑坡、泥石流造成（图 8）。2010 年我国水资源相对充沛的西南 5 省遭遇了秋冬春三季连旱的沉重打击；2011 年 5 月，已是入汛时节，长江中下游区域仍经受着持续干旱无雨的困苦煎熬。事实表明，在经济社会发展的新形势下，我国水旱灾害风险的分布与构成已经发生了显著的变化。

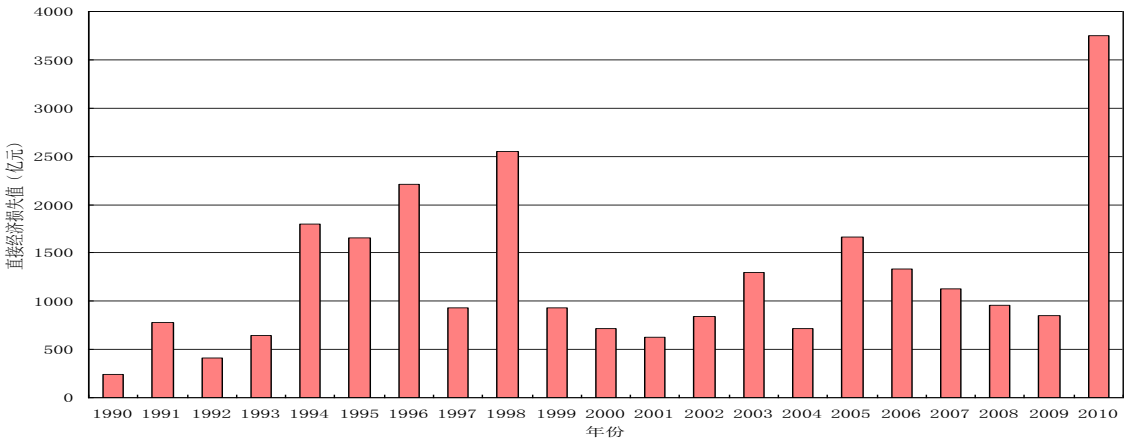


图 7 我国洪涝灾害直接经济损失（1990-2010）

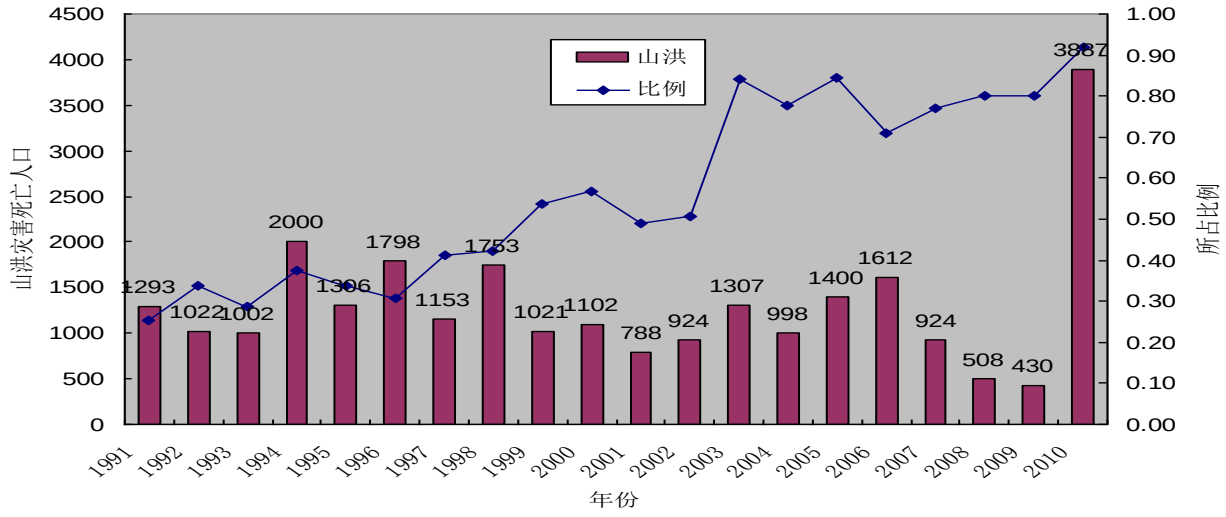


图 8 山洪灾害人员死亡人数与比例的变化（1991-2010）

2.3 新世纪中我国防洪抗旱形势的基本估计

事实证明，自然灾害具有“不可避免性”（刘树坤等，1993）。在现代社会中，水旱灾害问题不仅依然存在，而且表现得更为复杂，同时社会发展的安全保障需求会越来越高。我国作为快速发展中的人口大国，区域之间、人与自然之间基于水的脆弱平衡必将受到更大的冲击，支撑与保障全面建成小康社会，必将面临大量的治水新问题。防治水旱灾害是长期而艰巨的任务，并将面临一系列两难的困境，对此必须有清醒的估计。

（1）至本世纪中叶，我国人口预计将从 13 亿增长到 15 亿～16 亿，对粮食与土地的需求会进一步增大，利用洪水高风险区域土地不可避免，人与水争地以及人与生态系统争水的矛盾将更加突出，发展灌溉农业面临更多压力与挑战。

（2） 到本世纪中叶，我国城市人口占总人口的比重可能由世纪初的 37% 上升到 60%以上。城市中小河流的整治与现代社会中“城市型水患”的防治将日益重要，治理难度与所需的投入将大为增加；保障城市供水的要求进一步提高，城市水源地建设与城市周边地区经济发展的矛盾加剧。

（3）江河流域自然调蓄洪水与河道行洪的能力下降，洪水期同流量水位抬高，小流量高水位的现象更加频繁，堤防被迫不断加高，洪水风险有增大的趋势；干旱期由于江河水量减少，又不得不开发更多的水源。如何摆脱治水中恶性循环的窘境，建立人与自然之间良性互动的新型关系成为迫切的需要。

（4）现代社会对供水、供电、供气、交通、通信等网络系统的依赖性越来越大，一旦遭受水旱灾害，影响的范围将远远超出实际受灾的范围，间接经济损失甚至可能超出直接经济损失，灾后重建负担明显加重。

（5）随着经济的发展，人民生活水平的提高，面对重大水旱灾害，人民将不仅要求确保生命安全，最大限度减少损失，而且要求大灾之后能够基本维持或尽快恢复正常的生产、生活秩序，全社会的防洪抗旱安全保障需求不断提高，防洪抗旱安全保障的难度大为增加。

（6）21 世纪初期，我国以水灾害加剧、水资源短缺、水环境恶化为标志的水危机仍将趋于激化；人与自然之间、区域与区域之间基于洪水风险的利害关系更为敏感，价值观念的差异与利害关系的冲突使得不同治水方案、以及水利工程体系调度运用方案之间的矛盾更加难以协调。

（7）受全球气候变化的影响，降水的时空分布会显得更不均匀，极端异常水情、旱情可能出现得更为频繁，使得已有防洪抗旱工程体系难以达到规划建设的预期标准，使得水利工程体系的有效运用变得更加困难。

（8）随着社会经济发展与综合国力的增强，我国防洪抗旱体系建设的投入能力会相应增强。通过加强管理，有望提高全社会对水旱灾害的抗御能力、承受能力、应急反应与恢复重建能力。

徐乾清院士(2007)指出“防洪减灾的本质属性是在人类与洪水相互竞争生存与发展空间的矛盾对立中寻求平衡点，并以此为中心建立防洪减灾对策和有效措施”。为了维护、修复或重构区域之间、人与自然之间基于水的平衡，支撑与保障全面、协调、可持续的发展，新世纪中防洪抗旱减灾工作必将极大地依赖科技与管理的进步。现代水利的发展既要遵循自然规律，也要遵循经济社会的发展规律。尽管今天由于快速发展我们遭遇到的治水新问题，一些发达国家在他们快速发展的阶段也曾不同程度地遭遇过，但是由于国情的差异，我们既不可能直接照搬他国的成功经验，也不能简单超前引进发达国家最新的治水理念，因此，我国现代水利的发展，必须从自身国情出发，走自主创新之路。

2.4 防洪抗旱减灾领域的科技发展需求与趋向

新世纪中，加强水旱灾害管理已成为国际社会治水方略调整的必然趋向。一些发达国家，为了解决可持续发展所面临的日益复杂的水问题，正在深入研究如何通过推进流域综合管理与风险管理来调整与完善治水理念，将法律、行政、经济、工程、技术、教育等手段有机地结合起来，大力促进信息共享与公众参与，为积极应对全球变化带来的挑战与压力建立更强有力的保障体系；而发展中国家，为了应对经济社会快速发展阶段日趋严重的水资源短缺、水环境恶化与水灾损失加剧等问题，也在积极探讨并实施向洪水与干旱管理的战略性转变，不断加强体制、机制与能力的建设，以期在尽力抑制水旱灾害损失增长态势的同时，有效发挥洪水的资源效益与环境效益，为支撑经济社会的快速、协调发展创造必不可少的条件。

在经济社会快速发展的今天，水旱灾害管理涉及到的区域之间、人与自然之间基于水的利害关系日趋复杂。灾害风险评估与管理已“成为灾害科学、地球科学的发展方向、重点领域和前沿课题”，“成为灾害研究的一种新视角和创新的灾害管理策略及途径”（张继权等，2007）。加强水旱灾害管理，不仅需要运用众多学科的相关成果，需要具有不同学科背景的科学家、工程师与各级管理者密切合作，而且需要采取学科交叉、综合的研究模式，大力加强水旱灾害管理领域自身的学科建设。

水旱灾害管理的研究涉及到灾害学、防灾学与防灾减灾技术三个层次。灾害学的研究，以基础科学研究为主，也涉及到应用科学，并需要应用技术的支持；防灾学的研究，以综合性的应用科学为主，既需要基础科学的指导，也需要各种应用技术的支持；防灾减灾技术的发展，不仅依托于基础科学与应用科学的进步，而且需要大量融合相关领域的先进技术。

就水旱灾害来说，灾害学研究的是水旱灾害时空分布与演变的规律，水旱灾害孕育、发生、与人类社会交互作用的机理及其可能诱发的灾害系列，水旱灾害的分级标准及影响评价，水旱灾害的信息管理、风险分析与区划等；防灾学研究的是与社会经济发展需求相适应的减灾体系、管理模式、运作机制、治水方略与对策措施等，因地制宜制定灾前、灾中、灾后防灾减灾适宜的对策措施，以及相关的法规政策等；防灾技术研究的是除害兴利、增强人类理性调控洪水、抗御干旱与增强自适应能力的新技术、新设备、新材料、新工艺及其适用条件等等。其中，水情旱情的监测、预报、预警、灾情评估，以及防洪工程体系的隐患监测、安全评价、除险加固、风险评价与决策支持等方面是高新技术运用、发展十分活跃的领域。

水旱灾害的管理涉及到人与自然两大类因素，要求行政管理人员、专业技术人员与社会公众有更好的沟通与合作；其根本的问题是在治水方面如何为具有不同价值观念与利害关系相互冲突的人们寻求到和解、和谐与合作的基础，其成败的关键在于把握适度；其基本的特点是综合运用法律、行政、经济、科技、教育等手段，推动、实施有利于全局和长远利益的工程措施，理性增强对洪水与干旱的调控能力与承受能力，形成更为完善的防洪抗旱安全保障体系，以达到防洪抗旱减灾、促进人与自然的和谐相处，保障社会经济可持续发展的目的。

21 世纪中，防洪抗旱减灾领域的科技发展必然体现出两大趋向：一是自然科学中相关学科的深入与综合；二是自然科学与社会科学（法学、经济学、社会学、管理学、心理学等）在交叉领域的开拓与交融。不同国家不同区域，自然地理条件不同，社会经济处于不同的发展阶段，洪水与干旱灾害的风险特性必然会有显著的差异。因此，在治水方略的制定与技术方案的选择上，必须因地制宜，既要遵循自然规律，也要顺应经济社会的发展规律（图 9）。

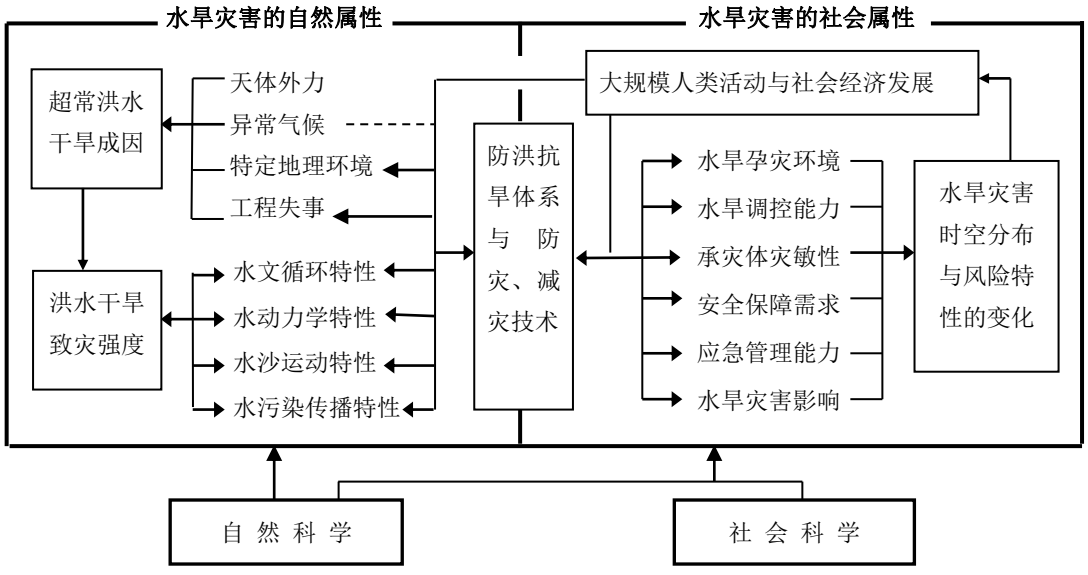


图 9 水旱灾害管理领域学科建设的相互关系

3 防洪抗旱减灾领域的学科建设与研究进展

3.1 防洪抗旱减灾领域灾害学的研究进展

所谓灾害学，是将加害与被害的各种因素及其状态作为现象，研究灾害的成因、变化及其可能导致的各种影响，探索灾害风险构成与演变的规律性。防洪抗旱减灾领域灾害学的研究，涉及到洪水与干旱的基本特性、水旱灾害的时空分布与演变的规律，水旱灾害孕育、发生、与人类社会交互作用的机理及其与相关灾害间相互诱发的灾害系列，水旱灾害的分级标准及影响评价，水旱灾害的信息管理、风险分析与区划等。

3.1.1 深化对洪水基本特性的认识

自然灾害的发生一般有孕育、暴发、漫延、衰减与平息的过程，洪水也不例外 。在此过程中，还可能诱发出一系列的次生灾害，构成灾害链。一般认为，灾害系统由孕灾环境、致灾因子、承灾体与防灾力构成。孕灾环境是指灾害孕育与产生的外部环境条件，包括自然环境和社会环境，它决定了灾害事件的类型与规模、承灾体可能面对的危险性，以及应对风险可能受到的制约。致灾因子指各种致灾事件导致灾害损失的那些特征指标，如降雨强度、风暴潮水位、洪水的淹没水深、淹没历时、土壤墒情等；承灾体指承受灾害的主体，包括各种物质、非物质资源以及人类本身；防灾力为降低灾害损失所采取的工程与非工程措施，它反映了人类应对灾害风险的能力（程晓陶，2009）。

洪水是自然界中水循环的一种基本现象，也是维持自然界生态系统平衡的环境要素。我国受季风影响的广大地区，每年汛期的几场暴雨洪水往往是区域淡水资源的主要补给形式。随着人口的增长，天然调蓄洪水的场所逐步被开发利用，一旦洪水泛滥，便会造成严重的生命财产损失。因此，人们直接感受到的往往是其灾害特性。在水土资源的开发利用与提高安全保障标准的过程中，人与自然之间的矛盾不断激化。为了构建人与自然和谐的发展模式，必须深刻领会洪水的利害两重性。通过近年来一些基础与战略规划项目的研究，我们对洪水的灾害特性、资源特性与环境特性，以及三者之间复杂的交互影响与利害转化关系有了更加全面而深入的认识（程晓陶、吴玉成、王艳艳等，2004；John. W. Porter, 程晓陶等，2006），参见图 10。

值得注意的是，洪水的利害两重性与其转换关系因区域、因洪水规模量级而异。不同地理气候与经济社会条件的区域，洪水表现出的利害关系会有显著的不同，而同一区域遭受不同规模的洪水时，洪水的利害转换关系也有明显的差异。因此，人类治水活动的成败，关键是如何顺应自然，遵循规律，因势利导，因地制宜，趋利避害，化害为利，形成人与自然之

间、区域与区域之间的良性互动，逐步提高安全保障水平，并有利于支撑可持续的发展。

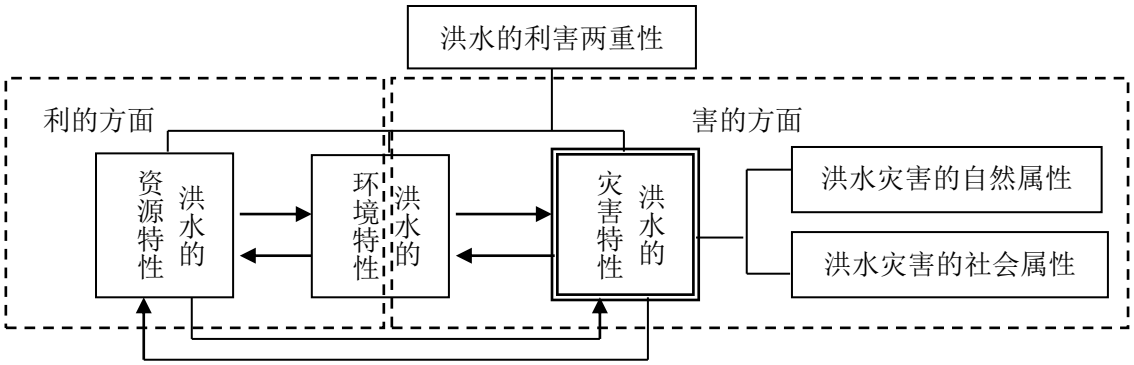


图 10 洪水的基本特性及转换关系

3.1.2 全面探讨洪水的风险特性

洪水风险是 20 世纪 80 年代起，才逐步引入我国的概念。由于风险存在于事件发展过程中的各个环节，而且表现形式各异，不同学科专家从不同视角给出了用途不一的定义与评估方法。水力学家强调了洪水危险性空间分布的不均匀性，水文学家看重的是洪水发生时间与规模的不确定性；从社会经济学的角度看，风险(risk)是损失的可能性，而从工程安全的角度看，风险是各种工程事故发生的概率与可能造成的恶果。这些理念在防洪规划、洪水风险图的绘制、流域洪水风险评价与损失评估系统的研发，以及工程安全评价等项目中已得到广泛的应用。

近年来风险三角形的概念(Crichton, 1999)也引入了我国。如图 11 所示，该方法认为风险取决于三个要素——危险性(hazard)，承灾体受灾可能性(exposure)和易损性(vulnerability)。任何一条边伸长，三角形面积增大，都意味着风险增加，反之则风险减小。这一方法适用于评估特定承灾体的洪水风险，而且可以分别针对风险的三个要素制定各种减灾对策。中国洪水管理战略研究的框架设计中也包含了这三个方面的内容（John Porter, Cheng Xiaotao et al，2006)。

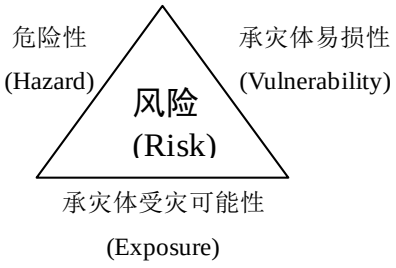


图 11 风险三角形

然而，从宏观研究的角度来看，对洪水风险的探讨，应有助于寻求一种更加合理的治水理念，一种更为有效的治水模式。洪水事件不仅会造成损失与伤害，也同时带来获利的机遇；而局部地区一味消除风险，又难免有以邻为壑之嫌。洪水风险研究的意义，实质上是探讨如

何更为合理地协调处理好人与洪水之间、以及人与人之间基于洪水风险的利害关系，以利于解决沿袭传统治水理念与方法已经难以处理的治水新问题。

因此，洪水风险的研究，不仅要考虑洪水及其可能造成的损失，而且要评估其在政治、经济、社会、生态与环境等各个方面可能带来的正负两方面的影响。要基于洪水风险的分析与评价制定减灾对策，则需对风险进行分类研究，例如积极风险与消极风险、短期风险与长期风险、可承受的风险与不可承受的风险、固有风险与附加风险、内部风险与外部风险、可控制的风险与不可控制的风险、可规避的风险与不可规避的风险等（程晓陶，2001）。

在经济社会发展与下垫面条件变化的情况下，水旱灾害的风险特性也会发生相应的变化。为此须强调：防汛抗旱应急预案是实施应急管理的重要依据，但是应急预案的科学编制只有建立在灾害风险分析与评估的基础上，才可能增强其针对性与可操作性。合理把握灾害预警发布与应急响应的范围、等级、时机，是体现应急管理水平高低的主要方面。实践证明，当灾害降临时，基于风险的判断，及时组织危险区中的群众避难迁安，是减轻人员伤亡的有力措施。但并不是说，人员转移的越早、越多、范围越大，就越体现了“以人为本”。显然，要想在水旱灾害的管理中切实做到把握适度，就必须更加重视灾害的风险分析，而当代科技的进步，为灾害的风险分析提供了新的、不断增强的手段。

在全球气候温暖化与经济社会快速发展的背景下，流域洪水风险特性已经且必将发生显著的变化。在日趋复杂的情况下，流域防洪体系的规划与建设及利害关系的协调，往往需要较长的时间，系统建成后，更是要长期发挥其作用。因此，未来洪水风险长期演变趋向的预测、评估已成为重要的研究方向。2002－2004 年，英国率先将未来预见的理念运用于未来洪水风险预见的研究，开展了“未来洪水及海岸侵蚀防治”的研究项目，依据未来气候变化和社会经济发展程度，对英国未来 30～100 年内所面临的洪水与海岸侵蚀风险做出了情景分析。研究数据表明，由于海平面上升，洪水极端事件发生几率增大，加之城市扩张、人口增长、经济发展模式的调整与规模的扩展，社会面对水灾的脆弱性增大，考虑到各种不确定性，未来英国面临洪水高风险的人数可能会上升 1.5～2 倍，年平均水灾损失可能从如今的 10 亿英镑上升到 15 亿～270 亿英镑。该项成果对于英国治水理念的调整与治水方略的转变起到了重要的推动作用（Evans E.P. etc, 2004a, 2004b）。

2006 年底科技部中英科技合作“流域洪水风险情景分析技术研究”正式启动。该项目以我国太湖城市化进程最为显著、对气候变化较为敏感的太湖流域为对象，项目计划分三个阶段实施。第一阶段以中方向英方学习为主，通过培训与交流，引进英方未来洪水预见研究中采用的情景分析技术，针对我国太湖流域的实际情况与发展需求，对方法进行必要的改进，

形成有实用价值的情景分析模型，设立了气候与社会经济不同发展模式下的未来情景，同时定性地建立起太湖流域未来洪水风险变化的动因响应关系，开发了未来洪水风险情景分析的水文、水力学、水灾损失评估、工程可靠性评估等一系列模型，形成了基于 GIS 的洪水风险情景分析系统（图 12）。

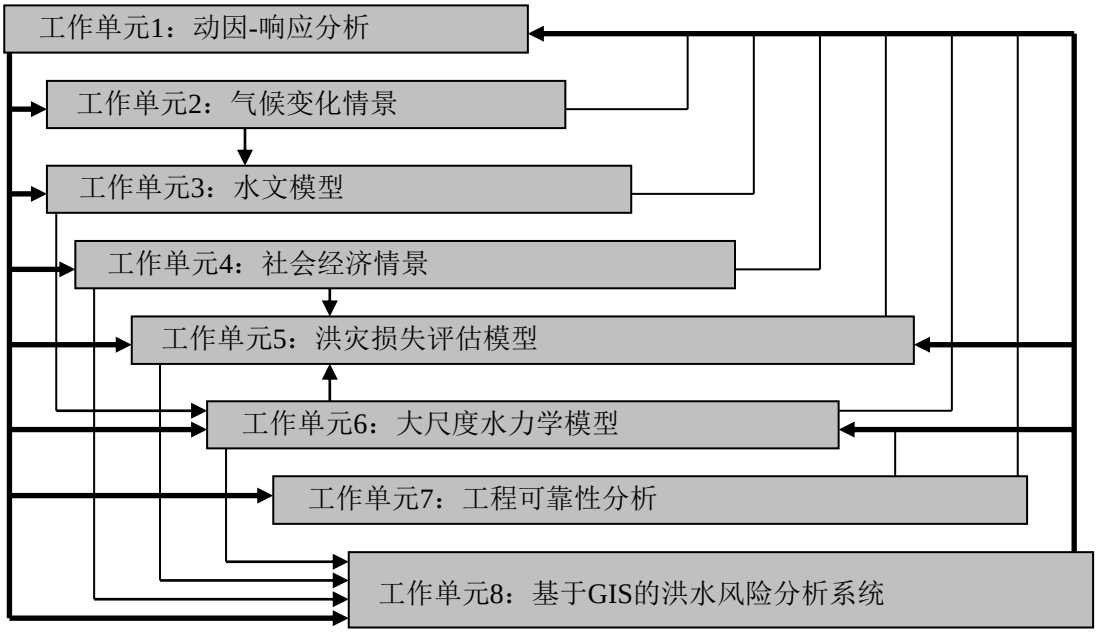


图 12 洪水风险情景分析系统各工作单元及相互关系

第二阶段进一步完善未来洪水风险的情景分析等一系列模型技术，建立了基于 GIS 的长时段、大尺度洪水风险分析系统，并利用该系统对太湖流域未来洪水风险变化的动因响应关系进行量化的分析，根据量化结果更新动因响应的定性分析。第三阶段在未来洪水风险情景分析的基础上，对现行治水方略的可持续性进行评价并提出相关的政策建议（G.L. Harvey, C.R. Thorne, X. Cheng, etc, 2009）。研究成果表明，在不同经济发展模式下，至 2050 年太湖流域的 GDP 总量比基准年的 2005 年要增长 5.4～9.5 倍。单纯考虑经济增长影响，至 2050 年，流域内年平均水灾风险将上升至 47.67 亿～66.88 亿元，是基准年的 3.9～5.4 倍。在 30 天雨量增加 5%的情景下，按国家经济发展规划模式测算，2050 年流域内年平均水灾风险将上升至 132.33 亿元，约为基准年的 10.7 倍，百年一遇水灾损失将上升到 1403.7 亿元。但是，如果按照国际 PRECIS 生成的不同气候变化情景考虑，流域年平均风险增长可能超过 20 倍（与英国的情景分析结果达到同等量级）。研究表明，气候变化与城镇化对洪水风险的影响具有显著的不同（图 13）。

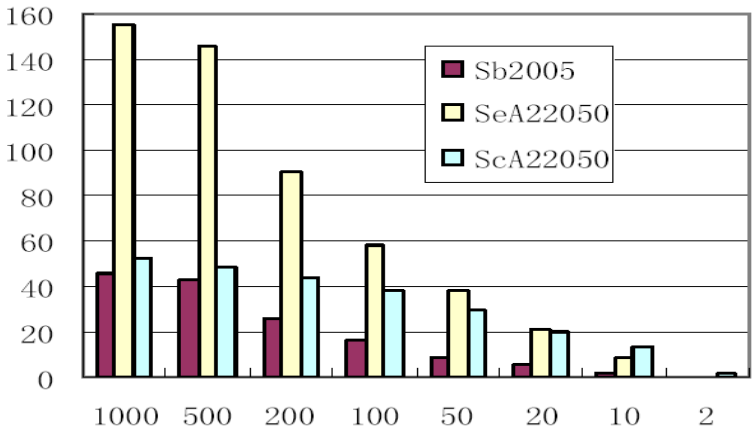


图 13 社会经济发展情景与降水增加情景下不同重现期的期望损失对比

图 13 表明，在仅考虑社会经济增长的 A2 情景下（SeA22050），损失值在稀遇的特大洪水一端增长显著；而在仅考虑降水量增长的 A2 情景下(ScA22050)，损失则主要增长在常遇洪水一端。即为了应对气候变化的影响，我们需要适当提高防洪排涝工程的标准；而为了抑制经济发展与城镇化背景下洪水风险的增长，则需要在土地利用管理、增强应急响应能力，以及开展洪水保险等方面采取新的举措。图 14 进一步表明，20 至 50 年一遇洪水对洪水风险期望值的贡献是最大的。即表明，除重点保护区之外，流域面上的防洪排涝能力以能抗御 50 年一遇洪水的标准为宜。研究成果为合理选定流域的防洪标准提供了依据。

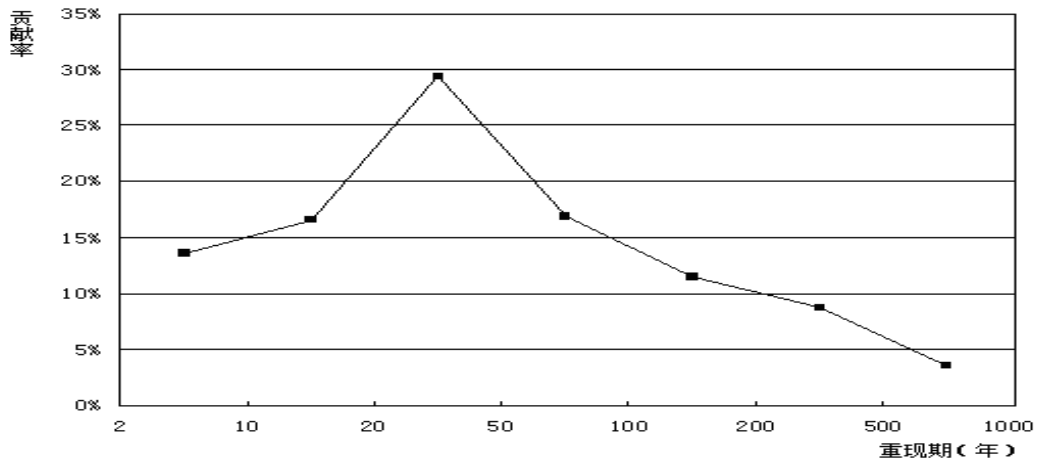


图 14 不同重现期洪水对年期望洪水损失的贡献率

3.1.3 认清洪水风险的可管理性

当代防洪体系的建设需要综合运用法律、工程、行政、经济、技术、教育等手段，要顺应时代发展的潮流，从单纯依赖工程手段防汛抢险转向更为全面的洪水管理。近年来，围绕洪水管理战略、关键策略、蓄滞洪区补偿政策、防洪抗旱技术标准体系、洪水资源综合利用、洪涝灾害损失评估与风险评价等课题开展了大量研究，并取得了丰富的成果。

洪水管理不是管理洪水，而是对洪水风险进行管理。基于洪水风险的可管理性，中国洪水管理战略研究报告指出：洪水管理是人类按可持续发展的原则，以协调人与洪水的关系为目的，理性规范洪水调控行为，努力增强自适应能力，适度承受一定风险以合理利用洪水资源，并有助于改善水环境等一系列活动的总称，进而对其内涵作了全面的阐述（程晓陶，2006）。

今天，在自然外力与人类活动的双重影响下，同样的天气条件，可以形成不同的降雨时空分布；同样的降雨可以形成不同的洪水过程；同样的洪水可以形成不同的淹没状况；同样的淹没可以导致不同的损失；同样的损失可以形成不同的灾难性影响。所有各环节上的不同，都与人类理性与非理性活动的综合效果有关（图 15）。洪水管理就是在这一系列的不确定性中，通过建立健全、合理有效地运作防洪减灾的各相关系统，去争取最有利的可能性（图 16）。

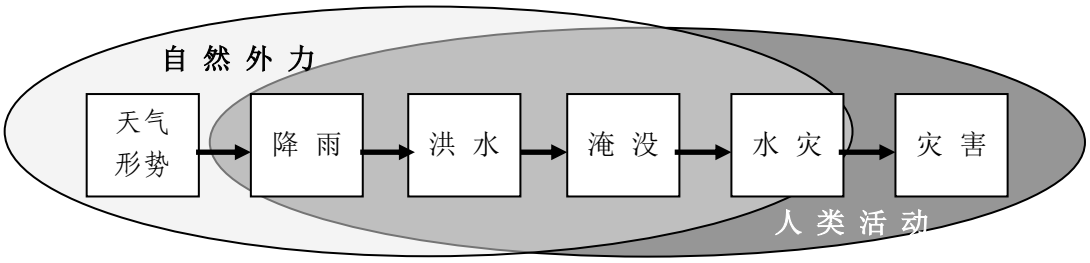


图 15 洪水管理的各个环节与可改变的后果

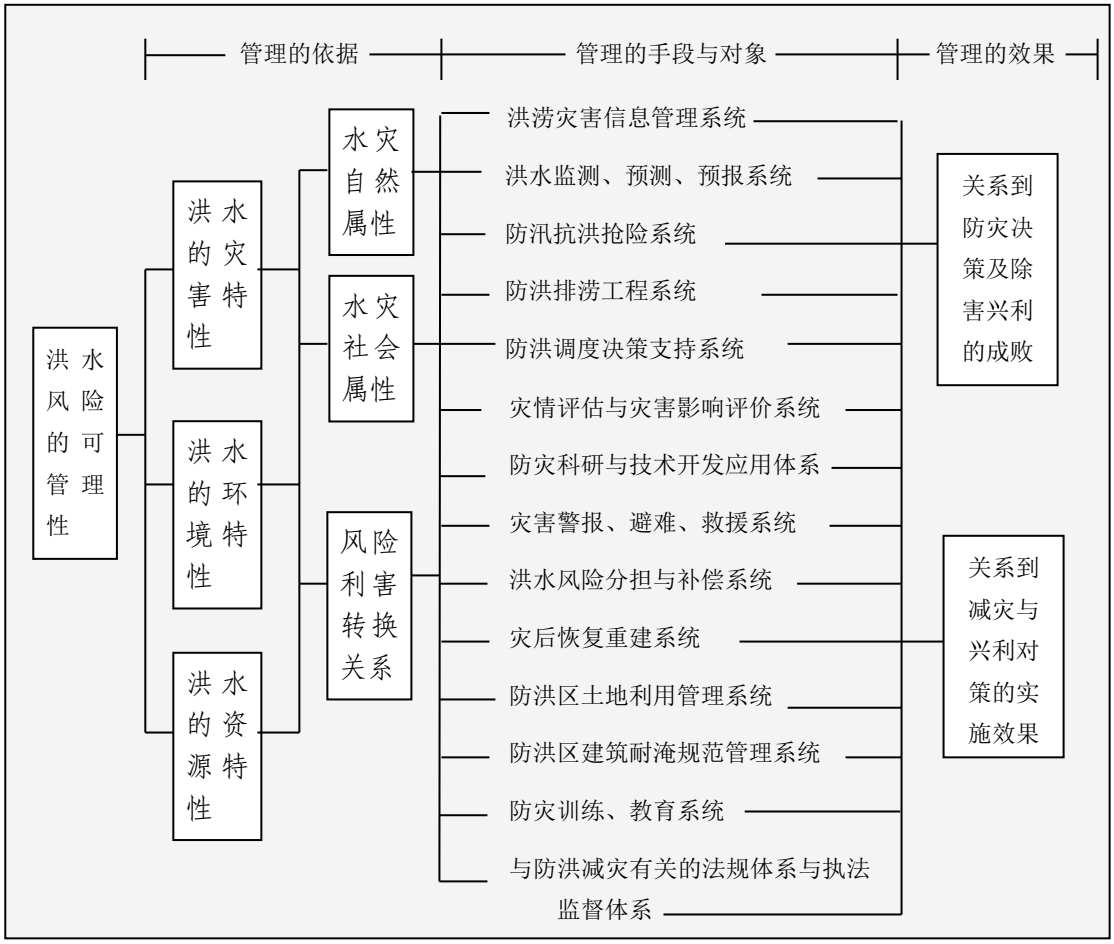


图 16 洪水风险的可管理性

在对未来气候变化的适应性对策研究中，同样有洪水风险可管理性的问题。在气候变化对“淮河流域重点平原洼地治理工程外资项目”的影响评估与适应性对策研究课题中，基于对流域内地理气候、经济社会、河流水系及防洪体系的相互关系与演变特征的分析，认为在气候变化影响下，流域三种类型的洪水中，1991、2003、2007 年发生的由持续一、两个月的长历时降水形成的量大但不集中的洪水，对平原洼地农业发展及治理工程效益的影响最为显著，不仅有更为频繁发生的趋势，而且是合理运用工程手段可以调控的类型。在此基础上，对气候变化可能造成的影响进行了半定量分析，并提出了增强排涝能力与提高自适应能力并举的应对方案（程晓陶、王静等，2008）。

3.1.4 加强干旱的基础研究

与洪水相比，干旱的基础相对薄弱。近十余年来，我国干旱灾害频繁，对经济社会影响日趋严重，如何制订科学合理的旱情等级标准，规范旱情评估方法，对于客观评估干旱灾害

的影响和采取合理的抗旱减灾措施，具有十分重要的意义。为此，国家防办加强了旱灾领域的科技研究。2005-2007 完成的《城市干旱管理理论与城市抗旱对策初步研究》初步建立了城市干旱缺水判别指标体系，提出了城市干旱缺水损失及影响定量评估方法、重点缺水城市抗旱预案编制方法，开发了城市抗旱管理系统，为加强城市抗旱管理工作，提高城市抗旱工作的主动性初步奠定了理论基础。至 2007 年《旱情等级标准》等一批研究成果通过了验收。经整合、完善现有的各种干旱评估指标，结合不同行政区域的特点，提出了适用农业、牧业、城市旱情和城乡居民因旱饮水困难，以及区域旱情综合评估的指标体系及等级标准；应用干旱指数方式对区域旱情进行评估。这种方法第一次引入了旱情频率的概念，既考虑了区域的受旱面积又考虑了受旱程度，较充分、客观地反映了一定区域干旱灾害的实际情况。

2008 年，在亚洲开发银行的技术援助下，《中国干旱灾害风险管理战略研究》项目正式启动。该项目针对中国干旱灾害管理现状，在消化、吸收国际社会干旱灾害管理的先进理念和成功经验的基础上，初步探讨了干旱灾害风险管理基础理论，提出了包括体制机制改革、应急能力建设、需水节水管理、极端干旱备灾以及科学技术支撑等在内的中国干旱灾害风险管理战略框架，并明确了近期的行动计划。目前，该项目成果已编写成稿，拟于 2011 年 6 月正式出版。

此外，“城市干旱缺水影响及损失评估研究”亦已通过专家组的专题验收。“城市干旱缺水损失评估及抗旱效益评价”采取定性与定量相结合的方法进行了较全面的研究，取得了多方面的进展：①从宏观上分析了城市干旱缺水对城市居民生活、城市经济发展、城市生态环境和城郊农业的影响；②初步建立了城市干旱缺水损失评估指标体系，提出了城市干旱缺水损失定量评估方法；③初步建立了城市抗旱效益评价指标体系和定量评价方法。

3.2 防洪抗旱减灾领域防灾学的研究进展

所谓防灾学，是基于对灾害风险的规律性认识与可利用的防灾体系，研究如何预防灾害；在灾害发生时如何减少损失，除害兴利；以及在灾后如何尽快恢复重建的科学。防洪抗旱减灾领域防灾学的研究，涉及到与社会经济发展需求相适应的减灾体系、管理模式、运作机制、治水方略与对策措施等，因地制宜制定灾前、灾中、灾后防灾减灾适宜的对策措施，以及相关的法规政策等。防灾学的研究旨在保证这些措施的合理性与有效性。

3.2.1 探讨适合我国国情的治水理念与方略

1998 大洪水之后，我国防洪体系的建设再次形成了新的高潮。各级政府成倍增加了治水的投入，在治水方略上前所未有地加大了调整人与自然关系的力度。2000 年以来，持续干旱

影响的范围明显扩展，加剧了水资源短缺与水环境恶化，迫使人们从社会、经济、生态、环境、人口、资源和国土安全等更加广阔的视野上深入探讨防洪抗旱减灾的问题。

在我国人多地少，粮食、土地与水资源需求压力极大，经济底子薄弱且发展不平衡，生态环境相对脆弱的国情下，靠短期高投入一举“根治洪水”，或将洪水高风险区中的人口资产都迁出去，“还洪水以空间”，不仅难以实现，而且在人与自然之间易于形成恶性的互动，在发展与防灾之间构成难以协调的矛盾。洪水管理成败的关键在于把握适度。

世纪之交，中国工程院提出的《中国防洪减灾对策研究》报告，重点研究了我国大江大河的防洪形势和相应的对策，提出我国“要从无序、无节制地与洪水争地转变为有序、可持续地与洪水协调共处的战略。为此，要从以建设防洪工程体系为主的战略转变为在防洪工程体系的基础上，建成全面的防洪减灾工作体系”（徐乾清等，2002）。水利部组织的《中国水利发展战略研究》、《水利与国民经济的协调发展》等重大项目，对水旱灾害、防灾减灾措施与人类生产生活之间的相互关系，水利在国民经济发展中的地位，以及防洪抗旱减灾体系建设存在的主要问题、面临的形势与对策作了较全面的探讨。

近年来，围绕全国防洪规划与“十一五”防洪规划的编制，水利部组织了大量的科研课题，在全国防洪风险区划、防洪标准、防洪体系规划建设等方面取得了显著的进展。水利部海委《海河流域防洪战略规划研究》、水利部科技创新项目《我国防洪安全保障体系与洪水风险管理的基础研究》、国家自然科学基金重大项目《洪水行为与减灾方法研究》第 4 课题第 2 专题“洪泛区和分蓄洪区的洪涝灾害风险分析和管理体系”、《国家中长期科技发展战略规划研究》“公共安全专题”、水利部《水利科技发展战略研究》、部规划院十五规划项目《中外治水方略比较研究》、全国水利发展“十一五”规划重大研究课题《防洪安全保障重点对策研究》、亚行赠款《中国洪水管理战略研究》、《中国干旱灾害风险管理战略研究》等宏观战略研究项目，从可持续发展治水原则、人与自然和谐的治水理念、防洪工程体系在洪水管理中的地位及应注重的问题、增强应急反应能力与自身适应洪水的能力、形成泛滥允许型的发展模式、发挥洪水的资源特性与环境特性等方面形成了一系列的研究成果。

例如，在“中国洪水管理战略”中，基于问题分析、需求分析与约束条件的分析，提出了我国实施洪水管理的总体战略：在深入细致把握中国各流域水系洪水风险特性与演变趋向的基础上，因地制宜，将工程与非工程措施有机地结合起来，以法律、行政、经济、科技、教育等非工程措施来推动更加有利于全局与长远利益、标准适度的工程措施，辅以风险分担与风险补偿政策，形成与洪水共存的治水方略；逐步健全水灾应急管理体制，增强应急反应能力，在保障生命安全的前提下，适度承受风险，求得防洪区土地利用与洪水资源化的最佳

效益，支撑全面、协调、可持续的发展。进而论述了我国洪水管理战略包含的三项重点任务、五项关键内容与五大战略措施，并指出为了有利于建立和谐社会，在推进洪水管理中追求整体与长远的利益最大化，支撑可持续的发展，提倡建立“风险分担、利益共享”的运作模式与“双向调控、把握适度”的推进机制。

3.2.2 城市防洪抗旱领域的研究不断取得进展

世纪之交，我国正处于城市化加速的进程中。由“水灾害加剧、水资源紧缺、水环境恶化”所构成的城市型水危机已露端倪，并呈加重趋势。城市防洪与供水安全保障是新世纪我国防洪抗旱减灾领域极具挑战性的课题。

近年来，减灾中心相继承担了水利部重点专项、自然科学基金重点项目、国家防办专项以及北京、上海、哈尔滨等城市的相关课题，并对 2006 年重庆市重大干旱（吕娟、屈艳萍、吴玉成，2006）、2007 年济南市暴雨洪水等灾害事件组织了专项调查。

研究表明，城市型水灾害对传统的治水理念与模式提出了新的挑战；同时在城市化进程中，经济技术实力的增强、对自然演化规律认识的深入、人类自我约束能力的提高等，又为实施城市治水新对策创造了条件。为此，特别强调了城市防洪排涝工程体系的规划与城市发展规划相结合,形成雨、污分流系统，在保障生命安全的前提下，合理选择防洪标准，适度承受一定的风险,以综合治水带动城市功能、环境、景观的改善；要采取各种雨水渗透与雨水蓄滞措施，以立法形式要求新建、改建小区必须设置相应容积的雨水调节池，改变让雨水尽快排入河道的传统思路；对扩大行蓄洪能力之后仍可能泛滥的洪水，要靠建筑物的耐淹化、平时的防灾准备与应急时的警报、避难系统来减轻灾害的损失；要建设城市防灾减灾信息系统，对水灾风险进行评估，以风险图的形式向社会公布评估的信息，以便采取必要的防范措施。

对于城市干旱缺水问题，一方面通过法律、行政、经济、技术等手段，加强节水型社会的建设；另一方面加强旱情的监测与评估，适时启用备用水源或长距离、跨流域的调水方案。2009 年启动的水利部行业专项《干旱预警方法及应急响应关键技术研究》以城市抗旱基础理论和应用研究为突破口，建立规范化的城市干旱预警方法和应急响应决策支持平台，为我国城市主动抗旱、科学抗旱、高效抗旱提供技术支持。

3.2.3 对蓄滞洪区、滩区、圩垸区安全建设、合理发展与风险管理模式的认识

我国的蓄滞洪区、圩垸区与滩区，历史上都是调蓄洪水的场所。近代由于人口剧增，这些区域的土地大都被开发利用，并且居住了大量的人口。为保障安全与构建和谐社会，各级政府近年来尝试推行了一些新的对策措施，既有成功的经验，也有走弯路的教训。依托十五

科技攻关、十一五支撑计划、自然科学基金重大项目与水利科技发展战略研究等项目，减灾中心基于大量实地调查，开展了比较系统的研究。

（1）积极探讨蓄滞洪区管理的适宜模式与政策。我国的蓄滞洪区既是江河防洪体系的重要组成部分，又是蓄滞洪区群众赖以生存与发展的场所，保障防洪安全与维护社会公正的需求相矛盾。①在承担的国家十五攻关《水安全保障技术研究》项目“蓄滞洪区洪水资源化利用示范研究” 专题中，针对海河流域蓄滞洪区，提出了蓄滞洪区洪水资源化适宜性指标体系，并对 26 个蓄滞洪区进行了适宜性分类，以白洋淀为例，定量分析了“地下水回补型”蓄滞洪区的洪水回补量和回补效率；以大黄铺洼滞洪区为示范开展多目标管理情景分析，以达成修复湿地、发挥滞洪区防洪功能，实现洪水和污水的安全利用、改善生态环境、发展湿地经济、推进可持续发展等目标，初步开发构建了集洪水分析、水质分析、洪水资源化分析等于一体的“蓄滞洪区规划管理信息系统”，使得研究成果更具示范和推广价值。②我国 2000 年颁布实施的《蓄滞洪区运用补偿暂行办法》在 2003 年淮河抗洪中为大规模运用行蓄洪区减少了阻力，发挥了积极的作用。然而，由于补偿办法中补偿金额与直接经济损失挂钩，核资核损，程序繁琐，效率低下。针对淮河行蓄洪区运用时，普遍已经内涝成灾的现象，提出行蓄洪区风险包括“固有风险”与“附加风险”，只有“附加风险”才是国家有义务补偿的风险，而其“固有风险”，则应依靠分担风险与提高承受风险的能力来解决。由于附加风险是为保护重点保护区而转移给蓄滞洪区的风险，与实际损失无关。因此，建议按人均、亩均或两者加权的模式确定补偿额度，不仅补偿的程序可以大为简化，而且国家的补偿负担也有所减轻，还可以摆脱“不公平”与“误导”的责难（程晓陶、杜晓鹤、吉谷纯一等,2007）。③在承担水规总院项目“蓄滞洪区经济社会发展对策研究”中，全面分析了我国蓄滞洪区经济社会发展现状、存在问题及发展潜力和需求，提出蓄滞洪区经济发展模式、人口迁移对策、土地管理对策、安全建设对策、运用补偿对策等对策建议，以及近期及远期的行动计划。

（2）1998 年大洪水之后，国家大规模实施了平垸行洪、退田还湖、移民建镇的措施，当时为促使圩区居民外迁，国家按每户 1.5 万元的标准给予建房补助，这是一个单向的鼓励政策。为了争取国家更多资金，地方政府上报的外迁户数自然是越多越好。但是由于种种社会经济方面的问题，开始一些定为“双退”的圩垸不得不改为“单退”，随后又出现了一些群众返迁的现象；2003 年黄河滩区受淹后按国家安排外迁的群众许多也陆续返回了原驻地。通过调研，我们发现，“迁得出、稳得住”的关键，在于生存条件，而与此相关的基础设施建设恰恰是个体农户无力承担的。因此建议：①如果国家的投资主要用于做好基础设施的规划与建设，群众通过参与基础设施建设与其它活动获得收入后，自主决定何时搬迁，建什么标

准的房，则国家一份投入不仅可达到双重的目的，而且还可以缓解一些不必要的矛盾；②只有从机制上变“单向推动”为“双向调控”，才可能达到把握适度的要求；③滩区与圩垸区的风险主要为固有风险，适合于采用风险分担的模式来增强承受灾害的能力；当且仅当国家为整体与长远利益而采取的措施给局部群众带来损失时，才可考虑采用补偿的办法。

2010 年通过验收的“十一五”支撑计划课题《蓄滞洪区风险评价技术研究》完成了对淮河流域蓄滞洪区的风险区划及典型蓄滞洪区的洪水风险分析；提出了蓄滞洪区建设管理思路，完成了蓄滞洪区建设管理模式分类；从人口管理、土地管理、产业发展管理等方面研究了有效协调蓄滞洪水、保障区内群众生命安全和经济社会发展关系的蓄滞洪区风险管理模式。研究了蓄滞洪区保障制度研究的理论与方法，提出了蓄滞洪区保障制度的基本思路和原则，并完成了蓄滞洪区保障制度设计；完成了具有自主知识产权的蓄滞洪区洪水分析软件系统、蓄滞洪区洪水风险图绘制管理平台和蓄滞洪区应急管理系统的设计与开发。研究成果在全国蓄滞洪区建设管理规划和全国洪水风险图制作中已得到应用。

3.2.4 加强应急管理体制与机制的研究

我国目前正处于人均 GDP 突破 1000 美元之后的加速发展的阶段。这一阶段往往“危机四伏”，不仅各种人为的灾难性事故频繁发生，而且突发性自然灾害的危害性也显著增长。近年来，我国政府已将制定突发灾害和公共事件应对措施、主动防范风险提高到维护国家安全、社会稳定和保障人民群众利益的重要位置。2006 年 1 月份国务院发布了《国家突发公共事件总体应急预案》，水旱灾害被列为自然灾害类突发公共事件的首位。国务院首批发布的 5 个自然灾害类突发公共事件专项应急预案中包括了《国家防汛抗旱应急预案》。

（1）洪水应急管理的主要对象是突发性洪水灾害，如溃坝洪水、山洪及其伴生的滑坡与泥石流、风暴潮、城市暴雨洪涝、行蓄洪区分洪运用及流域型大洪水等。突发性洪水不仅本身危害严重，而且易于形成次生、衍生灾害。①在水利部专项《水库溃坝风险与减灾技术研究》设立了“溃坝洪水应急管理研究”专题，研究内容包括：溃坝洪水风险分析平台建设，为我国溃坝洪水应急管理提供规范的系统框架；提出“中国水库安全应急反应预案编制导则”，涉及应急组织体系、通讯网络系统、人员转移和安置等方面的技术要求及实施措施；水库风险等级划分方法等（黄金池、何晓燕，2006；李昌志、黄金池等，2008）。②按照《全国山洪灾害防治规划任务书》的要求，参与了《北京市山洪灾害防治规划》等编制工作。2005 年 6 月黑龙江省沙兰镇发生 105 个学生被山洪夺去宝贵生命的悲剧后，赴现场做了实地考察，从 10 个方面归纳了应吸取的教训（程晓陶，2005）。③汶川大地震之后，围绕堰塞湖、震损水库等次生水灾害问题，迅速开展研究，不仅运用先进的遥感技术与 GIS 技术进行基础信息与

险情信息的提取，快速建立了溃坝洪水模型，分析了各种情况下可能形成的洪水量级与影响范围；而且建议要根据堰塞湖的溃决机理与条件，完善防御堰塞湖次生水灾害的应急响应计划，要针对灾区特点，明确紧急状态的认定原则；对于堰塞湖上下游可能淹没的区域，要分级分类制定应急计划，分级启动堰塞湖应急响应与撤离计划。对于震损水库的危险性评价与修复也提出了相应的建议。

（2）为北京市编制了“2008 奥运会城市防汛应急系统纲要”。举办奥运会期间正值北京市汛期，对防汛保安工作提出了更高要求。减灾中心作为主要承担单位，参与编制了北京 2008 奥运城市防汛应急系统纲要，制定了北京奥运城市防汛应急预案；采用一维、二维水力学模型；分布式水文模型；地理信息系统和三维场景展示等技术对北京市城区暴雨洪水与主要河道洪水风险进行分析、评估与展示。目前，减灾中心为“北京市防汛应急调度预案编制”与“北京城市防汛应急系统”建设提供的成果，已被运用于保障奥运安全的工作中。

（3）在为国家防办开展的“重点缺水地区水量应急调度预案编制”项目中，对抗旱预案的主要构成部分进行了全面阐述，并以天津、秦皇岛、辽源、日照、舟山、宁波、铜川等七个不同类型的城市为试点，按《抗旱预案编制大纲》的要求编制完成了重点缺水城市抗旱预案，为各城市编制抗旱预案提出了指导框架和应用范例。在国家防办项目“突发水旱灾害影响应急评估——旱灾影响”中，建立了分区域的农业旱灾影响评估模型，对旱灾对农业生产的影响进行较为规范的分析评估，以取得准确、客观的旱灾影响信息。

（4）为了建立健全水利部应对重大突发性水污染事件处置机制，提高应对和处置突发性水污染事件能力，2007 年 4 月水利部设立了《水利部应对重大突发性水污染事件应急预案》编制项目，该项目由国家防办主持，减灾中心旱灾研究室承担完成。《预案》共分 6 章 17 条，分别明确了总则（包括编制目的、编制依据、适用范围、工作原则）、组织体系与职责、报告与受理、应急响应、应急保障以及附则等内容。

3.3 防洪抗旱减灾领域防灾减灾技术的研究进展

防洪抗旱减灾领域防灾技术研究的是除害兴利、增强人类理性调控洪水、抗御干旱与增强自适应能力的新技术、新设备、新材料、新工艺及其适用条件等等。其中，水情旱情的监测、预报、预警、风险评估，以及防洪工程体系的隐患监测、安全评价、除险加固与决策支持等方面是高新技术运用、发展十分活跃的领域。

3.3.1 大江大河洪水预报预警技术

大江大河洪水预报预警信息是组织好防汛抗洪抢险救灾工作的基本依据。近年来随着分

布式水文模型、雷达测雨等新技术的发展，我国大江大河洪水预报预警技术有了长足的进步。

（1）黄河水利委员会开展黄河小花间多源降水信息同化及拼接、定量降水预报和基于GIS 的分布式水文预报模型等高新技术的应用研究，建成降水预报与洪水预报有机结合的小花间暴雨洪水预报系统，实现黄河小花间连续、滚动的气象、洪水预报，且将洪水警报预报的预见期由 14～18 小时延长到 30 小时。系统主要由中尺度数值降水预报模式、多源降水信息同化及拼接和全分布式水文预报模型三个部分组成。黄河小花间暴雨洪水预报耦合系统自2006 年在黄委水文局投入运行以来，有效提高了黄河花园口站洪水警报预报的时效性，为洪水预报及相关人员提供了业务技术支持平台，提高了黄河小花间洪水预报能力和技术水平，为黄河下游防洪排沙及黄河三门峡、小浪底水库调度运用提供了强有力的技术支撑和决策依据，在黄河防汛、水资源规划及调水调沙中发挥了重要作用。

（2）松辽委开展了基于气陆耦合的多模型多模式洪水联合预报关键技术研究。课题实际达到的主要性能指标为：① 构建了具有全部自主知识产权的分布式水文模型软件系统AutoWEP；② 集成了分布式水文模型、新安江模型、单位线模型以及经验模型等多种集总式洪水预报模型，建立了多模型多模式洪水联合预报技术体系；③基于数值天气预报模型 WRF，建立了气陆耦合洪水预报技术体系；④研发了基于气陆耦合的多模型多模式洪水联合预报软件系统。基于气陆耦合的多模型多模式洪水联合预报系统拥有全部自主知识产权并形成了产品体系，采用的基于开源 GIS 软件的开发模式极大的降低了系统的应用成本，在市场推广中性价比优势明显。目前该研究成果已不仅在松辽流域得到应用，还被广泛应用于国内多个流域、水库和水电站的洪水预报、防洪调度和发电调度等生产实践，实施效果良好，取得了巨大的社会经济效益。

（3）“十一五”期间完成的淮河“气象-水文-水力学耦合洪水预报预警关键技术”课题，在定量降水预报技术、气象—水文耦合洪水预报技术、水文—水力学耦合洪水调度技术以及致洪暴雨天气系统判别技术和洪水分级预警定量化技术等方面进行了深入细致的研究工作，开发了中尺度数值天气预报模式（MC2）区域应用技术、基于 DEM 与站点资料的域汇流参数网格化技术，创建了具有空间分布参数的流域水文模型与基于 GIS 的可视化平台，在淮河流域实现了逐时的、具有空间分布的定量降水预报。运用该成果对 2007 年以来的大洪水进行了实时预报，使洪水预报预见期在原有基础上增加了 72 小时以上。研究提出了淮河流域致洪暴雨天气系统判别指标，实现洪水分级预警与应急响应定量化。研究成果在淮河流域王家坝断面实时洪水预报方面进行了很好的应用。

3,3,2 防洪抗旱决策支持技术

洪水灾害的形成有孕育、发生、发展、消退的过程，相应的人类的防洪减灾活动也有预防、预报、预警、抗洪、抢险、救灾与灾后恢复重建等各个环节。在此过程中有许多风险与不确定因素会对决策产生影响。在新技术的应用方面，洪水仿真模拟、地理信息系统、遥感与全球定位系统、数据库、计算机网络、微波通讯、视频监视、雷达测雨、堤防大坝隐患探测、防汛新材料等高新技术在防洪规划与防汛抗洪、抢险救灾领域的应用方面日益广泛。全行业水情、工情、灾情整编的制度正在逐步完善。

（1）北京城市防汛应急系统预报预警调度平台。按照先期完成的《北京市防汛应急预警调度系统的总体设计》与《北京市 2008 奥运会城市防汛应急系统纲要》要求，市防汛办组织下与相关单位协作，在城市防汛应急预报预警调度平台的研发中采用了二维水力学模型、洪涝灾损失评估模型、J2EE 框架和 WEB 地理信息系统、Socket 技术模型的网络化、三维场景展示技术等先进的技术手段，开发了实时数据预警、积水分析、积水预警分析与发布、灾害分析、应急调度参考、三维防汛展示等功能，为城市防汛应急系统预报预警调度工作提供了支持（苑希民、刘舒、胡昌伟，2007）。

（2）浙江省重点项目“东苕溪流域防洪实时优化决策支持系统”研究。 该系统将洪水模拟、洪水预报、水库调度相结合，充分利用了 GIS、WEB、DB 等信息技术，经鉴定达到国际领先水平。主要技术特点包括：①实现了对东苕溪流域防洪工程、实时雨水情、防洪调度方案、历史洪水情况等信息基于网络的存储、更新、查询与检索；②研究了一维、二维水动力学模型耦合计算方法，并与洪水预报模型系统衔接，实现了东苕溪河道、蓄滞洪区洪水调度方案的动态模拟与实时优化计算；③实现了实时雨水情、实时调度方案动态连接，可以进行实时联动预报；④采用 ORACLE 数据库技术开发了系统信息管理的专用数据库，利用 ARCGIS 平台完成了东苕溪流域三维场景建模和调度方案展示。

（3）在“淮河、荆江洪水预报预警与调控系统关键技术研究”与“松花江洪水管理系统”等流域级的决策支持系统研发中，与院内外单位协作，从现有基础条件出发，充分挖掘可利用的信息资源，探求合理可行的系统构架，综合运用各种先进技术，使得系统在汛前能够服务于科学地制定流域洪水应急预案，在汛期可为防汛决策及时提供监测、预报、预警、灾情信息，以及可供选择的调度、抗洪等实施方案与评价意见，为洪水风险动态分析和评价、减灾预案设计、行蓄洪区安全建设、防洪控制性工程的科学调控、防汛管理，以及防洪减灾信息的社会化服务等提供了基础信息管理的平台与先进的数值模拟分析手段，进而形成有实用价值的决策支持系统(万洪涛、程晓陶、胡昌伟, 2009) 。

（4）宁夏回族自治区防汛抗旱指挥系统旱情实时监测及抗旱信息管理系统。与旱灾及对策研究室合作研发，系统建设内容包括：旱情实时监测系统建立和抗旱业务应用系统开发，旱情实时监测系统实现试点地区的包括墒情信息在内的旱情信息的采集、接受和处理；抗旱业务业务应用系统建设内容包括旱情监视、旱情查询、旱情分析及预测、旱情评估、旱情会商以及旱情三维信息管理系统。

（5）全国七大流域三维电子江河决策平台研究与建设。该平台基于 GIS、RS、IT、DB、VR 等现代高新技术，利用地形数据与高分辨率遥感影像，再现全国七大江河流域三维地形、地貌场景，并在三维场景上展现防洪工程体系以及相关的场景属性信息，包括：① 利用 1:25 万比例尺的地形数据与 30m 分辨率的遥感数据，建设了全国范围三维电子沙盘场景；② 利用 1:5 万比例尺的地形数据与 15.0m 分辨率的遥感数据，建设了七大流域三维平台；③ 利用 1:1 万比例尺的地形数据与 1.0m 分辨率的遥感数据，在大江大河重点干流河段或重点地区建设三维平台及相关功能；④研制基于网络化的三维流域防汛决策支持系统平台，集成防洪专业模型，合理反映防洪工程与行蓄洪区运用对洪水预报的影响。2003 年以来，成果已在部分省区推广，其中，“宁夏三维电子江河系统”获得 2006 年度宁夏回族自治区科技进步一等奖、“山东省防汛数字沙盘系统研究”成果获得 2005 年山东省水利科技进步奖一等奖。

3.3.3 防洪工程体系优化调度与运行管理技术

新世纪中，随着三峡、小浪底等大型水利枢纽投入运行，防洪工程体系的合理调度、综合利用与安全运行等成为迫切关注的问题。2002 年，在水利部重大科研项目“水库设计运用专题研究项目——国内外水库设计洪水理论和防洪调度方法评价研究”支持下，有关学者对洪水频率分析进行了较为系统的总结和研究（郭生练等，2005），重点对比分析了中、英、美三国在设计洪水计算中对设计暴雨与设计洪水的频率关系、点面关系、时程分配雨型、净雨分析、流域响应、分布线形、参数估计方法、PMP/PMF、受城市化影响地区和无资料地区的设计洪水计算等环节考虑的异同和特色等，进而介绍了多种洪水水文频率分析方法、其中关键问题的解决办法，以及汛期分期方法和分期设计洪水估算、水库汛限水位的动态控制方法等，具有很好的理论水平与实用价值。在“汛限水位设计与运用”项目中，有关学者在前期研究的基础上，以大伙房、清河、柴河、碧流河、葖河、观音阁、白龟山、丹江口、恒仁、于桥等水库为对象，对“汛限水位动态控制方法”开展了更加系统深入的研究，在相关单位的配合下，取得了一些突破性的成果，基本形成了一套完整的方法体系（王本德、周惠成，2006）。同时，水利部科技重点项目根据发展需求也资助了一批防洪减灾领域的课题。黄河水利委员会自 2002 年利用小浪底等水库开展调水调沙试验以来，持续坚持，认识不断深化，不仅取得

了丰富的成果，而且使得黄河下游河道行洪能力得以有效的恢复。同时，梯级水库与水库群联合调度已成为新的研究热点。

3.3.4 防洪工程安全技术

防洪工程安全技术涉及堤防工程除险加固、防洪抢险、工程管理与安全评价等关键技术、防洪工程建设规范与标准，以及与生态景观相结合的防洪工程建设新技术等研究方向[22-25]。

（1）堤基管涌机理和防治关键问题研究。开展了单层与双层堤基管涌砂槽模型试验，提出了管涌发展动态模拟的概化数学模型，开发了相应的有限元计算程序，实现了管涌发展的动态模拟；通过国内外相关设计规范和研究现状的分析评述，对管涌抢险的合理范围和盖重合理宽度等提出了建议；对悬挂式防渗墙的作用和合理设计进行了研究，分析和评价了垂直防渗的效果；推导并给出了双层堤基盖重设计的理论公式，对盖重设计准则进行了比较研究，并提出了建议（丁留谦、孙东亚、姚秋玲，2007）。该项目取得的部分研究成果已在《堤防工程设计规范》的修订中采用。水利部国科司组织的鉴定意见是：成果总体达到国际先进水平，其中三层堤基管涌破坏的研究和管涌动态模拟成果达到国际领先水平。

（2）崩岸防治技术。我国的河、湖岸线崩塌现象十分普遍，严重威胁防洪大堤和人民生命财产的安全。2000~2003 年间，我院先后在长江中、下游完成了三项崩岸整治试验工程，其中软体排抛石压重护岸新技术在科研、设计、施工和新材料等方面都开展了创造性工作，包括室内模型试验、数值模拟、试验工程建设等内容，形成了相对成熟的设计理念、技术方法和拖拉铺排施工工艺，申请并获得了“组合退放铺排船”、“梯形充沙管袋软体排”、“河口软体排护岸工程的系排组合锚固结构”等 3 项实用新型专利技术和 1 项发明专利。

（3）护坡新技术。护坡是保证堤防安全的重要单元，也是堤防出险加固工程中的重要内容。我国许多河道堤防护坡工程存在安全隐患，或在完建后不久就发生塌滑等问题。通过成因分析，探讨了护坡结构中垫层与反滤层设计以及波浪作用下护坡整体抗滑稳定计算方法，对国内外堤防结构设计理念与技术标准、设计规范进行了比较，建议在我国堤防工程设计规范中，①明确阐述对反滤层与垫层的要求，给出碎石反滤和土工布反滤的设计方法和相关准则；②增加在波浪力及护坡底面扬压力作用下护坡结构整体抗滑稳定性分析方法（孙东亚、丁留谦、姚秋玲，2007）。

（4）防洪工程风险评价技术。我国已形成以水库大坝、堤防等工程措施工程构成的防洪工程体系。但是这些工程有一定的防洪标准，也会因为自身的安全性给下游造成洪水灾害。工程安全评价是近几十年来的关于综合评价大坝、堤防等工程措施的安全性及其对下游威胁

程度的方法。在水利部重大项目“防洪减灾重大技术问题研究”中，提出了防洪工程风险评价的内容框架，对失事概率的估算方法、可靠度计算中随机性的描述及参数获取、防洪工程系统宗地风险度的计算、可靠性估算及风险评价的应用、风险标准的制定等关键技术问题进行了探讨，特别强调了在借鉴发达国家经验的同时，必须根据我国实际制定相应的风险标准。

4 防洪抗旱减灾领域科技发展目标与重点研究领域

4.1 发展目标

在2006年底完成的《水利科技发展战略研究报告》中，明确提出了新时期我国防洪抗旱减灾领域科技进步的总目标、阶段目标与重点领域。

（1）总目标。为支持建立与小康社会发展需求相适应的防洪抗旱安全保障体系，从灾害学、防灾学与防灾技术三个层次，构筑完整的防洪抗旱减灾学科发展体系，在防洪抗旱减灾基础科学、应用科学与水旱灾害预测、预防、预警与应急管理等关键技术及其集成方面实现持续创新；全面提高理性调控洪水的能力与洪水资源化的利用水平，增强全社会的水患意识和自适应能力，实现人与自然的良性互动，使水旱灾害造成的国民经济损失占GDP比例降低到中等发达国家同期水平，实现防汛抗旱工作的“两个转变”，为全面建设小康社会提供可靠的水安全保障。

（2）阶段目标。建立适合中国国情的洪水风险管理的理论框架，明确新时期治水方略调整中促进“两个转变”行动计划，把握经济快速发展阶段人类活动与水旱灾害相互影响的规律，认识水旱灾害风险的演变趋向，提出大规模治水实践中促进人与自然之间关系向良性互动转变的运作机制，提炼出市场经济体制下保障民生的防洪体系建设与管理的适宜模式；形成关键技术的自主开发能力，建立防洪抗旱减灾学科和人才培养体系；在减轻水旱灾害对国民经济发展不利影响的同时，为扭转国内生态环境恶化的趋势做出积极的贡献。

4.2 重点研究领域

针对我国经济快速发展与社会转型期防洪抗旱减灾领域的难点、焦点和阻碍发展的瓶颈性问题，在全面协调可持续科学发展观的指导下，按照水利部党组提出的新时期治水新思路与推动防汛抗旱工作两个转变的要求，本着突出重点、有限目标、弥补薄弱环节、把握发展方向的原则，明确防洪抗洪减灾领域战略研究的重点与重大课题，包括：防洪抗旱减灾战略；应对重大突发性洪水的应急管理体制与对策；蓄滞洪区、滩区、圩垸区安全建设、合理发展与风险管理的模式；国家防汛抗旱指挥系统现代化；干旱灾害综合管理与对策；我国城市防洪与供水安全保障；中小河流治理；以及防洪工程安全管理与合理调度运用等等。

针对我国经济快速发展与社会转型期防洪抗旱减灾领域的难点、焦点和阻碍发展的瓶颈性问题，在全面协调可持续科学发展观的指导下，按照水利部党组提出的新时期治水新思路与推动防汛抗旱工作两个转变的要求，本着关注民生、突出重点、有限目标、弥补薄弱环节、促进良性互动的原则，明确防洪抗洪减灾领域战略研究的重点与重大课题。

4.2.1 防洪抗旱减灾战略研究

目前我国防洪抗旱减灾领域战略研究的重点是新时期我国治水方略的调整与水旱灾害风险管理的基础性、宏观性、前瞻性研究。

实现防汛抗旱工作的“两个转变”，涉及到治水理念、管理体制、运行机制以及对策手段等一系列的调整。从我国的国情出发，我们需要选择有风险的洪水管理模式。通过适宜的工程措施将洪水风险控制在一定的限度内，结合风险分担、风险补偿等措施提高风险的承受能力，走与自然和谐的治水之路，谋求全局与长远的利益。为了推进水旱灾害的风险管理，必须深入探讨风险管理的基本概念、基础理论以及具有实践意义的管理体制、推进机制与方法，并以新时期治水思路为指导，对现有工程体系进行全面的评价，加快体系的完善与配套。目前，围绕治水方略调整与加强水旱灾害风险管理的重大问题，研究内容包括：

（1）中外治水方略调整与治水对策发展趋向的综合比较研究;

（2）适合中国国情的河流分级综合治水理论与防洪抗旱减灾战略;

（3）我国不同区域水旱灾害风险管理的适宜模式;

（4）基于未来洪水风险预见的流域（区域）现代防洪抗旱规划、建设与管理的理论与方法。

4.2.2 应对重大突发性洪水的应急管理体制与对策

我国现有防洪体系，只可防御常遇的洪水灾害，对于流域性超标准特大洪水的调控能力还明显不足，可能造成严重的人员伤亡与财产损失，对实现全面建设小康社会的目标产生冲击性的影响。重大突发性洪水灾害的发生，涉及自然与人为两方面的因素，并与两者的交互作用有关。应急管理与风险管理的不同，在于应急管理以稀遇、难以预测、影响重大的事件为对象，要求具备快速反应决断，高效进行社会化的组织动员与协调跨部门行动的能力，做到信息畅通、公开、及时，决策措施正确，预警、预案可行，健全行业部门的责任制（问责制）。

我国政府自上而下建立了有各相关部门作为成员单位参加的防汛指挥机构，实行各级行政首长负责制，形成了防汛应急管理的组织体系。为了进一步完善应急管理体制，当前迫切

需要健全应急管理机制、加强应急管理的能力建设，需要研究的主要内容为：

（1）突发性重大水灾应急管理的多部门协调联动机制；

（2）流域性大洪水中各类防洪工程联合运用与优化调度系统；

（3）重大工程消除险情隐患与抗洪抢险的新材料、新技术、新设备；

（4）台风风暴潮、暴雨山洪、泥石流及伴生灾害以及重大凌灾的减灾技术。

4.2.3 蓄滞洪区、滩区、圩垸区安全建设、合理发展与风险管理模式

蓄滞洪区、滩区与圩垸区中数以千万计的群众同样有脱贫致富、实现全面建成小康社会的要求与权力。在我国的国情下，普遍提高蓄滞洪区、滩区与圩垸区的防洪标准，或将其中生活的居民全部迁出高风险区，都是不现实的。目前，由于大江大河防洪工程体系的建设，部分蓄滞洪区在防洪体系中的地位与作用已经发生变化，面临需要调整的问题，为了保障蓄滞洪区、滩区、圩垸区的发展，对其安全建设与洪水风险管理问题应受到更多的关注。

蓄滞洪区、滩区与圩垸区的洪水风险既有共性又有特性。蓄滞洪区的洪水风险可分为固有风险与附加风险。固有风险是由蓄滞洪区自身易洪易涝的特点所决定的，附加风险则与重点保护地区受益转移的风险有关。滩区与圩垸区的风险主要为固有风险。固有风险适合于采用风险分担的模式来增强承受灾害的能力，而对于附加风险，则有必要采用风险补偿的办法。滩区与圩垸区在受淹的情况下，客观上也起到分蓄洪水的作用。因此，我国的蓄滞洪区、滩区与圩垸区要实现合理的发展，就需要在新《全国防洪规划》的基础上，研究蓄滞洪区的规划思路，合理调整蓄滞洪区的功能、运行方式、区内安全建设的标准与管理政策，建立适宜的建设管理模式等。值得探讨的主要内容包括：

（1）蓄滞洪区土地利用和产业发展的合理调整模式；

（2）蓄滞洪区安全建设、风险管理与减灾政策的研究；

（3）蓄滞洪区风险分担与补偿机制的研究；

（4）蓄滞洪区预警与应急管理信息系统。

4.2.4 国家防汛抗旱指挥系统现代化

未来防洪抗旱安全保障体系的管理现代化与决策科学化，对雨情、水情、工情、险情、旱情、灾情以及抗灾救灾行动等信息的监测、传输、处理、分析等能力，必然会提出更高的要求。我国防汛抗旱指挥现代化系统的建设将推动新技术在防汛抗旱减灾领域的应用与发展。同时，这些技术的发展又会对管理人员的素质提出更高的要求，促使现有管理体制中与发展不相适应的部分做出必要的调整与改变。目前行业中普遍存在的信息封锁现象，对防洪抗旱

减灾系统的管理现代化与决策科学化已经构成了致命的障碍。此外，由于 IT 产业发展迅速，产品更新换代很快，国家防汛抗旱指挥这样一个庞大的系统，若依赖进口软硬件，成本代价必然很大。

我国防汛调度指挥系统的建设已经进行了多年，积累了相当的实践经验。在系统发展的探索阶段，由于大量软件的低水平重复开发，大量成果因难以更新升级而被迫淘汰。各流域、各省现有系统所建的数据库网络协议，操作系统硬软件等，都有很大差异，使各层次的资源整合、集成面临很大的困难。因此，除了技术的革新之外，国家防汛调度指挥系统现代化的实现要在管理上狠下功夫，并积极推进通用型的洪水调度系统等关键技术。为此需要：

（1）加强防汛抗旱指挥系统信息标准化与共享机制的研究；

（2）加强新技术在防汛抗旱决策支持系统中的应用；

（3）改进水旱灾害监测、预报、预警与风险评估系统；

（4）推进国家防汛抗旱调度指挥系统中通用平台与核心专业应用软件的国产化。

4.2.5 干旱灾害综合管理与对策

干旱的应急管理，应以持续性特大干旱为主要对象。干旱虽不是突发性的灾害，但是当持续干旱达到一定严重的程度之后，也需要采取重大的应急措施，这就涉及到区域间、部门间、各级政府间复杂的责权利分配与协调的问题。同时，为了减少对生态环境难以恢复的伤害，当干旱发展到一定严重程度之后，也要考虑对用水需求采取更严格的限制措施，避免“快速耗尽有限的水源”和陷入“干旱缺水－开辟更多水源－产生更多污水－水的自净化能力更低－生态系统恶化－更加干旱缺水”的恶性循环。今后减少干旱造成的损失及其恶劣影响，将主要依靠干旱灾害的综合管理与科技手段的进步。因此，在从“单一抗旱”向“全面抗旱”转变的过程中，要统筹兼顾城乡之间、区域之间、人与自然之间的用水需求，必须大力加强干旱综合管理的研究，建立健全旱灾的监测、评估系统与全面抗旱的管理体系，主要研究内容有：

（1）建立健全全面抗旱管理的法制、体制与机制；

（2）干旱灾害时空演变规律及区划研究；

（3）加强大范围旱情动态监测、评估与预警技术的研发；

（4）持续性特大干旱的应急预案、协调机制与主动应对策略。

4.2.6 城市防洪安全保障

城市防洪安全保障是新世纪我国防洪抗旱减灾领域具有挑战性的课题。需要在“全面协

调可持续”科学发展观的指导下，统筹解决城乡之间、区域之间、人与自然之间基于水的众多复杂的矛盾。因此，城市防洪安全保障迫切需要科技进步的支撑。重点研究的内容有：

（1）城市防洪应急管理体系、运作协调机制与超标准防洪预案；

（2）城市型洪涝灾害成灾机理与综合治水、减灾新对策；

（3）高新技术在现代化城市防洪指挥系统建设中的应用；

（4）城市防洪排涝工程体系建设与现代城市和谐发展的新理念与新技术。

参考文献

[1]. ADRC. Natural Disasters Data Book-2005, March 2006.

[2]. Bernhard Lehner et al. Estimating the Impact of Global Change on Flood and Drought Risks in Europe: A Continental, Integrated Analysis, Climatic Change (2006) 75: 273–299, Springer 2006

[3]. Cheng Xiaotao. Flood and Drought Evaluation and Management，General Report for Question 87 of ICOLD, June, 2006 (Barcelona).

[4]. Crichton, D. 1999. The Risk Triangle, pp. 102-103 in Ingleton, J. (ed.), Natural Disaster Management, Tudor Rose, London.

[5]. Evans E.P., Ashley R., Hall J., Penning-Rowsell E., Sayers P., Thorne C. & Watkinson A. Foresight Future Flooding. Scientific summary: volume I – future risks and their drivers. London: Office of Science and Technology, 2004a.

[6]. Evans E.P., Ashley R., Hall J., Penning-Rowsell E., Sayers P., Thorne C. & Watkinson A. Foresight Future Flooding. Scientific summary: volume II – managing future risks. London: Office of Science and Technology, 2004b.

[7]. Erich Plate. Future Outlook on Water Related Risk Management, Proceeding of the International Workshop on Flood Risk Management, ICHARM, 2006.

[8]. Eugene Z. Stakhiv. AGENDA for Research & Applications in Governance (Institutions) & Integrated Flood and Water Management, Proceeding of the International Workshop on Flood Risk Management, ICHARM, 2006.

[9]. G.L. Harvey, C.R. Thorne, X. Cheng, E.P. Evans, S.Han, J.D. Simm and Y. Wang. Qualitative analysis of future flood in the Taihu Basin, China. Journal of Flood Risk Management, Vol. 2 No. 2, 2009

[10]. Hemant Shah. Hurricane Katrina: Profile of a Super Cat- Lessons and Implications for Catastrophe Risk Management, Risk Management Solutions, Inc. 2005.

[11]. IFRC & RCS, World Disasters Report. 2003.

[12]. John Porter, Cheng Xiaotao et al. National Flood Management Strategy Study, GHD PTY LTD & IWHR, March 2006.

[13]. Philip Buckle. Building Partnerships for Disaster Risk Reduction and Natural Hazard Risk Management, Provisional Report. The Cairo Regional Workshop, jointly organized by the UN/ISDR and the World Bank. 2007.

[14]. World Meteorological Organization & Global Water Partnership. Integrated Flood Management, Concept

Paper of the Associated Programme on Flood Management. 2003.
[15]. 陈雷. 坚持以人为本，依法科学防控，全力做好新时期的防汛抗旱工作. 在全国防汛抗旱工作会议上的讲话，2007.
[16]. 陈雷. 深入贯彻落实党的十七大精神, 为全面建设小康社会提供水利保障. 在全国水利厅局长会议上的讲话, 2008.
[17]. 陈肇和、李其军. 漫坝风险分析与安全评价在水库防洪中的应用. 李其军编《陈肇和论文选集》. 中国水利水电出版社. 2006.
[18]. 程晓陶. 新时期大规模的治水活动迫切需要科学理论的指导——一论有中国特色的洪水风险管理. 水利发展研究，2001(4).
[19]. 程晓陶. 探求人与自然良性互动的治水模式——二论有中国特色的洪水风险管理，水利发展研究，2002(1).
[20]. 程晓陶：风险分担，利益共享，双向调控，把握适度——三论有中国特色的洪水风险管理，水利发展研究，2003 年 3 期。
[21]. 程晓陶、吴玉成、王艳艳等. 洪水管理新理念与防洪安全保障体系的研究. 中国水利水电出版社，2004 年 12 月.
[22]. 程晓陶. 让沙兰悲剧不再重演. 中国防汛与抗旱，2005(3).
[23]. 程晓陶等. 中国洪水管理战略研究，黄河水利出版社，2006 年 6 月。
[24]. 程晓陶、杜晓鹤、吉谷纯一等. 中国における水害補償とその将来展望. 河川，No.736，2007.
[25]. 程晓陶、王静等. 气候变化对淮河防洪与排涝管理项目的影响及适应对策研究，气候变化研究进展，Vol.4 No.6 324-329, 2008.
[26]. 程晓陶. 水旱灾害风险管理与科技进步. 水利水电技术，2009（8）
[27]. 丁留谦、孙东亚、姚秋玲. 关于盖重宽度和管涌抢险范围的讨论. 水利水电技术, 2007(2).
[28]. 董哲仁等.水利科技发展战略研究报告，中国水利水电出版社，2006 年 12 月。
[29]. 鄂竟平. 树立科学发展观，稳步推进两个转变[J]. 中国防汛抗旱, 2004(1)
[30]. 郭生练编著. 设计洪水研究进展与评价. 中国水利水电出版社. 2005 年 10 月.
[31]. 黄金池、何晓燕. 溃坝洪水的统一二维数学模型. 水利学报， 2006(2).
[32]. 李昌志、黄金池、何晓燕、马小杰. 丹江口水库溃坝洪水分析. 长沙理工大学学报, 2008(6).
[33]. 刘志雨、杨大文、胡建伟. 基于动态临界雨量的中小河流山洪预警方法及其应用. 北京师范大学学报（自然科学版）. 46（3）：317-321.
[34]. 吕娟、屈艳萍、吴玉成. 重庆市干旱灾害脆弱性分析. 中国水利，2006 年(23).
[35]. 孙东亚、丁留谦、姚秋玲. 关于改进我国堤防工程护坡设计的建议. 水利水电技术, 2007(2).
[36]. 王本德、周惠成主编. 水库汛限水位动态控制理论与方法及其应用. 中国水利水电出版社，2006 年 8 年.
[37]. 汪恕诚. 发展先进生产力，探索治水新思路，人民日报，2001 年 8 月 6 日第 11 版。

[38]. 万洪涛、程晓陶、胡昌伟. 基于 WebGIS 的流域级洪水管理系统集成与应用. 地理信息科学学报，Vol.3, 2009 (11), 363—369

[39]. 解家毕、孙东亚、丁留谦. 防洪工程风险评价中的几个关键技术问题. 水利水电技术, 2007(2).

[40]. 徐乾清主编. 中国防洪减灾对策研究，中国水利水电出版社，2002 年 6 月。

[41]. 徐乾清. 防洪减灾本质属性于相关问题的思考于探索, 中国防汛抗旱, 2007（1）

[42]. 苑希民、刘舒、胡昌伟. 北京市暴雨积水致灾因素分析与预警系统构建. 第十一届海峡两岸水利科技交流研讨会论文集, 2007 年.

[43]. 张继权、李宁. 主要气象灾害风险评价与管理的数量化方法及其应用。黄崇福主编《风险分析与危机反应》国际丛书，北京师范大学出版社，2007 年 9 月。

[44]. 赵雪、唐婷. 水利建设滞后困局亟待破解——水利专家解读 2011 年中央一号文件, 科技日报, 2011-02-20。

[45]. 周魁一，谭徐明. 灾害的双重属性及其实践意义. 中国水利水电科学研究院学报. 1997(1).

[46]. 朱尔明、赵广和主编. 中国水利发展战略研究，中国水利水电出版社，2002 年 7 月。

[47]. John. W. Porter, 程晓陶等：中国洪水管理战略研究，黄河水利出版社，2006 年 6 月。

报告执笔人：程晓陶

3.3 泥沙研究与大江大河治理

前言

河流泥沙研究是一门综合性的基础技术科学，是水利工程学科的一个分支，主要研究河流边界在来水来沙作用下的变化情况，包括流域产沙、河道输沙、河床冲刷、泥沙沉积等过程。随着我国社会经济和水利水电事业的发展，河流泥沙研究取得了长足的进展，已成为我国水利工程学科在国际上领先的领域之一。然而，由于自然条件变化与人类活动的影响，特别是大型水利工程修建带来的影响，使我国大江大河目前出现了一些新的情况和变化，或者使原来的问题加剧，或者出现新的问题，导致河流健康状况不断恶化。进入 21 世纪，随着我国经济社会的快速发展，以及新时期治水思路的转变，维持河流健康、恢复河流生态、保障水资源和防洪安全等问题愈来愈受到人们的广泛关注，已成为国家社会经济发展的重大需求，同时，江河流域综合规划的修编、大型水利水电工程的建设和大江大河的治理等对河流泥沙研究也提出了更高的要求。如何实现人—水沙—自然和谐共处，保障国家经济社会的可持续发展已成为当前河流泥沙研究面临和需要解决的重大科学命题，河流泥沙研究面临新的挑战和发展的新机遇。

1.河流泥沙研究现状

1.1 河流泥沙研究发展过程

河流泥沙研究的历史可以追溯到公元前 256 年的战国末期，当时李冰父子在修建都江堰工程时巧妙地利用了水流泥沙运动规律，工程布局完全符合现代泥沙运动力学原理。我国古代成功利用水流泥沙运动规律的工程实例还有很多，但限于当时的技术水平，尚未形成一个学科体系，河流泥沙研究作为一个学科体系的建立约在 20 世纪 50 年代以后。在国外，欧美和前苏联的专家学者为泥沙学科的发展作了大量基础性的研究工作[1~8]，取得了较丰硕的研究成果，在我国，江河泥沙问题十分突出，围绕江河治理开展了大量的研究工作，涌现出了许多国内外知名的泥沙专家，以沙玉清[9]、张瑞瑾[10, 11]、钱宁[12~14]等为代表的老一代科学家，为泥沙学科的发展奠定了基础。随着 20 世纪 50 年代以来我国大江大河治理工作的推动，逐步发展与完善了泥沙学科体系，在细泥沙和非均匀沙起动、非均匀不平衡输沙理论、水流挟沙能力、高含沙水流运动、泥沙异重流、泥沙运动统计理论、水库淤积与调度运用方式、河流模拟理论与技术、河床演变与河道整治等多个研究方向取得了重大进展，介绍我国泥沙研究进展的文献[15~21]中列出的不少成果均有所创新，有的还达到了国际领先水平；在应用上，成功地解决了许多重大工程泥沙问题，在我国大江大河治理、防洪安全和水资源安全等方面发挥了重要作用，促进和保障了国民经济建设的快速发展和社会的稳定。

河流泥沙学科是一门具有交叉性和综合性的基础技术科学，主要研究河流边界在来水来沙作用下的演变情况，包括流域产沙、河道输沙、河床冲刷、泥沙沉积等过程。学科的研究领域涵盖泥沙运动力学、河流动力学、河床演变学、工程泥沙、航道与港口治理、水土流失与治理、高含沙水流与泥石流等内容，涉及水文学、水力学、地貌学、地理学、水土保持学、环境与生态学、沉积学等多学科。在细观尺度上，研究泥沙颗粒在水流作用下起动、跳跃、悬浮和沉积等过程；在宏观尺度上，则研究泥沙运动所导致的水土流失、河道演变、水库淤积、河口海岸变迁等；在更大的时空尺度上，还研究泥沙运动导致的固体物质从山区搬向平原和海洋、形成冲积平原和三角洲及在海洋环境沉积等过程。作为河流泥沙学科研究的应用，主要面向江河治理、水利水电工程、航道工程及生态环境中与泥沙有关的问题，本学科与防洪、水资源、引水灌溉、供水等紧密联系，并与生态、环境等方面的关系越来越密切。

1.2 我国在河流泥沙研究方面取得的重大进展

1.2.1 泥沙运动基础理论

1.2.1.1 泥沙起动

泥沙起动是泥沙研究中最基本的问题之一，也是研究工程泥沙问题首先遇到的问题。国外早在 18 世纪末就提出了泥沙起动的概念，在 20 世纪 50 年代以前已有不少较好的成果，但这些成果主要限于研究均匀沙、非粘性颗粒的起动，并将起动作为确定性现象（相应的起动流速为时均的）考虑。

从 20 世纪 50 年代开始，我国众多学者开展了这方面的研究，经 60 年的长期深入研究，取得了丰硕成果，并在下述几个方面有所创新以致突破。

①细颗粒起动机理及粗细颗粒起动流速统一的研究。细颗粒起动流速随着粒径减少而增加的现象，国外 1935 年就已提出[22]，但是无法解释其机理和从理论上给予表达，虽然有的研究者也曾提出用底部层流子层的影响来加以解释，但与后来的一些理论（猝发理论）和实验资料并不一致。在 60 年代，我国的四位研究者[9、 11、 23、 24]对此问题取得了突破性的研究成果，通过引入薄膜水单向压力传递和粘结力，解释了细颗粒起动的机理，并给出了能从粘土（D=0.004mm）到卵石统一的起动流速公式，公式与相当多的实测资料符合良好。此外，一些研究者还考虑了泥沙密实程度的影响[24]；还提出了粘结力属于 Van der Wanls 力，从而由 Hamaker 色散势能求得其值等研究成果[25 26]；在文献[26]中研究了大水深对起动流速作用。

②在非均匀沙起动规律及起动流速研究方面取得了突破性进展[25]。通过引入暴露度的概念，来反映泥沙在床面的位置，从理论上导出其影响，得到了非均匀沙分组起动流速公式；统一了输沙率与起动的规律，提出了定量起动标准；研究了干容重的影响及细颗粒成团起动等。在泥沙起动的随机特性和统计规律方面也取得了新的进展[25]。对泥沙起动力臂的随机特性进行了研究[27]，测量了河床暴露度，借以反映宽级配起动机理，引进了与暴露度有关的等效粒径，以便用均匀沙的起动流速公式确定分组起动流速[28]。

1.2.1.2 高含沙水流运动

高含沙水流是指含沙量 200～300 kg/m^3 以上的挟沙水流。我国北方不少河流中高含沙水流时有发生，特别是黄河干支流高含沙水流经常发生，支流的最高含沙量可达 1600 kg/m^3。由于含沙量高，水流的运动呈现出与低含沙水流明显不同的特性。在 20 世纪 60 年代我国学者就对高含沙水流开始系统的研究，相继开展了野外观测、试验研究及理论分析，取得了丰

富的研究成果。20 世纪 80 年代，在深刻认识高含沙水流运动机理的基础上，结合河流动力学、流变学及固液两相流动力学的基本原理，将高含沙水流形成的条件，高含沙水流的流变特性、运动模式和运动机理等进行了系统总结，建立了高含沙水流运动的理论框架，出版了专著《高含沙水流运动》[10]。

高含沙水流运动研究主要进展包括以下几方面：①高含沙水流产汇流特性研究[29、30]，分析了黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程，得出高含沙水流产沙的极限浓度；②高含沙水流流变特性研究[31~34]，提出了高含沙水流流变参数的经验计算公式，建立了高浓度浆体粘滞系数与宾汉屈服应力计算公式，揭示了宾汉极限应力随紊动强度的变化规律，分析了粘性颗粒泥沙的絮凝现象与机理；③高含沙水流的流动特性研究[12、35~37]，认清了一般挟沙水流、高含沙水流及泥石流的不同物理图景及内在联系，揭示了高含沙水流可能出现的伪一相流、两相流及层移质三种运动模式，将含有细颗粒泥沙的高含沙水流的流态划分为紊流和复杂结构流，建立了复杂结构流流速分布公式，从扩散理论求出了管道两相流湍流浓度分布的方程，推导出与一般挟沙水流同样形式的浓度分布公式；④高含沙水流挟沙力研究[38]，通过对二维水流单位水体的能量平衡方程式沿垂线积分，经分析整理得出包括全部悬移质泥沙在内的高含沙水流挟沙力公式；⑤高含沙水流河床演变规律研究[39]，在一定水沙组成和河床断面形态条件下，高含沙水流可以保持很高的挟沙能力，进行远距离输送而不淤积，黄河高含沙水流的输移规律及造床作用呈现“多来多排多淤”和“淤滩刷槽”（包括缩槽）的特点，对于高含沙水流河床演变中的特殊现象，如“揭河底”[40~42]、“不稳定流”、“浆河”等剧烈变化，也结合实际观察，通过室内试验进行了分析。

1.2.1.3 泥沙运动统计理论

针对泥沙运动具有的确定性和随机性两方面特性，文献[43]进行了长期系统研究，建立了泥沙运动统计理论体系。在单颗泥沙运动及其统计规律研究方面，按照泥沙运动的三种形式：滚动、跳跃和悬浮，对单颗泥沙运动作了详细的力学分析,计算了运动参数，特别是对过去研究较少的滚动作了详细的研究，在底部流速和床面位置已知的条件下，给出了运动参数的分布函数和数学期望的关系式，分析了泥沙四种运动状态(包括静止)相互转移的临界条件及转移概率表达式,从而建立了单颗泥沙运动的随机模型；在泥沙交换与输沙率方面，研究了泥沙运动状态相互转移的统计规律,包括处于各种状态泥沙的寿命分布，静止颗粒的起动分布,转移颗数及转移强度，在此基础上建立了输沙率的随机模型,给出了输沙率的脉动分布及时均输沙率的公式,从而统一地描述了这两种规律;在推移质扩散的随机模型和统计规律研

究方面，对忽略运动时间与考虑运动时间、固定参数与变动参数等情况, 研究了点源、线源和面源的扩散，得到了相应的沉积分布、输移分布与运动分布；在非均匀沙运动机理研究方面，基于引进暴露度的概念，提出了非均匀沙在床面暴露度的近似分布, 给出了非均匀沙交换强度的表达式及非均匀沙输沙率的分布等。出版了专著《泥沙运动统计理论》，美国流体力学百科全书曾辟专章予以介绍，研究成果经国家自然科学基金委员会组织专家鉴定，认为“本项研究建立了较为完整的泥沙运动统计理论体系，有显著的开创性，达到了国际领先水平”。

系统开展了泥沙随机运动的试验研究[44]，利用高速摄影技术等手段，对水流中泥沙运动轨迹进行了系统的试验，取得了大量实测资料，据此，对明渠挟沙水流运动的力学和统计规律进行了系统的研究，包括清水流速分布和阻力规律、边壁对水流结构的影响、边壁影响修正方法，浑水流速分布和阻力规律、泥沙跃高、跃长、跃速、底部浓度、泥沙运动基本概率、推移质输沙率等运动参数的力学和统计规律等，出版了专著《明渠挟沙水流运动的力学和统计理论》。

1.2.1.4 非均匀沙不平衡输沙

水流挟沙能力反映了水流挟带悬移质和推移质的能力，一般仅考虑水流挟带悬移质中床沙质的能力。近期的研究主要在细颗粒高含沙水流挟沙能力、床沙质与冲泻质的相互转化、床沙质和冲泻质统一的挟沙能力关系、非均匀沙的挟沙能力及其级配、不平衡状态下的挟沙能力等方面取得了较大进展。

关于水流挟沙力我国的研究者已从不同理论和假设进行了大量研究[19]，文献[10，45]整理了大量的长江、黄河、渠道及水槽实验资料后，在“制紊假说”的指导下，得到了广泛应用的均匀沙悬移质挟沙能力公式，该公式既有一定的理论基础，又考虑经验修正，体现了对泥沙运动基本问题的研究特色。还有一些学者从能量观点出发，导出了悬移质全沙的水流挟沙能力公式，利用长江和黄河各水文站实测资料及水槽资料进行了验证，并应用于葛洲坝工程坝区泥沙模型设计[23]。也有学者由推移质输沙率确定底部含沙量入手，结合悬沙沿垂线分布公式，得到了悬移质水流挟沙能力公式[46]。

目前对均匀沙的水流挟沙力研究成果丰富，已较为成熟，因此，人们常用均匀沙的方法来处理非均匀沙问题。影响非均匀沙水流挟沙力的因素一般分为床面条件和来沙条件，相应的对非均匀沙分组挟沙能力级配的计算主要有以下几种方法：在平衡输沙条件下，仅考虑床沙级配迭加的 Hec-6 模型方法[47]；考虑底部挟沙能力及床沙级配确定的方法[48]；考虑悬移质

来沙级配的方法[49]；需要指出的是，在强平衡条件下，两种级配是一一对应，用两种级配加权，应是等价的[50]，对于不平衡条件下采取悬沙级配及床沙级配迭加的方法[50]。

非均匀悬移质不平衡输沙的运动规律是泥沙研究的基本问题之一，在理论研究方面取得了很大进展，主要包括：①在前苏联早期研究成果的基础上，我国学者得到了理论成果[51]，文献[49]针对非均匀沙积分二维扩散方程给出一维不平衡输沙方程，进而给出了恒定流条件下一维非均匀流含沙量沿程变化的解析解，以及给出了明显淤积与明显冲刷条件下悬移质级配与床沙级配的变化方程[49, 52]；②对冲刷过程中含沙量沿程恢复问题和淤积过程中含沙量沿程递减问题进行了理论分析，得出的结果至今还有指导意义[53]。现阶段关于非平衡输沙计算中恢复饱和系数的确定和床面泥沙与运动泥沙的交换机理及其定量化是研究的焦点问题。采用实际资料反算得到经验的恢复饱和系数，冲刷时取 1，淤积时取 0.25[54]，该系数在国内泥沙数学模型中广泛引用，根据统计理论推导得到平衡时的恢复饱和系数介于 0.02-1.78[55]；针对非均匀沙河床，王仕强提出了床沙交换速率新的物理概念，计算研究了不同床沙交换速率时表层床沙的粗化过程及非均匀沙含沙量恢复饱和过程。近年来对非均匀沙不平衡输沙和挟沙能力研究中的前沿科学问题进行了完善和深化，由统计理论给出了非均匀沙扩散方程的边界条件及恢复饱和系数的理论值[52, 56, 57]，特别是对挟沙能力级配和有效床沙级配的结构及特性进行了深入研究，据此解释了各种输沙现象[50]；③对粗细泥沙交换规律进行了探讨，论证了床沙质和冲泻质具有相同的挟沙能力规律，为采用全沙挟沙能力提供了理论基础[58]。

水流挟沙能力是受上游来流输沙状态和床沙组成共同影响的，说明在淤积、平衡与冲刷等不同输沙状态下，水流的挟沙能力是不同的，建立了高低含沙水流的统一挟沙能力公式[54, 59]。从水流泥沙运动基本原理上解释了水流挟沙能力系数在不同河流是不同的、同一条河流中水库的挟沙能力系数与河道的也是不同的及高含沙洪水的多来多排现象。该公式中的指数取值是非常稳定的，系数可以通过半理论表达式估算，由天然河流的实测资料，得到了长江、黄河等不同含沙量天然河流的水流挟沙能力系数[54, 59, 60]的取值规律，避免了泥沙数学模型中水流挟沙能力系数和指数选取的不确定性，为泥沙数学模型在不同天然河道泥沙输移和河床演变计算得到推广应用提供了理论支持。

1.2.1.5 水沙两相流理论

近20多年来，泥沙运动的动理学理论得到较系统地发展，该理论采用连续介质方程描述水流运动，采用Boltzmann方程（或动理学方程）描述泥沙颗粒运动，搭建了泥沙微观运动特

性和宏观平均运动特性之间的桥梁。在低浓度条件下，获得了Boltzmann方程的解析解，得到了泥沙颗粒的浓度、平均速度及脉动强度分布等公式，并通过实验验证了公式[61、62]，从而定量描述了泥沙运动速度与水流速度的明显差异，揭示出泥沙浓度分布的两种不同类型，解释了最大浓度不在底部的Ⅰ型及以Rouse公式为代表的最大浓度在底部的Ⅱ型浓度分布。在高浓度条件下，采取BGK模型近似Boltzmann方程的碰撞积分，得出适用于高浓度的泥沙颗粒浓度分布公式[63]。基于动理学模型，还建立了泥沙颗粒运动的本构关系，适用于流体与颗粒共同作用的一般含沙水流，克服了诸多模型只适用于“流体作用为主的低含沙水流或颗粒碰撞作用为主的颗粒流”两类特定条件的不足[64~66]。

1.2.1.6 其它方面

在泥沙异重流运动研究方面，利用异重流运动方程，推导出异重流阻力系数，利用室内水槽进行了异重流阻力系数试验；在水槽试验中观察浑水自明渠流过渡到异重流的情况，得出潜入点处的修正弗氏数为 0.78[67]，当底坡很缓时，给出了异重流潜入还需要满足的均匀流流动条件[54]，这时异重流潜入点将下移。通过试验给出了浑水异重流二元（三元）孔口出流的试验结果和计算公式[67，69]；根据官厅水库的实测资料与室内试验，得出了水库异重流的潜入条件与异重流排沙的计算方法，还给出了异重流泥沙淤积的分析[70]。研究了异重流的挟沙能力与不平衡输沙规律；初步揭示了异重流运动规律，基本遵循一般明渠水流运动规律，只是在形成机理与水库异重流排沙表现出特殊的一面[68]。对异重流运动特性进行了全面总结，特别是对选择性引水的孔口布置及临界条件做了对比分析；利用异重流的运动特性进行浑水排沙，减少水库的泥沙淤积，在官厅水库、三门峡水库及小浪底水库的运用中都得到较好实践[69，70]。

在径流、潮流、波浪共同作用下的泥沙运动机理和挟沙能力研究方面，研究了潮流和波浪共同作用下的水流挟沙力，并在航道及河口冲淤计算中得到了应用 [71~73]；运用波流分解方法，获得了描述河口水流垂向结构的理论模式[74]；根据湍流猝发的平均时间、空间尺度，构造了具有较好力学基础的泥沙上扬通量与湍流猝发之间的定量关系，可适用于描述非恒定显著的河口泥沙起动过程[75]；给出了絮团平均沉速随水体盐度和含沙量的变化关系；研究了河口盐度的垂直和水平分布随径流和潮流相对强弱变化的规律；研究认为最大浑浊带是河口形成拦门沙的重要原因之一。

在流域水沙配置研究方面，从泥沙作为一种资源的角度对流域泥沙资源化和流域水沙资

源优化配置进行了系统研究[76]，探讨了流域泥沙资源系统与社会经济、生态环境和水资源系统的相互关系，泥沙资源配置的原则、任务、原理和手段，研究了泥沙资源量与水流搬运、生态环境和水资源之间的平衡需求关系，提出了区域承沙能力的概念，给出了流域泥沙资源优化配置的基本方程组，构建了流域水沙资源联合多目标优化配置理论框架，建立了流域水沙资源优化配置数学模型[77, 78]，为系统研究流域泥沙资源优化配置及其应用奠定了理论基础，并从黄河泥沙空间优化配置的理论与模型、潜力与能力、技术与模式、方案与评价等方面对黄河干流泥沙空间优化配置问题进行了系统研究[79, 81]。

1.2.2 工程泥沙

1.2.2.1 水库泥沙

我国水库泥沙淤积问题十分严重，据统计，全国水库因淤积总库容损失达 40%[16]。因此，在多沙河流上修建大型水利枢纽工程，水库泥沙淤积问题是面临的关键技术问题之一，甚至决定着工程的成败。如黄河干流的三门峡水库，设计时以防洪发电为主，没有认识到泥沙淤积的重要影响，水库运行两年后，泥沙在库区大量淤积，潼关高程急剧抬升，使得汇入库区的支流渭河尾闾水位不断抬高、泄水不畅，八百里秦川遭受洪水和盐碱化的严重威胁，不得不对工程进行大规模改建最后取得了成功。正因为我国水库泥沙淤积十分严重，所以国家特别重视，许多泥沙科研和勘测人员，进行长期观测、分析及理论研究，取得了巨大成就，主要进展较集中地反映在文献[54，82]。

20 世纪 50~60 年代，我国水库淤积计算采用框算和三角洲淤积的平衡坡降法[83]，70 年代以后，由于积累了大量实测资料和采用了不平衡输沙理论，水库淤积研究取得了长足的进步，对水库淤积与河床演变，特别是坝下游河床演变做了长期深入的研究，取得了系统的、深刻的成果[54]。表现在建立了水库淤积的理论体系，基本完成了由定性描述向定量表述的过渡，主要成果包括[54]：水库淤积的机理，水库泥沙运动规律，淤积形态和形成条件的定量表达，三角洲及锥体淤积纵剖面方程，水库纵剖面与横剖面塑造特点，异重流淤积及倒灌，变动回水区冲淤，推移质淤积，回水抬高，淤积物随机冲填时干容重确定，混合沙及其密实过程中干容重变化，淤积过程中糙率变化等。目前，我国在水库淤积理论研究和围绕大型水利枢纽工程开展的大型水库工程泥沙研究代表该领域的国际领先水平。

在水库淤积控制和运用方面，通过我国泥沙科技人员的长期努力，有三项重大创新取得了良好效果：①水库的长期使用（俗称“蓄清排浑”）控制库容淤积的运用方式。针对三门峡

水库淤积的教训和经验，20 世纪 60 年代首次提出了水库长期使用的设想[84]，经过多年深入研究阐明了水库长期使用的原理[85]，论证了它在技术上的可行性与经济上的合理性，详细研究了水库长期使用的有关参数及最终平衡形态，在此基础上，给出了一种淤积平衡形态的计算方法，并通过算例得到与数学模型计算颇为一致的结果[54]。无独有偶，三门峡水库淤积和改建的实验，提出了“蓄清排浑”[86]，实际达到了水库长期使用的效果。理论与实际的结合，使我国提出的水库长期使用方式，在国际上获得了很高评价。②通过水库“调水调沙”可能在一定程度上控制下游河道冲淤，以改善下游河道[87]。其中包括人工制造洪峰，加大下游河道输沙能力，以加大冲刷和减缓淤积。③变动回水区的航道控制[54]。根据对已建水库变动回水区碍航是五种原因的组合，采取抬高枯季坝前水位高于防洪水位，加大了航深，减少了变动回水区长度和消落冲刷量，从而减少有可能的碍航段。

1.2.2.2 河床演变

通常把河道分为顺直、弯曲、分叉、游荡四种类型，这种分类不仅是对每一种类型河道平面形态的直观表达，更重要的是包括了对不同类型河道演变规律的深刻描述[13]。这种分类较之西方国家的顺直、弯曲、辫状三种河型的 Leopold 分类法具有明显的先进性。多年来，我国学者在上述河型分类基础上，对河道演变规律进行了大量研究工作，主要进展包括：不同河型河道的演变规律、河相关系、造床流量、河流的自动调整作用、河道的稳定性指标、各种类型河道的形成机理、水库上游的淤积与下游河道的冲刷规律、河床变形计算、河口演变规律。专著“河床演变学”[13]、“河流动力学”[10]对河道演变的规律加以分析总结，上升到理论高度，反映出该研究领域的系统成果。

黄河下游游荡型河道是多沙河流上最为典型的河型，其河床演变的特征表现为，主河槽异常宽浅，河道严重淤积，河道比降大、河床可动性强，形成冲淤摆动快、幅度大的多汊散乱河道。滩槽冲淤在河床演变上的效果和影响是不一样的，滩地淤积、河槽冲刷，使滩槽高差和平滩流量增大，对固定滩地、稳定河槽、增大输水输沙能力有利；相反地，滩地坍塌破坏和河槽淤积则使河道形势变坏。对黄河下游河床演变中的一些问题，曾经有一些系统研究，取得了多项成果，理论上也有进展[88，89，90，91，54]。在河道的淤积抬高过程中，河槽淤积抬高起主导作用，滩地淤积抬高则是伴随发生；黄河主河槽大水期冲刷、变窄深；小水期淤积、变宽浅；冲淤的分界流量约为 1800~2500m^3/s 左右，河段淤积比在流量 800~1300m^3/s 时最大[92]。对黄河下游河道输沙及冲淤特性，在理论上进行了广泛概括，揭示了其机理[93]。

结合长江下荆江河段演变对弯曲型河道的形成原因及发展趋势进行了系统分析。从历史背景上考察荆江的成长过程，可以分为漫流阶段、两侧分流阶段、一侧分流阶段及无分流阶段等。在成因分析上，揭示出在 16-18 世纪内，下荆江逐渐由微弯河型变成弯曲的蜿蜒河型，主要原因是由于荆江从两侧分流转为一侧分流所造成的下荆江流量的增大[94]。原来下荆江流量较小，河床过水断面较小，比降较大，随着流量的增大，水流挟沙力相应增加，而来水含沙量基本不变，河流必须通过冲刷使比降减小，而发展成弯曲的蜿蜒河型使河长增加正是达到这一目的的有效手段。

分汊型河道的演变过程表现在河岸的崩塌和淤积、江心洲的迁移及支汊的兴衰等方面[95]，分汊型河道的一支或二支往往具有微弯的外形，在环流作用下，处于凹岸的一边，河岸不断塌坍后退，泥沙被带到对岸的江心洲的边缘或尾部回流区，以致江心洲淤积与延伸。江心洲的头部由于受到水流的顶冲和环流作用常常崩坍后退，而在尾部则在螺旋流作用下，不断淤积延伸，致使江心洲逐渐向下游迁移。由于分流与分沙比的变化，江心洲也可以形成横向摆动，但是比纵向的移动慢一些，这些变化反过来又影响分汊河道河床的冲淤变化。在上游水位条件不变的情况下，弯曲的汊道由于流线曲折，长度较大，水流阻力增大，以致分流比减小，弯曲汊道进口处的环流形态使进口的泥沙增多，导致汊道趋向于衰减；而直的汊道则趋向于发展，往往由于一次大的洪水，河道的变形比较强烈，老的江心洲萎缩，又产生的新的江心洲，或新的分汊形势，进入新的演变过程；汊道演变周期的长短因河段而异[95]。此外，水库下游的分汊河道和游荡河段在长期冲刷条件下，有减少分汊，甚至有向单一河道发展的趋势。

随着河流来水来沙的大幅减少，北方许多河流都出现了严重萎缩的现象，成为河床演变的一个重要特征。河道萎缩是指由于水沙条件发生变异，河床演变脱离了在长期水文学意义下水沙过程中所建立的“相对平衡”状态，出现过流断面缩小、泄洪输沙能力降低等河道基本功能衰减的演变现象[91]。河道萎缩是一种复杂的河床演变过程，出现了许多新的演变特点，黄河下游河道萎缩主要表现为“滩槽并淤”和“集中淤槽”两种模式，其主要特征是河槽过流能力降低、同流量下水位不断抬升[91]。若长期缺乏大流量洪水过程，其泄洪输沙能力会发生累积性降低，河道萎缩将进一步加剧，当河道萎缩至一定程度后，即使发生小流量洪水过程，也会形成漫滩成灾现象，从而产生小流量-高水位-大灾害的不利局面。研究成果表明：在一定的条件下，萎缩性河道是可以逆转的，通过小浪底水库的调控运用将大量泥沙拦截在水库里，下泄水流含沙量很低，挟沙能力有较大富余，冲刷河床，展宽河槽，特别是通过水

库“调水调沙”运用，加大洪峰将有利于萎缩性河道的重新塑造。近年的实践证明，利用小浪底水库初期拦沙运用和“调水调沙”的有利时机，将黄河下游萎缩性河道恢复和维持在平滩流量为 4000m^3/s 左右的中水河槽是可能的[96]。

修建水库一般会引起坝下游河床发生较大变形[54]，初期的蓄水拦沙会引起坝下游较长河段发生含沙量显著降低、自上而下的含沙量恢复和普遍冲刷、地下水位下降、航道变化、塌滩崩岸、河床粗化明显、河势摆动、断面形态与河床纵比降的重新调整，甚至引起下游部分河段河型的转化。三门峡水库、官厅水库、小浪底水库和三峡水库修建后下游河道发生的一般冲刷现象都较为显著，但都未出现明显的河型转化现象，只有在三门峡水库运用初期，铁谢至裴峪有游荡河段转向宽浅分汊的趋势，丹江口水库下游汉江有 100 多 km 具有游荡性的分汊河段转向宽浅单汊的现象[54]。

1.2.2.3 重大水利水电工程中的泥沙问题

作为典型的重大水利水电工程，以下仅介绍黄河小浪底水库和长江三峡水库中的泥沙问题的解决方法。

（1）小浪底水库“调水调沙”运用与改善下游河道的重大创新[87、97、98]。通过长期多种途径研究，作为小浪底水库关键技术之一的泥沙问题得到解决。小浪底水库开发的主要目的是防洪减淤，原计划可拦沙 105×10^8t，使下游河道减淤 20 年，相应的减淤量约 70×10^8t，相当于减少淤积厚度平均约 3m 以上，减少洪水位抬升约 2m 左右。可见小浪底水库减淤是防洪的另一效益，不亚于防洪库容的作用。小浪底水库 1999 年开始运用，减淤效果得到了保证，但是对黄河下游而言，单纯减淤是不够的。小浪底水库建库前，1986 年至 1999 年，由于进入下游河道径流量大幅度减小，洪峰削减，不仅河道淤积严重，而且主河槽淤积所占的比例较大，致使主河槽的断面面积大幅减少，局部河段最小平滩流量（主河槽过流能力）减至 2000m^3/s 以下。小浪底水库蓄水后，1999 年至 2002 年 5 月，按细水长流，下游河道发生了清水冲刷，但是冲河南、淤山东，夹河滩以下水位反而抬高，高村最小平滩流量减至 1800m^3/s，于是出现一个“无法交待”和一个难以克服的“矛盾”。“无法交待”是水库拦了沙，下游长河段继续淤积和洪水位抬高，小浪底原设计确定 8000m^3/s 以上洪水才蓄洪， 现在以人为本，超过平滩流量，滩地就会淹没，就应蓄水保滩地。但是水库蓄了中小洪水，来了大洪水怎么办？于是住有 180 万人的滩区防洪与中下游流域防洪产生了矛盾，按一般措施，这是“难以克服的矛盾”。此时唯一可行的措施就是通过水库“调水调沙”运用，人造洪峰扩大平滩流量，

加大下游河道冲刷。2002 年小浪底水库实行“调水调沙”运用后，共冲刷约 $14\times10^{8}t$，最小平滩流量扩大到近 4000m^3/s，避免了冲河南、淤山东，全河洪水位均匀降低，普遍在 1m 以上，这是非常大的效果，也解决了黄河下游滩区的燃眉之急。这种在 800 km 河段，使平滩流量加大 1000m^3/s~2000m^3/s，在世界治河史上是没有的。因此，小浪底水库不仅具有防洪减淤的效果，而且还有改善河道的功效。

（2）三峡水库在泥沙淤积及处理上，做了长期深入研究，颇为成功地解决了泥沙问题或找出了应对的措施[54, 99]，三峡水库有关泥沙淤积的五个问题包括：库容淤积及过程，变动回水区冲淤对航运的影响，水库翘尾巴淤积引起的回水抬高，坝区泥沙淤积问题，以及下游河道冲淤变形。从 20 世纪 50 年代末至 60 年代初，长江流域规划办公室下属有关单位及相关部门就开始着手开展研究工作，1984 年开始对三峡工程可行性论证后，组织了国内在河流泥沙研究较为权威的几个单位，在三峡泥沙专家组指导下，进行了长期研究，到目前为止仍在进行。先后采用了实测资料分析、理论研究、数学模型与实体模型多种途径并行，得到了大量深入系统的研究成果，其中对库容淤积，采用水库长期使用运用方式，经过泥沙数学模型及其它辅助手段研究，最后得到淤积 100 年（接近淤积平衡），防洪静库容能保留 80%以上的结论。由于 90 年代开始，来沙大幅度减少，淤积大为减缓。三峡水库蓄水后，利用 2003 年至 2008 年实际淤积资料检验，证明在原来使用的两个泥沙数学模型的参数完全不变条件下，计算淤积量、部位、排沙比与实际是符合的。对三峡水库采用长期运用方式，加拿大 CYJV 在三峡水库 160m 方案可行性研究报告（第五卷）写到：“指出这一点是很重要的：平衡坡降和水库长期使用库容的理论，在中国已发展成为一种成熟的技术，三峡工程处理全部泥沙的策略就是建立在这个基础之上，世界上没有一个国家像中国在水库设计中有那样多的经验，以致使调节和防洪库容能无限期的保持”[54]。

三峡水库另一个与泥沙有关的重大问题是航道与港口淤积。在三峡库区天然状态下枯季水深均在 3m 以下，有的浅滩只有 2.7m~2.8m。水库修建后，要求每年有半年时间万吨船队要到重庆，包括变动回水区，河道最小水深要达 3.5m。因此，如何在变动回水区加大航深，使重庆港码头能正常运转是一个重大挑战。通过 18 座已建水库变动回水区冲淤及碍航问题分析，多个实体模型反复试验和数学模型计算等，最后使这个问题基本解决，特别是在加大航道变动回水区水深方面，采用了枯季航运控制调度[54]，其中包括：首先，将水库产生碍航的枯季（2~3 月），枯水位人为抬高，取消低于防洪限制水位的死水位，抬高至比防洪限制水位高 10m 的航道控制水位，即较之以往的以发电为主的调度方式，抬高枯季水位在 15m 以上，

使库尾相当长的河段处于回水范围，缩小了变动回水区，减缓了变动回水区冲淤，普遍的加大了变动回水区的航深。其次，通过实体模型反复试验，进行了提前整治，以及找出以后应对港口淤积的措施。总之，通过水库调度（提高枯水坝前水位）、整治、疏浚可以使三峡水库航运在变动回水区均能大幅度改善，目前由于上游建库，三峡水库泥沙将大幅度减少，为其更好、更经济的处理泥沙创造了条件。

三峡工程泥沙问题的有效解决，其重大意义在于，推动了泥沙模拟技术的发展，对工程泥沙问题起到了重要科技支撑。用于三峡水库模拟水库淤积与下游冲刷的非均匀悬移质一维不平衡输沙数学模型是国内建立最早、模型起点高、理论基础较强、创新点多、且颇为可靠的数学模型[100, 101]，从 70 年末开始，目前仍在使用。实体模型试验也是三峡泥沙研究的重要手段，在变动回水区和坝区先后做了十余个大模型，在模型相似律、模型模拟技术及量测仪器方面均有创新和发展，顺利完成了各种试验， 特别是航道方面的试验，对三峡工程泥沙问题的解决做出了贡献。

1.2.3.河流模拟

1.2.3.1 泥沙数学模型

河流泥沙数学模型的发展始于 20 世纪 60 年代，70 年代以后逐步成熟，在 1989 年第四次河流泥沙国际学术研讨会上，前国际水力学会主席 Kennedy 在发言中指出：泥沙研究的 10 个重要进展之一就是河流数学模型的建立与发展，这是 70 年代以后泥沙研究唯一的重要进展。

我国在 20 世纪 70 年代研发出一维河流泥沙数学模型[49, 100, 101]，20 世纪 80 年代末建立了二维河流泥沙数学模型[102, 103]。90 年代以来，一二维嵌套、立面二维、平面二维、三维、力矩方程和河网[104]等泥沙数学模型取得了长足的发展，并在工程中广泛应用。

在一维河流泥沙数学模型方面，在其发展的几十年中，不断完善，已成为十分成熟的模型[18]。在理论层次上，建立在非均匀悬移质不平衡输沙理论的基础上[100]，引进了挟沙能力级配及有效床沙级配[50]，提出了采用全沙输移的理论基础[55]；考虑了区间入汇与取水对水流的影响，改进了水流动量方程[105]；推导了计算挟沙能力系数和恢复饱和系数的表达式，避免了参数取值的不确定性[54, 106]。在模型开发层次上，已由单一河段恒定流水沙模拟发展到复杂河网非恒定流水沙模拟[107]，克服了以前那种仅局限于单个单元演变的缺点，使系统内各单元的

互动关系变得直观明了，提升了河流泥沙数学模型的模拟功能。由平面二维模型发展到考虑横向环流的具有准三维性质[108]，在应用层次上，就三门峡水库、小浪底水库、三峡水库和黄河、长江等大江大河等有关问题进行了深入研究，取得了多项创新性研究成果[87, 91, 99, 109]。

在二维河流泥沙数学模型方面，也考虑了不平衡输沙、有效挟沙能力和挟沙能力级配[50]，建立了断面挟沙能力系数与网格挟沙能力系数的关系[102]，提出了不规则区域计算的等参元网格法[110]，建立了二维阻力沿河宽分布关系和二维水流挟沙力分布关系[110]。近年来，结合大江大河治理的需求，开发了基于 GIS 的黄河下游二维非恒定洪水演进和泥沙冲淤模型[111]。二维河流泥沙模型在研究和解决三峡工程变动回水区、坝区及坝下游河道的泥沙问题和黄河“调水调沙”生产运行的调前预测、调中预测及调后评估等研究中得到了广泛的应用。

目前，一、二维河流泥沙数学模型已比较成熟，三维数学模型以水流模型居多，基本具备了模拟大水域三维流场的能力，三维泥沙模型研究处于起步阶段[16]，大多利用水槽实验数据对模型进行水位、流速分布、含沙量分布、局部冲淤形态等的验证，离实际应用尚有一定的距离。

1.2.3.2 泥沙实体模型

实体模型试验是研究河流在自然情况下及修建水工建筑物后预测水沙运动和河床演变的重要手段之一。特别对一些三维性较强的问题，理论分析和数学模型计算困难甚大，通过实体模型试验的方法进行观测更为有效。我国自 20 世纪 50 年代从前苏联引入方程分析法和爱因斯坦模型相似律，先后针对我国模型试验发展要求开展了大量的泥沙实体模型模拟理论与技术研究，建立了一整套实体模型的相似理论、设计方法和试验技术，并在研究和解决大量的工程泥沙问题中积累了丰富的经验[112]。

在相似理论方面，从 20 世纪 50 年代开始，针对我国江河开发和治理的要求开展了大量的泥沙实体模型模拟理论研究，提出了动床泥沙实体模型相似律[10, 113]；结合黄河河道宽浅、冲淤变化大和含沙量高等特点，提出了黄河动床泥沙模型相似律[114, 115]，围绕三门峡和小浪底等大型水利工程，开展了大量的泥沙实体模型试验工作[115, 116]；提出了全沙模型相似律并用于葛洲坝水利枢纽坝区泥沙模型设计，解决了泥沙实体模型设计中的难题，取得了很好的应用效果[23]。

在模型设计和试验技术方面，对含沙量比尺的确定、模型沙选择、模型人为转弯、比降二次变态、宽级配非均匀沙模拟、异重流模拟、河型变化河段模拟、时间变态对试验成果相

似性的影响、几何变态对悬移质和推移质运动与淤积部位相似性影响及模型沙基本物理特性等问题提出了新的认识，具有非常十分重要的应用价值[112]；建立了一套适用于长河段、多进口、不同河型、高低含沙量、变幅大和干支流同步模拟的变态动床模型设计方法，解决了修建水库引起的下游冲刷、汇流区水沙运动、高低含沙量与不同粒径泥沙同时模拟等方面的相似问题，取得了令人满意的成果[21]；通过大量的海域电厂取排水工程泥沙实体模型试验研究，建立了一套适用于潮流和径流同步模拟的动床实体模型设计方法[21]，解决了波浪、潮汐和径流作用下水流、泥沙输移和海床冲淤模拟的相似问题。

此外，将动床实体模型和泥沙数学模型联合起来运用的合交模型[18]，也是研究发展的一种新趋势。近几十年来，我国泥沙研究工作者充分利用实体模型试验的优势，针对长江的葛洲坝与三峡水利工程、黄河的三门峡工程与小浪底水利工程及其它大江大河的河道整治工程中做了大量的动床实体模型试验，形成了较为完善的实体模型试验理论方法和实践经验。

2.国家需求与学科发展方向

2.1 国家需求

2.1.1 大江大河治理与防洪安全的需求

近几十年来，河流泥沙研究取得了丰硕的成果，为我国经济建设和社会发展提供了强有力的科技支撑。但由于泥沙研究尚属发展中的学科，经验性较强，许多基础理论还不成熟，一些现象还无法从机理上得到圆满解释。同时，由于人类活动的日益加剧和自然气候变化的影响，江河长时期的径流量减少，造成河流泥沙淤积、河床不断抬高、主河槽萎缩、过水能力不断降低、同流量下的水位大幅度升高、防洪形势日趋严峻。如长江部分测站洪水位不断破历史最高记录，1998 年长江流域特大洪水充分说明了河湖泥沙淤积、河势不稳、河道湖泊槽蓄和行洪能力降低的危害性；黄河下游河道严重淤积萎缩，使得“二级悬河”加剧、“小水大灾”现象频发、功能性断流与洪水威胁并存；淮河、松花江、西江等河流及其支流也是洪灾频频。目前，全国 70%以上的固定资产、44%的人口、1/3 的耕地，数百座城市以及重要铁路、公路、油田等国民经济基础设施和工矿企业处于主要江河中下游平原，受到洪水严重威胁，一旦发生较大洪水灾害，就有可能严重干扰国家正常的社会经济秩序，成为国家的心腹之患。

进入二十一世纪，随着我国经济社会的快速发展，作为清洁能源、再生能源的水电工程

也进入快速发展阶段，国家对防洪安全、水资源安全、供水安全及水电开发提出了更高的要求，希望在一个较长的时期内保持一个安全、稳定、可持续发展的流域生存和发展环境，实现人-水沙-自然和谐发展，这使得国家加快了大江大河治理的步伐，许多江河治理工程中的技术问题急需研究解决。在此背景下，河流泥沙研究必须深入开展基础性、前瞻性、战略性研究，揭示泥沙运动机理，加强水沙变异引起的河道淤积萎缩机理、洪水演进异常现象形成机理、主河槽调整规律、遏制河道继续萎缩、维持河流健康的措施和大江大河治理中急待解决的技术难题的研究，预测大江大河未来河床演变的发展趋势，提出大江大河治理的对策和措施，满足我国大江大河治理和防洪安全对泥沙学科的更高需求。

2.1.2 重大水利水电工程建设的需求

当前我国正处于水利水电工程建设的高峰期，已经建成和正在建设许多重大水利水电工程，这些工程的修建将改变天然河流水沙条件与河床形态的相对平衡状态，使水沙条件和河床形态进行重新调整。通常情况下，对工程上游的库区来说，水位壅高，水深增大，水面比降减缓，流速减小，水流的挟沙能力显著降低，促使大量泥沙在库内淤积，其结果导致水库有效库容减小，原设计兴利指标不能全部实现，甚至将威胁水库的寿命；水库回水末端的淤积上延，将扩大淹没和浸没面积，给工农业生产带来严重影响，并且将威胁上游重要城镇、工矿的安全和铁路、桥梁的正常使用；回水末端的泥沙淤积还会影响航运；库区泥沙的大量淤积，可能造成有害物质沉积于库底，使得污染物在库区出现富积现象，使水质和环境受到污染。对工程下游的河道来说，在工程运用初期，由于下泄清水或含沙量较低的水流，加之泥沙变细，下游河道将发生冲刷，如黄河小浪底水库和长江三峡水库下游河道目前处于清水冲刷阶段，但冲刷初期是以下切为主，中后期则伴随一定的展宽，其影响范围和影响程度如何尚不十分清楚。水库运用不当还可能对下游产生不利影响，如黄河龙羊峡等水库运用后宁蒙河段淤积萎缩、过流能力下降，出现了严重的凌洪灾害。因此，需要深入研究河流大量修建重大水利水电工程后，对上下游河道的长期影响，从尽可能延长工程使用寿命和维持下游河流健康的角度，提出工程优化的调度运用方式，为重大水利水电工程的建设和安全运行提供科技支撑。

2.1.3 生态环境与河流健康的需求

河流健康是探求在河流开发与保护之间找到一种平衡，以维持河流可持续的、健康的功能。河流健康概念于 20 世纪 80 年代提出，尽管“河流健康”一词用于河流或河流生态还存

在不少争议，但这一形象的比喻至少引起公众和政府决策部门对河流状况的恶化给予了更多的关注，促进了河流健康的评价指标和评价方法的研究，成为河流管理的一个评估工具，改变了河流治理理念。河流健康概念引入国内较晚，加之我国南北方河流差异较大，目前还没有能够被普遍接受的河流健康定义、评价指标和方法，严重影响了维护河流健康工作的开展。

目前，我国河流生态环境和健康状况呈恶化趋势，如长江中下游河势仍处于剧烈调整阶段，崩岸塌岸等现象时有发生，流域废污水排放量呈逐年增长趋势，局部河段污染严重，水环境整体上日趋恶化，长江口受咸潮入侵影响较严重，影响沿江部分城市供水和河口生态环境；黄河由于来水减少，自 20 世纪 70 年代初以来，有 21 年下游出现断流，局部地区生活生产供水困难，河流水循环受损，主河槽淤积萎缩严重，河口湿地萎缩，生物多样性遭到破坏，生态和环境恶化；珠江由于来水减少，咸潮入侵加剧，严重影响了河流的生态环境和供水安全，等等。因此，改善河流生态环境，维持河流健康是 21 世纪国家面临的紧迫和艰巨任务。河流泥沙研究应该在河流健康评价指标和方法，维持河流健康的措施和技术方面加强研究，为维持河道稳定、改善河流生态环境、维护河流健康提供科技支撑。

2.1.4 河口海岸开发建设的需求

沿海地区是我国改革开发的前沿阵地，随着河口海岸开发建设的快速发展，大量影响河口海岸和航道开发建设的泥沙问题需要研究解决，对泥沙研究提出了新的、更高的要求。由于河口和滨海地区通常是我国重要的核心经济区，面临风暴潮灾害、防潮御卤、闸下淤积、海岸带水资源开发利用、航道维持、城市用水、水环境保护等方面的压力；特别是由于流域环境变化及重大水利工程的影响，河口来水来沙条件将发生变化，需要从机理上研究河口区水沙变化规律、输沙特性、海岸风暴潮灾害及对策、海水入侵及控制，以及岸线和流路的演变规律，同时揭示这种变化对河口海岸生态与环境的影响，提出解决的对策和治理措施，为河口海岸开发建设提供科技支撑。在航道开发建设方面，面临着保证航道一定的通行能力和保证率等问题，这就需要研究自然条件变化和人类活动引起的水沙变化对航道的影响及应对措施，研究既能保证泥沙在航道少淤积，满足航道宽度、深度和水流条件要求，又不会对堤防安全、防洪安全和河流其它功能形成大的影响的航道整治措施和技术，以及维持航道稳定的工程与非工程措施，为航运安全提供科技保障。

2.2 学科发展方向

2.2.1 从细观上深入揭示泥沙运动机理

泥沙运动与河流动力学尚属发展中的学科，在理论上仍不成熟，目前学科处于半经验半理论研究阶段，主要原因是以往对具体工程泥沙分析较多，对泥沙细观研究不够，对其运动机理揭示还不十分清楚，因此，深入开展细观研究，揭示泥沙运动机理仍将是今后河流泥沙研究的重点发展方向之一。如紊动拟序结构对床面泥沙颗粒上扬和远距离输运有影响，基于紊动拟序结构制约作用的泥沙起动和悬浮运动应是泥沙运动力学的一个重要研究方向；床面泥沙交换强度较之输沙率是更基本的概念，利用泥沙交换强度能统一悬移质与推移质的运动规律，有可能建立泥沙运动统一理论，需要深入研究；非均匀沙不平衡输沙运动属于泥沙研究的前沿问题，研究内容广、难度大，应在已有的基础上，进一步深入开展。挟沙水流本来属于固液两相流的范畴，由于现代两相流理论的发展，能从更深层次揭示泥沙运动机理，特别是高含沙量水流运动机理，从而使泥沙运动理论更为深刻，应加强水沙两相流的研究及在工程中的应用。

2..2.2 非均匀沙不平衡运动规律

不平衡条件是自然界普遍存在的现象，泥沙运动也不例外，如天然河道水流与泥沙运动一般特性；非均匀悬移质的不平衡输沙；冲淤条件下挟沙能力及挟沙能力级配表达；洪峰涨、落峰条件下，水力、泥沙因素及河道的冲淤变化过程；典型河道不同水流条件下水流与悬移质相位差别及其对输沙能力的影响；不定常流条件下推移质运动特性，洪峰的滞后、有充分补给或无充分补给条件下的滞后对推移质输沙率和河道冲淤的影响等，都属于不平衡泥沙运动范畴。受研究手段的限制，以往对平衡条件下，特别是平衡且均匀沙条件下的泥沙运动研究较多，运动机理也比较清楚，不平衡条件下，特别是不平衡、非均匀沙条件下泥沙运动研究较少，除少数成果外通常大都是参照平衡条件进行研究，其运动机理也不十分清楚。因此，从客观反映自然界泥沙运动现象出发，开展不平衡泥沙运动规律研究十分必要。

2.2.3 泥沙运动理论的整合与统一

受研究手段和认识水平的限制，过去人们往往把同一泥沙运动的不同阶段和不同部分分开来研究，得出不同的表达方式或解释，如泥沙起动与推移质输沙率、悬移质输沙率和推移质滚动、跳跃输沙率等。而实际上，许多泥沙运动现象之间存在着紧密联系，有的甚至就是同一运动的不同阶段，如泥沙起动就是推移质输沙率很低时的特殊状况，悬移质与推移质是冲积河流同一泥沙运动过程中紧密联系、难以分开的两个阶段。此外，由于泥沙运动理论的不完善，现阶段泥沙数学模型种类多，挟沙能力公式与不平衡输沙公式不仅形式有所差别，

且其中的参数不固定，任意变动和凑实测资料的情况比较普遍，而从泥沙数学模型发展考虑，应保持挟沙能力公式、不平衡输沙公式中的参数尽可能趋向固定或明确变化的规律。因此，从促进学科发展、使相关理论更为成熟和使用更方便考虑，不同泥沙运动理论整合与统一是学科发展的必然要求和最终结果。

2.2.4 河流系统泥沙问题

河流本身是一个复杂巨系统，各部分之间相互联系、互相影响。河流系统泥沙问题更加复杂，包括“产、输、冲、淤、拦、调、用”等多个部分，一个部分的变化必然引起其它部分的相应变化，从而导致河床冲淤。因此，必须从全流域的角度来研究泥沙的侵蚀、输移和沉积，以及在可能条件下的合理安排。这里有两个方面的研究内容：一是建立能定量复演流域侵蚀、河流输移、冲刷与淤积，及入海泥沙的统一水沙过程的预报及相应的实用模型，研究流域侵蚀与河流演变的关系，研究来水来沙变化对河流上、中、下游泥沙运动及河床演变的影响，研究大型水利枢纽工程修建后对其上、下游河道长期的影响等。二是从资源化的角度研究泥沙的优化（合理）配置，如开展流域水沙调控与优化配置的理论、配置的目标、配置的措施和配置的方式等研究，提出流域泥沙长期配置的措施与方案。河流系统泥沙研究将是今后一段时期内河流泥沙研究的重要目标，从学科发展的角度看，与此相关的内容，也都是近期内可能取得突破的研究领域。

2.2.5.注重边缘科学与交叉科学

现代科学研究的显著特点是学科交叉和发展边缘学科，也是未来的必然趋势。泥沙学科具有边缘和交叉的特点，只有交叉才能出成果，由于泥沙学科过去与其它学科交流和渗透不够，各学科大量的相关研究成果有待集成，相关理论和方法有待借鉴和结合。因此，通过注重发展边缘科学与学科交叉，可以使交叉领域的一些问题得到尽快解决，如通过概率论与流体力学相结合的途径，研究泥沙运动统计理论；两相流有关理论与河流动力学传统方法结合研究高含沙水流和泥石流等；海洋动力学与河流泥沙动力学结合研究河口与海岸泥沙问题；河流动力学与河流地貌学结合研究河流长期演变及河型变化；河流泥沙与水生态、水环境结合研究环境泥沙问题及相互作用等。

2.3.存在的问题

我国大江大河的治理、水利水电工程的大发展，水利工作的转型，以及在工程建设、航

道开发与治理、水资源短缺和生态保护与水环境整治方面的需求，给我国河流泥沙带来了重大的机遇和挑战，但在泥沙学科发展中也存在一些问题，需要在研究中得到重视和加以改进。

2.3.1 现有河流泥沙理论不能满足工程实际日益提高的要求

随着人类社会的发展、气候的变化和水利工程的不断建设，工程泥沙问题越来越复杂、要求越来越高，在解决工程泥沙问题上不仅要考虑自然气候变化的影响，还要考虑人类活动的影响；不仅要考虑河流的健康，还要考虑人水和谐，考虑的因素越来越复杂。解决问题的制约因素多、关系复杂、难度大，使有关泥沙问题解决的难度越来越大，现有理论难以满足工程实际日益提高的要求。如在河流的上中游大量建设水库和开展水土保持治理后，黄河下游治理应该向什么方向发展（宽河、窄河、还是宽窄相间）？黄河干流泥沙应如何合理安置？“二级悬河”如何治理？黄河泥沙问题如何根治？怎样才能使黄河做到长期不淤或河床抬高速度大为减缓？长江上游干流一系列高坝大库和各支流的梯级开发，使中、下游长期下泄低含沙量水流，中下游河道将如何变化？对中下游防洪安全、水资源安全和航运安全有何影响？影响程度多大、范围多大和时间多长？江湖关系将如何变化？对流域社会、经济有何深远影响？当然上述一些问题解决并不单纯是泥沙方面的问题，但是泥沙问题是其中需要考虑的重要因素之一。这些重大问题的解决都给泥沙研究提出了更高的要求。

2.3.2 河流泥沙理论有待完善

河流泥沙研究成为学科发展的历史不长，但在人们治水治沙的实践中，对水流中泥沙运动规律的认识不断深入，对河床演变规律的总结不断提高，解决了江河整治、水利工程建设及生产实践中的大量泥沙问题，诸如水库淤积与下游河道冲刷，航道整治与维护、渠首防沙、桥墩冲刷、堤岸防护、工业取水与泥沙处理等问题。在实际问题解决过程中，采用定性分析和定量预测等各种手段相结合，推动泥沙运动基本理论、河床演变学及河流模拟技术等方面均取得了一定进展。但也应清楚地看到，由于河流泥沙研究是新兴学科，尚不成熟，对现象定性描述多、定量表达少、经验性强、许多理论还有待完善，缺乏概括性高的理论体系。而江河治理开发实践中遇到的实际问题异常复杂，现有理论和方法还难以使所有问题得到圆满解决。如游荡性河型的演变规律就没有成熟的理论，使其治理产生诸多的困难；三峡水库下游河道冲刷，河床冲刷发展历程关系到江湖关系变化、河床冲刷深度、河口沙量变化等方面的调整，影响着工程对防洪、航运、生态等方面影响的评价，然而由于当前对冲刷过程中床沙粗化的影响认识不足，加之对河势变化影响复杂，还难以给出较可靠的长期定量预测；与

此类似的问题还有下游河型的转化，典型河段河势的调整和间歇性高含沙河流的河道演变规律及其治理对策等。这些问题的存在表明，关于泥沙运动基本理论和河床演变原理的研究，在今后一段时间内仍将是河流泥沙研究的重点内容。

2.3.3 泥沙数学模型软件与参数的规范化

我国泥沙数学模型不少是建立在非均匀沙不平衡输沙基础上，对泥沙模拟起点颇高，模拟内容较多。由于发展不平衡，低水平重复严重。目前存在的问题是：国内使用的河流泥沙数学模型很多，采用的方程，特别是挟沙能力公式和不平衡输沙其它公式（包括挟沙能力级配等）中的参数不少缺乏理论根据，不固定或没有明确变化的规律，存在任意变动和凑实测资料的现象，难和实际较接近，明显地反映出理论跟不上工程泥沙的需要，理论上的集成与澄清是十分必要的。同时，我国河流泥沙数学模型商业化不够，近年来，不少单位都在引进国外商业软件，如 DHI 和 Delft 等的软件，国外的商业软件之所以能够比较快的打入国内市场，并不是因为它们在模拟能力上显著优于国内的软件，而是因为这些软件具有前后处理方便快捷，可视化程度高，计算成果能够动态显示，计算效率高，网格灵活可变等优点。相比而言，国内的软件虽然很多，有些软件的物理图形和基本原理处于国际领先水平，模拟成果甚至优于商业软件，特别是在泥沙运动和河床演变模拟方面，但由于这些软件多数是由个人或少数几个人开发的，功能比较单一，通用性较差，程序结构没有优化设计，计算效率不高，界面不规范，可视化和动态显示程度弱，限制了推广应用。我国的河流泥沙数学模型软件离成熟的商业软件尚有一定距离，只要我们能够切实转变观念，建立稳定的研发队伍，投入一定的财力，相信在不长的时间里，一定会在世界的商业软件中占有一席之地。

2.3.4 多学科交叉研究不足

河流系统中的物理、化学、生物等各种过程涉及到泥沙动力学、河床演变学、地貌学、沉积学、水文水环境、生态学等多个学科，以往河流泥沙研究主要研究不同来水来沙条件下的河流动力学与河床演变规律，很少涉及地貌、生态和水质等问题，涉及多学科交叉的问题研究较少，制约了泥沙学科的发展。目前，随着我国经济社会发展对河流系统要求越来越高，河流地貌、河流生态环境和河流水质等已成为河流系统研究的热点方向，要解决这些问题，就必须开展河流泥沙与地貌学、生态学和环境学等学科的交叉，取长补短、相互渗透，提高综合研究能力。多学科交叉研究，必然将推动泥沙科学和相关交叉学科的向前发展，并且丰富泥沙科学的研究内容。

2.3.5 泥沙研究缺乏长期规划和系统管理

国家对泥沙研究缺乏长期规划，特别是对泥沙运动基本理论研究，没有系统的规划，投入也很少，目前，除少数科研人员开展了一些深入的基础理论研究外，多数人员集中在具体的工程泥沙问题的研究，这与市场经济冲击、科研浮躁和国拨科研经费管理办法密切相关。

泥沙研究缺乏系统管理，各研究单位八仙过海，各显其能，找到什么课题做什么课题，各自为战，急功近利，低水平重复，浪费了国家科研经费和办公、试验设备等资源，难出高水平成果。

泥沙研究尚处于半理论半经验的科学，实测资料分析对学科的发展具有重要的推动作用。而改革开放后，水文部门对国家投资测量的河道水文、泥沙和冲淤资料实行有偿服务，收费标准使研究人员难以承受，严重阻碍了学科的发展。

由于行业社会地位、工作环境和收入的差距，使泥沙专业对优秀年轻人才的吸引力下降，影响了后备人才的引进和培养，对专业未来发展产生了不利影响。

3. 河流泥沙理论和工程泥沙创新前沿

目前我国水利水电工程的高速建设、大江大河治理、河流航道条件的提高、生态保护和环境治理等，以及水利事业的发展和转型对工程泥沙提出的要求愈来愈高，需要给予强有力的科技支撑。而加强河流泥沙基础理论研究，是提高工程泥沙水平的基础。近十多年来，河流泥沙基础理论研究总的形势并不乐观，长期坚持研究的人员太少。借我国建立创新型国家的东风，进一步推动河流泥沙基础理论创新研究是十分必要的，这不仅为了解决工程泥沙问题的难题，同时也有利于巩固和提高我国河流泥沙研究在国际上的领先地位，推动世界泥沙研究的发展。

3.1 大规模深入开展河流泥沙实测资料分析

3.1.1 加强新水沙条件下河流泥沙资料的观测

我国对水文泥沙资料观测一贯十分重视，已积累了大量宝贵的实测资料。随着自然气候的变化和人类活动日益加剧，需要加强对新的水沙条件下水文泥沙资料的观测，特别要注意加强野外与室内测验仪器和试验方法等的改进与创新。目前实测水文泥沙资料封锁十分严重，有关领导和部门要下决心解决，使实测资料和数据库在相当范围内开放。

3.1.2 通过实测水文泥沙资料分析揭示机理

我国实测资料丰富，应开展大规模的深入分析。加强实测资料分析是指对泥沙运动的特性与规律的分析，实测资料分析往往能揭示新的现象和规律，是创新的重要途径之一。从书中和已发表的文献之间找出的一些问题，创新的程度往往较低，带动的研究少，而从实践中发现新的现象，经过研究往往能揭示新的机理，引伸出新的研究方向和课题，有可能完成较系统的创新。

3.1.3 注意引进新的分析方法

在实测资料分析方法方面，可以采用的新方法较多，如模糊数学、灰色理论、神经网络、分维分形、先农熵等，这样使经验关系也能有大量的实测资料和较深入的归纳作为基础，要注意不同方法对不同问题是否适应的问题。在资料分析中，还可以编制一些资料分析的软件系统，以减少各自编程序的耗时浪费。

3.2 河流泥沙基础理论的深入研究

河流泥沙运动的基础理论问题需要持续不断地加强研究，特别是下述有重大工程意义、学科发展需求和创新前景的前沿课题，应予优先安排。

3.2.1 泥沙起动

泥沙起动是一个基本问题，已开展了 200 多年的研究，其中不少问题已研究的较为清楚，目前国内的一些研究成果低水平重复较多，缺乏创新性，不少成果对机理没有新的阐述，没有新的概念，公式结构没有什么变化，只是在系数和指数上略有改变。对于小砾石、沙及细颗粒的单颗泥沙起动，已基本研究清楚了，但在细颗粒受力状态方面，还有一些分歧，如薄膜水附加下压力是否与大气压力有关等，对此进一步开展一些创新性研究是需要的。

3.2.1.1 非均匀沙分组起动流速

对于非均匀沙的起动，要求能算出不同粗细颗粒的起动流速，包括不起动的颗粒，而且能够符合实际。分析时要注意底部水流（紊流拟序结构）和床面位置不同对颗粒的影响[25, 117]，后者包括暴露度的表示，应研究如何在受力状态分析中从理论上引入反映暴露度的参数，以反映颗粒间的遮掩与阻挡，以反映不同粒径颗粒起动流速的差别，而不是通过经验系数来考虑。

3.2.1.2 起动标准与输沙率的关系

(1) 过去对泥沙起动判别缺乏明确标准，由各人的目测确定，本来应该差别很大，但是由于低输沙率时，它与流速的高次方成比例[25](30 次幂以上)，即令输沙率差 200 倍，但流速只差± 8.8%左右，按这样的差别，绘在对数纸上就符合很好，如此看来，起动流速的标准似乎并不重要。但是，反过来从输沙率看差别就会很大，可相差 200 倍。更重要的是通过研究起动标准，可以深入揭示低流速时推移质运动机理，包括：起动时仍符合输沙率的规律，输沙率没有明确的零点，起动流速实际只有约定的意义等。

(2) 几种起动标准表示方法的对比研究和新标准提出。现有的几种起动标准分别为：静止、弱动、中动和普遍动的经验标准[118]，个别动、少量动和大量动的起动概率标准[119]，输沙强度标准的概念[120]，相对起动强度概念[121]，相对输沙率的表达等[25]。应在对比和分析这几种表达的基础上，提出新的起动标准或选择已有成果。输沙率标准应具有：具体、好观测、机理表达清楚的特点，当采用输沙率标准时，通过研究可得到一簇低输沙率曲线，则可以在曲线上找出若干个点，每个点就定义了一个时均起动速度，可见起动速度只具有约定意义。

(3) 卵石起动标准很低，若按沙粒起动标准给出卵石起动的标准，将会导致不符合实际的结果。事实上，若取卵石起动标准与沙粒的一样，则会得到目前长江川江河段的卵石均不能起动。按沙粒起动标准[25]，川江年输沙率为 $520\times10^{4}t$ 才算起动，川江朱沱、寸滩、万县和奉节四站的卵石推移质输沙率仅 $20\times10^{4}t$ ~$30\times10^{4}t$ 左右，按沙粒起动的标准根本不能起动，这是一个很大的矛盾，值得研究。

3.2.1.3 细颗粒成片（成团）起动机理与起动速度

细颗粒成片起动研究具有很重要的实际意义，如水库降水冲刷的坝前段，以及河口海岸当泥沙容重较小时(如浮泥被掀起)就会出现这种情况。粘性颗粒成片起动(成团起动)的机理是粘着力及薄膜水附加下压力，有一部分作为内力而抵销，它们阻碍起动的作用会减弱，从而使其容易起动，甚至会出现同样大小单颗泥沙组成的泥团起动流速小于单颗的现象。研究成果表明[25]：当干容重为 1.236t/m^3 时，对于 0.005mm 单颗泥沙组成的小片，在水深大于 3.356m 时，它的起动流速就小于单颗的，其机理是水深大，单颗起动时附加下压力大，其起动流速就大，而对成团起动，这种力往往是可以忽略的。

3.2.2 非均匀沙床面泥沙交换

3.2.2.1 非均匀沙床面泥沙四种状态输移规律

开展非均匀沙床面泥沙静止、滚动、跳跃与悬浮等 4 种状态交换模式研究，建立各种状态之间的转移条件及转移强度的定量关系[43]。

(1)非均匀沙的交换强度研究是近几十年来在我国发展的新的前沿领域。床面泥沙交换强度较之输沙率是更基本的概念，由交换强度可以推导出输沙率，反之则不然。Einstein 推导推移质输沙率时就有交换强度的意识，但他只用了起动和止动两种交换强度。

(2)研究交换强度的意义不仅能进一步揭示泥沙运动机理，提供推导推移质输沙率和悬移质输沙率的方法，而且还在于能将床面静止、滚动、跳跃与悬浮泥沙联系起来，使挟沙能力中包括了推移质输沙率，推移质输沙率公式中包括了含沙量，在更高的层次上使各种输沙率理论和表达达到统一，在非强平衡条件下更是如此。已有的研究成果表明[43]：通过 16 种泥沙交换强度表达式的研究，包括对有关参数的定量确定，可推导出单位床面单位时间和不同状态之间的泥沙交换的颗数；由交换强度可推导出输沙率公式(弱平衡)，其中滚动、跳跃、悬浮输沙率中的每一种都受其它两种的制约，说明利用泥沙交换强度能将各种运动形式的输沙率联系起来，有可能建立泥沙运动统一理论，并得到推悬比的关系式[43]。

(3)在研究泥沙交换强度中，涉及一些更基本的研究，包括：转移概率、状态概率、单颗泥沙单步运动和泥沙起动周期等，这就使泥沙运动由宏观转为细观，由多颗粒转为单颗粒，能深入揭示其机理，对此已有一些开创性工作[43, 44]。

3.2.2.2 底部紊流拟序结构及猝发对泥沙运动状态的影响

底部紊流拟序结构及猝发对泥沙掀起，特别是对泥沙起动周期有重要的影响，对起动周期研究包括两种途径：一种采用瞬时速度掀起的平均时间，另一种可从猝发考虑，对前者已有专门成果[43]，对后者文献[122、123]的成果应有助于这方面的研究。猝发掀沙对起动后的泥沙转为滚动、跳跃、悬浮的比例，以及跳跃长度与紊流的尺度关系等研究，也是十分重要的，文献[124]在这方面做了不少实验研究，值得参考。

3.2.3 非均匀沙推移质输沙能力

3.2.3.1 分组输沙率的表达式

在这方面的研究，应突破已往几种模式的束缚，不要限于单纯的修改系数或指数，应以

建立新的分组输沙率公式为主，分组输沙率由床沙级配迭加，也可以由推移质级配迭加，但表达公式不同，在平衡条件下两者给出的结果是一致[50]；宽级配影响的研究有两种途径：参数校正方法与分组计算方法，究竟孰优孰劣，分组法较为简单，修正系数法显得复杂，且机理上不明确，修正往往不能通用，这方面应在深入研究后予以评价。分组输沙率的研究要求能计算不同粒径的输沙率(包括不能起动部分)，并且经资料证实符合实际。

3.2.3.2 推移质级配与床沙级配关系

推移质级配可由分组输沙率公式导出，进而研究推移质级配与床沙级配的关系，应注意当床沙不能全部起动(推移)时，将能起动部分的床沙标准化，但在按分组输沙率计算总输沙率时，则应采用全部床沙级配，以反映不能起动床沙在床面所占的面积对起动和输沙率的影响。

3.2.3.3 反映来沙影响的有效床沙级配

在非强平衡条件下推移质不能完全用床沙级配迭加，此时应考虑来沙级配。卵石推移质特性之一是来沙级配较床沙级配要细很多，确切地说，是较与推移质级配相应的床沙级配细。因此，若不考虑来沙级配，推移质输沙率将偏小，若考虑来沙级配，则推移质输沙率偏大。这正是在实际卵石推移质测验中有所谓强烈输沙带及来沙对卵石输沙率影响大等现象的原因，如何考虑来沙影响是值得注意的，这也是推移质输沙率测量结果波动很大的原因之一。要想解决上述问题，就需要做一些深入研究，如：是否可引进有效床沙级配，它由床沙与来沙级配按一定权重迭加[43, 44, 125]，如来沙级配未知，如何进行研究等。

3.2.3.4 床沙级配变化（包括粗化）与推移质冲淤及来沙级配的关系

只有按分组输沙率计算才能反映床沙级配的变化，包括粗化问题也是如此。如分时段计算冲淤条件下分组输沙率便可得到床沙级配变化，也可通过研究推移质级配与床沙级配关系，进一步导出冲淤过程中床沙级配变化。以往在研究床沙粗化时往往引进一个反映级配的统计参数，如分散度等，这并不恰当，反而使问题复杂化。这是因为冲刷时粗化是一个过程，在同一初始级配的不同粗化阶段，这个参数是不一样的，将这个参数塞进到推移质公式，以反映粗化对推移质的影响，也是很生硬的，应直接求出级配的变化(包括粗化和细化)规律，再据此求推移质总输沙率。

河床粗化不仅发生在冲刷期间，而且会发生在交换期间，水库下游河道冲刷，往往使砾

石、卵石等下移，这是交换时的粗颗粒下沉、细颗粒冲走的明显例子。这种过程由冲刷粗化是算不出的，因为粗化后的最大颗粒在原来级配中没有的。这种交换粗化常常是水库下游床沙变化的主要形式，对输沙与河床变形有很大影响，特别是长江中下游将长期经历这种现象。

3.2.3.5 粗颗粒推移质平均速度的表达式

研究粗颗粒推移质移动速度有重要的意义，该速度分两种：移动时的实际速度和包括静止时间的平均速度。据初步研究[126]，当 H=10m，则 $\overline{v} = 1.98m$ ，D=20mm 时，颗粒实际运动速度 0.053m/s，而平均运动速度 $U_s = 0.569 \times 10^{-5} m$ ，按全年 3 个月移动 4.52km。川江(如重庆一带)卵石移动速度每年仅 1km-5km，表明它们在床面停止时间很长，运动时间非常短，从而使数学模型计算碰到一个新的问题，不能像悬移质计算那样，随水流移动，这会带来很大的失真，这是研究粗颗粒推移质平均速度需要注意的问题。除直接研究单颗推移质平均速度外，还可考虑按推移质扩散模型来研究[43]。

3.2.4 非均匀悬移质不平衡输沙

3.2.4.1 扩散方程边界条件的定量表达式

到目前为止，扩散方程边界条件大都凭概念直观地给出，或者假定条件太强(如 $S_b = 0, S_b = S_b^*$ 等)，有关这方面已有一些评述[126, 127]。有两种途径可进一步深入研究：一种是按悬移质与床沙交换，并用全部水深含沙量变化控制[43, 127]，另一种是注意到紊流猝发特性而构成[122, 128]。底部边界条件是泥沙运动的重要内容，好的研究成果应能得到一些其它关系和结果，实际上给出了边界条件就给出了河床冲淤，但研究的现状是求解扩散方程的人很多，但对边界条件研究的却很少。

3.2.4.2 不平衡条件下挟沙能力的多值性

不平衡输沙方程中包括了挟沙能力(或底部挟沙能力)，因此，在不平衡条件下也有挟沙能力确定的问题，但该挟沙能力和平衡输沙时是有差别的。挟沙能力系数 K 及平均沉速等在不平衡条件下是变化的，特别是后者，其中挟沙能力平均沉速变化是由于挟沙能力级配随着冲淤不同而变化。挟沙能力系数 K 随着冲淤而变，主要是由于淤积时，泥沙已挟在水流中，悬浮只受悬浮概率控制；冲刷则受起悬概率控制，细颗粒的起悬概率小于悬浮概率，这些都会导致冲淤时挟沙能力的差别。挟沙能力与含沙量的恢复饱和系数不相同，往往是导致挟沙

能力多值性的主要原因，需要专门研究。

3.2.4.3 挟沙能力级配与有效床沙级配

在强平衡条件下，不需要挟沙能力级配及有效床沙级配的概念，此时挟沙能力级配等于含沙量级配，有效床沙级配等于实际的床沙级配，并且含沙量级配与床沙级配是一一对应的单值关系，因此，由含沙量级配迭加挟沙能力[49]，与由床沙级配迭加挟沙能力都是正确的[47, 48]。美国 Hec6 模型在 1981 年版本中引用了由床沙级配迭加挟沙能力的方法[47]，该方法在此前十多年就已提出[49]。

对于不平衡输沙，上述两类迭加方法都没有理论根据，于是必须引进挟沙能力级配与有效床沙级配的概念[50]。关于这方面的研究，目前有不少成果，有的还较深入[129]，有的缺乏根据，应通过对比分析，指出一些不合理、不符合实际的地方，对某些概念予以澄清，明确似是而非的，以便集中研究力量，少走弯路，相关的讨论可参见文献[50]，还需要探讨新的研究途径。

3.2.4.4 恢复饱和系数

平衡条件下恢复饱和系数α 成果的对比研究。恢复饱和系数与扩散方程底部边界条件关系密切,应从此处切入，究竟是大于 1，还是小于 1，其取值范围如何？需要澄清，文献[53]给出的恢复饱和系数范围较大(1-940)，且α 取值始终大于 1。而实际资料表明,α 大都小于 1，绝大部分的泥沙数学模型均采用经验数据：淤积 0.25，冲刷 1.0[54]。文献[55] 的研究给出α 可以大于 1，但更多是小于 1，最小可小于 0.01。黄河的α 值一般取 0.01，理论分析指出只有当交换时落入床面泥沙以概率 1 转为床沙才会出现α 大于 1。

不平衡输沙时恢复饱和系数的研究主要集中在由含沙量分布差别引起悬浮高和单步距离不同，这方面也有一些研究[52, 57]，能证实冲淤的恢复饱和系数的差别及其它特性。

3.2.4.5 挟沙能力在断面内分布

文献[110]提出了横断面内挟沙能力分布及断面总挟沙能力问题。横断面内各垂线(或各块条面积)内泥沙很难平衡，总是由中泓向两边横向扩散，且不同断面形态横向扩散作用不同，此时挟沙能力如何定义？是否选择较为标准的横断面，当断面总含沙量与总挟沙能力达到平衡时可定义横断面各垂线的挟沙能力。

应研究横向扩散的一般规律；要满足各垂线挟沙能力沿横断面积分应等于断面总挟沙能力；同样的挟沙能力公式采用垂线平均流速与断面平均流速计算出的挟沙能力是不同的，应校正谁？

3.2.4.6 床沙质与冲泻质挟沙能力及异同

目前在绝大多数泥沙数学模型中均采用全沙挟沙能力，特别是在水库淤积计算中尤其如此，这是对原有床沙质与冲泻质概念的挑战。如何全面解释和澄清有关概念，冲泻质是否存在挟沙能力。床沙质与冲泻质划分与不划分的异同和根据，以及明确有关计算方法的理论基础等是很需要研究的，这方面可参考文献[58]。

3.2.5 两相流的理论

在两相流理论研究方面，应着重开展以下几方面的研究：明确现代两相流理论在河流泥沙运动研究中应用效果显著的部分，以及某些假定前提对河流的适用性。两相流理论得出的泥沙运动方程，特性及其有关参数与清水的差别和相应条件。两相流理论在高含沙量水流和泥石流的运动中应用及与已有研究的对比。吸取河流泥沙运动方面的某些概念、参数、研究方法的长处，促进两相流理论的研究[61~69]。

3.2.6 河床演变

3.2.6.1 来水来沙变化对河床变形的影响

通过来水来沙作用的分解，可以进一步揭示河床变形机理，如水库蓄水运用枯水流量加大后，浅滩航深增加并不多，甚至有时还可能减少；径流量减少后，洪峰削减，造床流量减小，河槽淤积缩窄。类似地含沙量变化也会引起河床一系列变化，应注重分解一些单因素对河床演变影响的研究。建库对下游河床演变的影响，包括径流调节系数变化及洪峰削减程度不同引起的不同响应。

加强河床演变现象的调查研究，这是河床演变研究创新的基础，河床演变现象调查研究主要是指野外河流（水库、湖泊）调查，也包括卫片分析、实测资料研究等，研究中首先要注意现象之间的联系，揭示其机理，进而从理论上予以概括，引出新的概念、特性和规律。

3.2.6.2 河势演变的不同层次研究

河床演变是由大小不同级别的变化组成，深入研究河床演变应分别研究不同尺度的现象。

按照尺度大小，河床演变可分成五个层次：泥沙运动、床面形态、河势单元（包括分汊河道分流比变化、江心滩（洲）消涨、边滩移动、河槽展宽与缩窄、岸壁崩塌、浅滩冲淤等）、河段河床演变(包括分汊河段、弯道、顺直等)、河型形成与转化。其中最低的两个层次已分别有专门的研究，河床演变研究主要涉及第三、第四层次，第三层次的河势变化研究应是河床演变规律研究的主要内容，而第四层次的长河段河床演变大都与工程泥沙问题结合进行。第五个层次河型转化研究是河床演变的最高层次。

3.2.6.3 造床流量的理论基础与平滩流量

造床流量和平滩流量是两个常用的概念,，不少人对造床流量与平滩流量的理解不一样，使用较含混，确定它们的方法也很多，大都限于经验的性的方法。由于造床流量和平滩流量是河床演变的重要参数，必须对它们做进一步的研究。新的思路是如何从机理上评价一个变动的水沙过程的造床作用，从而引出造床流量的表达，以及平滩流量与造床流量的差别等。

塑造河道形态的是整个水沙过程，但是为了研究方便，常常需要引用代表流量来表示。代表流量至少应有两个：塑造河流纵剖面的代表流量与塑造横剖面的代表流量。目前从机理方面研究，已有一些尝试，如提出塑造纵剖面的代表流量(第一造床流量)是在同样水流坡降下，它与某个变动流量过程一样输移同样的沙量[93]，因此，这个流量应由全部流量过程决定。而塑造横剖面的代表流量，主要是由最大一次洪峰流量确定，有的研究按长江约 10~15 天和黄河约 5 天考虑，至于其它小河时间更短。平原河道在洪峰时多发生强烈冲刷，其塑造横剖面的造床流量如何定？值得研究。最简单的方法是考虑该时期内冲刷一半的流量作为这种流量[93]，即第二造床流量，第二造床流量是反映一个典型洪峰过程对塑造横剖面的造床作用。

平滩流量是河床主槽的满槽流量(即平高漫滩的流量)，它往往不一定能反映当年的造床作用。当来流的洪峰流量改变时，第二造床流量也将发生变化，若时间较短，冲淤量不够，河槽(包括平滩流量)往往未改变到与第二造床流量相应。可见平滩流量是一定时期由第二造床流量累计作用形成，或者说平滩流量是第二造床流量的滞后表现[130]。

3.2.6.4 长江和黄河不同河段河型成因

开展一级及亚类河道的河型分类研究。应着重研究黄河游荡段与弯曲段成因差异，达到准平衡的机理，以及长江蜿蜒河段与分汊河段形成差异及上游建库后变化趋势。

加强河型转化条件的试验模拟技术[131]和理论研究，特别是造床流量减少或水库下游河道

引起河型转化的可能性研究。

3.2.6.5 河道萎缩的特性与控制

我国大多数河流（特别是西北部的河流）由于降水量减少，特别是上、中游用水量增加引起的中、下游径流量减少，以及上、中游水库的削减洪峰对下游河道输沙能力的减少等，导致下游河道河槽的衰退甚至萎缩，河漫滩植物生长（甚至被侵占）引起的过流流速降低。应研究河流衰退及萎缩特性，包括：径流量减少、洪峰削减、含沙量变化引起的输沙能力变化，淤积及河槽退化；主槽断面缩窄后加大了水流上滩，改变滩槽洪水分配，加速淤积；可能的减缓衰退措施和如何恢复与维持一个基本规模的河槽等。

3.2.6.6 河流的长期冲刷

河流上大量修建水库后，导致下游河道长期遭受低含沙量水流的冲刷，引起的泥沙运动和河床变形。如长江中下游已进入此阶段，目前冲刷较快。另一方面已经衰退的河流，如发生流域特大水，河流会迅速展宽，如汉江 1935 年大水，在 1938 年测图上就反映出河流发生过大幅展宽，河宽增大约 3-5 倍，洲滩尺寸增加约 2 倍左右，前苏联学者罗辛斯基的河型分类中就有一种“周期性展宽”河型，因此，要加强河流长期冲刷问题的研究。

3.2.6.7 维护河流健康

河流健康是对河流开发与保护达到的一种平衡状态，以维持河流可持续的、健康的功能，河流健康是动态的。应加强水沙条件和水沙变化对河流健康的影响，以及不同径流量下河流健康的主要指标等方面的研究。

3.2.7 河口与海岸泥沙研究

3.2.7.1 径、潮、波作用下泥沙运动机理与挟沙能力

这方面的研究主要包括:水力学特性（特别是流场特性），含沙量分布特性，径潮波作用下挟沙能力，不平衡输沙影响等。

3.2.7.2 不同密度分层流

研究各层流之间渗混过程及相对平衡条件，浮泥和异重流形成条件、运动及沉积，风暴潮骤淤机理等。

3.2.7.3 海岸最大浑浊带的变化及对河口的影响

研究最大浑浊带的变化及对泥沙出河口的影响和对沿海岸泥沙输移及冲淤的影响。

3.2.7.4 径流量变化对河口输沙及演变的影响

研究黄河入海沙量增减对河口三角洲延伸和侵蚀的影响，包括：三角洲处于平衡的来水来沙条件，上游大量建库后对长江来沙量及河口延伸的影响，径流变化(减少)对河口影响的一般特性；河口三角洲的侵蚀，河流衰退条件下河口演变特性等。河口水沙资料往往缺乏，除现场观测外，如何插补和推算一些水沙数据是十分必要的。

3.2.8 水库淤积

3.2.8.1 水库变动回水区推移质与悬移质相互转化及冲淤规律

变动回水区推移质与悬移质转化研究。进入变动回水区，由于泥速减缓，一部分粗颗粒悬移质转为推移质；在变动回水区枯水位降低最快的河段(也就是壅水刚消失的河段)流速大，部分推移质转为悬移质(形成所谓走沙)。

变动回水区冲淤特性及规律研究。在枯季坝前水位消落期间，沿程各段均会出现先淤后冲，并且愈向下游来沙愈多，冲刷也愈多，应研究这种冲淤的特性及对其航运的影响，并研究变动回水区冲刷形成的粗颗粒向下运行及沿程淤积情况。

3.2.8.2 水库淤积平衡和准平衡与河流平衡形成过程

水库淤积的平衡，特别是回水末端附近的淤积相对平衡发展很快，可与河流形成对比，研究其造床发展过程；水库在进入相对平衡阶段，研究塑造纵横剖面的过程。

3.2.8.3 絮凝对水库淤积的影响

研究水库静水区发生絮凝的可能性及絮凝对淤积的影响等。

3.2.8.4 “调水调沙”的有关理论问题 [87]

研究问题主要包括：水库大量冲刷的条件，冲刷量的分析计算；如何从下游河道输沙能力的要求，确定水库冲刷出库的水沙数量；水库群联合“调水调沙”中有关泥沙问题等。

3.2.9 河流泥沙变化对生态环境影响

应加强泥沙与生态环境的关系研究，包括：泥沙与生态、环境关系，黄河水中部分有害物质本底很高，它与泥沙的关系；大型水库淤积对库内及下游河道生态、环境的影响，重金属压入库底的效果；河流来水来沙变化对生态环境影响；泥沙资源开发、利用与生态环境的关系，无序采砂对水流和生态环境的影响。

3.2.10 大力发展边缘学科与交叉学科

应从以下几方面大力开展边缘学科与交叉学科的研究：概率论与流体力学相结合的途径，研究泥沙运动统计理论[43]；两相流有关理论与传统河流动力学方法结合，研究高含沙水流和泥石流等[131]；海洋动力学与河流泥沙力学结合研究海岸泥沙；河流地貌学与河流动力学结合研究河道及河流长时期变形及河型变化；此外，还可引入其它学科研究方法于泥沙运动的研究，包括熵概念在推移质粒径沿程变化分析中的应用[133]，人口控制演化数学模型用于卵石推移质时空分布[134]，自组织临界性应用于推移质脉动[135]，推移质的分维研究[136]等。

3.3 工程泥沙研究方向

3.3.1 黄河综合治理措施及泥沙问题长期根治

黄河治理目标可以形象地用“四不”来概括：堤防不决口、河道不断流、污染不超标、河床不抬高，黄河治理是综合的，这里仅从泥沙角度提出几个具有战略意义的方向：①黄河泥沙处理 5 字方针“拦、排、放、调、挖”的潜力与能力分析，今后 50 年、100 年内黄河泥沙的如何具体安排；②“拦、排、放、调、挖”五个字中以什么为中心？看来需要通过建立黄河水沙调控体系，以调为中心，将五种措施组合成一个体系，使其发挥综合的效果，在 100 年内使黄河泥沙得到合理安排；③“二级悬河”的治理措施研究。由于生产堤和河控工程的存在，在一定管控下，依靠河流自生消除是很困难的，目前引沙吹填低凹滩地区，特别是堤根河方面已显出效果，但能否大面积推广？研究其它治理措施；④宽河与窄河的争论应进一步研究后达到一个基本共识，窄河可能是最终的方向，当然这种转变是逐步的和长期的。窄河在基本能控制淤积的条件下有利，宽河优点是滩地滞洪淤沙，但是当控制滩地以不淹没为主，则实际仍然是窄河运行，当然对于大洪水仍有滞洪作用 。

3.3.2 长江中下游河床演变

长江中下游径流量变化和长期下泄低含沙量水流产生的冲刷，涉及到河流泥沙方面的一些基本理论问题和河床演变方面一些新的特点和现象，应着重在以下几方面加强研究：①上

游干、支流大量水库修建后对长江中、下游来水来沙的长期改变及其影响；②来沙与床沙交换，对挟沙能力的影响，冲淤条件下挟沙能力的差别以及不平衡输沙规律有关参数的变化；③冲刷过程中粗化层的形成、控制和破坏特性；④在长期冲刷条件下，蜿蜒河型与分汊河型变化的可能性；⑤支汊淤塞对航运和用水等影响。

3.3.3 流域来沙及沿河流演进的系统模拟

对于大江大河应建立流域来沙及沿干流水沙演进的模型，以便河流管理和维护河流健康，该模型将使流域来流产沙和河道泥沙冲淤相互联系，统一研究。

3.3.4 流域水沙优化配置理论与调控技术

从流域的角度讲，宏观研究河流泥沙变化、泥沙空间的优化配置理论与调控措施是今后重要的研究方向之一。包括：流域水沙变化及预测（包括模型），流域泥沙资源化研究，流域水沙配置理论研究，河流水沙调控指标、措施及模型研究，河流泥沙空间配置模式及泥沙安置方式研究，河流泥沙空间配置效果评价指标及方法研究。

3.3.5 泥沙数学模型完善与商业软件

我国泥沙数学模型基本是针对不平衡输沙条件建立的，考虑的因素多，有较强的通用性，但是，目前存在两个问题：一是好的、成熟的数学模型受软件水平的限制，很少达到商业标准，二是模型多，低水平重复较普遍，有不少模型通用性差，参数不固定，有的甚至随便调整，缺乏科学性和严肃性，今后应加强以下几方面的研究：①针对泥沙数学模拟的难题，加强机理和理论方面研究；②在水流计算方面，吸取国外的先进经验，充实我们的模型，不能简单地使用国外的商业软件；③组织整合数套理论基础强、模拟功能较全、较为符合实际的泥沙数学模型，在河道和水库大量验证与应用，并开发出商业软件，以便推广应用；④建立泥沙数学模型平台，以便统一检验、对比和评价，避免黑箱操作，同时平台可以选择最优的模块搭建新的模型。

3.3.6 实体模型相似理论及试验技术

我国实体模型经过数十年的不断发展，最大规模的河流模型和一个工程最多的模型都在我国，已积累了丰富的经验和开发了不少好的试验技术及先进的观测仪器，目前需要总结提高，主要包括：①模型相似理论的深入研究，特别是某种相似不能满足时，对结果可能带来

的偏差分析及校正方法；②实体模型与数学模型结合相辅相成，对于实体模型难以模拟的部分由数学模型补充；③试验技术自动化发展；④新的测量仪器的研发。

4.结语

河流泥沙学科是个古老而年轻的学科，它与水文学、水力学、地貌学、地理学、以及环境与生态学、沉积学等多种学科相互交叉，相互渗透。20 世纪 50 年代以来，随着我国大江大河治理工作的推动，河流泥沙学科体系得到了逐步发展与完善，在非均匀不平衡输沙理论、水流挟沙能力、高含沙水流运动、异重流、泥沙运动统计理论、水库淤积、河流模拟等多个研究方向取得了重大进展，一些成果达到国际领先水平。在应用上成功地解决了许多重大工程泥沙问题，在我国大江大河治理、防洪安全和水资源安全等方面发挥了重要作用，促进和保障了国民经济建设的快速发展和社会的稳定。

由于河流泥沙研究是新兴学科，尚不成熟，对现象定性描述多、定量表达少、经验性强、许多理论还有待完善，在泥沙基础理论方面开展深入探索将是今后河流泥沙研究的重点内容之一。随着今后国家在大江大河治理与防洪安全、大型水利水电工程建设、生态环境与河流健康、河口海岸开发建设等方面的重大需要，江河治理开发实践中遇到的实际问题日益复杂，现有理论和方法尚难以使所有问题得到圆满解决，河流泥沙学科应在传统理论研究、工程泥沙上取得巨大进展的同时，注重边缘科学与交叉科学。我们相信，河流泥沙学科在解决人类发展所面临的防洪、资源、环境等问题及可持续发展方面将发挥重要作用。

参考文献

[1] Du Boys MP，Le rhone et les rivieres a Lit affouillable. Annales de Ponts et Cgausses，1879，18(5):41-195。

[2] Gilbert G. K，The Transportation of Debris by Running Waer. U. S. Geol. Sur. Prof . Paper. 1914, 86 (1)-263。

[3] Rouse H，Experiments on the mechanics of sediment suspension. Proceedings of the 5th international congress for applied mechanics，1938, 550-554。

[4] Einstein H．A，The bed load function for sediment transportation in open channel flows. U. S. Dept. Agri.，Tech. Bull.1950, 1026: 71，钱宁译：明渠水流的挟沙力，北京:水利出版社，1956。

[5] Великанов М. А., Диналка Руслоых Потоков, Том Второй наносы и Русю, ГосудаРс. Изд. Тех.-Теоре. Лнт. МОСКВА, 1955。

[6] Гончаров, В.Н., Динацика, русловцх Потоков, Гцдро летторлог. Издат. Ленинград, 1962。

[7] Bagnold R.A，An approach to the sediment transport problem from general physics，U.S. Geol. Survey, Prof. Paper.1966, (422): I。.

[8] Engelund F，Hydraulic resistance of alluvial streams. J.Hydraulics Div.，ASCE. 1966, 92(2):315-327。

[9] 沙玉清，《泥沙运动学引论》，中国工业出版社，1963。

[10]张瑞瑾，《河流动力学》，中国工业出版社，1961 年 1 月。

[11]张瑞瑾，《河流泥沙动力学》，中国水利水电出版社，2002 年。

[12]钱宁主编，《高含沙水流运动》，清华大学出版社，1989 年 9 月。

[13]钱宁，张仁，周志德，《河床演变学》，科学出版社，1987 年 4 月。

[14]钱宁，万兆惠，《泥沙运动力学》，科学出版社，1983 年 12 月。

[15]中国水利学会编著，《2007-2008 水利学科发展报告》，中国科学技术出版社，2008 年 2 月。

[16]李义天，谢鉴衡，王明甫.武汉水利电力大学泥沙研究进展，泥沙研究，1999（6）:26-28.

[17]曹叔尤，水力学及河流动力学基本问题研究的现状与任务，四川大学学报（工程科学版），2002（1）:1-5。

[18]王光谦，河流泥沙研究进展，泥沙研究，2007 年第 2 期。

[19]王光谦，胡春宏主编，泥沙研究进展，中国水利水电出版社，2006 年 12 月。

[20]胡春宏，我国江河治理与泥沙研究展望，水利水电技术，.2001（1）:50-52。.

[21]韩其为，胡春宏，50 年来泥沙研究所主要研究进展，中国水利水电科学研究院学报，2008（3）。

[22]Hjulstrom,F.,“The morphological Activity of Rivrsas Illustrated by River Fyris”Bullerin of the Geological Institule,Uppsala Vol 25 chap 3 1935。

[23]窦国仁，泥沙起动流速，水利学报，1960（4）：44-59。

[24]唐存本，泥沙起动规律，水利学报，1963（2）：1-12。

[25]韩其为，何明民，泥沙起动规律及起动流速，科学出版社，1999 年。

[26]杨铁笙，黎青松，万兆惠.粘性颗粒泥沙淤积物起动条件的研究，三峡水利枢纽工程应用基础研究（第二卷），地质出版社，1997 年，25~33。

[27]段文忠，孙志林，非均匀沙起动与河床粗化问题研究，武汉水利电力大学河流工程学，1996 年。

[28]刘兴年，陈远信，方铎等， 宽级配卵石推移质输沙特性研究，三峡水利枢纽工程应用基础研究，第一卷，1977 年，19-27 页。

[29]王兴奎，钱宁，胡维德，黄土丘陵沟壑区高含沙水流的形成及汇流过程，水利学报，1982（7）：26-35。

[30]许炯心，黄土高原高含沙水流形成的自然地理因素，地理学报，1999（4）。

[31]詹义正，王明甫，白永峰，论浆河形成的临界条件，泥沙研究，1991（3）。

[32]杨美卿，钱宁，紊动对细泥沙浆液絮凝结构的影响，水利学报，1986（8）：21-30。

[33]夏震寰，汪 岗，无粘性均质颗粒在细颗粒悬浮液中的沉降，泥沙研究，1982（1）：14-23。

[34]费祥俊，高浓度浑水的粘滞系数，水利学报，1982（3）。

[35]张瑞瑾，高含沙量水流流性初探，武汉水利电力学院学报，1978（1）。

[36]王明甫，段文忠，谈广鸣等，高含沙水流的水流结构及运动机理，中国科学，A 辑，1987(5)。

[37]王兆印，钱宁，高浓度泥沙悬浮液物理特性的实验研究，水利学报，1984（4）:1-10。

[38]张红武，张清，黄河水流挟沙力的计算公式，人民黄河，1993（11）：7-9。

[39]王明甫，陈立，周宜林，高含沙水流游荡型河道滩槽冲淤演变特点及机理分析，泥沙研究，2000（1）。

[40]王尚毅，顾元棻，黄河“揭底冲刷”问题初步研究，泥沙研究，1982（2）。

[41]万兆惠，宋天成，“揭河底”现象的分析，泥沙研究，1991（3）。

[42]韩其为，黄河揭底冲刷的理论分析，泥沙研究，2005（2）：5-28。

[43]韩其为，何明民，泥沙运动统计理论，科学出版社，1984 年。

[44]胡春宏，惠遇甲，明渠挟沙水流运动的力学和统计规律，科学出版社，1995 年。

[45]谢鉴衡，河流泥沙工程学（上册），水利电力出版社，1983 年。

[46]王士强，明槽水流的非均匀挟沙力研究，水利学报，1998(1):1-9。

[47]Feldman, A. D., Hec Models for Water Resources System Simulation, Theory and Experience, the Hydraulic Engineering Center, Davls, California, 1981。

[48]李义天，冲淤平衡状态下床沙质级配初探，泥沙研究，1987（1）。

[49]韩其为，水库不平衡输沙的初步研究，水库泥沙报告汇编，黄河泥沙研究协调小组编印，1973 年，145-168。

[50]何明民，韩其为，挟沙能力级配及有效床沙级配确定，水利学报，1990（3）：1-12。

[51]窦国仁，潮夕水流中悬沙运动及冲淤计算，水利学报，1963（4）。

[52]韩其为，扩散方程边界条件及恢复饱和系数，长沙理工大学学报（自然科学版），2006（3）：12-24。

[53]张启舜，明渠水流泥沙扩散过程的研究及其应用，泥沙研究，1980 年。

[54]韩其为，水库淤积，科学出版社，2003 年。

[55]韩其为，何明民，恢复饱和系数初步研究，泥沙研究，1997(3)：32-40。

[56] 韩其为，何明民，论非均匀悬移质二维不平衡输沙方程及其边界条件，水利学报，1997（1)：1-10。

[57]陈绪坚，韩其为，恢复饱和系数的理论计算方法，泥沙研究，2008（6)。

[58]韩其为,水量百分数的概念及其在非均匀悬移质输沙中的应用,水科学进展,V01.18,N0,5 P633-640。

[59]胡春宏，郭庆超，黄河下游河道泥沙数字模型及动力平衡探讨，中国科学，E 辑，2004，34（增刊)。

[60]Hu C H,Guo Q C,Chen J G，Basic character and the critical equilibrium of sedimentation in the lower yellow river，第六届国际水科学与工程讨论会，2004 年 5 月，澳大利亚。

[61]Wang GQ, Ni JR, The kinetic theory for dilute solid/liquid two-phase flows, International Journal of Multi-phase Flow, 17(2) (1991), 273-281。

[62]Wang GQ, Ni JR, Kinetic theory for particle concentration distribution in two-phase flow, Journal of Engineering Mechanics-ASCE, 116(12) (1990), 2738-2748。

[63]Ni JR, Wang GQ, Borthwick AGL, Kinetic theory for particles in dilute and dense solid-liquid flows, Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 126(12) (2000), 893-903.

[64]Fu XD, Wang GQ, Shao XJ, Vertical dispersion of fine and coarse sediments in turbulent open-channel flows, Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 131(10) (2005), 877-888。

[65]Wang GQ, Fu XD, Wang XK, Kinetic modeling of constitutive relations for particle motion in low to moderately concentrated flows, International Journal of Sediment Research, 20 (2005), 305-318。

[66]Wang GQ, Fu XD, Huang YF, Huang GD, Analysis of suspended sediment transport in open-channel flows: Kinetic-model-based simulation, Journal of Hydraulic Engineering-ASCE, 134(3) (2008), 328-339。

[67]范家骅，王华丰，黄寅，吴德一，沈受百，异重流的研究和应用，水利水电出版社，1959 年。

[68] 方春明，韩其为，何明民，异重流潜入条件分析及立面二维数值模拟，泥沙研究，1997（4)。

[69]范家骅，沈受百，吴德一，水库异重流近似计算法，水利水电科学研究院科学研究论文集(第 2 集)，1962 年。

[70]范家骅，沉沙池异重流的实验研究，中国科学（A 辑)，1984（11)。

[71]窦国仁，董风舞，波浪和潮流的挟沙能力，科学通报，1995,40(5)。

[72]曹文洪，张启舜，潮流和波浪作用下悬移质挟沙能力的研究，泥沙研究，2000(5):16－21。

[73]刘家驹，连云港外航道的回淤计算与预报，水利水运科学研究，1980（4）:31-41。

[74]周济福，李家春，河口混合与泥沙输运，力学学报，2000,32(5):523－531。

[75]Cao Z, Pender G, Wallis S, Carling P. Computational dam-break hydraulics over erodible sediment bed. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE. 2004,130(7): 689-703。

[76]胡春宏，王延贵，陈绪坚，“流域泥沙资源配置关键技术问题的探讨”，《水利学报》，2005 年第 12 期，第 36 卷。

[77]胡春宏，陈绪坚，王延贵，“流域水沙资源优化配置理论和数学模型研究”，《第六届全国泥沙基本理论研究学术讨论会论文集》，黄河水利出版社，2005 年。

[78]胡春宏，陈绪坚，“流域水沙资源优化配置理论与模型及其在黄河下游的应用”，《水利学报》，第 37 卷第 12 期，2006 年。

[79]胡春宏，陈绪坚，陈建国，郭庆超，黄河干流泥沙空间优化配置研究（Ⅰ）-理论与模型，水利学报，2010 年第 3 期。

[80]胡春宏，黄河干流泥沙空间优化配置研究(Ⅱ)—潜力与能力，水利学报，2010 年第 4 期。

[81]胡春宏，陈绪坚，陈建国，安催花，黄河干流泥沙空间优化配置研究（Ⅲ）-模式与方案，水利学报，2010 年第 5 期。

[82]焦恩泽，黄河水库泥沙问题，黄河水利出版社，2006 年。

[83]张威，水库三角洲淤积及其近似计算，人民长江，1964 年第 2 期。

[84]唐日长，水库淤积调查报告，人民长江，1964 年第 3 期。

[85] 韩其为，长期使用水库的平衡形态及冲淤变形研究，人民长江，1978(2)：18-36。

[86]三门峡泥沙问题编写小组，黄河三门峡水库的泥沙问题，《坝工建设技术汇编》 2007，(第二辑)，水利水电出版社，1976 年。

[87]水利部黄河水利委员会，黄河调水调沙试验，2007 年 12 月。

[88]钱宁，周文浩，黄河下游河床演变，科学出版社，1965 年。

[89]赵业安，周文浩，费祥俊著. 黄河下游河道演变若干基本规律。黄河水利出版社，1998 年。

[90]潘贤娣，李勇等，三门峡水库建设后黄河下游演变，黄河水利出版社，2006 年。

[91]胡春宏等著，《黄河水沙过程变异及河道的复杂响应》，科学出版社，2005 年。

[92]胡春宏，陈建国，郭庆超，严军著，《黄河水沙调控与下游中水河槽塑造》，科学出版社，2207 年 6 月。

[93]韩其为，黄河下游输沙及冲淤的若干规律，泥沙研究，2004(3)：1-13。

[94]谢鉴衡，丁君松，王运辉，《河床演变及整治》，水利电力出版社，1990 年 6 月。

[95]张书农，华国祥主编，《河流动力学》，水利电力出版社，1988 年 6 月。

[96]胡春宏，陈建国，郭庆超，陈绪坚，“黄河水沙过程调控与塑造下游中水河槽”，《人民黄河》，第 27 卷第 9 期，2005 年。

[97]韩其为，黄河调水调沙的效益，人民黄河，2009 年 5 月第 31 卷第 5 期。

[98]韩其为，黄河调水调沙的巨大潜力，人民黄河，2009 年 6 月第 31 卷第 6 期。

[99]长江三峡工程泥沙问题研究，知识产权出版社，2008 年。

[100]韩其为，何明民，水库淤积与河床演变的(一维)数学模型，泥沙研究，1987(3)：14~29。

[101]韩其为，黄煜龄，水库淤积过程的计算方法及电子计算机的应用，长江水利水电科学研究成果选编，长江科学院，1974 年第一期 45-85 页。

[102]李义天，河道平面二维泥沙数学模型研究，水利学报，1989 年 2 月。

[103]周建军，平面二维泥沙数学模型的研究及应用，水利学报，1993（11）:10-19。

[104]方春明，毛继新，鲁文，可视化河网一维恒定水流泥沙数学模型[J]，泥沙研究，2003(6)，：60-64。

[105]Guo Qing-chao, Jin Yee-chung. Modeling Sediment transport using depth-averaged and moment equations. *J. of Hydraulic Engineering*, ASCE. 1999, 125(12), 1262-1269。

[106]Guo Qing-chao, Jin Yee-chung. Estimating coefficients in one-dimensional depth-averaged sediment transport model. Canadian Journal of CIVIL Engineering, CSCE, Vol.28, June, 2001,536-540。

[107]李义天，孙昭华，河流泥沙研究进展及发展趋势，2004 年。

[108]方春明，考虑河道环流影响的平面二维水流泥沙数学模型，中国水利水电科学研究院报，2003 年一卷（3）：190-193。

[109]毛继新，三峡水库 2007 年蓄水位专题研究，中国水利水电科学研究院报，2003 年一卷（3）：174-200。

[110]李义天,赵明登,曹志芳.河道平面二维水沙数学模型，北京:中国水利水电出版社，2001 年 12 月。

[111]朱庆平，芮孝芳，余欣等，基于 GIS 的黄河下游二维水沙数学模型水沙构件设计，人民黄河，2005 年 3 月。

[112]胡春宏，王延贵，张燕菁，河流模型模拟技术的进展与展望，水文，2006，26(3)：47-51。

[113]李保如，自然河工模型试验，科学研究论文集（第二集），中国工业出版社，1963 年。

[114]屈孟浩，黄河动床模型试验理论与方法，黄河水利出版社，2005 年 12 月。

[115]张红武等，黄河高含沙洪水的模型相似律，河南科学技术出版社，1994，1-165。

[116]胡春宏，陈建国，郭庆超，三门峡水库淤积与潼关高程，科学出版社，2008 年 8 月。

[117]刘兴年，曹叔尤，方铎等，粗细化过程中的非均匀输沙特性研究，三峡水利枢纽工程应用基础第一卷，地质出版社，1997 年，18-24 页。

[118]Kramer,H.Sand Mixtures and Sand Movement in Fluvial Modes,Proc. ASCE. Trans, Vol.100,1935,798-838。

[119]窦国仁，泥沙运动理论，1963 年。

[120]Taylor.B.D., Temperature Effects in Alluvial Stereams, Report KH-R-27, W.M. Keck Lab.of

Hyd. And Water Resources, Calif, Inst. Tech., 1971 年。

[121]Yalin, M.S., Mechanics of Sediment Transport,Oxford Pergaman Press, 1972.中译本：孙振东译，输沙力学，科学出版社，1983 年。

[122]曹志先，泥沙数学模型近底层边界条件 II：非均匀输沙，水利学报，1997（1）。

[123]关见朝，非均匀悬移质不平衡输沙过程水流挟沙能力研究，中国水利水电科学研究院博士论文，2009 年。

[124]王兴奎等，编著，《河流动力学》，科学出版社，2004 年 9 月。

[125]韩其为，三峡水库推移质数量及淤积分析，水利水电技术，2009 年（8）。

[126]韩其为编写，“推移质运动特性及输沙率”(潘庆燊、杨国录、府仁寿编)三峡工程泥沙问题研究第二章第四节，中国水利水电出版社，1999 年。

[127]韩其为，非均匀悬移质不平衡输沙的理论研究，水利水电技术，2007（1）。

[128]Van, Rjim, L.C., Mathematical Modeling of Suspended Sediment in Nonuniform Flows, J of Hydr. Engr. ASCE, 112(6), pp433-455，1986 年。

[129]韩其为，论挟沙能力级配，第六届全国泥沙基本理论研讨会论文集（第一册），黄河水利出版社，2005 年 11 月，3-20 页。

[130]吴保生，冲积河流平滩流量的滞后响应模型，水利学报，2008，39（6），680-687。

[131]谢鉴衡主编，河流模拟，水利电力出版社，1990 年 4 月。

[132]倪晋仁，王光谦，张红武，固液两相流基本理论及其应用，科学出版社，1991 年。

[133]曹叔尤，方铎，刘兴年，仙农熵概念在长江三峡卵石推移质粒径分析中的应用，中国三峡工程建设(增刊)，1997。

[134]刘兴年，黄尔，曹叔尤，朱鉴远，何月萍，长江上游卵石推移质输沙量时空分布初探，四川联合大学，1996 年。

[135]姚令侃，方铎，非均匀沙自组织临界性及其应用研究，四川联合大学，1966 年。

[136]刘兴年，方铎，陈运信，樊崇良，宽级配输沙率输沙随机过程的分维研究，四川联合大学，1997 年。

3.4 农田水利工程

1.农田水利工程学科发展要求、研究任务

农田水利工程学科是以水文学、土壤学、水力学、工程力学等学科为基础，研究与农业水利工程有关的地表水、地下水、土壤水分的转化运移过程和溶质迁移转化规律，通过灌溉排水工程措施改善农田水分状况和调节区域水情分布，促进生态环境的良性循环。目前，农田水利学的研究内容主要有三方面，一是研究与农业灌溉、农田排水和农业水环境有关的水分、养分和盐分在土壤、作物、和相邻环境之间的转化、迁移机理及其时空变化规律，侧重于农田水分转化迁移过程和基本理论；二是研究增产、高效的灌溉排水规划设计理论和工程技术措施，侧重于农田水利的工程措施和技术方法；三是研究提高水分的农业高效利用和减少涝渍灾害影响的管理措施和调控对策，侧重于农田水利的管理措施。农田水利学科的基础理论和应用基础研究，对于我国的粮食安全、水资源高效利用、农业环境治理和水污染控制具有重要的理论支持作用，是《国家中长期科学和技术发展规划纲要》对于本学科研究提出的重要研究方向和内容。

1.1 农田水利工程学科发展的国家需求

农田水利工程学科的发展必需紧密结合国家中长期发展规划与国家经济建设的需求，着重解决以下几个方面的问题：

1.1.1 缓解我国水资源紧缺和维护国家粮食安全

我国水资源时空分布不均，与土地资源分布不相匹配，耕地面积的一半以上处于水资源紧缺的干旱、半干旱地区，灌溉排水是主要的减灾增产手段。从水资源利用的长远发展分析，尽管中国总供水量可能有所增加，由于工业和生活用水量的快速增长，农业用水量将基本保持与现在规模相仿。在农业用水零增长的条件下，为维持我国的粮食安全，节水灌溉是农业水利面临的唯一选择，这就需要农田水利工程学科在理论和技术上给予支撑。

1.1.2 协助解决“三农”问题和维护社会和谐发展

解决我国“三农”问题，农业水利建设是关键和基础，需要进一步发展和推广农业水利新技术，提高粮食产量，增加农民收入。我国有 3 亿农村人口需要解决饮水安全问题，农村饮水安全工程建设与实用技术研究是国家新农村建设重点内容，需要农田水利工程学科提供

新的理论和技术支持。

1.1.3 保护农业水环境和促进水生态健康持续

农业生产中化肥和农药大量使用，是造成面源污染和水体富营养化的重要原因。水污染不仅加剧了灌溉可用水资源的短缺，也直接影响到饮水安全、粮食质量和作物安全。制定区域环境治理措施，规范农田灌溉过程中的用肥用药制度，提高农田用水和用肥效率，保护水生态健康持续，对农田水利工程学科发展提出技术支撑的要求。

1.1.4 农村水利现代化建设

要实现农业水利工程和农业水资源的现代化管理，需要引进现代化信息和管理手段，建立切实可行、运转灵活的管理体制，实行农民可直接参与的运行模式和调控体系，从而对于农田水利工程学科发展提出科技支撑需求。

1.2 农田水利工程学科的发展目标、任务

1.2.1 农田水利工程学科发展目标

农田水利工程学科的发展目标是：针对我国水资源紧缺、农业节水潜力巨大的现状，以保障国家水安全、食品安全为目标，建立作物高效用水和优化配水的新理论和关键技术；针对我国洪涝灾害频繁、中低产田大面积分布的特点，通过合理的工程技术措施、现代信息化管理技术、排水控盐理论和技术的研究，建立符合我国特色的防洪除涝技术体系和土壤盐碱化防控治理体系；通过信息化建设，建立信息化管理体系，使农业水利设施布局更加合理，功能更加完善，运行更加高效，促进农业现代化目标的实现；针对我国水污染加剧、农业生态环境脆弱的现状，研究农业面源污染的形成、演化和控制理论，完善农业面源污染控制的技术体系，实现农业生态环境的可持续发展；针对我国农村安全饮水存在的严峻形势，研究新的供水管理模式，实行农村安全供水管网建设，解决农村人口的饮水问题。

1.2.2 农田水利工程学科发展任务

未来几年，我国农田水利工程学科的主要发展任务为：建立系统的农业水资源可持续利用的理论体系，促进水科学与生态科学的创新和发展；构建具有中国特色的现代农业节水技术体系与高效用水模式，开发适合不同区域特点的水资源可持续利用技术；研究构建适合我国不同地区不同类型的灌区管理模式，实现灌区管理的良性发展；加强高新技术应用，研究数字灌区的关键技术，促进农业水利信息化；进行灌水、排水、量水和测量设备和器具的研制，开发低成本、高精度、长寿命、易使用的系列产品；深入开展农业水利领域的前沿性研

究，为灌溉排水和农业水环境的应用研究奠定坚实的理论基础。

2 农田水利工程学科国内外发展现状

目前，国内外农田水利工程科学的研究已由实验统计性质向具有较严谨理论体系和定量方法的科学转变，农业生态系统中物质迁移理论及其调控机理是学科发展的基础，基于大尺度的水分和养分（盐分）运动理论向实用区域水分养分（盐分）转化的预测预报模型、区域多种作物组合的耗水计算模型、作物高效用水生理调控与非充分灌溉理论等方面的研究十分活跃。农业节水新技术与产品研发速度较快，一批低成本、高效率的新型农业节水设备与制剂正在走向市场和大面积应用。新型喷微灌和滴灌节水设备的研制，需要研究微型流道中的水流特征和相应的快速成型理论。由于水资源的紧缺，集雨节灌、城市雨洪利用、劣质水开发利用等越来越得到重视。农业水环境与水土保持研究日益受到关注。高新技术在农业水利现代化管理中的应用日益广泛，数字地球、数字流域、数字灌区、数字渠道概念的提出，进一步推动了农业水利工程领域的发展。农业水利工程标准与宏观战略研究促进了农业水利工程技术向着定量化、规范化、模式化、集成化方向发展。饮水安全得到越来越多的关注，饮水安全标准和相应的法律法规得以颁布，供水管道、农村安全饮水管理体制逐步完善。

2.1 农田生态系统中水分盐分迁移规律

土壤水运动机理研究更加深入，如优先流、土壤水参数确定及空间变异性等。将地面水、地下水、土壤水、大气水和作物水之间的转换作为一个整体进行研究是目前水分转化与利用研究的热点。国内外学者对微域的土壤—植物—大气系统（SPAC）水分运移进行了大量研究，但如何应用微观尺度的 SPAC 水分传输理论解决流域尺度水转化过程的描述仍然需要作大量的研究工作，这涉及到如何考虑土壤与植被的空间变异性以及水文地质条件的影响，把点上（微观尺度上）得到的模型扩展到面上、区域上应用的问题。

在水盐运动方面，由过去单纯研究灌溉条件下的水盐运动，逐步转向各种农业化学物质在作物—土壤—地下水系统中运移规律的研究，探讨化肥、农药、除草剂、养殖排放、细菌、病毒在土壤中吸附、解吸、传输的过程和机理，区域地下水、土壤水和溶质运移的空间变异性和随机理论也是当前研究的热点。目前，在地面灌溉中的水肥淋失规律及数值模拟、污水灌溉对土壤污染等方面的研究已取得大量成果。

2.2 农业节水灌溉理论与技术

近年来，国内外提出了许多新的概念和方法，如限水灌溉、非充分灌溉与调亏灌溉等，对由传统的丰水高产型灌溉转向节水优产型灌溉，提高水的利用效率起到了积极作用。国内外学者研究并提出了非充分灌溉条件下主要作物的灌溉制度、调亏灌溉指标、调亏灌溉模式、作物调亏灌溉田间实施技术，建立了水分生产函数时空变异规律理论与方法，提出了节水灌溉条件下农作物的灌溉制度、种植比例、灌溉水量分配、地区间灌溉水量调配等。近年来，通过减小作物腾发量实现“真实节水”的理念得到广泛重视，根据这种理念，在我国华北平原区开展了大量实际观测和应用，对于实施农业节水提供了新的途径，这种理论的可操作性受到密切关注。

地面灌溉技术研究方面，在土壤入渗过程中气阻影响研究的基础上，水平畦灌的研究不断深入，传统的畦灌、沟灌也由过去单纯研究灌水技术要素对灌水均匀性和水分深层渗漏的影响，转向综合研究灌水技术要素对土壤水肥运移和对水肥淋失的影响；同时，开发了膜上灌等新型灌水技术，并得到较大面积推广。波涌灌溉利用了致密层在发展中不断减小田面糙率与土壤入渗特性这一客观规律，逐次为以后各周期的灌溉水流创造了一个加速水流推进与提高减渗效果的新接口。浑水波涌灌溉则是利用含沙量较高的水进行波涌灌溉，能够起到更加明显的效果。

在喷、微灌技术研究方面，国外一直非常重视喷灌水肥需求规律及水肥耦合高效利用方面的研究，施肥灌溉应用十分普遍。以色列、美国、荷兰等国家对不同作物的施肥灌溉制度和微灌施肥灌溉专用液体肥料进行了 20-30 年的研究，取得了丰富的成果，已经研制出了针对多种经济作物水肥高效利用的专家管理系统。我国从 20 世纪 70 年代起，针对微灌开始了研究和试验示范工作，开展了微灌条件下的土壤水分与溶质运移规律、日光温室和大田经济作物的灌溉制度、水肥耦合模式、滴灌施肥技术等研究工作。在喷微灌设备方面，对注肥设备的研制取得了可喜的进展。国外由于长期的技术积累，一些著名公司不断有新产品推出，开发出了系列化的内镶式、管上式灌水器件，新开发的产品抗堵性能提高，而使用寿命得以延长。国内一些企业也有新产品推出，但因缺乏技术支撑，产品性能尚不如国外，而且开发费用高，周期长。

地下灌溉由于能显著减少作物无效蒸发(土壤表面蒸发)而特别省水的优点，发展也十分迅速。目前国外利用废旧橡胶、塑料发泡剂等研制成功了新型发汗渗灌管，并在果树、花卉等作物中开始应用，现正在开展其合理管道间距、埋深及其优化灌水模式、防生物堵塞技术

等方面的研究。

工程节水技术方面，高精度激光固化树脂快速成型技术得到进一步发展，在微小光斑聚焦以及精密扫描系统、微涂层实现方法方面取得了突破。根据我国国情，已成功研发出秸秆粉碎还田免耕施肥小麦播种机、注水量和注水频率可调的坐水种点灌机、抗旱用行走式轻型喷灌设备、长流道新型薄壁微灌带、节能异形喷嘴、可调雾化程度及射程的多功能喷头、新型短流道喷头、轻小型喷灌机组、新型中远射程喷头、国产激光控制精细平地铲运设备等节水灌溉设备和系统，其中国产激光控制精细平地铲运设备、专用直流潜水电泵等设备形成定型生产或示范应用。

在节水制剂与材料研发方面，国内学者初步解决了秸杆纤维的溶胀和交联技术，使研发的产品耐盐性超过现有市场产品和文献报导。成功研发了生物集雨营养调理剂、纳米混凝土改性剂、多功能生物型种衣剂、新型保水剂、新型防水保温材料、新型填缝止水材料、新型液膜材料、新型高效重金属离子净化剂等节水制剂和材料，其中已有多功能生物型种衣剂、新型高效重金属离子净化剂等产品形成定型生产或示范应用。

2.3 农田排水和水盐调控

农田排水是通过排除农业土地上的过量水分和盐分，调控地下水位，达到改善土壤水分条件，防止涝渍灾害和土壤盐碱化，提高农作物产量和改造中低产田的一种有效措施。近 20 多年来，随着科学技术的进步，农田排水技术和理论发展迅速，主要表现为：

（1）明沟向暗管排水过渡。荷兰暗排面积已占总排水面积的 80%以上，埃及属干旱地区，约 4000 万亩耕地已全部实现灌溉，为防止灌溉土地盐碱化，实施暗管排水的面积已超过 3000 万亩；

（2）广泛利用塑料管道及研究应用可预包排水管的新型合成过滤材料。荷兰、美国、德国、日本、埃及等国已全面推广应用波纹塑料排水管；世界上许多国家，如荷兰、法国、西班牙、加拿大等，近二十年来将土工织物用作农田排水暗管的外包过滤材料，开展了大量的研究和田间应用，以取代颗粒松散、重量大、施工难度大的砾石过滤材料。

（3）研制开发新型排水施工设备。英、美、荷兰等发达国家已陆续研制应用了多种型式的开沟铺管机和无沟铺管机等，施工速度和质量都有了极大的提高；

（4）农田排水技术研究的发展趋势由单一目标转向涝渍碱兼治等多目标综合治理，单一工程技术类型转向多种措施相结合的综合类型；单一的水量、水位控制调节到水质控制、溶

质运移、污染防治和水环境保护等技术的研究；由单一的任务转向满足农业生产需求和减轻对水体危害的双重任务发展；

（5）排水对水环境的影响日益受到普遍关注。近年来，国外研究学者对农田排水条件下减少氮污染的农业措施、管理措施、工程措施和预测评价软件方面做了大量的研究和实际工作。

在过去的年代里，我国的农田排水事业已取得显著成绩。针对我国大多数受涝渍威胁地区涝渍相随相伴的特点，对涝渍兼治连续控制的动态排水指标、涝渍兼治的组合排水工程形式及其设计计算方法进行了研究，取得了实用的成果，丰富了农田排水理论和应用技术。近几年，宁夏农业综合开发办利用荷兰政府贷款，引进了荷兰先进的排水设备和技术，在宁夏银北灌区开展了大规模的排水工程建设，有效地调控了地下水位，改善了项目区耕作条件及生态环境，取得明显的社会效益，经济效益和生态效益。

我国农田排水工程技术的发展，是从单一明沟排水发展到明沟、暗管、鼠道、竖井及泵站等多种类型的排水工程措施，目前对各种排水工程措施在改造中低产田中的作用及发展方向等方面的认识都比较明确，经验也较为成熟。

明沟是当前我国运用最广泛的一种排水措施，各地因地制宜总结并制定了防御涝渍灾害的明沟排水系统技术方案。暗管排水技术较大规模发展于上世纪 70 年代末，它可控制地下水位，达到排水治渍排盐的作用。竖井排水主要兼具井灌井排作用，对干旱、涝渍、盐碱多灾种并存的华北平原等地区中低产田改造，起着重要作用。鼠道排水具有施工简便、造价低廉且对排除犁底层滞水和地面残留积水特别有效，在粘质土地区其治渍效果好，所以多用作辅助排水措施，对它的适用条件、结构形式、施工方法等方面已取得较多成果。泵站排水，已广泛用于解决不能自流排水的低洼地、平原圩区等地的排水出路。我国生产实践中，一般均根据各地不同灾害类型、不同自然条件、不同技术经济水平，因地制宜地分别应用上述各项排水措施进行涝渍盐碱灾害的治理。

控制排水是一种新型的排水技术，在排水暗管或明沟出口加设控制设施，按照农作物种类的不同或生长季节的不同调控地下水位。控制排水已经在美国、荷兰、日本等国家得到广泛应用，控制排水可以提高水资源的利用效率，与湿地、水塘相结合，能有效地处理排水中的氮、磷污染物质。

但由于受传统观念的约束，我国重灌轻排思想仍然突出，对农田排水的重要性缺乏足够的认识，有些领域的研究还刚刚起步，如农田排水工程的综合防御技术，新技术新材料的开

发及推广应用，农田排水对水环境的影响研究，农田排水软件和硬件技术等都存在较大差距，迫切需要加大人力、物力、财力的投入。另据 2001 年统计数据，全世界排灌面积比为 0.70，中国目前为 0.37，远未达到世界平均水平。因而，为防治土壤涝渍和盐碱危害，发展和健全农田排水系统，加强排水理论和技术研究，都值得我们给予极大的关注。

2.4 非常规水资源化及其高效安全利用技术研究

在节水的同时，开发利用非传统水资源，是解决缺水的重要途径，其中污水资源和咸水、微咸水资源以及天然雨水资源的开发利用极为重要。开发利用非常规水资源已成为众多国家和地区解决用水危机的新途径而受到普遍重视。在国外，无论是水资源十分紧缺的国家（如以色列），还是水资源相对丰富的国家（如美国）早已开展了污水资源化的开发利用工作。从地域范围看，污水灌溉的实践遍及世界上大多数地区。在经济发达的美国，目前全国 50 个州中有 45 个州开展了污水回用于农业的工作，全国城市污水再生回用总量约为 $94\times10^8 m^3/a$，其中 60%用于灌溉；气候干旱的以色列，目前全国建有 200 多个污水回用工程，其污水利用率已达 70%，其中约 2/3 用于灌溉，灌溉用污水水量占总灌溉水量的 1/5；约旦大多数城市处理后的污水主要回用于农业，灌溉面积近 1 万公顷。此外，世界上其他一些国家如阿根廷、巴西、智利、希腊等国，在污水回用于农业方面也有丰富经验。微咸水方面，以色列、美国、突尼斯、埃及、中亚、阿拉伯等国家都有较长的微咸水灌溉历史。雨水高效利用在以色列、日本、美国、德国等国家取得了许多成功经验。海水方面，意大利用海水浇灌白菜、甜菜等作物，长势良好，并且含糖量增加；加拿大的耐盐、耐寒的紫羊茅品系，美国的全海水浇灌的大麦品种等，都是利用现有的耐盐或盐土植物品种，经海水浇灌驯化，逐步淘汰选择，提高其抗盐性，最后选育出来的。

我国的非常规水资源具有水量大、水量集中的特点。再生水方面，根据规划目标，2010 全国污废水处理率将不低于50%，预计再生水总量将达到$442.5\times10^8 m^3$。微咸水方面，据统计中国地下微咸水资源约$200\times10^8 m^3/a$ ，可开发量为$130\times10^8 m^3$，主要分布在易发生干旱的华北、西北地区，其中黄淮海平原地区2～5 g/L的微咸水资源量达$54\times10^8 m^3$ ，西北地区(新疆、甘肃、宁夏、陕西、青海、内蒙古的部分地区)矿化度2～5g/L的地下微咸水资源达$88.6\times10^8 m^3$。雨水方面，我国的降水总量丰富，但分布不均匀且差异悬殊，我国多年平均降水量为$6.19\times10^{12} m^3$，年降水量最大的地方超过6000mm，而约有1/3的面积降水量低于200mm，如果能够把雨季和丰水年的水蓄积起来，既可以防涝防洪，又可以解决旱季和枯水年的缺水状况。海水方面，

我国拥有18000 km漫长海岸线和20779 km^2沿海滩涂，且分布相对集中。因此我国非常规水资源开发利用潜力很大。

我国在非常规水利用领域历史较为悠久，再生水方面，到1998年，全国污水灌溉面积已达316.8万hm^2 ，约占全国灌溉总面积的7.3％ ，且污水灌溉面积仍在逐渐增大。微咸水方面，我国北方干旱、半干旱地区利用微咸水和咸水进行灌溉，最早可以追溯到80年以前，宁夏同心和海原县用矿化度3～7g/L的咸水灌溉韭菜、芹菜和甘蓝，山西汾河灌区利用浅层地下微咸水灌溉冬小麦、春玉米、棉花等，河北沧州地区自1976年开始利用矿化度小于5g/L的微咸水灌溉小麦等。在我国，近十几年来雨水集蓄利用在农业方面发展迅速，如我国甘肃省实施的“121雨水集流工程”，宁南山区实施的“窑窖农业”，内蒙古自治区进行的“112集雨节水灌溉工程”都取得了许多经验和较大经济效益。海水方面海南大学生物科学技术研究所利用生物工程技术已获得了可用海水直接灌溉的耐盐豇豆、辣椒、茄子和番茄等。这些为非常规水资源的进一步开发利用提供了技术支撑条件。

2.5 大中型灌区的现代化管理

从世界各国的情况来看，无论是发达国家还是发展中国家，大规模开发和建设灌排设施的时代已经过去，灌区管理成为各国关注的焦点。目前灌区管理方面的热点问题一是灌区管理制度改革，二是以信息化为核心的灌区现代化建设。

目前发达国家的灌区管理正朝着信息化、自动化、高效化方向发展，在灌区管理中普遍采用了遥感遥测技术、网络技术、数据通信技术、计算机技术、系统工程、地理信息系统、自动控制技术等，实现了集信息采集－处理－决策－信息反馈－监控为一体的优化调度。美国从 20 世纪 50 年代开始就十分重视灌区管理系统的建设。如美国的帝王灌区（Imperial Irrigation District）早在上世纪五十年代后期就兴建了基于电话线的遥控设施。澳大利亚最大的河流墨漯河流域（Murray Basin）是澳大利亚的主要灌溉农业区。从上世纪 90 年代初开始，维多利亚及新南威尔士州等先后进行了灌区体制改革。古尔本-墨漯灌区（Goulburn-Murray Water）和墨漯灌区（Murray Irrigation Limited）是其中的典型代表。两个灌区在体制上分别实行了民营化和私有化，与此同时，两个灌区分别对灌区管理设施进行了更新改造，实现了现代化。以色列的灌溉农田都采用了喷、滴灌等现代灌溉技术和自动控制技术。中等发达国家如韩国、马来西亚等在灌区管理的信息化和现代化建设方面发展的也比较快。而发展中国家如印度、埃及、墨西哥等也都在探索灌区信息化，特别是像遥感、地理信息系统已被广泛

地应用于灌区管理的研究工作，如灌区作物蒸发量的分析、灌溉用水计划的制定等，但这些工作更多的是一些零星的研究，大规模的信息化建设还有待时日。

我国灌区的大规模建设集中在上世纪 50 年代到 70 年代。受当时经济发展水平、科技水平及投资体系的制约，大多数灌区先天不足，一般都只有骨干工程，田间工程则大部分未配套。90 年代后期，国家开始对大中型灌区实施续建配套与节水改造，随着这一工作的逐步完成，大中型灌区将形成完整的控制系统，从而为灌区的现代化管理提供必要的前提条件。

在管理体制方面，我国大中型灌区从 80 年代开始就一直在探索体制改革，提出了不少观点，进行了多方面的尝试，比如灌区的地位问题，80 年代以前，灌区一般都附属于水行政部门，80 年代以后，有的灌区依旧沿袭过去的体制，而不少灌区则变成了独立的法人，有的成了供水公司，还有的成了股份公司，也有的成了用水户的自治组织，近年来，参与式灌溉管理又成了热门的话题；再比如，针对灌溉水价问题和水费征收方式问题也提出了多种途径。但到现在，仍然没有找到一种普遍适用的管理模式，大多数灌区仍然没有走上良性循环的道路。而且从我国目前的管理体制来看，大中型灌区一般是分级管理，灌区只管骨干工程，骨干工程以下的田间工程以及农作物的种植情况等一般由地方管理。在这种体制下，灌区难以掌握实际的灌溉面积和作物种植情况，因而也难以掌握真实的灌溉用水量。因此，我国灌区管理体制和制度建设迫切需要进行全面系统的梳理，从而找到适合我国不同地区不同类型灌区并能实现良性发展的管理模式。

在管理设施和手段方面，我国从 70 年代开始就曾在少数几个灌区开展过自动化方面的试验工作，如韶山灌区，但最终没有成功。进入 80 年代，计算机技术开始在灌区中应用。一些高校和科研单位开始了研究和试点，并取得了一批研究成果并在生产实践中应用。90 年代后期，中国水利水电科学研究院等单位先后在甘肃省景泰川提水灌区、陕西泾惠渠灌区等开展了信息化建设工作，取得了一定的成效。但是，目前大多数灌区仍然主要靠人工进行用水的申请和登记，靠人工进行水位和雨量的观测，靠一些简陋的设施和粗放的方法量水或者根本就不量水，不少基层的灌区管理单位甚至还没有微机，用水管理依然主要凭经验。从总体来讲，我国灌区的管理水平和信息化程度还很低，与发达国家有较大的差距。

从上述现状来看，现阶段我国灌区现代化管理的主要内容包括两个方面：一是管理制度体系的建设，包括体制改革、水权水价体系的建设与健全、经营机制等；二是信息化建设，包括各种水雨情及工情等各种信息的采集、传输、存储、处理以及决策支持系统的开发等。前者属于制度层面，后者属于技术层面。灌区信息化建设是提高灌区现代化管理水平、提高管理效率、降低管理成本的重要手段，是灌区今后建设和发展的重要内容。部分灌区信息化

建设的实践表明，信息化建设将有力促进灌区“两改一提高”工作，特别是在促进灌区水费制度改革、减轻农民负担、促进灌区职能转变等方面起到积极的推动作用，作为重要科技手段，必将为我国的节水型社会建设发挥重要的支撑作用。

2.6 农业水环境监测与治理技术

水环境的污染从污染源发生的类型上可分为点源与面源两大类。点源污染主要指工业生产过程中与部分城市生活中产生的污染物，因此，这种污染形式具有排污点位集中、排污途径明确等特征。相对而言，面源污染一般地理解为一种分散的污染源造成的水体污染，地表径流冲刷而产生的土壤颗粒、土壤有机物、化肥、农药、有机肥料或城市街面堆积物等随地表径流流入受纳水体、引起水质污染的一种污染类型。面源污染具有发生区域的随机性、排放途径及排放污染物的不确定性及污染负荷空间分布的差异性。农业面源是最主要最易构成水体环境隐患的面源污染。三峡大坝库区 1990 年的统计资料表明，90%的悬浮物来自农田径流，N、P 大部分来源于农田径流。

从本质上讲，农业面源污染物来自于土壤中的农业化学物质，因此，它的产生、迁移与转化过程实质上是污染物从土壤圈向其它圈层特别是水圈扩散的过程。农业面源污染正在成为水体污染的主要原因，农业面源污染的控制已成为水污染治理的关键。

发达国家在农业面源污染治理上主要通过源头控制，开发环境友好的农业生产技术，在各主要水域和水源保护区研究和制定限定性农业生产技术标准。通过技术层面与政策层面的结合，在全流域范围内广泛推行农田最佳养分管理，规范水源保护区农田作物类型、轮作方式、施肥用量、肥料品种和施肥方式，实行全流域氮、磷总量控制，削减农业面源污染排放量。据美国 1990 年的调查评估报告显示，美国面源污染约占总污染量的 2/3，其中农业面源污染占面源污染总量的 68%~83%，导致 50%~70%的地面水体受污染或威胁影响。近 10 多年来，通过制定政策、法律和采用环境友好的农业生产技术等措施，美国的农业面源污染已大幅减少，据 2006 年统计，美国农业面源污染面积已比 1990 年减少了 65%。在欧洲，20 多年来，欧盟国家氮、磷化肥用量分别下降了大约 30%和 50%，曾经十分严重的地下水硝酸盐污染有所缓解，湖泊和近海域水体富营养化也得到一定程度改善。

我国农业生产主要靠的是化学投入，表现在化肥、农药、除草剂等用量大幅度地增长。由于目前农业大量施用化肥和农药，特别是过量施用或不合理施用时，在水土流失的同时，大量氮磷元素及农药进入水体导致严重的污染。近 20 年来，我国化肥施用量超过世界平均水

平的 1 倍多，而利用率只用 30－40%，其余 70－60%的化肥进入环境，污染水体和土壤。仅 2000 年，氮、磷肥进入水体的量已达到 135 万～211 万 t 和 10.0 万～24.9 万 t，对生态环境构成较大压力和危害。农药和农膜用量的迅速增长，对农村造成了现实和潜在的环境危害。畜牧业的规模化发展，使其粪便产量远远超过了工业固体废弃物，其有机污染物直接进入水体，产生了严重的环境压力，造成了土壤板结、地力下降、生态环境破坏、农产品质量下降，影响到农业可持续发展，直接威胁着人类的身体健康。

国内有关农业面源污染的理论研究近年来取得了较为丰富的学术成果，学者对农业面源污染与农业的可持续发展关系、对生态环境和人类健康的严重影响已基本形成共识，有力地推进了人们对农业面源污染环境严重后果的认识。同时，我国学者结合我国的基本国情和现状，将节水灌溉与农业面源污染控制相结合，研究控制面源污染的节水灌溉技术和水肥综合管理技术，探讨化肥和农药在农田中的转化迁移规律和预测分析模型。在理论研究和预测分析模型方面，目前我国主要以消化和利用国外的成功模型、重点研究模型参数的取值和模型的适用性问题为主。但由于受研究角度的影响，学者对我国农业面源污染的形成机理多立足于宏观层面，从农业生产的一般组织方式来展开研究。在面源污染治理方面，目前多借鉴发达国家经验，我国农业面源污染治理的手段包括经济手段和行政手段，或者 2 种手段的综合。

2.7 农村饮水安全保障技术

我国城市化程度还很低，约有 9 亿人口居住在县城以下乡镇和村庄，其中，乡村人口 7.13 亿，占全国人口的 53.3%（2009 年国民经济和社会发展统计公报，国家统计局，2010 年 2 月 25 日）。长期以来，农村和乡镇基础设施建设落后，村镇供水以分散供水为主，供水保证率低，供水水质难以保证。十一五以来，国家将村镇供水提到了“民生水利”的高度，在该领域的投入不断加大。针对农村饮水解困和农村饮水安全工程的建设，开展了村镇供水领域的研究。具体包括：

(1) 饮用水源开发利用技术研究。探索了不同地质单元不同类型地下水勘查技术模式，开展了不同地层条件下地下水取水工程技术。

(2) 劣质地下水处理技术研究与设备研制。对以高氟水、高砷水、苦咸水等作为供水水源，开展了劣质地下水处理技术研究与设备研制。

(3) 雨水安全集蓄与利用技术及装置开发。在淡水资源缺乏的农村地区，开展了雨水预处理技术研究、水窖水质净化技术研究、海岛地区集雨利用模式、山丘区集雨利用模式等研

究。

(4) 消毒技术与装置开发。开展了氯消毒、二氧化氯消毒、臭氧消毒、紫外线消毒以及分散供水消毒技术与装置研究。目前，如何将这些技术与设备进一步实用化，以适应村镇供水的特点，需要进一步的工作。

(5) 农村安全供水水质检测与农村供水管网优化设计与标准化、信息化集成技术研究。

3 我国农田水利工程学科存在的主要问题

3.1 农田节水灌溉理论与技术研究

3.1.1 全国性和区域性的农业节水试验与监测网络还未形成

我国农业节水技术领域研究的基础条件还比较落后，全国性和区域性的试验研究网络还未形成，特别是试验仪器设备条件除了个别中央科研单位和高校的重点实验室可与国际水平接轨外，大多数的科研单位和高校在该领域的试验条件还相当简陋，影响了试验数据的精度，而且由于仪器设备落后和投入不足，我国实验数据采集的自动化程度低、连续性差，试验大部分靠人工进行。同时，由于没有有效的农业用水状况监测体系，对不同地区、不同灌区的用水水平和节水状况不能有效监督和控制。还有，尚未建立起国家级农业节水技术综合研究中心，还没有建立起国家级和省、地、县、乡级层层分工协作、完善的农业节水试验台站与信息监测网络及农业节水技术研发和推广体系。

3.1.2 农业节水灌溉基础研究薄弱

对农业节水发展起关键作用的应用基础研究还很欠缺，在灌溉排水条件下土壤水分、盐分、养分的转化运移和尺度效应等方面缺少突破性的研究成果；在农田尺度水分高效利用的应用基础、区域节水高效和对环境友好的农业用水优化模式等方面的研究深度还很不够，影响基础理论研究成果转化为节水效益。总体来说，我国农田水利基础研究薄弱，科技积累不足，整体研究条件较差，跟踪模仿性研究较多，原创性研究较少。

3.1.3 节水综合技术体系和应用模式研究不足

农业节水技术是一项复杂的系统工程，需要水利、农艺、工程和管理技术的整体融合与合理配套。但目前的现状是在各单项技术之间缺乏有机的连接和集成，缺乏适宜于不同区域水土条件的农业节水技术集成体系和应用模式，导致多项技术的节水增收效果并不比单项技

术显著的局面，农业节水技术体系的整体效益难以发挥。我国在农艺节水技术领域缺乏相应的技术产品、配套的应用设施和规范化的技术（产品）标准，实际应用操作复杂，难以掌握，且技术成本的增加使得其规模效益难以发挥。

3.1.4 节水设备与产品功能单一，材料与工艺研究水平的滞后

我国节水灌溉设备生产中的大宗产品多仿制国外，其中的关键技术和工艺不过关，市场竞争力差。由于从事节水灌溉设备生产的厂家以中小企业和民营企业为主，设计、研制、开发能力有限，产品质量欠缺。又由于引进技术和国产设备在规格和制式上的差异，造成国产节水灌溉设备的通用性、兼容性、互换性、多功能性较差，导致节水灌溉工程的性能不完善、质量低下。

3.1.5 农业节水发展政策和制度研究方面的滞后

从当前农业节水发展的实际情况看，许多节水技术措施在投入产出方面的表现都不是太好，这样就很难调动最终用水者采用这些节水技术措施的积极性。由于经济效益不好，许多地方政府和水管理部门缺少了推动农业节水发展的主动性，形成了许多地区农业节水发展主要依靠国家投资和行政驱动的局面，这样就很难保证农业节水能够持续稳定发展。

在我国，管理落后成为发展农业节水的重要障碍，如：灌溉用水计量和收费方式与节水的需求不相符合；节水活动投入主体和收益主体的严重错位；水权分配与交易机制尚不健全等，不解决这些问题，即使再有效的节水技术也很难得到长期推广应用。

3.2 农田排水研究

3.2.1 治理标准偏低

我国很多地方对排水除涝缺乏足够的认识，特别是近年来北方地区持续干旱，水资源短缺的形势日益紧迫，在高度重视解决水资源紧缺的同时，放松了对涝渍灾害的警惕。排水工程投入严重不足，原有的排水河道被占用或淤积堵塞，丧失了排水能力，有些排水工程的排水能力还不到设计标准的一半；一些田间排水沟道被废除，涝渍碱治理的经验和措施得不到推广应用。多数地区排涝标准不足 3—5 年，与发达国家农村地区的排涝标准相差甚远。

3.2.2 施工机械落后，外包过滤材料研究刚刚起步

暗管排水施工机械主要有无沟铺管机和开沟铺管机两种。过去由于用刚性管材，且系人工埋设，效率不高，质量难以保证。宁夏和新疆分别引进美国和荷兰开沟铺管机，并得到一定规模的应用。随着技术的发展，开沟铺管设备也在不断的改进和完善，以往的开沟铺管机

多存在动力不足，纵坡控制较差，在地下水位较高时施工速度慢或很困难，受技术、经济等多种条件的限制，目前我国各类型暗管排水面积不超过 150 万亩左右，机械化作业水平较低。

随暗管排水发展而出现的一个突出的技术问题是，在轻质土内埋管如何才能有效地防止排水暗管被淤堵又能保持稳定的透水性。由于土工织物与传统的过滤排水材料(砂石料等)相比具有产品系列多、性能稳定、质轻、运输施工方便、劳动强度低、工效高、施工质量易保证等优点，世界上许多国家近二十年来又将土工织物用作农田排水暗管的外包过滤材料，开展了大量的研究和田间应用，取得了有益的经验。我国在这方面也开始进行一些研究，但系列较短水平较低，实用经验不多。

3.2.3 研究的基础条件和技术水平落后

由于对除涝排水没有给予重视和投入严重不足，以往的排水试验站任务削弱、改变，并逐渐移到其它方面的试验研究。农田排水技术领域研究的基础条件设施和信息获取手段还很落后，大部分观测手段原始，依靠人工操作进行，尤其是排水流量和水位的观测，影响了试验数据的精度，而且没有较长系列完整的资料，特别是排水水质的观测数据，限制了农田排水对河流、湖泊等水体环境的影响评价与对策研究。

3.2.4 排水对水环境的影响还未引起高度重视

农田排水不仅是有害盐类，而且也是大量污染物质进入水体的主要传输途径。长期以来，化肥和农药的大量使用，对土壤和水体等环境产生了不良影响，已构成目前水质环境恶化的一大威胁，越来越严重地影响着农业生产的持续稳定的发展。大量研究表明，地下排水中硝态氮的损失是地表水和地下水水质恶化的主要污染源。农田污染物通过地下排水进入地表水体的损失量、损失机理、控制途径一直没有得到高度的重视。一些河流、湖泊经过很多年的治理没有明显的好转，农田排水对水体的影响是主要原因。

3.3 非常规水的资源化研究

3.3.1 污水灌溉对农作物生长发育影响的机理研究有待加强

许多试验大都停留在对比分析，如污水灌溉对植物生理性状的危害程度，未能指出是由于哪种污染元素的作用或哪几种元素的联合作用，同时对这些元素的毒害原理和作用机制也缺乏相关研究。对于不同污水水质灌溉下的不同农作物，可以有针对性地去除对作物生长危害严重的污染物质，设定合理的污水稀释比例，制定科学的污水灌溉制度和清、污轮灌制度，在实现污水灌溉利用价值最大化的同时达到食品安全和环境保护的要求。

用于污水处理的氧化塘和人工湿地一般占地面积较大，单位面积净化负荷水平较低，污水停留时间长。同时，污水中的有害物质对周围环境和地下水资源安全存在一定威胁，因此氧化塘和人工湿地的防渗及周围隔离带的设立工作必需加强。

3.3.2 微咸水灌溉技术和土壤盐分监测技术研究的问题

由于区域地下水位的下降，我国华北地区的土壤盐碱化得到初步控制，西北地区盐碱地控制和微咸水灌溉技术方法方面取得一些研究成果，但长期大田滴灌可能造成土壤剖面盐分积累和土壤盐分的积累规律尚不清楚，特别是针对棉花大田滴灌的发展现状，需要了解节水高效和控盐稳产的灌水模式和排水控盐技术。温室大棚在多年利用条件下出现土壤质量退化的问题，对于温室大棚中不同灌溉方式的土壤水分、土壤养分、土壤盐分和地下水中化学物质的迁移转化规律、精量灌溉技术和灌溉模式研究较少，为维持温室大棚的持续发展，需要了解和研究控制土壤盐分积累和防止地下水污染的排水技术和综合技术方法，为设施农业的持续发展提供技术支持。微咸水灌溉已开展多年研究的老课题，但是目前我们还没有建立微咸水灌溉安全控制指标体系，缺少切实可行的微咸水与淡水的混灌/轮灌技术与灌溉制度，限制了微咸水的安全可靠利用和微咸水灌溉的持续发展。微咸水灌溉和长期节水灌溉可能造成盐分积累和土壤耕层盐分聚集，导致灌溉土地次生盐渍化和质量退化的风险，但对微咸水灌溉土壤盐分变化的监测、预测预警和土壤盐分控制研究落后，特别是监测仪器的研发明显不足。

3.3.3 雨水集蓄利用配套设施不健全

在雨水集蓄利用方面，国际上已从过去经验的总结，向现代技术的应用和工业化技术产品生产方面转变（比如德国的塑料窖体生产等）。雨水利用也不仅仅只是为了解决生活用水和农业用水，而逐步开始对雨水资源化和水资源的保护与高效利用进行探索。在我国，与集蓄雨水高效利用相配套的免耕技术及机械化机具在一定程度上解决了半干旱地区的播种出苗和灌溉问题，但在一些关键技术上尚未突破。目前，我国雨水集蓄利用的方式、材料和技术发展落后，雨水利用新技术和新方法的研究十分薄弱，已难以适应集雨工程迅速发展的需求。

3.4 大中型灌区现代化管理研究

总体来讲，我国灌区的管理水平和信息化程度还很低，与发达国家有较大的差距，主要

表现在以下几个方面：

3.4.1 灌区信息采集点少、手段落后，息传输手段比较单一

有关调查资料显示，大型灌区平均 0.37 万 hm^2 有一个水位、流量观测点，单位测点控制渠道长度 94km，农业用水户单元小、数量多，造成事实上根本无法对用水户的用水量进行细致、实时的监控。同时，观测手段也相对落后，现在灌区大部分仍是采用简单的、经验的方法进行水量监测，测量精度较低，而且由于不能及时准确地获得水流和灌区灌溉管理所需的其他信息，大多数灌区不能动态制定用水计划，使得用水调度大多凭经验进行，不可避免地造成一些无效放水。

目前，大多数灌区的信息传输手段限于传统的电话网络或者人工报送，监测的水情、墒情和作物长势等信息只能人工通过电话或整编后的纸媒介进行传输，时效性差，难以满足实时调水的需求。

3.4.2 灌区信息化系统的综合集成能力差

灌区信息化系统在设计和建设时，雨量采集、灌溉需水分析、水资源监控、供水调控、水费收缴、内部管理、决策咨询等系统各自独立，其结果使得硬件资源利用率低，维护费用增加，投入高，无法满足灌区日常管理工作的要求。在具体工作中又只重视硬件投入，不重视软件开发。这不但使得硬件不能充分发挥效力，系统的操作维护困难，而且资料的整理分析等后续工作还需要手工操作，没有真正减轻工作量。

3.4.3 灌区信息化建设没有真正形成产品，共享性差

多年来，我国在灌区信息化研究方面已做了不少工作，但一直处于研究和试验阶段，没有真正形成产品。例如关于灌区自动化研究，在技术上可能存在缺陷，稳定性、耐用性差，一旦出现问题，除当时参加研发的人员以外，其他技术人员较难解决。往往是研发人员在的时候，系统运行良好，当研发人员离去以后，技术力量较强的灌区尚可勉强维持，而技术力量较弱的灌区，则容易陷入停滞状态。

由于灌区信息化建设长期以来没有一个统一的规划和标准，各灌区各自为政、各自封闭，使得灌区之间的信息难以共享，也难以与其他相关系统实现联网，共享信息。同时，各灌区重复开发、重复建设现象严重，造成很大的浪费。

3.4.4 灌区管理人员信息化意识和技术水平亟需提高，技术力量缺乏

部分灌区也尝试进行信息化方面的建设，但由于灌区管理人员信息化技术水平比较低，使得建成的信息系统使用难、管理维护更难，无法充分发挥已建系统的作用，更兼新老系统

共同运行，不仅没有减轻反而加重了灌区工作人员的负担。久而久之，新建系统逐渐老化、落后，人们也对信息化的效益产生了怀疑，系统无法进行更新改造，逐渐淘汰，灌区管理又恢复到从前。灌区要实现信息化，必须从提高灌区管理人员的信息化意识和技术水平入手，使之能够很好的使用信息化系统，对信息化系统能够进行必要的管理和维护。只有这样，才能推动信息化建设，也只有这样，才能使得信息化建设落在实处，对实际工作发挥其应有的作用。目前主要依靠一些不熟悉水利专业的 IT 行业人员和不熟悉 IT 行业的水利类的大专院校、科研院所进行研发。研发人员对灌区信息化的研究和开发尚在摸索当中，实际应用就更加困难。

3.5 农业面源污染研究

由于农业面源污染分布面积广，污染的产生在空间上、时间上的不确定性，造成研究工作非常困难，我国在农田面源污染对地表水环境的影响研究方面基础薄弱，在控制管理研究方面基本上处于空白状态。目前主要存在的问题包括：

3.5.1 农业面源污染理论研究有待加强

我国学者在面源污染的研究方面多立足宏观层面，忽视了微观层面上的农业生产主体行为与农业面源污染之间的关系，忽略了不同地区农业生产要素禀赋结构差异对农业面源污染的影响。现有的灌区水循环及其伴生过程研究，大多集中在土地利用或农业生产条件等单一环境背景下农田尺度降水、地表水、土壤水与地下水相互转化及其作物耗水过程方面。随着经济社会发展，气候变化、土地利用方式、农业生产条件等灌区环境正发生巨大变化，直接导致灌区水循环与粮食产量、水土环境要素的演变。不同节水灌溉条件下化肥的地表径流、入渗流失、作物吸收、作物吸收的氮磷循环过程及机理研究不足，更缺少长时间、大区域的实验研究成果。目前没有开发研制出符合我国种植结构和灌溉模式的农田面源污染的预测分析模型。

3.5.2 变化环境条件下农业水环境问题

“村村通公路”与“新农村建设”在加速乡村城镇化与农村现代化同时，也减少灌区耕地可利用率，并因过多的路面硬化、高架桥梁、居民点集中建设等土地利用方式调整，改变了灌区水循环要素及产汇流过程，由此导致灌区耗水、养分、盐分及多种污染物等伴生过程迁移转化规律发生变化。而种植结构调整、耕作方式改变、畜牧养殖、大量化肥农药杀虫剂使用及大面积土地平整、渠道衬砌等农业生产条件变化，改变了原来的土壤环境及其覆被、

蓄积等条件，由此导致灌区入渗补给、蒸发、产汇流及养分、盐分、污染物等伴生过程迁移转化条件的变异，影响灌区粮食产量、作物品质、环境演变和经济效益。因此，气候变化、土地利用与农业生产条件等变化环境对灌区水循环及其伴生过程的影响机理有待进一步认识，序言研究各因素共同作用下灌区水循环水土环境要素演变规律，弄清灌区节水增产潜能和环境演化特征，实现灌区水资源优化配置与综合节水。

3.5.3 农业面源污染立法不足

除了技术上推行农业区规划以减少水土流失的草被防护带之外，西方国家在长期研究的基础上制定了包括法律、经济手段及国际协定在内一整套比较完善的防止农业面源污染的制度和措施。例如，荷兰制定了农田磷素允许投入量、流失量和超标收费制度；法国对不同的作物提出了肥料禁用的时间规定；美国对农业面源进行总量控制。鉴于我国的基本国情，目前暂不能推行发达国家的这种做法，但值得学习和应用。我国没有对面源污染单行立法，有关预防和控制面源污染的条文散见于现行法律、法规和政策之中，而且这样的条文并不多见。虽然有些法律、法规在某些条文中提及了面源污染，但是，这些规定都过于原则，没有制定切实可行的预防和控制面源污染的措施。我国农业发展水平与发达国家的差距，中国土地要素制度安排、农业生产组织方式以及在现有土地制度安排下，农户行为与发达国家的不同，影响了相关政策的可操作性。

4 农田水利工程学科未来发展方向

农业水利学科的发展将围绕提高农业用水效率、保护农业水环境和维持灌溉农业持续发展等主题，开展灌溉排水和农业水环境基础理论与应用技术的研究，主要包括以下几方面：

4.1 农田系统中水分、养分、盐分循环机理与区域水盐演化规律

作物在土壤中吸收水分、养分并调节土壤中的盐分，通过蒸腾将大部分水分转化到大气中，将养分的一部分组成作物的机体，将盐分残留在土壤中。大气、作物、土壤和地下水中水分、养分和盐分的循环过程，决定了作物的生长状况，控制了作物对于养分的吸收和氮磷的流失，导致了土壤盐分的积累和演化。灌溉排水的目的是保证作物的正常生长，提高作物的质量和产量，并且不会导致农业生态系统的退化和非持续发展。因此，农田系统中与作物生长有关的物质循环规律和机理，是农业水利研究的基础理论问题。国内外学者对于水分、养分和盐分的运移开展了大量的研究，但研究多偏重于局部，或侧重于农田系统中水分的研

究，而将这个系统中各种物质的相互耦合，且以农田生态环境作为控制性指标的研究较少。在农田系统中水分、养分、盐分循环规律研究方面，未来研究重点为：

4.1.1 农田系统中养分迁移转化规律和养分流失控制研究

随着氮磷面源污染的加剧，需要研究区域尺度氮素迁移转化规律，分析氮磷在不同尺度下迁移转化的特征，建立区域尺度氮磷迁移转化预测模型，提出流域农业面源污染预测、控制的途径和灌溉排水条件下农业化肥高效利用模式。

探讨农业生产中氮磷流失的各种影响因素和转化运移特征，根据不同地区的特点确定适宜的施肥标准，建立氮肥优化配置管理系统和合理的施肥制度，提高作物对肥料的吸收效率，减少氮磷的流失量和农业面源污染。

定量研究氮磷在土壤水和地下水两种不同地球化学环境中迁移转化的耦合理论，研究简化和实用的氮素转化运移模式，特别是研究氮素挥发、反硝化、作物吸收和土壤本底氮素对于氮素平衡的影响，分析硝态氮在地下水中的运动形态和转化过程，为地下水污染治理和高效用肥提供理论基础。

4.1.2 变化环境下土壤盐分演变趋势和土壤盐渍化控制研究

变化环境包括人类活动及气候变化，其中人类活动的影响很大程度上也将通过影响气候的变化来影响作物的耗用水规律。研究环境变化对盐分循环与盐渍化演变产生的影响，判断各种人类活动强烈影响下土壤盐渍化的演变趋势；分析和预测变化条件下农田用水量和耗水量的变化规律，探讨长时间尺度非饱和土壤的水量平衡特征，建立水分平衡和盐分平衡的耦合机理；研究水分和盐分年内短时间、高强度频繁涨落和多年长时间尺度的土壤盐分缓慢积累的时间尺度耦合机理和模型；研究局部非饱和带活跃的水盐交替和区域大尺度范围盐分缓慢积累的土壤盐分演化的尺度耦合问题。结合经济发展、环境效应、水盐均衡，建立持续发展下的土壤盐分调控理论和模式，提出维持土壤持续利用的土壤水盐控制方法和途径。

4.2 节水灌溉理论和技术

4.2.1 作物耗水的空间尺度转换理论及方法

目前对作物耗水的监测基本在小区及田间尺度，由于影响作物耗水相关要素的空间变异性，如何根据点上的作物耗水资料进行区域作物耗水的估算，解决由点到面的作物耗水的空间尺度提升；通过遥感遥测资料估算宏观的作物耗水基础信息，需要研究宏观作物耗水信息转化为区域作物耗水量理论和方法，为区域尺度灌溉用水配置提供基础信息。

4.2.2 定量区分气候变化与人类活动对作物耗水及灌溉用水的影响

我国城镇化率不断提高，以城镇为中心的热岛效应明显增强，城镇与农田之间平流作用强烈，许多地区年际间气温呈逐年上升趋势、辐射则呈逐年下降趋势、而参考作物蒸发蒸腾量则有升有降，显著影响了区域耗水量及灌溉用水量。这些人类活动及气候变化影响田块尺度的作物耗水强度及灌溉用水，同时由于田间作物耗水的改变，进入大气的蒸发蒸腾量不同，又进一步影响农田小气候，下垫面条件的改变也影响农田光、热等能量平衡，进而影响农田小气候，农田小气候改变导致区域尺度的气候变化（降雨减少、气温升高等），这种变化又进一步影响作物耗水及灌溉用水。因此，应从更长的时间尺度、更大的空间尺度将人类活动与气候变化对作物耗水及灌溉用水的影响进行综合研究。

实际上，由于人类活动很大程度上通过影响气候变化来对作物耗水产生影响，特别是在较长的时间尺度及较大的空间尺度，因此很难将人类活动与气候变化截然分开，但从研究变化环境下作物耗水的调控机理及途径层面上，又必须将两者分开。如何在不同的时空尺度下探明两者对作物耗水影响规律、建立其定量关系是研究的基础，也是难点。

4.2.3 变化环境下的节水高效灌溉技术及其环境效应

变化环境下由于作物耗水规律及灌溉用水量显著变化，主要研究不同尺度节水高效灌溉技术和管理模式，探讨不同节水灌溉技术对农业水循环过程、气候变化及水环境的影响。

节水灌溉技术在我国推广面积迅速增加，在改变现有农业灌水模式节水的同时也势必对周围环境造成影响。如水稻改变传统淹灌模式，甚至采用无水层灌溉模式，从而显著改变原有稻田水循环过程，减少耗水量及灌溉用水量，改变稻田 CH_4 的排放规律；作物品种的改良，特别是抗旱节水品种的采用显著影响作物的耗水及灌溉用水量。作物耗水及灌溉用水改变后，需要研究农田及灌区尺度排水的变化规律，同时研究排水中农业面源污染负荷变化规律和定量描述方法。努力发掘作物抗旱种质资源，研究快速、高效的抗旱性鉴定评价方法与指标。

4.2.4 节水灌溉关键设备的研发和产品化

研究“标准化，通用化、系列号”的节水管材管件，研究“高质量、标准化、系列号”的节水灌溉控制部件，研究规格多，内密封性好，容积大的化肥罐和大型过滤器装置。

4.2.5 农业节水信息化管理研究

利用基于遥感监测或者单株作物检测的电信号与其他信号和作物水分信息关系的时空变异性，提高节水管理信息采集、传输的可靠性，研究依据土壤、作物、微气象数据和可用灌溉水量预报的农业节水优化模式的数字化设计软件，研究使用信息技术提高节水效益之间的

新方法。

4.3 农业排水理论及涝渍治理

4.3.1 排水控制理论和渍害治理

主要研究节水灌溉条件下的排水控制理论及技术，长期灌溉条件下的区域土壤盐分平衡理论与预测分析方法，集约化农业和设施农业的排水问题，干旱半干旱地区（特别是膜下滴灌地区）的排水措施和盐分控制，湿润半湿润地区涝渍兼治的排涝防渍标准和排水技术、区域排水指标与田间排水标准的衔接技术等问题。

研究作物不同生长阶段对渍害的敏感程度差异；涝渍综合排水指标与作物产量的数学模型；把排水控制指标同作物产量与品质联系起来，研究作物对涝渍胁迫的敏感性；在单一涝渍过程对作物的影响研究的基础上，发展多个涝渍过程对作物的复合影响研究。

4.3.2 防洪与排涝、工程与非工程措施综合研究

当前，我国农业生产基本上以户为承包单位，因而在排涝能力上也因户而异，缺少全局性的地区治涝防涝规划。而区域性的防洪工程多是由国家和地方政府投资，与除涝相比，水库、堤防等防洪工程标准相对较高。如何对流域的排涝系统进行统一规划，合理协调防洪与排涝的关系，解决蓄洪与垦殖的矛盾，提高低洼涝渍地区的除涝排水能力，仍是当前的迫切要求和值得解决的问题。探讨除涝工程管理运用操作规程和控制运用模式，进行防洪除涝系统优化调度研究，优化农村防洪除涝系统，最大限度发挥内河、水面蓄滞洪涝的功能。同时，研究适应种植、培育耐湿耐涝品种，提高作物抗涝能力，以减轻受灾损失程度。

4.3.3 基于信息技术的决策支持系统的建立

建立基于 GIS 技术、满足涝渍防御管理需求的决策支持系统。系统中包括有关气象、水文、土壤、下垫面条件、防洪除涝工程及区域社会经济发展状况的数据库，具备各类信息的空间显示、查询和分析功能；结合不同类型的应用软件，研究不同类型区地面水、土壤水、地下水及溶质的运移与工程治理程度(渠、沟、管、泵、闸的规格标准及优化布局形式等)的关系，对不同频率典型年洪涝的风险、洪涝灾害经济损失及其对农村生态环境的影响进行预测评价，以及对不同治理和调度方案下实际发生的洪涝情况进行风险预测及评价，实行沟、站、井、闸、涵统一调度，提高除涝能力。

建立土壤水盐自动监测和数据采集系统，研究不同形式灌排措施特别是普遍实施节水灌溉条件下的土壤盐分控制指标，和不同类型气候、土壤、地下水条件下的主要作物耐盐、碱

度指标；研究不同类型的土地利用情况和不同灌排措施条件下，防治土壤盐碱化的地下水动态调控指标；以水盐均衡理论为依据，采用计算机模拟技术，探求灌区土壤次生盐渍化的预测、预报方法，控制指标和适宜措施等，为防治工程的建设与运行提供依据。

4.3.4 农田排水水环境影响控制技术及示范管理

选择面积大、有代表性的典型农田排水地区，建立水氮磷运移动态监测网，研究评价不同地域农业生产活动、农田排水措施等因素对水污染负荷的影响，典型区域农田化肥流失途径、分区污染特征、季节变化规律；研究不同农业管理措施(不同施肥水平、不同耕作、不同灌溉模式)条件下土壤中溶质运移转化内在机理及地表和地下氮磷损失规律；实现不同水肥管理措施及不同地下水位条件下化肥对土壤、作物和水环境的影响评价及预测预报；评价控制排水对减小地下排水中的氮损失量的影响，提出适宜的农田控制排水措施及可操作方案；分析探讨排水系统设计规模与地下排水中硝态氮损失与作物相对产量的相互联系和制约机制，提出同时考虑作物产量、地下水环境和工程投资的排水工程优化设计方法；运用地理信息系统与非点源(化肥等)污染模型相结合，建立典型地区自然、社会经济空间特征信息数据库，结合空间分析技术，研究农田化肥等污染与主要控制保护措施(排水控制措施、农业管理措施)的响应关系，制定相应的工程和管理措施及对策。

4. 4 非常规水资源化与灌溉利用

4.4.1 非常规水长期灌溉的生态安全研究

研究再生水灌溉条件下，主要农作物生理生态特征对有害物质的响应；有害物质在作物不同部位的累积及其对农产品品质的影响；再生水灌溉对土壤渗透性的影响；有害物质（重金属、盐分等）在土壤中的运移、转化、吸附与累积的动态过程；再生水灌溉对土壤和地下水的潜在影响。研究咸水灌溉条件下土壤和地下水盐分动态的预测技术，分析和预测长期微咸水灌溉过程中盐分积累和富集规律，为维持微咸水灌溉的可持续发展提供理论支撑。

4.4.2 非常规水资源化技术研究

在未来研究中，要加强对非常规水资源利用进行动态监测研究，尽快建立适合我国农业特点和基本国情的非常规水灌溉安全性评价指标体系，为非常规水资源的综合开发利用提供科学依据。研究再生水满足灌溉控制指标的净化技术；再生水安全的量化指标体系；开发适用于城镇生活污水资源化的新型高效、价廉的持续性处理技术（利用土壤过滤与吸附、土壤微生物作用与农作物的吸收等生物处理技术）；研究污灌下的不同灌水方式、污净水混灌或轮

灌的应用技术、不同污灌方式下的作物灌溉制度；生活污水城镇绿化应用技术；研究雨水资源开发潜力与利用模式，建立雨水资源收集与高效利用途径和技术模式。

根据作物不同生育期的耐盐要求和当地的水源状况，研究咸淡水轮灌的交替方式，咸淡水轮灌的分配方式、灌水时间和适宜水量，提出适合当地气候特点和土壤盐分动态分布的最优咸淡水轮灌方式和相应控制指标。通过对已有研究成果的分析和大田微咸水实验，研究制定不同的淡水、雨水和微咸水资源条件、不同灌溉技术条件、并能满足淋洗需水要求的主要作物的微咸水灌溉制度。研究保持微咸水灌区区域盐分均衡的排水控盐技术、旱排盐技术及其在干旱地区的适用性；排盐地区的设计及规划方法；研究微咸水灌区用于高浓度咸水排水的蒸发池排盐技术。

4.4.3 非常规水资源灌溉利用的实验研究区建设

再生水、微咸水灌溉利用的关键问题是灌溉利用方法（灌溉制度、灌水方式、与其他类型水源的联合利用）的持续性，特别是非常规水灌溉利用对于土壤环境、作物生长、作物品质和地下水等的影响，这些影响只有在长时间的连续观测中才能得到可靠的结果。目前国内尚未建成大区域再生水灌溉和微咸水灌溉的实验研究基地和实验示范基地，影响了非常规水灌溉利用的基础研究和基础推广。再生水将是我国农业灌溉用水的重要潜在水源，再生水灌溉是污水处理的重要途径，建议尽快选取合适灌区，建立再生水灌溉试验基地，开展持续实验，提出再生水灌溉利用的技术方法和灌溉制度。

4.5 农业面源污染控制和农业水环境

农业面源污染问题具有特殊性，很难用城市污水处理系统的技术解决农业面源污染问题，需要与灌溉排水相结合，解决合理灌溉、合理施肥、合理排水，提高化肥的利用率，充分利用农田生态系统，消耗或降解农业的氮磷。农田既是被污染对象，又是处理污水的土地系统，处理好这种相互矛盾和相互关联的问题。研究以保护和改善农村水环境的切入点，控制农业面污染源，利用农业生态系统，将污染源转化为资源，利用农田、沟道、洼地等，通过灌溉、排水等手段，调整好农业生态系统，维持系统的良性发展。主要研究内容为：

4.5.1 复杂灌排系统水循环机理和农业面源污染形成机理

包括灌区多尺度水循环机理，自然水循环和社会水循环耦合机理，节水灌溉条件下灌区水循环演变机理；不同类型水源（地表水、土壤水、地下水、蓄水）的优化配置与综合调控模式。研究“灌溉—排水—湿地”系统主要污染物迁移、转化机理，水稻田的产流和水质过

程耦合机理，节水灌溉条件下灌区环境、生态时空演变规律；研究不同灌溉模式、施肥措施、排水条件、用水管理条件下的氮磷运移、转化规律；建立田间尺度的土壤水分与氮磷运移转化的耦合模型，分析灌溉、施肥对对地下水质量的影响和控制措施。

4.5.2 变化条件下灌区生态系统的演化、健康评价及节水防污型生态灌溉模式

农田土壤面源污染物的环境效应根据生态系统健康的理论进行评价。生态系统健康的理论在近二十年才逐步形成，农业作为与人类最密切相关的生态系统，其健康状况更应受到重视。虽然国内外已就农业生态系统健康的概念、评价方法和评价指标等方面作了一些探讨，但对生态系统健康的评价多是定性的判断；同时，生态系统的复杂性决定了其不能用一个或几个指标来准确概括。灌区是更为复杂的生态系统，灌溉和排水系统有机地联系了区内水分和物质的循环。如何通过微观与宏观相结合，在区域调查和田间实验的基础上，利用和改进现有的评价方法，将定性评价与定量分析有效结合，并考虑指标选择的整体性、可比性和可获得性以及系统的等级性、建立一套防止灌区生态系统健康评价指标，实施可持续发展环境评价，是需要进一步探讨的问题。相关的研究问题为：①分析典型灌区景观格局及其变化过程，变化环境下灌溉农田景观过程响应，对比分析农业水利活动对微观和宏观农业生态系统变化的影响；②建立提高灌区生态系统的碳汇能力、节水和防止面源污染的农业水利的最佳管理措施；③探讨灌区生态系统健康的评价方法，建立农田生态系统健康与环境友好的评价指标体系。

4.5.3 灌区农田生态系统温室气体的综合环境效应

全球气候变暖及其导致的生物多样性减少、气候变化和灾害天气频繁是目前人类所面临的最为严重的环境问题之一。大量证据表明，温室气体浓度升高是导致气候变暖的最直接原因，而农田土壤温室气体（CO2、N2O 和 CH4 等）的净排放占气候变化温室效应年增长量的 20%，长期的农业活动使大气层中 CO2 的增加对过去 50 年所观察到的全球变暖产生了重要的影响。农田土壤温室气体已成为新的污染源。2005 年，农业活动对温室气体释放的贡献达到 5.1-6.1 Gt 的等同 CO2 量，占全球因人为因素释放的总的温室气体的 12%；农业活动产生的 CH4 释放量为 3.3 Gt 的等同 CO2 量，占其总释放量的 60%；农业活动产生的 N2O 释放量为 2.8 Gt 的等同 CO2 量，农业土壤对大气中 N2O 的贡献率达 70%-90%。同时，化学氮肥用量的增加是全球大气 N2O 浓度增加的一个重要因素。近年来，特别是通过《京都议定书》后，人们对研究土壤温室气体和土壤碳汇产生了极大的兴趣。在陆地生态系统中，土壤对温室气体具有源和汇的功能，并可受人为利用和管理措施的较快影响，其碳库可以在较短时间尺度中快速调节。

农业土壤和农作物的碳汇能力对于全球因人类活动产生的碳排放具有巨大的补偿潜力，因此，研究农田土壤中的温室气体的综合环境效应，以及农田氮碳循环将有助于了解农田生态系统缓解全球温室气体浓度上升的潜在可能性，及其对全球气候变化的贡献，从而为制定有关缓解全球变暖的政策措施提供科学依据。相关的研究问题如下：①探索变化环境下灌溉农田土壤温室气体的物理、化学和生物过程的发生机理；②建立变化环境下农田土壤微生物生态的动态变化规律及其对土壤温室气体、农田面源污染、养分、盐分的反作用；③评价变化环境下不同灌溉农田生态系统中影响温室气体源汇的主要环境因子，不同农田生态系统中的温室气体的变化规律及其综合环境效应。

4.5.4 复杂农业灌排系统面源污染控制机理

包括农田面源污染的影响因子识别理论、水肥高效利用的灌溉排水理论和技术，灌区尺度灌溉、排水系统与湿地系统的协同运行理论和技术，以及土地利用和种植结构调整的节水减污机理和调控技术。提高氮肥利用率，实施合理、科学的水肥管理措施，达到节水、减少化肥流失，保护生态环境，促进农业增产的目的。重点研究不同条件下水、肥合理管理的技术措施，减少氮肥淋溶的节水灌溉技术与田间管理制度。

4.6 极端天气对灌溉排水的影响及对策

极端天气对灌溉排水系统的影响表现为干旱、洪涝、渍、低温寒冷等。近年来由于受人类活动的影响，全球范围内极端天气呈多发态势，严重影响农业生产和粮食安全。我国更是一个各种农业灾害频发的国家，其中干旱和洪涝灾害表现为随机性，每年由于各种干旱和洪涝灾害造成大量的粮食减产及农民财产的损失。因此，研究极端天气对农业需水、作物耗水、农田排水、灌溉用水等的影响规律，在此基础上，制定应对的水资源调度配置策略、灌溉排水系统调度对策，对提高水资源利用效率，减轻洪涝灾害，稳定粮食生产具有重要的意义。研究内容：

4.6.1 特殊干旱监测及水资源调度预警

干旱区主要作物缺水敏感期，作物水分生产函数及其时空变化规律。研究特殊干旱条件下作物耗水规律，局部灌溉方法及其实施技术，局部灌溉条件下的作物产量响应。

鉴于干旱的发生具有区域性，地面点的监测由于空间变异性的影响，很难对区域总体旱情进行把握，因此借助遥感监测的旱情分析近年来得到重视，需要研究针对灌区尺度进行遥感旱情监测的实际应用以及如何在旱情监测信息的基础上，结合区域内水资源状况制定水资

源调度及灌溉措施预警方案，遥感信息提取的实效性及其与地面点上信息的快速融合，进而制定具有实效性的预警对策需要研究。不同干旱程度，减少作物受旱减产的灌溉技术、灌水量，有限水资源在区域间、不同作物间、同一作物的不同生育阶段的时空分配理论与技术。

4.6.2 极端洪涝灾害的作物响应及农田排水应对措施

洪涝灾害区主要作物不同淹水深度及淹水历时的作物产量响应，应对作物涝灾的农田排水标准，不同洪涝条件下农田排水及排水系统调度运行方式。涝渍灾害共同作用下的作物产量响应，应对作物涝渍灾害的农田排水标准，不同涝渍条件下农田排水及排水系统调度运行方式。

4.6.3 旱涝交替灾害下的作物响应及灌溉排水系统应对策略

我国南方部分地区经常出现同一作物遭受旱涝交替灾害，需要进一步研究作物的响应，探讨根据作物响应的田间灌溉排水措施。研究在旱涝交替情况下，灌溉排水系统的运行调度预案制定，排水再利用问题。

4.7 现代灌区信息化管理

4.7.1 灌区管理模式的研究

通过比较分析国内外各种类型的灌区管理模式，从灌区性质、灌区水价体系和经营管理等方面提出适合我国不同地区不同类型的灌区管理模式。研究灌区水质水量统一管理的理论与方法；复杂灌排系统联合运用技术。关于农业水权的研究，包括农业用水水权、排水水权、排污权的初始分配；农业水权的主体、取得以及内容表达的程序化与法律范式；农业水权的转让等。探讨高新技术在农业水利现代化管理中的应用，农田与灌区（渠系）水利管理问题研究，水资源农业利用的水土环境效应评估与水土环境整治技术，农村饮水安全的成套技术和设备研究等内容。

4.7.2 量水设施及设备研究

研究水分损失小、价廉、精度高、抗干扰性强的渠系量水设备，研制具有量水和控制双重功能的取水口量水设施、新型管道量水仪表、适合高含沙渠道采用的量水装置等，开发经济实用的灌区自动化量水二次仪表及设备、井灌区计量与控制用水装置等。

4.7.3 数字灌区关键技术研究

研究利用全球卫星定位系统（GPS）和地理信息系统（G1S）、遥感技术（RS）和计算机控

制系统的精细准确调整灌水施肥的精准灌溉技术，开发水情自动测报系统和区域水资源管理系统；建立和完善农业水利信息化综合体系，包括利用遥感影象资料获取灌区农作物分布、土壤墒情、塘堰调查等各类空间信息的技术；研发工程监测管理系统，开发灌区工程设施的数据库系统和动态监测体系，观测、记录工程设施的运行状况，及时提出灌区工程维护与更新改造的方案，保证系统的正常运转；建立水土保持监测与管理信息系统，对流域及农村区域的水土流失现状进行动态监测，为退耕还林和淤地坝建设，为水土保持区域和小流域治理工程提供设计、咨询评价及管理和决策支持。

4.8 中尺度农业水土环境要素的监测方法和技术

美国科学技术委员会在《支持美国水的可用性和水质的联邦科学与技术策略》（2007）中指出：“新的水质和水量的监测方法对于发展世界市场具有巨大的潜力……，发展新的水测量技术方法有助于保持美国在水科学和技术的杰出地位，并强化我们的经济。”这充分说明了发展监测方法和技术在科学和经济发展中的重要作用。美国几大联邦机构，包括自然科学基金委、环保署、地调局、农业部、能源部等，都资助研究水土环境要素的监测方法和技术方面的项目。而我国目前水土环境要素监测的主要设备基本是进口，开展农业水土环境要素的监测方法应用基础理论研究还很少。

近年来，随着电子技术的发展，对土壤物理性状和过程的测定，出现了非接触性观测（土壤孔隙、结构、优先流等）和多参数的同步定位测定两个明显的发展趋势。例如，CT 技术已经成功应用于土壤结构、孔隙的观测，便携式 CT 开始应用于田间土壤、水分和植物的观测研究。TDR 和热脉冲 - TDR 等多功能探头实现了土壤含水量、电导率、温度、导热率、热容量的连续定位测定，并可间接获得土壤容重、孔隙度等特性，为深入研究土壤中水、热和溶质的耦合运移机理提供了条件。穿透雷达技术可提供地表以下几十米地层的高分辨率结构图，人们正在研究，怎样从雷达分布图来确定土层结构中的水力传导度。应用穿透雷达技术，也可能确定土壤中污染物的分布。

现有的土壤含水量的测量方法可应用于小尺度上的精确测量（如 TDR，中子仪），或者是大尺度上的快速估计（如遥感影像），但在点尺度到遥感尺度之间测量土壤含水量的方法还不存在。发展一种在 100-1000 m2 尺度测量土壤含水量的崭新技术，除了在这些尺度上直接进行测量外，还可以用来对遥感传感器进行率定。这种方法的原理与中子仪相同，但使用宇宙射线中子作为中子源。一些实验结果显示，敏感性为 1%的体积含水量的变化对应于约 1%的中

子流的变化，在 10-50 cm 的表层土壤和 10-100 m 直径内，中子对土壤含水量反应敏感。将仪器放在表层土壤 20 cm 下或放置在地面以上 100-200 m，敏感性最高。可以预计的优点是非破坏性、非接触性，较广的覆盖范围，不包括放射源，运输和田间放置方便，可安置在地表之上或之下。

4.9 农村饮水安全研究

过去十年间，村镇供水领域的研究仅仅是结合工程建设开展了一些应急性技术研究，理论和技术的研究都不能构成一个完整的体系，深度和广度方面也远远不够。

4.9.1 村镇供水的区域性问题研究。

我国地域辽阔，自然条件差异大，各地面临的饮水问题千差万别。急需结合各地实际情况，研究并建立适合不同地区条件的村镇供水模式。

(1) 西北干旱地区村镇供水模式与关键技术研究。西北干旱地区，资源性缺水问题严重。该类地区常开采地下水和集蓄雨水作为供水水源，需研究适宜的地下水选择与开发。

(2) 西南山丘区村镇供水模式与关键技术研究。该地区地质条件复杂，地形起伏大，居民点规模小，人口居住分散。虽然年降雨量较大，但由于地质、地形和居住方面的原因，使得村镇供水保证率难以提高，季节性缺水问题严重。

(3) 环渤海劣质地下水地区村镇供水模式与关键技术研究。长期以来，该地区都是旱涝盐碱等自然灾害频发的地区，浅层地下水含盐量高，用作饮用水口感差，且危害身体健康；近 30 年来，很多地方不得不以开采深层地下水作为村镇供水水源。但该地区深层地下水氟含量高，作为饮用水源对人体骨骼有很大危害。急需研究从区域上解决这一问题的战略措施和相应的技术。既需要研究跨流域调水解决区域饮用水供水的理论和技术问题，也需要研究当地劣质地下水处理技术。

4.9.2 村镇供水消毒技术研究。

村镇供水工程规模普遍较小，城市供水系统成熟的消毒技术难以适应。急需进一步研究适宜的村镇供水消毒技术与有关的理论。如村镇供水水源条件下，不同消毒技术消毒副产物的发生机制，各种消毒措施的效果及适宜投加量、投加技术与设备等。

4.9.3 村镇供水、排水及污水的水处理新技术研究

在村镇供水领域，传统水处理技术的应用常常受到技术、经济和社会等因素的限制，需要研究村镇供水水处理新技术，如低成本膜技术的研究及其在村镇供水的应用。随着村镇供

水的发展，农村居民用水量将不断增加，生活排水及其处理问题将越来越突出。需要研究农村排水的收集和处理模式以及相应的技术。

4.9.4 应急供水技术与模式研究

人们时时刻刻需要饮用水，饮用水的供应应该是连续的。但是，当自然灾害发生时，供水系统往往会被破坏，致使饮用水供应中断。因此，需要开展适宜于农村地区的应急供水技术与模式。包括地震、洪水、干旱等自然灾害发生时，不同类型地区的应急供水技术与模式。

5 农田水利工程学科发展建议

根据我国农田水利学科的发展现状和国民经济建设对学科发展的要求，对本学科的发展提出以下六点建议：

5.1 注重基础理论和实验研究，强化自主创新

基础研究是科学研究的源动力，建议加强精细的田间试验研究，特别是加强对农田水利学科发展起关键作用的应用基础研究，包括水分高效利用的应用基础、区域节水高效和对环境友好的农业用水模式等，努力取得具有国际影响的创新成果。

现有农业水利研究的基础设施条件已远远不能满足创新的需求，应强化平台建设战略，加大对信息监测与科学实验基地(包括国家重点实验室、工程技术中心、野外实验台站、服务推广体系)投入，通过建立农业水利基础研究示范工程、节水高效农业技术产业化工程，优选和建设一批节水农业技术创新基地和重点野外科学实验台（站），建立以农业水资源和节水农业技术为主要内容的信息共享与网络科研环境平台，培养和造就一批勇于创新、拼搏实干的高水平研究群体和队伍，为农业水利学科的创新能力建设提供必要的平台基础条件。

5.2 注重学科交叉，加强技术创新

现代农业水利是在传统的农田水利的基础上，根据学科发展和社会经济发展的需要，融入了生物、环境、计算机、信息、高分子材料等一系列学科，具有多学科相互交叉、各种学科和高技术互相渗透的明显特征。农田水利学科的发展必须注重与其他的学科的交叉研究。与遥测、遥感学科的交叉，利用现代监测技术，从田间实验到灌区的检测，将小区域的理论研究成果拓展到大区域的实际应用；与生态、环境学科交叉，研究农业节水和高强度农业种植条件下农业生态的响应和环境演化规律，为现代农业的持续发展提供理论支持；与生物学

科交叉，筛选高水分利用效率作物品种，提高作物本身的节水潜力，将工程措施、农业措施与管理措施有机结合，形成综合节水技术，发挥两学科的优势，有可能在学科交叉点上取得前进和突破。

5.3 理论与实际应用相结合，开发实用技术

农田水利学是一门应用型科学，最终要面对农民和农村，要坚持从实际需求出发，所得到的成果要以技术先进、操作方便、经济实用为目标。开发适合于不同地区采用的标准化、规范化、模式化、定量化、集成化的综合技术体系和应用模式。

5.4 注重学术队伍建设，加强国内外交流与合作

注重人才队伍建设，完善学术梯队，加强国际合作和交流。造就和形成一批学术思想活跃，具有创新意识，学术造诣较深，在国内甚至国际有一定影响的学科带头人和学术骨干是学科建设的关键。

5.5 注重基础数据的积累和整理，建立基础数据的共享平台

我国农业节水技术领域研究的基础条件还比较落后，全国性和区域性的试验研究网络还未形成，试验仪器设备条件还相当简陋，实验数据采集的自动化程度低、连续性差。建议加快建立和完善农业用水和耗水监测体系，改进实验条件，增大设备投入，逐步实现基础数据的共享。

3.5 水工结构工程

1 国家要求

我国人均水资源占有贫乏而又时空分布严重不均，水资源丰富而又主要分布在西南地区，为了充分利用这些水资源和水能资源，我国兴建了大量水工程，现有水库大坝 8.7 万余座，江河堤防 29 万多 km 等水工程，其中 15m 以上大坝有 2.63 万座，大江大河的重要堤防 6.57 万多 km，是世界上拥有水工程数量最多的国家之一。这些水工程在防洪、灌溉与供水、发电、航运等方面发挥了巨大的社会经济效应。然而，这些水工程有以下主要关键问题及其国家要求：

（1）大多水工程建于上世纪 50～70 年代，由于多种原因，普遍存在防洪标准低、工程质量差等安全隐患，加上管理维护不善、工程老化等不利因素的影响，造成大量病险水工程。如 2006 年全国水库大坝安全普查，病险水库有 3.7 万座，约占水库总数的 40％；且分布广、威胁大、病险种类多、险情重。病险水工程不仅难以正常发挥工程效益，而且严重影响人民的生命财产、基础设施和生态环境的安全，一旦溃决将产生毁灭性的灾难，如 1975 年 8 月石漫滩、板桥水库大坝溃坝造成 2.2 万多人死亡，1100 多万人受灾，直接经济损失超过 100 多亿美元；1963 年 8 月刘家台水库漫顶溃坝造成 937 人死亡，6.4 万多人受灾等等。因此对这些水工程必须进行及时安全监测、安全监控、安全预报以及病险预警。

（2）我国在西南地区已建、在建、将建大量的高坝水库，这些大坝坝高 200m~300m 级，又处在地形与地质极其复杂、高地应力、高地震区和泄洪流量大等特点。在设计、施工和运行等技术指标已突破了现行规范，需从已运行的大量水工程中吸取科学技术经验，制定新的设计、施工和运行规范。

（3）我国大型水电工程开发将在本世纪 50 年代基本结束，今后将主要转为运行管理。水工程的安全分析与评价、病险水库的补强加固、运行寿命诊断与退役等将成为水利学科的研究重点，这些均要依据已运行多年水工程的海量监测资料分析，发展现行水工结构的强度、稳定和耐久性等分析理论和方法。

（4）水工程安全是《国家中长期科学和技术发展纲要（2006 年~2020 年）》中“重大自然灾害监测与防御”的重要内容。

针对以上水工程的主要关键问题及其国家要求，研究水利学科现状、发展方向及创新前沿具有重大的科学价值和社会经济效益。本项目主要针对高坝及特高坝的应力分析、极限承

载力、非线性问题、物理模型试验、原位高新安全监测技术等前沿科学技术问题进行研究。

2 研究现状及分析

2.1 高坝应力分析

本节主要研究与分析高混凝土坝、高面板堆石坝和土石坝应力分析等研究现状。

2.1.1 高混凝土坝的应力分析

2.1.1.1 高混凝土坝的应力控制标准

随着计算机的飞速发展，有限单元法已经在工程技术领域得到了广泛的应用。我国水利水电系统推广应用有限元法计算混凝土坝坝体应力始于上世纪 70 年代，实践证明该法计算灵活、适用范围广，对解决结构复杂、特别是对复杂地基上的坝体包括基础应力及变位问题具有显著优点，亦对解决坝体内局部应力分布，例如坝内孔洞、角缘应力集中问题提供了方便办法，故在 1978 年颁布《混凝土重力坝设计规范》（SDJ21-78）中明确规定了对于地质条件复杂情况高坝的应力，除用材料力学方法计算外，宜采用有限元法进行计算研究。《混凝土重力坝设计规范》（DL5108-1999）规定有限单元法计算混凝土重力坝时以拉应力宽度作为控制标准。

尽管如此，迄今有限单元法仍难以量化方式纳入混凝土坝设计规范，理由大致如下：（1）用有限元单元法算出的坝踵应力受网格剖分影响太大，单元尺寸愈小，算出的坝踵拉应力愈大，应力解答有不确定性，难以定出强度控制标准；这是有限单元法最严重且难以解决的问题；（2）没有与有限单元法配套的设计标准，无法判断设计剖面是否满足设计要求。

鉴于该问题的复杂性，多年来，有限元单元法计算成果在坝工设计中的应用受到限制。为了适应该方法在混凝土坝，特别是高碾压混凝土坝设计中的进一步应用，精确应力分布求解显得更为重要。

材料力学与拱梁法等虽然算出的坝踵应力不符合实际情况（未考虑角缘和地基的影响），但有与之配套的设计标准，应用方便。因此，在有限单元法精确求解的基础上，一些学者以有限单元法计的应力推求内力，并用材料力学公式反求等效应力。等效应力可以消除应力集中现象，还能反映坝体断面的总体应力水平，从某种意义上解决了大坝有限单元法分析中应力数值的不稳定问题。但是，它无疑是一种粗略的取值方法，掩盖了如局部应力集中等可能导致对一些开裂误判等特殊问题。另外，虽然最大等效应力比最大有限元应力减小了，但等效应力的拉应力区范围比有限元应力的范围增加了。从这一点来说，有限元等效应力法建议的方法和拉应力分布的相对宽度作为控制标准的方法产生了矛盾，不能统一。因此，有限元

法分析中应力取值一直是坝工界长期关注且尚未得到很好解决的关键问题之一。我国（DL/T5346-2006）《混凝土拱坝设计规范》对等效应力法计算结果作出了一定的规定，对于200m以上的高坝，其拉应力控制标准应作专门研究。

应力控制标准是建立在一定的应力取值方法基础上的，两者必须配套，这也是建立有限元法应力控制标准的难点所在。

2.1.1.2 高混凝土坝应力仿真分析方法

对混凝土坝应力的分析方法大体上可分为理论解法、实用算法和数值方法。数值方法主要有差分法、边界元法和有限元法。其中，差分法简单，便于编程计算，但当用差分法求解温度场时，网格的剖分不够灵活，求解温度应力时则较为困难。边界单元法节省计算时间，但要考虑施工过程中的徐变应力场及坝内介质非均匀性，则会遇到困难。有限单元法是目前较为成熟的计算混凝土坝温度场和应力场的数值方法。

混凝土坝的施工方式和材料特性，导致的温度效应将延续较长时间，这对大坝施工期、运行期温度场及徐变应力场全过程三维仿真计算提出了更高的要求。特别对于碾压混凝土坝，由于每层混凝土碾压浇筑的时间不同，材料特性（包括热学和力学等参数）随着龄期的不同而不同等，仿真分析中的时间步长不宜过大否则便失去了仿真意义，仿真分析的计算时间步总数有的多达几千，特别是浇筑层数过多、浇筑时间长等问题更为突出，甚至导致在目前微机上计算无法实现，或者即使实现也将花费大量的计算时间。

针对碾压混凝土坝三维仿真分析难度较大的情况，“八五”、“九五”历时十年攻关，我国的科学家和工程师们提出了一系列有效的计算方法，朱伯芳院士提出“扩网并层算法”、武汉水利电力大学王建江博士提出“非均质单元法”、大连理工大学提出了“波函数法”、西安理工大学陈尧隆教授、李守义教授提出了“三维有限元浮动网格法”以及河海大学朱岳明教授等提出“非均质层合单元法”。

2.1.2 高面板堆石坝应力分析

研究面板堆石坝应力变形性状通常有三种方法，即模型试验、有限元数值计算和原型观测。其中有限元数值计算可以在一定程度上模拟出面板坝施工及蓄水时的应力变形性状，为面板坝的设计、施工以及运行提供重要的技术依据。

对面板堆石坝而言，坝体的应力变形特性是关系到坝体安全和运行性状的一个重要问题。在我国的面板堆石坝工程实践中，虽然取得了一定的成绩，但也有一些失败的教训。沟后面板砂砾石坝的垮坝事件、株树桥面板堆石坝面板的塌陷、以及天生桥面板堆石坝的大量结构

性裂缝等问题，都显示了面板堆石坝的应力变形问题不能忽视。最近一些年来，随着面板堆石坝坝高的不断增加、坝址地形条件的渐趋复杂，面板堆石坝应力变形分析的理论和分析方法也提出了越来越高的要求。其应力变形分析主要归纳为以下研究成果：

（1）面板堆石坝的数值计算分析方面，堆石材料的本构模型必须真实反映其非线性的应力—应变关系，线弹性模型对于堆石变形的计算是不适用的。在目前的面板堆石坝计算分析中，Ducan 模型的应用较为广泛，大量的工程计算表明，其计算结果对工程实用是可信的。

（2）Ducan 模型的参数之间具有一定的相关性。因此，在模型的应用中应注意其参数的协调性。

（3）在面板堆石坝数值计算分析中，对于面板与堆石体的接触，宜采用薄层接触面单元，混凝土面板之间的接触，宜采用分离缝单元，而面板与趾板之间的接触，宜采用软单元。这样的模拟方式，基本上考虑了面板堆石坝界面接触中的主要因素，在大多数情况下均可得出较为满意的计算结果。而对于面板堆石坝界面接触的更精确模拟，可以采用界面单元方法。具体而言，在面板堆石坝计算分析中可采用有限单元与界面单元混合模式的分析方法，采用这种方法，可以有效地处理接触面和接缝界面的滑移与分离问题。

（4）可以以圆弧型防渗墙替代常规的直线型防渗墙来减小防渗墙拉应力，以折线型面板替代直线型面板来减小面板上拉应力。

（5）堆石流变对面板的应力影响比较显著，一是堆石流变使面板坡向压应力增大，拉应力减小；二是堆石流变使面板河谷部位坝轴向压应力增大，岸坡拉应力增大；是堆石流变使面板沿坡向趋于受压，有助于减小该方向上的拉应力，但坡向压应力有较大增幅，在设计施工中对这些情况应予足够的重视，并采取相应措施。

2.1.3 高土石坝应力分析

高土石坝的应力和变形计算有多种方法，主要有弹性理论方法、极限平衡理论方法、弹塑性分区方法、弹塑性差分方法、碎块体理论、工程软件法、有限单元法等，其中有限单元法是最快捷、最有效的方法。

进行高土石坝有限元计算和应力应变分析，首先要涉及的就是土体的本构模型。目前，土体的本构模型还不太完善，工程中常用的模型有以下几种：

（1）线弹性模型

此模型对于计算简单坝体具有模型简单、方便，并能够得到较满意的计算结果。但对于比较复杂的坝体，此模型有明显的不足。所以，此模型在土石坝的计算中没有得到广泛的应用。

（2）*K-G*模型

*K-G*模型同时考虑了土的剪切和压缩性质，理论相对完善。该模型的缺点是，确定 *K*、*G* 参数的试验技术比较复杂，工作量也比较大。

（3）推广的双曲线模型

1979 年，沈珠江提出了推广的双曲线模型。该模型考虑的因素较多，理论上比较合理，需要的试验也不太复杂。这一点与其他模型相比有明显的优势。但是，该模型形式比较复杂，参数较多，在实用上还存在较多的困难。其次，由于考虑了驼峰的剪切曲线和剪胀曲线，需要确定相应的残余强度和极限剪切体变。

（4）邓肯—张模型

邓肯一张模型模拟了土石体的绝大部分特征，并且由于其发展较早，应用工程经验成熟，各个参数有明确的物理意义和丰富的经验数值，因此，以邓肯模型为典型的非线性弹性模型在实际岩土工程中一直占有非常重要的地位，是分析岩土工程的重要模型之一。

一个好的模型，首先应当实用，即模型具有一定的理论和试验依据形式简单、参数少、测定方便、计算结果与实际结果比较相符等等。综上所述，邓肯一张模型基本满足以上要求，是当今土石坝工程计算中得到了广泛的应用。

综上所述，土石坝工程计算常采用有限元计算方法、邓肯一张本构模型、增量法加载的综合运用，基本上能够模拟土石坝施工工程中的应力变形过程。

2.2 高坝极限承载分析

2.2.1 高坝抗滑稳定分析方法

高坝的抗滑稳定分析是十分复杂的问题，其目的是核算坝体沿地基深层软弱结构面抗滑稳定的安全度。近年来，随着各种勘测、处理技术和岩石力学的进步，抗滑稳定研究也取得了一定发展，但是尚未形成统一的方法和明确的规定，需要凭借工程经验对实际情况做出判断。

目前大坝抗滑稳定分析方法大致有以下几种：刚体极限平衡法、有限元分析法、可靠度分析法和分项系数法等。

2.2.1.1 刚体极限平衡法

刚体极限平衡法概念清楚，计算简便，易于掌握，广泛应用于各种规模的工程中。该法具有丰富的工程经验，并有与之配套并且较成熟的安全评判准则。刚体极限平衡法的基本思路是：先设定滑动面，将可能的滑动体（指坝体、岩石、或大坝与岩体组成的滑动体等）视

为一个或若干个整体滑移的刚体，忽略其变形以及滑裂面上的应力分布情况；仅考虑滑裂面上的合力（包括正压力和剪应力），而忽略滑裂面上所承受的各种分力对滑裂面形心的力矩；然后分析作用于滑动体上的荷载，如自重、水压力、扬压力、地震荷载等，将这些荷载沿着滑动面的切向和法向分解；最后算出滑动力和抗滑力的比值，即为安全系数。据此安全系数可以判断滑动体的稳定安全度。

刚体极限平衡法常用的方法有：剩余推力法、被动抗力法和等安全系数法。当坝体的滑动面为单一滑裂面时，刚体极限平衡法能较好地反应实际情况；但是对于复杂的破坏面，刚体极限平衡法则需要引入若干假定才能建立刚体极限平衡模型，这就可能忽略了某些控制性因素，使得结果不符合实际。

刚体极限平衡法也存在一些局限性，如：仅考虑岩体强度特性，忽略了岩体受力后所产生的变形，因而无法得到滑动面内应力与变形的空间分布，及其在加载历史中的发展过程；最危险滑动面的确定也是先通过假定，再由试算得出的，摩擦系数和凝聚力值具有一定的人为性和随机性，取值偏于保守；双滑面及多滑面的安全系数无规范可查，浅层和单滑面的安全系数虽有规范可查，但规范上的建议取值是由经验丰富的工程师及专家根据自身经验所定的，有很大的人为性；极限工作状态与允许的工作状态也有较大的出入。

2.2.1.2 有限单元法

近年来，随着计算机技术的飞速发展和岩土力学理论水平的不断提高，有限单元法已成为一种日趋完善和成熟的数值分析方法，对传统的刚体极限平衡法做了很好的补充。到目前为止，有限元方法常采用安全系数来分析大坝抗滑稳定，主要有以下的几种形式：点（或局部）抗剪安全系数K_e、抗滑富裕系数K_s、超载安全系数K_p、强度储备安全系数K_f和混合安全系数。

有限元方法可提供坝体及地基内各点的应力及变位值，可算出沿软弱面上的局部安全系数，并由此估算整体抗滑系数。通过有限元分析可以了解在抗力体中的应力方向、应力大小及变位值，以及上游基岩中的拉应力数值和范围。该法还可以了解破坏区的分布、范围，以便找出最危险的部位，并分析其严重程度还可分析各种加固措施的作用。对于一些重要的工程，特别是抗滑稳定较严重的问题，除刚体极限平衡法外，常常进行有限元分析与模型试验，作为校核、验证或深入研究的手段。

但是有限单元法也存在一些缺陷，如：应力和应变的大小与单元网格的划分有关，大坝的安全度指标不容易确定；在坝体角缘处的应力集中和失真现象还比较严重；同时由于有限

元法计算程序的差异性以及实际工程的复杂性，对坝体及坝基的位移应力值尚无统一的量化标准，而缺少相应的判别准则，因此，有限元方至今仅作为参考与补充。所以研究有限元法在坝体抗滑以及在坝体强度方面的应用和对应的设计准则具有一定的现实意义。

2.2.1.3 可靠度分析法

可靠度分析法是基于概率统计理论的不确定分析方法。基本思路是：将影响坝体稳定的各种因素都作为随机变量，进行统计分析，然后用结构分析方法建立大坝的失稳模式和极限状态方程，从而计算出坝体的失效概率及可靠度指标。可靠度分析法考虑到各种主要参数之间的相关性，及其自身的随机性，又将结构的作用与效应紧密相结合，因而比单一的安全系数法更能反映实际，此法已逐渐应用于实际工程中。

可靠度分析法也有缺陷：极限状态函数往往不能表示为显式函数，给实际计算带来非常大的困难，而建立合理的极限状态函数恰是问题的关键；同时，随机变量和不确定因素的分布对计算结果有着很大影响，在实际工程中运用可靠度理论需要大量的资料，但很难获得足够多的样本，而只能以经验值来推求一些变量的概率分布，也使得计算精度不高。

2.2.1.4 分项系数法

分项系数极限状态设计方法是《混凝土重力坝设计规范》（DL5108-1999）提出的用来进行结构和地基的稳定性验算的方法，它将建筑物抗滑稳定分析从传统的安全系数表达式转化为极限状态表达式。极限状态方法的设计表达式采用分项系数和基本变量代表值来表征各种原因产生的材料强度，计算方法等的不定性和变异性。分项系数极限状态设计方法与传统的单一安全系数或多项系数设计方法有本质上的不同，它的各种分项系数都是根据可靠度理论并与规定的目标可靠指标相联系，经优选而确定的。采用这一方法的设计计算结果隐含地反映了规定的可靠度水平，这也是新规范推荐的方法。

2.2.1.5 稳定分析的新理论和方法

针对有限元法在水工程稳定分析中出现的一些缺陷，尤其在大变形的仿真分析中，拉格朗日法的有限元网格可能产生严重的扭曲，甚至使得单元的雅可比行列式为负值，不仅在计算中需要网格重构，而且严重地影响解的精度。近几年来国际上许多著名的计算力学学者，提出了一些新的分析理论和方法。

（1）块体单元法

块体理论(Block Theory)是在 1985 年由石根华和 R.E.Goodman 共同提出的。块体理论法

认为：复杂边坡一般由多种岩体组成，而岩体又被断层、节理、裂隙、层面以及软弱夹层等结构面切割为许多坚硬岩块，在组成岩体的许多岩块中，必定有一块安全系数最小，在各种力作用下，首先滑移一个岩块，然后其他岩块随之滑移，进而产生连锁反应，最后造成整体破坏。首先滑下的岩块称为关键块体，关键块体稳定与否，决定着岩体的稳定性。

（2）不连续变形分析法 DDA

石根华提出的不连续变形分析法 DDA(Discontinuous Deformation Analysis)，主要应用于分析裂隙岩体的安全稳定性。该方法将每一个完整的块体作为一个单元，将节理、裂隙、断层等构造面和不同材料分区的界面等作为块体的边界，块体与块体之间用法向弹簧及剪切弹簧连接，从而将被不连续面所切割的块体系统连成一个整体进行计算。块体与块体之间的接触力，即法向及剪切弹簧上的力能精确地满足平衡条件，由该法向及切向力和摩尔一库仑准则可以精确地求出沿软弱面或不连续面的抗剪断安全系数分布。DDA 在模拟大坝的破坏过程方面也有较强的能力，因此，DDA 用于大坝稳定安全分析是一种有发展潜力的方法。

（3）Meshfree Method 法

Meshfree Method 法采用节点信息及其局部支撑域上的权函数实行局部精确逼近，然后通过配点法或伽辽金法对偏微分方程求解，从而摆脱了单元的束缚。目前流行的无单元法是无单元 Galerkin 法类，它以最小二乘法构建插值基函数，从微分方程的弱变分形式原理出发，导出求解问题的代数方程。该类方法的特点是求解精度较高，但计算量大，需要背景网格（background cell）作为数值积分的积分域。另一类是基于配点型的无单元法，它以径向基函数来逼近场函数，直接在离散点上满足微分方程或边界条件，建立求解问题的代数方程。无单元法主要依靠形函数逼近来实现，形函数揭示了各类方法的逼近本质。理论上，固体力学无单元法对于三维非线性问题是可行的，但需要寻找合适算法来减少巨大的计算量。如在解决拱坝与地基相互作用等大尺度问题时，可考虑选用具有优良局部特性的小波函数以减少节点数而不影响计算精度。

2.2.2 评判大坝抗滑稳定安全性的标准

通过大坝抗滑稳定分析方法来确定安全系数时，会涉及到如何去判断大坝是否达到了极限状态，即确定失稳判据的问题。到目前为止，常见的失稳判据有以下几个类：

（1）收敛性判别标准

对大坝进行非线性的有限元分析时，在荷载施加的某一个过程中，出现了结果的不收敛现象，从坝体结构的角度看，这个时候的坝体变形趋向于无穷，此时，可以认定坝体达到了极限的状态，此时的强度储备系数和超载安全系数可以作为大坝抗滑稳定分析的安全系数。

（2）突变性判断准则

当大坝的状态发生突变时，表示坝体从一个平衡状态向另一个平衡状态的转变，表示坝体系统的状态发生了突变。一般的情况下，根据突变性的标准，可以认为能够反映状态突变现象的变量都可以作为大坝的失稳判别依据。迄今为止，常用的表示突变特性的有：当坝体荷载变化或强度折减时，特征点的位移随之变化时的突变；坝体中关键部位的位移变化率的突然变大；结构的塑性区发展成一定的滑动通道；坝体结构中外力所做的功与形变势能不能平衡。

综上分析可知，抗滑稳定性分析方法种类较多，各种方法都有自己的优缺点，没有一个公认的最佳方法，失稳判据也存在相同的问题，因此，今后研究的重点是确定最佳抗滑稳定性方法和最佳失稳判据。

2.3 高坝非线性问题

高坝的非线性主要包括几何非线性、材料非线性和时间非线性。其中，几何非线性主要包括高坝的损伤和裂缝等，材料非线性主要指的是材料的塑性等，时间非线性主要指的是高坝的流变等。其中，高坝的损伤和裂缝分析比较复杂，同时包含几何非线性与材料非线性；此外，同时存在材料非线性与时间非线性的情况，即粘塑性问题。以上非线性问题国内外均有一定的研究。

2.3.1 高坝损伤分析

高坝的破坏经历了三个阶段，即弹塑性阶段、断裂阶段和破坏阶段。将损伤力学和断裂力学结合起来，建立考虑损伤的断裂力学，称为破坏力学。损伤力学和断裂力学都属于破坏力学的范畴，两者各有不同又相互关联。从物理机制上讲，损伤力学与断裂力学是有本质联系的，材料的损伤与断裂反映了材料变形破坏的物理过程。在研究领域上，断裂力学是损伤力学的后续，两者存在互补的关系：损伤力学的主要研究出现宏观裂纹之前材料中分布的细观缺陷的发展演化；而断裂力学则研究出现宏观裂纹之后宏观裂纹的扩展以及含宏观裂纹的变形体的力学性能性能，忽略在宏观裂纹形成以前的损伤阶段，也忽略了宏观裂纹周围的损伤，只考虑理想的宏观缺陷。在研究手段上，断裂力学和损伤力学应当互补，尤其在上述过渡阶段，急需将损伤力学和断裂力学相结合，形成分析过渡阶段的损伤与断裂前兆的方法。在这方面，模糊裂纹模型和钝裂纹带模型可看作有益的模型。

20 世纪 70 年代前后创立的耗散结构论、协同学、突变论、混沌、分形及超循环理论等，构成了现代非线性科学的理论体系。这些非线性理论共同形成的学科具有普适性，其共同探索非线性及复杂性的规律性，为认识复杂现象提供了新的思维方式和解决问题的新方法。被

誉为20世纪继量子力学和相对论两项重大发现后的第三次科学革命，并成为新世纪科学发展的主方向之一。非线性科学的研究不仅具有重大的科学意义，而且有着广泛的应用前景，它几乎涉及自然科学和社会科学的各个领域，并正在增强影响人们对客观世界的传统看法，在不同研究领域相继掀起了转变认识观的重大变革。在对混凝土等脆性材料损伤破坏力学的研究中，一些学者敏锐地提出了其非线性特征以突变论、协同论和耗散结构理论为代表的现代非线性理论，为重新认识材料的损伤破坏过程提供了新的思路。

2.3.2 高混凝土坝裂缝分析

（1）基于断裂力学的裂缝分析方法研究

目前，较常用断裂力学理论判断裂缝是否发生转异而失稳。最早将断裂力学用于混凝土研究的是Kaplan，他将金属断裂力学理论分析混凝土裂缝。越来越多的试验表明，断裂韧度K_c、临界能量释放率G_c及断裂能G_F等断裂参数不仅依赖于试件大小，还依赖于几何条件，随试件尺寸的变化而变化。应用线弹性断裂力学的一个主要条件是材料为均质连续和各向同性的弹性体，而混凝土则是一种非均质多相复合材料。有些学者在混凝土断裂试验中发现，在扩展演变过程中，混凝土呈现某种程度的非线性，据此认为混凝土并不是脆性材料，而是弹塑性材料。因而倾向于用弹塑性断裂力学参数作为混凝土断裂特性的判据。许多研究者提出了一些非线性断裂判据和非线性模型。现有研究表明，混凝土断裂力学参数存在明显的尺寸效应，且试验结果相互矛盾，因此妨碍了断裂力学在混凝土坝裂缝诊断中的应用。对混凝土坝裂缝扩展演变分析方面，一些学者提出了相应的数值模型，并进行了数值模拟。

目前，国内外学术界和工程界对混凝土断裂的研究已取得了一些进展，但怎样对裂缝发展演变进行数值模拟远没得到解决，特别是对非线性材料、各向异性、复杂受力情况下的裂缝的任意扩展问题，人们还无法解决。

（2）应用非线性理论研究混凝土坝裂缝演变规律

带缝服役的大坝与库水和坝基相互作用时，系统具有内在的不确定性，外部环境（如气温、降雨、地震等）等多种因素的影响，使大坝系统处在一个复杂的时空中，具有显著的非线性特征。由于应用断裂力学进行混凝土坝裂缝演变规律分析时遇到了困难，许多学者利用非线性理论的挖掘、分解、解释和预测能力，对该问题进行了探索。

2.3.3 高坝粘塑性分析

根据大坝安全细则和监测规范，大坝的安全状态一般分正常、异常和险情三大类；同时，根据大坝的结构性态可分为粘弹性、粘弹塑性和失稳破坏三个工作状态。因此，大坝监控指标相应地分为一、二、三级，其中，一级和二级监控指标已经得到了一定的应用。

在一级监控状态下，高混凝土坝坝体任一点的应力均未超过材料的比例极限，坝踵拉应力小于允许值，坝体处于粘弹性工作阶段；或者坝踵区部分开裂，应力重新调整，下游区压应力增加，坝址区压应力达到材料的比例极限，应力与应变基本维持在线弹性范围内，坝体处于准粘弹性工作阶段。在该状态下，拟定监控指标时，高混凝土坝的基岩及坝体本构模型分别采用伯格斯模型和广义开尔文模型。

在二级监控状态下，裂缝区扩展，下游区压应力增加，进入屈服状态，结构的变形有较大的增加，应力与应变开始呈非线性，坝体处于粘弹塑性工作状态。在该状态下，高混凝土坝基和坝体均可采用 6 参数弹-粘-粘弹-粘塑性模型。

2.4 物理模型试验

在高混凝土坝的研究和设计中，模型试验具有重要地位。依据试验成果，不仅可以改进初步设计，更重要的是可以对坝和基础联合工作的整体三维结构的强度和安全度进行验证和预测。

2.4.1 结构模型试验

结构模型能模拟弹性、塑性至破坏的全过程，并随着现代科技的发展和测试水平的提高，结构模型试验仍起到了某种特定的作用，并可与数学模型分析相互结合，分析复杂的大坝与坝基的变形和破坏机理，验证计算分析结果。同时，结构模型试验不仅用于设计阶段，而且用于评价已建坝的实际工作状态。

静力模型试验通常分两种。

（1）正常荷载法，即在相应于实际结构的工作荷载下量测位移和应变，但是已可能开始出现各种现象，如基础沉陷、接缝错位和滑动、局部塑性变形等。这时宜采用循环荷载使它们达到一定的“稳定状态”下工作。测试成果可以预见模型在正常工作条件下的工作性能。

（2）最终荷载试验，即逐步增加荷载至破坏，可以确定结构的“整体”安全系数（即破坏前实际承受的荷载与正常工作荷载之比值）。这种试验超出了弹性限度，模型可以对塑性变形的发展、裂缝的逐步形成直至破坏的全过程提供完整的资料，有利于全面了解和分析结构的承载能力并确定采取合适的安全控制措施。

2.4.2 地质力学模型试验

地质力学模型是一种非线性的结构模型破坏试验，用于研究岩体变形破坏机理及坝与基础的总体稳定性。近二十多年来，意大利 ISMES 完成了十几项大坝的地质力学模型试验，其中大多数属于世界上有名的高坝。ISMES 根据其实践经验，将地质力学模型分为以下两种类型：

（1）按常规方式模拟坝体，也模拟岩基中的某些破裂面，通常沿坝肩模拟分层的岩系状况，这对坝体应力分布和模型的总体强度有一定的影响。如黎得拉科里重拱力坝模型，由于坝基层面滑动而破坏。

（2）采用特殊材料，其力学特性相当低，弹模和强度的相似系数与地质力学模型的几何比尺一致。如依太普模型和依赞通模型。

2.5 原位高新安全监测技术

水工结构及其复杂，应用上述数学模型与物理模型研究水工结构的应力、极限承载力、非线性等问题，由于计算理论与方法及其计算参数等与实际有一定缺入，使计算、试验成果与实际工程有较大差别。原位监测是 1:1 的模型试验，其实测变形、渗流、应力应变等真实反映水工结构的工作状态。因此，在现代水工设计、施工、与运行规范和法规中，水工结构特别是重大水利水电工程必须进行原位监测。随着现代高科技的发展，在水工结构工程领域里我国的原位监测资料分析及其安全评价与安全监控等理论与方法有长足的进步，处国际前沿，然而，传感技术和无损检测技术，正面临升级换代的新阶段。近年来，在各国竞相研究开发的高科技传感系统中，光纤传感以其独特优势，而居于重要地位，日益受到科技界、工程界的重视，已成为工程安全监测领域里的重要的高技术手段。

2.5.1 光纤传感技术国外研究现状

光纤传感器的历史可追溯到上世纪70年代，那时，人们开始意识到光纤不仅具有传光特性，而且可以构成一种新的直接交换信息，无需任何中间级就能把待测的量与光纤内的导光联系起来。1977年，美国海军研究所(NRI)由查尔斯·M·戴维斯(Charles M. Davis)博士主持的Foss(光纤传感器系统)计划。其后，光纤传感器在世界的许多实验室里出现。由于其具有常规传感器所无法比拟的优点和广阔的发展前景，很多国家不遗余力地加大对光纤传感器的研究力度，涌现出许多成果。如：光纤机械量传感器、光纤热工量传感器、光纤电磁量传感器、医用光纤传感器、监测大气污染光纤传感器等。光纤传感器在结构和土木工程方面也进行了大量尝试性应用。1989年，Mendez等人首先提出了把光纤传感器用于混凝土结构的检测。相继，日本、英国、美国、德国等许多国家的研究人员先后对光纤传感系统在水利水电、土木工程、地质工程中的应用进行了研究。至今日本、美国和瑞士的光纤传感器对于形变量的测量应用领域较广泛，已经从混凝土的浇筑过程扩展到桩柱、地基、桥梁、大坝、隧道、大楼、地震和山体滑坡等复杂系统的测量或监测。总体来看，针对应力应变、位移、温度以及裂缝监测的不同需求，光纤传感器的研究与应用，美国和日本处于领先地位，欧洲紧随其后，已开展了广泛研究。

2.5.2 光纤传感技术国外研究现状

与国际上光纤传感器的迅速发展相比，我国近十年已开展这方面的研究工作。虽然国内也研究开发出了数十种光纤传感器，但是在水工结构领域内，尚停留在应用可能性和实验室研究的水平上。

3 发展与研究方向

3.1 高坝应力分析

3.1.1 高混凝土坝

对于高混凝土坝的应力分析，以下几个方面有待进一步研究：

（1）利用有限元法求解高混凝土坝应力分布时，精确解的获得有利于有限元法的推广和发展。自适应有限元法最早始于 20 世纪 70 年代初期，是从经典有限元研究中派生出来的新分支，它是一种能通过误差分析自动调整算法以改进求解过程的数值方法。进入 20 世纪 80 年代以后，国际上自适应有限元方面的研究成果日益增多，它已成为有着广阔发展前景的数值计算方法。

（2）有限元等效应力法在高坝分析中还不成熟，对高坝等效应力控制标准需做进一步的研究，确定更具普遍意义的有限元等效应力法拉应力控制标准。收集足够多样本的高拱坝资料，对其等效应力值和实际应力分布与裂缝开展情况进行综合研究，用概率统计的方法确定具有一定安全度的等效应力控制指标。

（3）各应力仿真分析方法在降低解题规模和提高计算速度方面各有千秋，需进一步研究出更加合理有效的应力仿真分析方法。

3.1.2 高面板堆石坝

有待进一步研究以下方面：

（1）在面板堆石坝应力、变形特性的研究中，离心模型试验是与数值计算分析相互补充、互相验证的方法。在离心模型试验中，应注意考虑模型试验中的固有误差；同时，在进行面板堆石坝的离心模型试验中，还应解决面板材料模拟、堆石材料缩尺、试验数据传输、内部变形观测、蓄水过程模拟等一系列问题。今后的离心模型试验将进一步在模型材料主要是堆石材料的合理级配控制、面板材料的合理模拟等、试验量测手段主要包括坝体内部变形的观测、接缝位移的测量等、以及如何在有限的离心机容量下解决高面板坝的模型试验等方面进行深入的研究。

（2）在面板堆石坝有限元分析中，堆石本构模型、混凝土面板与垫层接触面模拟、接缝

模拟都会对面板及混凝土防渗墙的应力结果产生较大影响，而加载过程的模拟、网格划分也会产生不同程度的影响。因此，为了使面板堆石坝应力变形分析更趋合理化，应从上述多方面努力，混凝土面板与垫层的相互作用、混凝土防渗墙与墙两侧砂砾石层的相互作用、堆石体流变、接缝的应力变形特性等方面都需要进行大量的试验研究。一方面，应加大室内试验力度，对堆石体流变特性、面板与垫层的相互作用、防渗墙与墙两侧砂砾石层的相互作用、接缝的应力变形特性进行全面深入的研究，以提出更能反映实际情况的本构模型及参数；另一方面，应充分利用已有的原型观测资料，运用反分析手段，对现有模型进行检验和修正，并获得较为可靠的参数。通过两方面的努力，可望在不久的将来，面板堆石坝应力变形分析将能从定量分析的程度更好地为工程服务。

3.1.3 高土石坝

高土石坝应力分析有待进一步研究以下几个方面：

（1）土体本构理论的限制。岩土材料的本构模型是土力学计算的基础，是用数值方法分析岩土工程问题时，提高计算精度的关键因素之一，因此建立完善的的岩土材料本构关系是完善工程计算的前提条件。目前，岩土材料的本构理论均不能全面的反映土体的各种性质，从另一方面限制了工程计算的发展。

（2）计算参数的限制。数值计算所涉及的模型参数大多数是常规三轴的试验结果，常规三轴仪尽管能揭示土体的部分力学性质，但对于土体各向异性的试验仍然有很大的局限性。另外，现有的三轴仪主要是针对细颗粒土设计，尺寸偏小。颗粒土的尺寸效应对计算参数的影响仍有待进一步研究。

（3）水库蓄水后，由于水的渗透作用，土石坝的后期应力变形较之施工填筑阶段更为复杂，影响因素更多。因此，需要进一步研究土石坝的后期变形。

（4）当坝基布设混凝土防渗墙时，由于混凝土防渗墙与坝基土层弹模相差悬殊，防渗墙与周围土层难以满足变形协调条件。需要进一步研究界面接触模型。

3.1.4 高坝应力分析新理论

针对高坝的应力、应力水平和裂缝等特点，以往的应力分析的理论和方法难以分析宏观、细观和纳观耦合的应力应变的缺陷，探索用微纳米尺度的力学分析方法分析应力应变和裂缝的稳定性，即采用宏观、细观、纳观的三层嵌套的力学模型。其基本原理是：①用原子镶嵌模型和分子动力学理论模拟裂纹尖端附近的纳观区行为；②用弹性基体加离散位错描述细观区行为；③宏观区采用超弹性/粘塑性大变形本构关系和有限元计算。最近，郭增才和杨卫等提出了新的 MD（分子动力学）-MPM（材料点方法）-HS 跨尺度计算模式。在跨尺度计算中，

在关键区域（如裂纹尖端）采用分子动力学来模拟，在其它非关键区域采用连续介质力学模拟。在连接区域把材料点看做原子并将其排列在实际晶格位置。图 1 描述了原子团簇在裂纹基体上的局部晶序图。

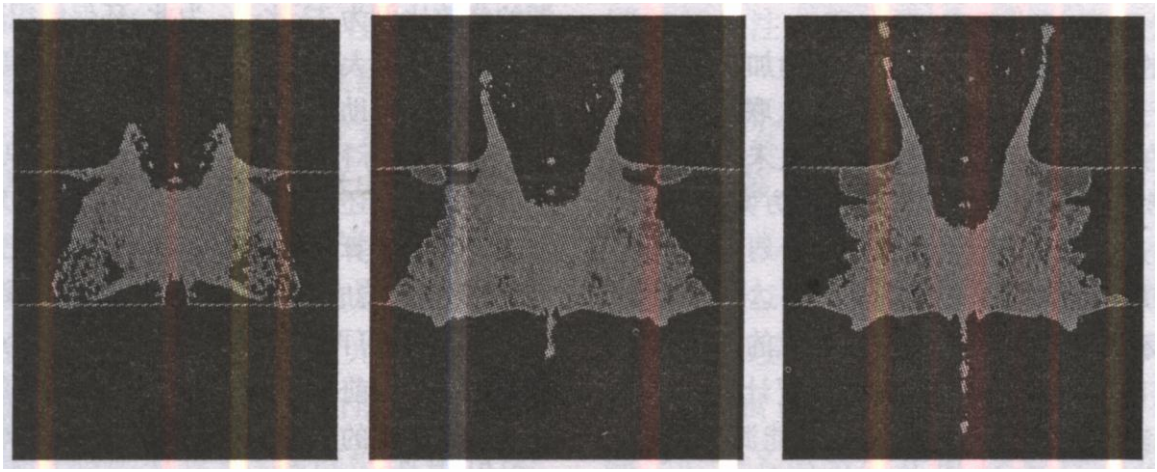


图 1 原子团簇在裂纹基体上的局部晶序图

3.2 高坝极限承载分析

由于坝基通常存在软弱结构面，对大坝的变形、受力和稳定性都有着重要影响，因此抗滑稳定分析成为大坝设计中的一个重要环节。目前，大坝的抗滑稳定分析还需要在以下几个方面进一步研究。

（1）规范推荐的刚体极限平衡法具有统一的稳定判断标准，能够求出单一滑动面和双斜滑动面的稳定安全系数。但是在双斜滑动面的理论公式推导过程中，传统算法均涉及了较多假定，对计算结果有一定影响。因此抛弃假定条件，对稳定安全系数的计算方法进行改进，可以提高计算结果的准确性。

（2）对于坝基存在多个滑动面的大坝，现有的方法难以解决其稳定分析问题，因此有必要对多滑动面情况的稳定安全系数解法进行研究。

（3）目前广泛使用的有限元法，虽然计算精度较高，但是缺乏统一的稳定安全判据，进行稳定性判断时带有较大的主观性。因此，研究有限元法的稳定性判据显得十分必要。

（4）DDA、NMM、Meshfree Method 等新兴数值方法尚处于初步研究阶段，在高坝稳定研究方面具有很大的潜力。

3.3 高坝非线性问题

3.3.1 非线性研究的问题

（1）混凝土力学特性具有细观非均质性导致的非线性特点。只有摆脱传统线性分析的束缚，寻求非线性分析手段，结合系统论、控制论、信息论等先进的分析方法，正确合理的揭

示材料损伤破坏机理，才能使混凝土力学的研究进一步发展；这是从本质上认识和解决混凝土结构安全评价问题的一条正确途径，并且已成为一种必然的发展趋势和一项十分紧迫的任务。

（2）经典的损伤力学一般采用一个统一的损伤变量来描述损伤的程度，实际上应充分考虑材料渐进的性能劣化与材料应力、应变之间的耦合现象。

3.3.2 进一步研究的分析理论和方法

针对上述问题，本项目提出以下进一步研究的分析理论和方法：

（1）微纳尺度分析法

任何结构的疲劳破坏过程大致经历四个时期，即疲劳成核期、微观裂纹增长期、宏观裂纹扩展期以及最后断裂期。在工程实践中，为了简化计算，又常把它们综合为两个阶段，即疲劳裂纹形成阶段和疲劳裂纹扩展阶段，也即微观与宏观之分。因此，需进一步拟探索用微纳米尺度的力学分析方法分析裂缝和强度，即采用宏观、细观、纳观的三层嵌套的力学模型。

（2）随机疲劳理论

随机疲劳理论是今后疲劳理论发展的主方向之一，特别是结合随机过程理论、模糊数学理论等新方法，处理疲劳问题就更加符合实际情况。结构疲劳是一门实验科学，它是以疲劳实验为依据，对结构性能进行研究分析，以得出对今后的设计工作有指导意义的结论。需进一步研究结合其他方法对疲劳理论进行修正，将疲劳寿命划分为两个阶段，并对准确计算结构的全寿命及其可靠性提供了一个解决方案。

（3）发展非线性问题的分析理论与方法

利用实测数据，结合数值模拟和物理模型试验，融合断裂力学基本概念和非线性理论，研究裂缝发展演变过程的耗散结构特征，构建基于分形几何裂缝扩展演变分形方法，建立混凝土坝裂缝扩展演变的熵变理论与方法体系，并探索基于非线性理论的裂缝转异诊断方法。

（4）材料、几何与时间三种非线性的耦合分析

在研究高坝非线性时，通常同时研究几何非线性和材料非线性，或同时研究材料非线性和时间非线性，实际上，这三种非线性关系有时是同时存在的，如在确定高混凝土坝二级监控指标时，可以将材料的断裂考虑到坝基和坝体的本构模型中，确定坝基和坝体的本构模型为 7 参数弹-粘-断-粘弹-粘塑性模型。

3.4 物理模型试验

在工程实践中，物理模型试验正在显示独特的作用，其中结构模型试验渐趋成熟，但是地质力学模型尚有许多科学技术问题有待进一步研究，为此，重点研究地质力学模型试验的

发展与研究方向。

3.4.1 地质力学模型比尺的选择

根据地质力学模型的相似条件，显然，比尺越小，材料的强度越低，弹模亦低，模型基础块体的成型就越困难，故模型比尺不宜过小。但模型的体积是几何尺寸的三次方，比尺太大，不仅材料用量及工作量大增，且费时、耗资，并使加载及量测困难，试验精度也难以提高。因此，应注意适当选用模型比尺。模型比尺的选择，可从以下几方面考虑：①模型比尺与体积用料、经费及周期的关系；②模型比尺与试验精度的关系；③从材料块体成型考虑。

3.4.2 地质力学模型材料的选择

研究满足相似关系的模型材料是地质力学模型试验最主要的内容。要找到完全相似的模型材料十分困难，一般根据要研究问题的性质，寻找满足主要参数相似的材料。例如，对于沿夹层滑动的稳定问题，夹层材料的相似性必须严格满足，而岩体的某些材料参数的相似性可以适当放宽。

模型材料应有以下特性：(1)容重高、抗压强度和弹性模量低；(2)性能稳定，不生锈，有很高的绝缘性；(3)容易得到，并且价格便宜；(4)力学参数易于调节，如通过调节松香酒精胶结剂浓度可以很容易地调整材料的弹性模量、抗压强度；(5)酒精易于挥发，干燥时间短，可缩短试验周期；(6)没有任何毒副作用，不会对人体造成伤害；(7)压制成型的砌块易于切割，能满足模型拼装砌筑的工艺要求；(8)由于采用松香酒精溶液作为胶结剂，砌块表面用酒精润湿后，即具有自黏能力，故砌块接缝可用本身材料黏接，故砌缝的存在不影响模型的整体性能；(9)由于各种材料拌和后未产生化学反应，因此试验后的材料可重复使用，提高了材料的利用率和使用寿命。

3.4.3 模拟技术

（1）摩擦系数 f 的模拟

不连续面上摩擦系数的模拟，根据相似原理，要求 $C_f = 1$，$C_c = C_\sigma$。即原型岩石层面间的摩擦系数应与模型相同，凝聚力相似常数应等于应力相似常数。有效模拟摩擦系数的材料尚需进一步研究。

（2）结构面的剪切刚度及粘结力 c 值的模拟

岩体结构中对层面抗剪特性的模拟是地质力学模型试验中另一个重要的问题。抗剪特性主要包括摩擦系数 f 值、粘结力 c 值及剪切刚度 Ks 值。对 f 值的模拟已引起人们的重视。层面的 c 值经常被留作安全储备，在模拟中不予考虑，这对有些工程作这样的处理是允许的。但在有些工程，（如三峡左岸厂房坝段坝踵附近有两条缓倾角裂隙，其部分连通率为 14%，大

坝沿缓倾角裂隙面滑动，首先要剪断裂隙不连通处的岩石)，必须要模拟裂隙不连通处的内摩擦角和 c 值与层面剪切刚度 Ks 值。因此，尚需进一步研究 c 与 Ks 的模拟技术。

（3）建基面或岩体不连续层面渗透压力的模拟

扬压力对水工建筑物的稳定和应力有重要影响，模拟时，扬压力中的浮托力部分应作体积力，一般在重度设计时予以考虑，层面渗透压力往往是要模拟的。如果在层面上施加渗透压力，而不考虑层面 f 值对抗剪强度的影响，则比较容易解决；如果要同时模拟 f 值和渗透压力，模拟技术就十分复杂。虽然，有些工程做了一些尝试，但尚需进一步研究。

（5）地应力的模拟

边坡或地下洞室开挖问题经常需要模拟地应力，地应力实际上是体积力，可以在离心机中直接模拟，但模型比较小。因此，尚需进一步研究地应力的模拟问题。

（6）喷锚支护施工工艺过程模拟技术

在实际工程中，洞室的施工工序对围岩的稳定性影响很大，在模型试验中要考虑这种影响，尚需解决在初始地应力场中的洞室开挖技术和喷层、锚索(杆)的模拟技术问题。

（7）模型平面变形控制技术

控制模型平面变形是地下洞室模型试验中的一项重要技术，它是使模型试验结果较好地反映原型性态的必要条件。因此，尚需进一步研究模型平面应变控制条件。

（8）模型边界柔性加载与横向变形同步技术

在模型试验中，由于模型中洞室的开挖和存在，以及模型材料的内外变形的不同步，导致模型边界变形必然是不均匀的。而实际工程中，洞室周围岩体变形是连续的，不存在边界横向变形促进或者约束问题，在离洞壁足够远处，围岩中的应力分布应是均匀的。为了保证模型试验中模型边界条件与实际工程情况一致，必须克服加载与模型边界横向变形的不同步现象，以及由于模型边界变形的不均匀引起的应力分布的变化。

3.4.4 量测技术的发展

实验力学发展最快的领域是量测和数据采集技术，每一项新的量测技术的诞生都会推动实验水平的提高，地质力学试验技术同样如此。目前试验的位移量测已向高精度、传感微型化、自动化及遥测等方向发展，而且地质力学模型在这方面的要求往往要高一些，因为它不仅量测在正常荷载下的位移，而且还要观测岩体在超载下的错动或失稳中的位移变化。模型观测的主要内容为应力、应变、位移、裂缝和破坏形态，测量的主要方法有电阻应变片和应变仪、位移传感器、激光散斑、云纹、摄像录像等。由于地质力学模型材料变形模量比较低，只有在修正刚化影响的基础上才能计算应力，所以位移是主要测量内容。模型变形测量方法

大体可归纳为 3 类：机械法、电测法和光测法。计算机技术和自动化技术的应用保证了试验结果测量的自动化和可靠性。常用的测量系统如下：

（1）应变测量系统，①电阻应变测量；②光栅光纤应变测试系统。

（2）内部位移测量系统。

（3）表面收敛测量。

3.5 原位高新安全监测技术

光纤传感技术是近年来发展较快的检测和监测技术，可实时、在线、动态监测混凝土结构的多项物理量，而分布式光栅传感技术提供了一种崭新的测量手段，可以精确地监测结构内部的力学与渗流等状态，而且具有使用寿命长等优点，能弥补传统检测手段的不足和缺陷。但目前该技术仍处于实验阶段，尤其在水工结构中尚缺乏应用实践，尚需进一步探讨：

（1）监测空间分辨力的提高、传感器的灵敏度进一步改善、可监测物理量的进一步增多等。

（2）在混凝土中传感器的长期稳定性和耐久性、光纤与混凝土界面的粘结剂、荷载传递的微观力学以及实测规划等有待于进一步研究探讨。

（3）与光通讯技术、微电子技术和计算机技术等尚需进一步整合，使光纤传感技术在大坝安全监控领域中得到更加广泛的应用，发挥更大的作用。

（4）光栅传感器在水工程中的埋设技术有待进一步提高。

4 转化为生产力

（1）研究的关键是将研究成果及时应用于实际工程的设计、施工和运行中去，产生社会经济效益。

（2）为制定新型设计、施工和运行规范与法规等提供技术支持。

（3）及时撰写论著、有关规程和细则等，申报发明专利与新颖实用专利等，进一步提高和发展我国水工结构领域的科技水平。

（4）培养和造就高层次的水利科技人才。

3.6 水利水电工程技术

1 概述

随着经济高速发展，我国修建了一大批水利水电工程。这些工程在抗御洪水灾害、调蓄利用水资源、提供清洁电能、促进经济社会可持续发展发挥了重要作用。我国正在建设和将要建设一大批规模宏大的大坝水库和水电站，已建、在建大坝数量、水电装机数量位居世界第一，大坝设计、建造水平位居世界前列，并引领该领域的发展方向。国内外已建、在建的各种坝型的坝高(见表 1)。

表 1 各种坝型国内外最高大坝名称列表

序号	坝型	国外最高		国内最高(已建或在建)	
		坝名(国别)	坝高(m)	坝名	坝高(m)
1	混凝土重力坝	大狄克逊坝(瑞士)	285	三峡工程	181
2	碾压混凝土坝	Miel坝(哥伦比亚)	188	龙滩	216.5
3	混凝土拱坝	英古里双曲拱坝(格鲁吉亚)	271.5	锦屏一级	305
4	土石坝	罗贡心墙坝(塔吉克斯坦)	305	糯扎渡心墙坝	265
5	面板坝	阿瓜密尔巴坝(墨西哥)	187	水布垭	233
6	沥青混凝土坝	芬斯特斗(奥地利)	96/150	冶勒心墙坝	124.5

我国已建和在建的地下水电站约 120 座，水工隧洞累计长约 1100km。正在建设的金沙江溪洛渡水电站，左、右岸地下厂房开挖尺寸为 443.34m×31.9m×79.6m（长×宽×高），各装 9 台 77 万 kW 水轮发电机组，装机规模达 1386 万 kW，是世界上规模最大的地下水电站。国外最大地下水电站为加拿大拉格朗德Ⅱ级水电站，装机容量 732.6 万 kW，安装 22 台 33.3 万 kW 水轮发电机组，地下主厂房开挖尺寸为 483.4m×26.5m ×47.3m。正在建设的锦屏二级水电站，装机容量 480 万 kW，四条引水隧洞单线长度约 16.7Km，开挖直径为 12.4m～13.0m,最大埋深约 2525m，具有埋深大、洞线长、洞径大的特点，地应力高，地下水十分丰富，技术难度极具挑战性。南水北调工程穿越黄河输水隧洞，长 2.6Km，地质条件复杂，采用盾构法施工和预应力环锚混凝土衬砌技术。这些工程的成功建设，标志着我国地下工程技术已处于世界先进水平。

改革开放后，我国大坝建设取得重大突破，从 100m 级高坝、200m 级高坝的建设，发展到目前 300m 级高坝工程，装机容量从 100 万 kW 到三峡的 2250 万 kW。特大型工程，例如三

峡、二滩、龙滩、水布垭、小浪底、小湾等的成功建设和运行，紫坪铺高面板坝和沙牌高碾压混凝土拱坝在2008年汶川特大地震中的优异表现，都标志着我国在大坝建设和管理上已取得举世瞩目的成就。

总结国内外水利水电工程技术的发展情况，并梳理今后水利水电工程建设中所涉及的设计、施工关键技术以及基础理论发展，提出水利水电工程技术相关科技前沿问题，以引导今后学科研究发展方向是继续保持我国水利水电领域领先地位的当务之急。

2 我国水利水电工程发展

20 世纪 50 年代以来，我国大坝逐步由土坝为主转向多坝型发展，如当时建成的官厅土坝、佛子岭连拱坝、梅山连拱坝、狮子滩堆石坝、响洪甸重力坝、磨子潭双支墩大头坝、新安江宽缝重力坝等，在我国大中型坝中均系首次修建，为我国大坝工程跨入世界现代大坝工程建设的行列开启了新的篇章。随后，大坝的形式向多样化发展，并逐渐形成我国特色的坝型，如混凝土坝从轻薄型连拱坝、支墩坝、重力拱坝开始，发展成为独具特色的宽缝重力坝、空腹重力坝，以及大量型式各异的浆砌重力坝、支墩坝、拱坝等。在修建土坝、堆石坝方面，白龙江碧口和石头河土石坝的建成，标志着我国修建现代碾压式堆石坝垮出了一大步。在中小型工程中，工程师利用当地材料及传统大坝工程工艺，修建了型式多样的土石混合坝、水坠坝、淤地坝、草土坝、橡胶坝等。

80 年代我国建成了当时规模最大的葛洲坝水利枢纽工程、高 178m 的龙羊峡重力拱坝、高 157m 的东江双曲拱坝、高 165m 的乌江渡拱型重力坝等，为我国防洪、发电、供水及灌溉等方面作出了巨大的贡献，使大坝工程勘测、设计、施工、科研和管理水平达到一定的高度。20 世纪建成了高 240m 的二滩混凝土双曲拱坝，标志我国建坝水平已进入世界先进行列。进入 21 世纪以来，随着三峡重力坝、龙滩碾压混凝土坝、水布垭混凝土面板堆石坝等的相继建成，以及目前正在实施的大批 300m 级高坝的建设，标志着筑坝关键技术方面已取得突破性进展。

以 1980 年为界，大坝建设存在两大趋势：一是高坝数量明显增加，1980 年后 20 多年建成的高坝约为前 30 年的 2.8 倍；二是面板堆石坝、碾压混凝土坝和高拱坝三种坝型成为主力坝型，三种坝型在安全性、经济性和施工特性方面表现出很强的竞争力，混凝土面板堆石坝与碾压混凝土坝更是从无到有，迅速占据主要地位。从这些变化可见我国大坝工程建设不但规模巨大，而且坝高与坝型的发展速度引领了世界大坝的发展趋势，相应的筑坝技术、基础处理技术、泄洪消能技术、高边坡处理技术和地下工程技术也取得了长足的进展。

上世纪六十年代以前，我国地下工程施工以手风钻钻孔爆破开挖、人工出渣为主；围岩

稳定性维护以架立支撑防止塌方的被动支护为主，施工速度慢，效率低，安全问题突出。伴随着改革开放，引进国外的先进技术、先进设备和管理经验，使我国地下工程技术产生了质的飞跃。我国的工程技术人员在引进、消化、吸收的基础上再创新，拥有了一批具有自己特色的地下工程新技术。

2.1 筑坝技术

2.1.1 混凝土重力坝

混凝土重力坝是大坝建设的主要坝型之一。我国最早的宽缝重力坝是 20 世纪 50 年代建设的新安江水电站大坝和古田一级水电站大坝；上犹江水电站大坝坝高 67.5m，是我国第一座坝内式厂房重力坝；1969 年建成的刘家峡水电站实体重力坝坝高 147m；70 年代建成的枫树坝水电站坝高 95.5m，牛路岭水电站坝高 93.3m，两者都是我国第一批空腹重力坝。已建的三峡水电工程大坝坝高 181m，是混凝土实体重力坝，坝身孔数之多、泄洪流量之大实属罕见。三峡工程大坝混凝土总量达 1800 万 m^3，突破传统的门塔机施工方法，采用连续式、工厂化的塔带机施工方案，创造了年浇筑 548 万 m^3 的世界记录，为确保三峡工程施工进度奠定了坚实基础。

2.1.2 高混凝土拱坝

混凝土高拱坝已成为大型水利枢纽的主要坝型之一，我国已经建成的高度超过 30m 的拱坝有 300 多座，是世界上拱坝最多的国家之一。1998 年 240m 高的二滩拱坝投入运行后，为特高拱坝的建设积累了经验，2005 年 60m 以上的高拱坝有 172 座，在建的代表性工程有 305m 高的锦屏一级拱坝、294.5m 高的小湾拱坝、285.5m 高的溪洛渡拱坝、250m 高的拉西瓦拱坝等一批工程。围绕这些高拱坝的抗震技术、结构问题、枢纽设计和施工技术等问题，国家组织开展了关键技术研究并取得了丰富成果。

近十年来，我国致力于 300m 级特高混凝土拱坝专门技术和在高地震烈度区高拱坝的合理体型的研究。在高拱坝应力控制标准、高拱坝建设全过程仿真技术、高拱坝设计判据、高拱坝坝身泄洪和坝下消能防冲、高拱坝孔口配筋理论及高拱坝设计方法等方面的研究已经取得了突破性进展，为我国兴建 300m 高混凝土拱坝打下了基础，提供了科学的理论依据。

正在建设中的混凝土双曲薄拱坝以小湾和溪洛渡为代表。小湾水电站坝型为混凝土双曲薄拱坝，坝高 294.5m，装机 4200MW，泄洪总功率 46000MW，坝体承受总水推力达 170MN，地震基本烈度为 8 度。溪洛渡水电站坝型为混凝土双曲薄拱坝，坝高 285.5m，装机容量 13860MW，泄洪总功率为 100000MW，为世界之最，地震基本烈度为 8 度。

2.1.3 碾压混凝土坝（RCC 坝）

1979 年我国开始对 RCC 筑坝技术进行探索研究，1986 年福建坑口大坝建成，成为当时世界上第一座高 RCC 坝（高 75m）。20 世纪 90 年代结合岩滩百米级 RCC 技术的开发和推广工作先后对坑口、普定、沙牌及龙滩工程建设中的关键技术进行了系统研究。

经过几年的科技攻关，我国 RCC 筑坝技术得到全面提升，主要体现在：1996 年建成了世界上第一座薄拱坝福建溪柄溪 RCC 拱坝（高 63m），厚高比仅 0.19；2001 年建成了四川沙牌三心 RCC 重力拱坝（高 132m）及甘肃龙首 RCC 双曲拱坝（高 80m），其坝高居世界前列；随后建成的龙滩 RCC 重力坝（高 216.5m）,是当今世界最大最高的坝；贵州光照 RCC 坝高 200.5m，它们的成功建设标志着我国 RCC 筑坝技术已达到 200m 级的世界最高水平。

碾压混凝土技术是干硬性混凝土利用土石坝振动碾压施工工艺，突破了传统的混凝土大坝柱状浇筑法，具有机械化程度高、简化施工程序、缩短工期、节省投资等特点。我国的碾压混凝土筑坝技术，创立了自己独特的经验，在理论、工艺、材料等方面不断创新，并突破了在高温多雨夏季和高海拔严寒低温冬季筑坝的禁区，形成了具有自主知识产权的不同类型、不同坝型的特色施工技术和国际先进的筑坝工法。概况来说，我国特色碾压混凝土筑坝技术的特点是中胶凝材料、高掺粉煤灰的配合比，变态混凝土和二级配碾压混凝土组合防渗方式，低 VC 值、薄层、短间歇、全断面薄层碾压快速施工。

三峡三期碾压混凝土围堰是三峡三期主体工程的施工围堰，又是三峡二期工程蓄水（135m 水位）、通航、发电的挡水"大坝"，作用重大。该围堰与左岸大坝共同挡水拦蓄库容 147 亿 m^3，最大高度达 121m，混凝土工程量 167.4 万 m^3。围堰在明渠截流后仅用 4 个月便全部建成，创造了最大月浇筑强度 47.5 万 m^3，最大日浇筑强度 21066m^3，连续上升 57.5m 的世界纪录，在适应快速施工的结构措施、快速施工技术及应对措施、施工质量保证措施等整套关键技术取得一系列创新成果，为碾压混凝土筑坝技术发展积累了宝贵经验。

龙滩碾压混凝土的成功建成，将我国碾压混凝土筑坝技术水平从 100m 跃升至 200m 级，筑坝高度、建设速度均有重大突破，在碾压混凝土坝体断面、防渗结构、温控防裂和质量控制等方面有实质性创新，形成了设计和施工的成套技术。

2.1.4 高土石坝

土石坝工程施工简便、地质条件要求相对较低、造价便宜，并可就地取材且料源丰富，因此是水利水电工程中极为重要的一种坝型。土石坝断面虽比混凝土坝大，但方案论证和时间对比证明，若河床覆盖层较深、岸边有合适的垭口布置溢洪道，则土石坝工程的综合经济指标比混凝土重力坝优越。

土石坝工程的建设历史久远，并经久不衰。随着科学技术的进步，今天的土石坝工程涵盖了土料防渗、混凝土面板防渗、沥青混凝土防渗、土工膜防渗等类型。我国的大坝仍然是土石坝具有数量的绝对优势，高 30m 以上的土石坝占总坝数的 59%，这与其它国家类似。目前在建的代表工程是糯扎渡心墙坝，坝高达到 261.5m。

(1)混凝土面板堆石坝

混凝土面板堆石坝安全性、经济性和适应性的特点已为大坝工程界同仁所共识，常成为坝型比选中的主要比较方案，且在很多情况下成为首选坝型。混凝土面板堆石坝是近三十年发展起来的一种新坝型，我国修建混凝土面板堆石坝始于 1985 年的西北口水库。由于混凝土面板堆石坝对地形地质条件的适应性能良好，对多雨和恶劣气候适应性强，对外来物资需求少，工程量相对较小，建设速度快，运行安全，容易维修，因此在国内外得到迅速发展。

目前我国混凝土面板堆石坝的数量、规模、技术难度和施工速度都已居于世界前列。最早开工建设的是 1990 年建成的西北口水库，坝高 95m。基于在施工技术、抗震安全、软岩筑坝、硬岩筑坝、高陡边坡筑坝、深厚覆盖层筑坝、高寒高海拔地区筑坝的研究和实践，面板坝在我国得到了快速的发展，2005 年已建在建坝中，面板坝有 169 座。代表性工程有坝高 178m 的天生桥一级、坝高 233m 的水布垭、坝高 219m 的江坪河、坝高 186m 的三板溪、坝高 179.5m 的洪家渡、坝高 162m 的滩坑、坝高 158m 的紫坪铺等。

我国混凝土面板堆石坝技术在发展中创新，除面板堆石坝和面板砂砾石坝坝型外，还有粘土心墙与混凝土面板坝结合的堆石坝、喷混凝土堆石坝、溢流面板堆石坝和趾板建在深厚覆盖层上的面板堆石坝等新坝型，以及建在强地震区的混凝土面板坝，如黑泉面板坝（按 8 度设防）。2008 年 5.12 汶川大地震，位于震中附近的紫坪铺面板堆石坝虽遭遇的地震烈度大大超过设防烈度 7 度，但大坝仍经受了考验。

(2)沥青混凝土防渗土石坝

目前，沥青混凝土心墙坝正在国内普及，施工技术日渐成熟，并将向更高的坝高发展。经过张河湾、西龙池、宝泉工程的建设，沥青混凝土面板坝施工技术也将在国内初步形成。20 世纪 70 年代初开始至 80 年代末，我国修建了一批沥青混凝土面板坝和心墙坝，其中最高的面板坝是 1979 年兴建的 82.5m 高的陕西石砭峪定向爆破堆石坝，最高的心墙坝是 1974 年兴建的 58.5m 高的甘肃党河堆石坝。20 世纪 90 年代以来，我国相继建成了一批大中型沥青混凝土面板坝和心墙坝，如 1998 年建成最大坝高 72m 的天荒坪抽水蓄能电站上库，2003 年建成坝高 104m 的三峡茅坪溪沥青混凝土心墙坝等。

近年来，沥青混凝土防渗堆石坝工程，在引进国外技术及总结国内经验的基础上，取得

了较大进步，对基础覆盖层较厚又缺乏合适防渗土料的地区，具有很大的实用价值。已建的四川冶勒工程，坝高 124.5m，河床不对称，覆盖层厚达 420m；即将修建的新疆下半地工程，基础覆盖层厚 140m，这些工程的建设将为进一步发展沥青混凝土心墙防渗技术提供宝贵的经验。

2.2 大坝基础处理技术

我国水电站多建在狭窄的山区河谷上，面对复杂和不良的工程地质和水文地质条件必然要求采用新的处理技术。四川南桠河冶勒水电站，右岸台地处坝基覆盖层为最大厚度超过 420m 的腔结卵石层，该覆盖层采用两层防渗墙加墙下帷幕灌浆的处理工艺，总深度达 200m。贵州乌江渡水电站，坝基溶洞多，采用了孔口封闭灌浆法防止坝基渗漏。

近年来建设的超高大坝和大容量水电站，要求地基处理有更高的标准、更完善的功能和更大的工程量。小浪底水利枢纽主坝防渗墙，既要防止渗漏，又要承受大的压力，为此在主坝内建成了深 81.9m、厚 1.2m、混凝土强度为 35MPa 的防渗墙满足了设计需求。天生桥二级水电站引水隧洞采用 6MPa 高压固结灌浆技术，处理了隧洞围岩中的断层破碎带和溶洞，并使引水隧洞具有能承受高水头压力的功能。

水利水电工程的特点，要求地基处理与基础工程采用快速施工技术。二滩水电站采用高压旋喷技术，在很短的时间内，迅速形成了垂直防渗体系，为大坝在规定的时限内完成施工赢得了时间。冶勒水电站下层防渗墙，采用传统施工机械在规定工期内很难完成，为此采用低净空液压铣槽机，在 6m×6.5m 廊道内顺利地完成了防渗墙施工。

几十年的筑坝实践证明，我国水利水电工程大坝基础处理技术在 20 世纪 90 年代以来，尤其进入 21 世纪后，工艺、材料设备等方面均取得了很大进步。

2.2.1 水泥灌浆技术

灌浆技术主要应用于大坝坝基、隧洞围岩的防渗和加固处理中，我国灌浆孔的最大深度已达 206m。20 世纪 80 年代在乌江渡水电站帷幕灌浆中，采用了孔口封闭灌浆法，随后该法广泛用于大坝坝基帷幕灌浆。在二滩、小浪底项目中，实施了国际先进的自下而上纯压式灌浆法、GIN 灌浆法等。在非岩溶地区高坝坝基帷幕灌浆中，高压灌浆技术得到应用，灌浆压力达到 5～6Mpa，天荒坪抽水蓄能电站隧洞固结灌浆压力达到 9.0 MPa。除采用孔口封闭灌浆法外，在云南五里冲水库岩溶地区还应用了模袋灌浆技术堵塞岩溶通道。坝基无盖重灌浆可在一定程度上解决坝基固结灌浆与大坝混凝土浇筑在工期方面存在的矛盾，三峡和二滩部分坝块下的固结灌浆中就成功应用了这一技术。

水泥灌浆材料中，稳定浆液和细水泥浆液等新型灌浆材料的使用有了长足进展。稳定浆液是掺有稳定剂的水泥浆液，浆液 2 小时析水率不大于 5%，在小浪底坝基固结灌浆和帷幕灌浆中得到采用。三峡二期工程固结灌浆和帷幕灌浆中使用了湿磨水泥浆液。大黑汀水库灌浆使用了干磨改性细水泥，它是以 42.5 级普通硅酸盐水泥为基料，加入适量灌浆剂干磨而成，比表面积为 5000～6000cm^2 /g，效果优于普通水泥灌浆。沙牌碾压混凝土拱坝中，使用的超细水泥的比表面积达 8733cm^2/g。贵州红枫水电站和云南小湾水电站还使用了高稳定性膏状浆液材料。

灌浆设备（包括钻孔、灌浆和制浆）也有不少新成果，我国自行研制的高压灌浆塞、高速搅拌机、高压阀门等灌浆机具也得到应用。自主研制的灌浆自动记录和监测系统，由初期的测记灌浆压力、注入率两项参数，发展到可以同时测记灌浆压力、注入率、浆液密度和岩体抬动四项参数，应用在工程上可实现 1 台监测设备控制监测 8～16 个灌浆机械的作业情况。

2.2.2 防渗墙技术

防渗墙主要用作坝(堤)基或坝(堤)体、围堰堰基或堰体的垂直防渗结构。目前，我国建成的防渗墙最大深度达 101.8m，最大厚度为 1.5m，单项工程最大截水面积为 27.15 万 m^2。

我国防渗墙施工技术发展始于 1958 年，防渗墙成槽(孔)机械主要有冲击钻机、抓斗和液压铣槽机。三峡工程二期上游围堰防渗墙施工采用了国内第一台液压铣槽机。我国最早成孔的固壁材料基本上采用粘土，20 世纪 80 年代后期开始使用膨润土。用膨润土制成的浆液性能优良，固壁效果好，墙体质量高，能适应抓斗和液压铣槽机等新设备的使用，经处理后可回收利用。最近国外有一种以聚丙烯酰铵为主材的高分子聚合物材料，用它制成的泥浆无毒，不产生废浆，被称为环保泥浆。目前国内还没有生产，价格也较高，只有少量工程中试验应用。

防渗墙墙体材料主要有固化灰浆、塑性混凝土、高等级混凝土和自凝灰浆等。　　固化灰浆最早在铜街子和王甫州等水利水电工程中应用。塑性混凝土在水口和三峡围堰以及长江堤防垂直防渗等工程中应用。高等级混凝土在小浪底主坝和冶勒防渗墙中得到应用。自凝灰浆曾在三峡三期下游围堰得到成功应用。

墙段间的接头分柔性接头和刚性接头两种，柔性接头有钻凿法、接头管法、铣接法、双反弧法等。接头管法可节省混凝土，加快施工进度，目前接头管的起拔力可达 3000kN 以上，四川狮子坪水电站防渗墙，防渗墙厚度 1.2m,墙深 100m，全部采用拔管法，最大深度达到 94m。

铣接法是利用液压铣槽机铣削接头，精度高，效率高，接头可靠，在小浪底主坝防渗坡左岸段施工中得到应用。

2.2.3 高喷灌浆技术

高喷灌浆技术主要应用于坝(堤)基覆盖层和围堰的防渗工程中，也可在地基加固中应用，我国高喷灌浆技术始于 1978 年，目前在水利水电工程中普遍采用。

20 世纪 70 年代引进高喷灌浆后，高喷工艺在实践中得到不断改进。在单管法、二重管法和三重管法的基础上，开发了新二管法和新三管法，前者提高了压缩空气的压力，后者以高压水和高压浆两次切割地层，防渗结构有用旋喷桩搭接构成防渗体，也有定向喷射或摆动喷射形成板状折线形搭接防渗墙，三峡工程曾使用了二管法和新三管法。河南林州弓上水库粘土心墙砂砾坝心墙及坝基渗漏，也采用小孔距高压旋喷桩套接防渗，最大孔深 83m，施工后效果较好，这是国内最深的高喷防渗墙。

高喷孔使用常规回转钻机、冲击式钻机跟管等钻进方法，工程中还开发了钻孔与喷射灌浆两个工序直接衔接的“钻喷一体化”新的施工方法。在二滩水电站使用的国外设备有高喷机械，既能钻孔，也可喷浆和取芯，还有带电子称量和自动控制系统的配料搅浆设备等，高喷灌浆自动记录和监测装置也开始得到应用。

2.2.4 化灌技术

自 1953 年佳木斯等地采用碱性水玻璃进行化学灌浆算起，我国的化灌事业已走过了 50 几个春秋。化学灌浆一方面作为水泥灌浆的补充，另一方面越来越独立的成为一种地基和坝体混凝土裂缝的处理技术，具有优异性能的多种灌浆材料如环氧树脂、聚氨酯、丙烯酸盐和水玻璃类浆液成为灌浆工程中不可缺少的一部分。

化学灌浆在三峡、葛洲坝、小湾、龙羊峡、丹江口、陈村、风滩、万安等水利枢纽中都有较大范围使用，早期的使用主要是用于坝基加固。如青海龙羊峡大坝采用中化 798 环氧浆材处理 G4 伟晶岩劈裂带取得较好效果。

在三峡工程坝基处理中也大量采用了水泥/化学高压复合灌浆新技术，如采用 CW 环氧浆材处理 F1096 软弱夹层及断层破碎带，解决了复杂岩层中断层破碎带含泥软弱夹层的基础处理问题，使处理后变形模量达到了设计要求；采用新研制的高浸润、高渗透、固化剂无毒的改性环氧树脂 CW 浆材进行固结灌浆，使浆液渗透到泥化夹层细微裂隙中，恢复了岩体的整体性；采用新研制的环保型丙烯酸盐浆材，全面代替了过去长期采用的有毒、致癌的丙凝材料，在三峡工程中建造的化学灌浆帷幕总深度达 15000m，化灌加固地基长达 300m。

我国化学灌浆技术近 50 年来取得了长足的发展：化学灌浆从无到有从小到大发展起来已经成为我国现代工程技术不可或缺的一个组成部分；化灌浆材品种开发、制浆设备研制都已取得许多突破，已基本能适应和满足国内化灌工程的要求；化学灌浆技术已在国内水电、交通和采矿等行业得到推广应用；化学灌浆已从工程完建后的应用，发展到工程兴建前设计中就采用，并已成功解决了水电工程中的许多基础处理难题；化学灌浆理论和技术上取得了一些突破，如采用水泥－化学复合灌浆技术处理低渗透性软弱岩石地层技术在三峡工程中的应用已具国际先进水平，我国还在浆液扩散半径的计算理论、浆液湿面粘结理论、减低浆液毒性的据抗理论、浆液吸渗理论等方面取得了较大进展。此外，化学灌浆还在大坝混凝土裂缝修补中得到广泛的采用。

2.3 高边坡处理技术

建国以来，我国水电工程中曾多次发生滑坡，造成了重大的经济损失和人身伤亡。水库蓄水以后由于库区不稳定岩体而诱发灾害。这是水电工程中常见的一种滑坡事故。1961 年 3 月，拓溪水电站由于暴雨形成的水库水位突然上升，导致库区发生 165 万 m^3 的滑坡，诱发了 21m 高涌浪越过坝顶造成数十人死亡；乌江渡大、小黄崖区在水电站蓄水后即出现弧形裂缝，延伸 200m，切割深 150 ~200 m，各形成了 300 万 m^3 和 100 万 m^3 的不稳定山体；1987 年在处理大黄崖滑坡体时， 因爆破事故造成 24 人死亡；黄龙滩水电站在 1974 年蓄水后发生 73 处滑坡， 总方量达 0.9 亿 m^3。

在水电建设中由于开挖坝肩溢洪道、厂房和隧洞进出口等而形成滑坡也是屡见不鲜的。1985 年 12 月 24 日，天生桥二级闸道边坡开挖时发生滑坡导致在基坑工作的 48 人死亡；1989 年 1 月 7 日漫湾水电站左岸开挖时发生 10.6 万 m^3 的滑坡使工期推迟一年，被迫移走一台机组，因而增加了相应 50 万 t 抗滑力的加固工程；隔河岩水电站由于左岸洞开挖失稳近 20 万 m^3 岩体发生解体，边坡处理工程延误工期近 3 个月。到本世纪末我国将建设和建成一批大、中型骨干水电站，在这些工程建设中仍然存在着严峻的库区滑坡和人工高边坡稳定问题。

由于水电工程中边坡稳定问题的严峻性，80 年代初以来,岩质高边坡稳定问题研究已引起各方面的广泛重视。综合现有的研究工作可以看到，围绕我国水电工程高边坡问题，已经取得了丰硕的研究成果。

2.3.1 高边坡理论研究

岩石高边坡变形破坏机理，是岩石高边坡稳定性评价的重要理论基础，同时，也是高边坡变形与稳定性控制的重要依据。因此，变形破坏机理研究在岩石高边坡工程中一开始就受

到高度重视。20 世纪 60～70 年代以来，通过西南地区水电建设的前期勘测工作和工程实践，这一方面最为重要的理论贡献就是岩石边坡变形破坏基本地质力学模型的建立和以此为依据的边坡失稳机制分类体系的建立。

2.3.2 高边坡数值模拟

数值模拟技术在高边坡稳定性评价中得到了广泛深入的应用。一方面随着计算机技术的发展，以有限单元法为基础的数值模拟技术在 90 年代中期突破了计算机内存和算法上的限制，使得开展适用于高边坡稳定性分析的大规模科学计算成为可能。数值模拟技术本身的发展为高边坡变形与强度稳定性分析提供了强有力的工具，三维数值模拟技术得到了广泛的应用。

另一方面，各种更适合于岩体计算的数值模拟方法自 20 世纪 80 年代以来得到极大的发展，首先是刚性离散单元法的提出，使得节理岩体模拟这种更接近于块体运动的过程模拟成为可能，实现了岩体数值模拟技术一次质的飞跃。紧接着， 适用于不连续介质的大变形问题分析块体理论的出现，从而实现了岩石块体的移动、转动、张开、闭合等全过程的模拟，据此可判断出岩体的破坏程度、破坏范围，从而对岩体的整体和局部的稳定性作出正确的评价。在数值模拟技术方面另一标志性成就是 FLAC(Fast Lagrangion Analysis of Continue，P．A．Cundal1，1996)方法的提出。这种方法可以考虑材料的非线性和几何学上的非线性，采用混和离散化法使塑性破坏和塑性流动得到体现；并采用显式时间差分解析法，大大提高了运算速度；适用于求解非线性大变形，但节点的位移连续，本质上仍属于求解连续介质范畴的方法。

对应用数值模拟技术的另一方面是人们在认识岩体变形破坏本质和本构关系描述方面取得了长足的进展。自 70~80 年代弹塑性、断裂、流变问题提出以来，90 年年代关于损伤分析、流变~损伤耦合分析、渗流~损伤耦合分析得到了岩石力学和工程地质学家的重视，并开始应用于诸如三峡船闸高边坡等工程的分析。总之，人们对地质体力学行为的描述与刻画正越来越接近于客观实际，尽管这方面还有很长的路要走。

2.3.3 高边坡安全监测

国外的岩土工程监测开展较早，我国从 80 年代初开始引进和研制了部分仪器，在露天矿边坡和水电开挖高边坡开展了系统的安全监测研究，在国家“六.五”“七.五”攻关计划的支持下，监测仪器、监测方法和监测设计、施工及监测成果应用等方面的技术不断得到改进，监测技术在高边坡安全研究中的应用越来越引起重视，并取得了一些明显的成效。90 年代伴随二滩、三峡、小浪底等大型水利水电工程的设计和施工，边坡监测技术水平无论从仪器质

量、监测设计与施工、观测与资料整理分析等多个方面都取得了长足的进步，监测技术已从研究阶段转入了生产实用阶段。目前，监测工作已成为了边坡工程施工的重要环节，几乎所有重要的边坡工程都设计有监测。监测工作对正确评估边坡的安全状态、指导施工、反馈和修改设计、改进边坡设计方法等多方面具有非常重要的意义，监测技术的引入使边坡工程的设计和施工在安全稳定和经济合理的协调统一中起到了不可或缺的桥梁作用。

2.4 高坝泄洪消能技术

我国高坝建设普遍存在高水头、大流量、窄河谷的技术特点，而且对于许多大型水电站而言，上述难点往往同时存在，对高坝泄洪消能技术研究提出了很高的要求。经过几十年的不懈努力与大量创造性工作，我国在高坝泄洪消能技术研究方面取得了许多突破性进展。

2.4.1 九十年代前泄洪消能技术

我国 50 年代建设的新安江宽缝重力坝为当时 100m 级高坝大流量(10000m^3/s)泄洪消能先进水平的代表，差动式鼻坎的设计成功解决了工程的泄洪消能难题。乌江渡工程的泄洪消能则代表了我国 70 年代的最高技术水平，其具体表现在：坝高超过 150m，泄量超过 20000m^3/s，单宽流量超过 200m^3/(s.m)；为了充分利用河床宽度，4 个表孔采用厂前挑流，这是一种新型的厂房与泄水建筑物重叠布置形式，它避免了泄流时水舌与厂房顶的接触，仅在水舌起挑和终挑时短时间小流量冲击厂房顶，泄流时对厂房顶的影响小；泄流最大流速超过 40m/s，高速水流问题突出。乌江渡工程在高速水流脉动分析与掺气减蚀技术方面都取得重大进展。进入 80 年代后，东江、龙羊、安康、岩滩、小浪底等一大批工程研究并采用了窄缝式消能工、宽尾墩消能工、宽尾墩加台阶式消能、高底坎大差动消能工、洞内消能工等新型泄洪消能技术，这些新技术的应用为我国高坝泄洪消能技术的发展积累了丰富的经验。

2.4.2 二百米级高坝泄洪消能技术

三峡水利枢纽主要建筑物设计洪水标准为 1000 年一遇，洪峰流量为 98800m^3/s；校核洪水标准为 10000 年一遇加 10%，洪峰流量为 124300 m^3/s。泄洪坝段居河床中部，前沿总长 483m，设有 22 个表孔、23 个表孔以及 22 个后期需要封堵的临时导流底孔。枢纽在校核水位 180.4m 时的最大泄洪能力为 126000 m^3/s。三峡工程泄洪消能的特点是：泄洪总量大，为世界上所有类型大坝之首；单宽流量超过 200 m^3/(m.s)；三层泄水孔共 67 个（不同时期两层泄水孔同时使用），水舌分层入水，适当碰撞；采用挑流消能方式，仅对坝址附近范围进行混凝土保护，并在两侧变墙设置潜水丁坝以减轻回流淘刷。

二滩水电站是世界高坝泄洪消能的重要里程碑，它代表了 90 年代国内外的最高水平，具

体体现在：在坝高 200m 以上的工程，二滩是泄量最大的；按分区消能、按需防护的原则，布置两个消能区，即坝区消能区和泄洪洞消能区；坝身采用表中孔水舌碰撞、水垫塘消能；首次系统地研究并提出水垫塘消能的设计控制参数，对水垫塘体型（长度、水深、二道坝高度等）、水垫塘底板稳定、坝身泄洪诱发振动提出了系统研究成果；对高水头大泄量泄洪洞的体型、消能工体型、掺气减蚀提出了系统研究成果。水电站的运行情况和原型观测表明二滩水电站的泄洪消能是成功的，为我国的泄洪消能技术进一步提高奠定了基础。

2.4.3 在建工程泄洪消能技术

进入 21 世纪，我国一批 300m 高坝开始建设，溪洛渡、小湾水电站等 300m 级特高拱坝泄洪消能技术代表了世界最高水平。溪洛渡拱坝最大坝高 285.5m，坝身泄洪量高达 32000m^3/s，是世界上坝身泄洪规模最大的拱坝工程。建设中的向家坝水电站采用跌坎底流消能方式，其泄洪量为世界坝工底流消能首位。以上这些高坝工程的泄洪消能的安全可靠运行均面临新的挑战。

2.5 地下工程技术

2.5.1 大型地下厂房

我国地下厂房，无论规模多大，地质条件多复杂，基本摒弃了传统的混凝土衬护方法，依据新奥法理论，采用喷锚支护为永久支护，结合有限元分析成果和施工期安全监测，动态优化支护参数。用系统锚杆作浅层支护，用锚索作深层支护，维护围岩稳定。在喷混凝土中，普遍采用掺化学纤维或钢纤维，提高喷混凝土的整体性和抗裂能力。

在引进挪威岩壁吊车梁新型结构的基础上，我国采用双向爆破、锁角锚杆的岩台开挖技术，使岩台成型效果更好；在设计理念上，锚杆在松驰圈不受力，向深部传递吊车梁荷载，使岩壁吊车梁对地质条件的适应性更强。

统筹规划引水系统、三大洞室和尾水系统的施工程序，对关键线路的主厂房总结形成了“平面多工序、立体多层次”的快速施工方法；提出了“先中后边、先软后硬”的主厂房顶拱开挖、支护原则；制定了高大洞室“施工分层、一次预裂、薄层开挖、随层支护”和“先洞后墙、逐层加固”的高边墙开挖稳定技术。此外，较好地解决了复杂引水发电系统的施工期通风难题。上述技术的应用，提升了我国大型地下厂房的勘测、设计、科研和施工技术的综合水平。

2.5.2 大断面长隧洞

在大江大河上修建水电工程，施工期导流流量大，运行期泄洪流量大，需要修建大断面

长隧洞，其开挖尺寸达 350m^2～450m^2,围岩稳定问题突出。对于 II、III 类围岩，一般采用分层开挖、逐层支护的方法。对于 IV、V 类围岩则采用“超前勘探、预加固、分层分区开挖、短进尺、弱爆破、勤量测”等围岩稳定技术，形成了管棚双浆液预加固、中空自进式注浆锚杆预加固，格构梁或钢支撑与锚杆联合受力和分部开挖法、眼睛法、核心土法等成套技术。

锦屏二级水电站引水隧洞长 16.7Km，开挖直径 12.4m～13.0m,穿越地层的岩性主要为三叠系大理岩，岩溶发育，出水构造多，最大单点涌水量达 7.3m^3/s，地下水压力近 10MPa。隧洞工程区轴线剖面上最大主应力(σ_1)的最大值约 70.1MPa，σ_2和 σ_3最大值约 38MPa 和 31MPa，围岩强度应力比小于 2，岩体岩爆倾向性指数 1.32～5.8,具备发生高地应力破坏的强度条件。为深入了解隧洞沿线的工程地质和水文地质条件，主体工程开工前，先开挖了两条辅助洞，研究大涌水、强岩爆的治理对策。主体工程施工采用钻爆法和 TBM 法分别从两端掘进，大涌水量和高水压力及强烈岩爆时有发生，施工安全风险极为突出。为此，设计单位联合科研单位进行岩爆预测和防治研究，主要防治措施有：超前导洞应力解除法，修正掌子面形态法，纳米有机仿钢纤维喷混凝土封闭，水压锚杆快速加固等。对丰富的高压地下水，则以排水为主，辅以固结灌浆封堵。总体而言，钻爆法对于岩爆的适应性强于 TBM 法。

隧洞混凝土衬砌的模板技术有：全断面针梁钢模台车、城门洞型钢模台车和顶拱 260°圆形钢模台车等，适应不同直径、不同断面型式的快速施工。

2.5.3 高压长斜(竖)井

抽水蓄能电站均会遇到高压长斜井或深竖井。我国已建成的抽水蓄能电站 18 座，总装机容量 2000 万 kW。广州抽水蓄能电站高压水道采用二级斜井布置，其中上斜井长 406.22m，下斜井长 347.5m，倾角 50 度，开挖直径 9.7m。天荒坪抽水蓄能电站则采用 700 多米长的一级斜井布置。

以往斜（竖）井开挖一般采用正、反井同时掘进，上口用下山法，手风钻开挖，人工装碴，卷杨机牵引斗车出碴；下口用阿力马克爬罐打反导井，自重溜碴，通风散烟困难，安全威胁大。九十年代中期，我国开发了反井钻机打导井，是斜(竖)井开挖技术的重大革新，由于其安全、快捷的优点，在水电系统中广泛采用，反井钻机的开挖深度，尚不能突破 300m 的极限。

斜井混凝土施工的难点，是模板技术。我国自行研制的 XHM 型滑模，主要技术创新是：用前后液压千斤锁定在井壁上的中梁作为支承系统，由液压系统控制模板沿中梁滑升；由具有自锁功能的前后液压爬升器作为动力沿底部钢轨腹板带动滑模系统整体爬升。首次实现了斜井混凝土衬砌连续滑升技术，平均滑升速度 8m/d，填补了我国此项技术空白，具有自主知

识产权。

目前，已形成了斜（竖）井导井开挖、扩大开挖与支护、混凝土衬砌、固结灌浆等成套技术。

2.5.4 无钢衬高压钢筋混凝土岔管

随着抽水蓄能电站在我国兴建，大直径高压岔管的结构型式是一道难题。如我国第一座抽水蓄能电站--广州抽水蓄能电站，采用一洞四机的布置型式，主、支管分岔处内径由 8.0m 变至 3.5m，主管是大圆锥体，分岔支管是小圆锥体，大小圆锥体相贯。岔管承受最大静水头 610m，最大动水头 725m，P.D 值达 58000KN.M。如采用常规的钢岔管，需采用厚度 60mm 左右的高强钢板，在洞外加工，则运输洞尺寸大，费用高，如在洞内瓦片拼装焊接，则施工条件差，质量难以保证，水压试验难度大。广蓄电站与美国合作设计无钢衬高压钢筋混凝土岔管新技术，混凝土衬砌厚度 60cm，28d 抗压强度为 30MPa，单层钢筋布置。

钢筋混凝土高压岔管的设计理念是：内水压力由混凝土传递到围岩的应力应小于该处地应力场的最小主应力，围岩承受绝大部份内水压力。钢筋混凝土衬砌主要起保护围岩、降低糙率和便于高压灌浆作业。通过高压固结灌浆，提高围岩特别是地质缺陷的抗渗性及变形模量，并对混凝土衬砌施加一定的预压应力。钢筋配置原则是根据有限元分析成果，限制混凝土裂缝开度。水道放空时，外水压力由混凝土衬砌及一倍厚的围岩联合承担，但要做好岔管顶部排水系统。

目前已形成了高压岔管设计理论、分析方法及开挖支护、混凝土衬砌和高压固结灌浆的技术标准和成套工法，在类似工程中广泛应用，取得了良好的经济效益。

3 国家需求和发展趋势

3.1 大力发展水电是促进国家经济可持续发展的需要

水力发电是重要的能源组成部分，对促进国家可持续发展不可缺少。21 世纪，我国国民经济仍处于继续工业化阶段，对能源的依赖性很强，并且单位产品的能耗高，国家能源短缺的矛盾依然存在。即使到了经济稳定增长阶段，随着第三产业的发展，人民生活水平提高，能源产业的基础地位仍不会改变。我国的华中、华东以及华南等东部地区，经济发达，但是能源不足，特别是华东地区，所需的能源主要依靠外部输入。其中，长江流域下游的江苏省、上海市以及比邻的浙江省这二省一市的国民生产总值约占全国国民生产总值的 20%，经济增长速度居全国之首。进入 21 世纪后，这个地区以发展火电来满足日益增大的电力需求将受到更为严酷的制约。西南地区大型水电站投产后，其产出的清洁水电能源对于缓解华中、华东

等经济发达地区电力紧张、可显著减轻向沿海经济发达地区运输煤炭的压力，有效地缓解北煤南运和全国铁路与运输的紧张状况，为提高综合国力和国民经济的发展注入新的活力。

清洁水电能源是二十一世纪可持续发展最至关重要的，全世界很多发展国家已经把大部分水电都开发了，而我们国家目前开发比例仅 35%，远低于发达国家开发程度。早开发、多应用水电，对我们国家的发展，尤其是可持续发展是非常重要的，其一方面能够满足社会需要，另外一方面可以源源不断的支持国家的可持续发展。

3.2 大力发展水电是应对全球气候变化的需要

温总理在 2009 年哥本哈根全球气候大会上宣布：到 2020 年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%，作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划。

当前，我国正处于城市化、工业化快速推进的过程中，能源消费的刚性增长是必然趋势。2009 年，我国能源消费总量已经达到 31 亿吨标准煤，而在 2008 年这一数据为 29.1 亿吨。同时，我国以煤为主的能源结构，为“高碳”埋下了伏笔。我国人均二氧化碳排放量 2007 年达到 4.6 吨，超过了世界平均水平，今年有可能超过法国，2015 年前后有可能超过欧盟（其目前数据为 8.7 吨）。尽管我国人均二氧化碳排放量大约只有美国的 1/4，但排放总量已经超过了美国。我国决定通过大力发展可再生能源，到 2020 年我国非化石能源占一次能源消费的比重达到 15%左右。水电作为技术最成熟、最具市场竞争力且可以大规模开发的非化石能源，是我国实现节能减排目标和非化石能源发展目标的重要措施。

优先发展水电是应对全球气候变化的重要措施之一。新中国成立 60 年来，我国水电累计发电量 67273 亿 Kw·h，相当于替代 26.4 亿吨标准煤，减少二氧化碳排放约 59.6 亿吨。2009 年我国水电装机容量 1.97 亿 Kw，占全国电力总装机容量的 22.5%。截至 2010 年 9 月，我国水电总装机容量达到 2 亿 Kw，开发程度仅 37%。初步规划到 2020 年水电装机容量应达到 3.8 亿 Kw，其中抽水蓄能电站为 5000 万 Kw,常规水电 3.3 亿 Kw，新一轮水电开发高潮即将来临。高坝和地下厂房工程是水利水电工程主体建筑物，是最关键、最重要的组成部分，大力发展水电对高坝和地下厂房工程技术进步提出了更迫切的要求。

3.3 大力发展水电也是世界能源发展趋势

在 2004 年联合国水电与可持续发展会议上，通过了《水电与可持续发展北京宣言》，这是国际上对 20 多年来水电开发中热点问题讨论的总结，是世界水电发展历史上的第一次，对世界水电发展具有重要的指导意义。基于对水电发展的新认识，为应对经济危机，尤其是全球气候变化，各国进一步加大了对水电的投入力度。 目前世界上有 165 个国家已明确将继

续发展水电，其中 70 个国家在建总装机为 1 亿 Kw，110 个国家规划建设 3.38 亿 Kw,。目前国际水电开发与可持续发展的研究具有以下共识：

（1）优先发展水电是各国政府及国际各界人士当前的共识。能源是实现可持续发展的必要条件，水电是清洁的、可再生能源，以环境友好、社会和谐的各种方式开发水电，符合新千年的发展目标，有利于持续地减少贫困和有效缓解全球 20 亿人无电供应的问题，可以有效减少温室气体排放，因此得到联合国、世界银行等国际机构的高度重视，也得到了各国政府及国际各界人士的积极推动。

（2）世界各国在发展水电中的成功经验，让国际各界人士认识到优先发展水电是现实可行的。联合国呼吁所有有关各方共同努力，以可靠、廉价、经济可行、社会和谐和环境友好的各种方式为社会提供电力，并认为水电在实现这一目标中具有巨大的潜力。个别水电项目曾对社会、环境及生态等造成较大的负面影响，从而引起国际各界人士的广泛关注， 但是，世界各国在开发水电中的众多成功及成熟的经验表明，水电开发是可以做到可靠、廉价、经济可行、社会和谐和环境友好的，是技术上成熟的可再生能源，可以大规模商业化开发。目前发达国家大部分技术及经济可行的水电资源都得到了开发， 发展中国家水电开发率还很低，尤其非洲，开发率还不到 8%，因此，优先发展水电对全球，尤其对发展中国家是非常重要的，也是现实可行的。

（3）呼吁大力开发水电，是科学认识水电的必然结果。联合国支持世界银行等金融机构重新投身水电开发， 呼吁各国政府创造良好的吸引投资的环境，以便为可持续的水电项目开发提供资金保障，世界银行在对水电开发做过多年的全面评估分析后正式宣称重新投资水电，发生这些变化的前提是水电为全球社会进步、经济发展、改善环境及消除贫困等方面做出了巨大的贡献， 在未来仍有做出贡献的巨大潜力。当今世界上尚有 2/3 的经济可行水电资源仍待开发，因此科学地认识水电、开发水电必然会成为世界的趋势。大力发展水电，高坝工程和地下电站的优质、安全、快速建设对水利水电工程科技提出了更高的要求。

3.4 大力提高水电建设技术是安全高效利用水资源的必然趋势

西部大开发即将迎来我国水利水电建设的重要发展时期，一批重大水利水电工程正在或将要开工建设，如金沙江下游河段乌东德、白鹤滩、溪洛渡和向家坝，锦屏一级、小湾、大岗山等一大批特高坝均为特大型工程，且各具特色。它们具有如下共同特点：坝址处于强地震区，基本烈度一般为 8 度；窄河谷、高水头、大泄量，单宽泄洪功率处世界最高水平；特大型地下厂房洞室群，其规模均位于世界地下厂房的前列；高陡边坡问题十分突出等。

尤其在特高拱坝建设方面，目前国内外已建成的特高坝经验不多，仅有的几个已建成的

工程也多出现一些问题。如何在设计、施工、运行、管理各个阶段针对各坝的特点采取措施，保证工程的顺利建成与长期安全运行是一个亟需解决的问题。

而在特高混凝土面板坝方面，目前 100m 级的面板坝已有成熟经验和成套技术，其设计和施工都有规范和常规可循。200m 级的已建成和在建的面板坝约在 10 座左右，成功的经验不多，受到破坏的情况也不少，现有经验尚不足以覆盖更高的坝，不能以 100m 级坝的经验直接引伸到 200m 级或更高的坝，而要采用不同的设计理念，更加重视理论分析和试验研究以及原型观测成果的作用，以试验研究与经验相结合作为决策的依据，且一切都应从严。

所以进一步提高我国水电建设的科技水平，开展大型水电工程施工关键技术攻关，进一步提升大坝长期安全运行的技术途径和延长大坝工程的正常使用寿命，以及大坝建设与生态协调将可以全面提升我国水电施工的科技水平，确定我国在大型水电施工安全的国际领先地位。

4 科技前沿问题

我国正在规划、设计和建设的水利水电工程中，多项工程技术指标已超过了世界水平，必将遇到前所未有的技术难题。为了切实解决这些工程中的重大技术难题，必须加强基础理论研究以及发展各种数值模拟方法，这些研究均与现代水利水电工程建设有密不可分的关系。经过多年的科技攻关，我国在大坝温控防裂与应力仿真、高坝抗震、高速水流消能、高坝施工仿真、地下工程及坝基处理等研究领域取得了令人瞩目的进展，但在这些研究所涉及的基础领域、设计分析理论、新技术、施工设备和施工工艺，尚不能完全满足下一步水电开发需要。因此，在水利水电工程领域还有许多科技前沿问题急待研究解决，本文仅列出以下若干重点研究内容。

4.1 筑坝技术

4.1.1 超高混凝土重力坝关键技术研究

目前规划的超高坝、特高坝大多是堆石坝和混凝土拱坝，基本没有混凝土重力坝，国外超高、特高混凝土重力坝也是屈指可数，鉴于混凝土重力坝建设安全风险小，抵御超标准洪水能力强，便于维护管理，超高、特高混凝土重力坝仍然是坝型选择的比较方案。因此，需要针对超高混凝土重力坝的关键技术问题开展新材料、新结构、新工艺的攻关研究，促进我国混凝土重力坝工程技术的发展。

超高混凝土重力坝关键技术问题有：①基础处理设计与施工技术研究；②大坝体型、材

料分区和构造设计研究；③大坝应力、变形和稳定安全性研究；④高重力坝抗震设防关键技术研究;⑤高速水流及泄洪消能技术研究，包括研究泄洪组合方式、泄洪建筑物体型、联合消能工、空化气蚀和掺气减蚀、水流压力脉动及诱发振动、抗冲耐磨、泄洪雾化等问题；⑥施工技术和工艺措施研究，包括大体积混凝土温度控制和防裂措施研究；⑦大型施工机械和施工配套装备技术研究等。

4.1.2 碾压混凝土筑坝关键技术研究

为充分发挥碾压混凝土快速施工和造价低的优势，宜改变传统的以减少重力坝混凝土体积为目标的设计思路，而应根据材料性能和坝体功能要求来设计重力坝体型，放宽对温度控制、放宽对骨料质量和放宽对地基条件的要求，达到工程造价和工期综合最优的目标，并将工程建设对自然环境的不利影响减至最低限度，达到工程建设与自然环境协调的更高境界。贫胶凝材料碾压混凝土坝借助堆石坝施工工艺具有较好的施工特性，能够快速施工，减少水泥用量，简化温度控制，因而具有较强经济性和竞争优势。

碾压混凝土坝在实际应用中已有 20 余年的历史，施工技术已日趋成熟，但仍有不少问题尚待在实践中研究解决，其中最为关注的是温控问题，虽然碾压混凝土坝水泥含量少，水化热量低，但因其施工速度快，散热慢。据分析，如龙滩那样的大坝，碾压混凝土坝温度自然冷却到常温需要 50 年以上的时间。因此，施工期的温控以及温度应力分析研究仍是碾压混凝土坝的一个亟待解决的关键问题。此外，还应在以下几个方面进一步深入开展研究工作：

①改进材料的配合比，使之既能节省水泥，又能保证强度，尤其是层间接缝的粘结强度；②从研究结构型式、材料特性两方面入手，进一步提高坝体的抗渗能力；③碾压混凝土重力坝温度应力分析和防裂措施研究，结合坝体分缝型式和细部构造的研究，以尽量控制坝体裂缝的产生和发展；④改进坝体构造设计，使之既便于碾压施工，又能保证工程质量和坝体的正常运行；⑤改进施工质量监控方法，尤其是高温季度和雨天施工工艺，开发新的监测仪器，使监测工作既快又精确，以保证施工质量。

4.1.3 高混凝土拱坝关键技术研究

我国正在修建或将要修建的几座特高拱坝，拱座推力大、应力水平高，加上地质条件复杂、地震烈度高等各项不利条件，与普通高拱坝相比安全度不但不高还可能略低，即特高拱坝的安全度并没有随着大坝的重要性提高而提高。如果考虑实际应力状态、材料的长期性能特点等因素，特高拱坝的实际安全度可能低于普通高拱坝。已建或在建的国际国内的少数几座特高拱坝在施工中或运行期逐渐出现一些问题也充分说明这一点。国外有几座特高拱坝因安全事故不得不耗巨资进行修复，国内已建的高拱坝在运行中也均出现不同程度的裂缝。同

时，特高大坝工程规模和投资巨大，设计使用寿命远大于 100 年，对混凝土材料的长期耐久性要求高。因此，研究大坝真实工作形态和混凝土的耐久性规律，通过科学的混凝土配合比优化设计，实现大坝混凝高性能化，提高大坝长期运行的安全性和健康服役寿命，是高坝建设中混凝土材料的发展方向。

主要研究内容包括：①复杂条件下特高拱坝的真实工作性态；②复杂条件下特高拱坝的极限承载力和长期运行安全度评价方法；③大坝混凝土高性能化的综合技术；④基于大坝合理使用年限的混凝土耐久性定量化设计方法；⑤混凝土快速施工技术研究；⑥特高大坝抗震功能设计的内涵及分级设防水平的确定；⑦高拱坝-地基体系地震破损过程分析理论方法及整体抗震安全评价准则；⑧特高坝混凝土的动态抗力特性试验与数值模拟方法及其动态破坏机理。

4.1.4 高混凝土面板坝关键技术研究

我国已建成和基本建成的 200m 级面板坝有水布垭、三板溪、洪家渡、天生桥一级等工程，还有紫坪铺、吉林台等 150m 以上的高坝，各有特色，都做过大量和系统的理论分析、试验研究及原型观测，各有值得总结的经验和教训，积累了大量资料和数据，值得认真总结，为建设更高的坝提供参考。国外也有坎普斯诺沃斯、巴拉格兰德、卡拉纽卡等 200m 级面板坝，也有相应的问题和经验教训。

高面板坝的主要问题仍是变形和渗流控制，因过量变形引起混凝土面板的断裂和挤压破坏，导致防渗系统失效而大量渗水，危及大坝安全的事故是首先要考虑的问题。需要从干缩断裂力学、温度断裂力学，以及大坝的应力应变的分析模式和施工程序等做深入研究，同时柔性面板的研究工作也是今后的研究方向。

目前对混凝土面板的尺寸、分缝、配筋等都是经验性的，需要做深入的试验研究和设计计算。对单层钢筋放在混凝土面板中部、混凝土面板分段浇筑而仅设水平施工缝、面板厚度及配筋率可进一步减小等传统做法有很多质疑。对面板混凝土的耐久性也研究得不够，在面板上做一层防渗、防裂、保温涂料以提高其耐久性的有效性和经济性是值得研究的途径。

4.1.5 水利水电工程新材料研究

材料是结构抗力的关键。采用性能优良的材料，不仅有助于保证结构的安全，还有利于缩短建设工期、降低工程投资。不同坝址、不同坝型和不同的坝体应力状态，对材料的要求也不尽相同。

除积极研究采用新型水泥、钢材和高分子有机材料外，水利水电新材料工程关键技术研究的课题主要有：①新型混凝土材料及其性能研究；②新型抗冲耐磨材料的开发和应用；③

筑坝材料的耐久性性能研究，包括流变、蠕变特性及长期强度特性；④贫胶凝材料、胶凝砂砾石或堆石混凝土等新型筑坝材料的开发；⑤新型高效灌浆材料、高性能混凝土外加剂等其它材料研究。

4.1.6 大坝数字仿真技术研究

计算机仿真技术应用于水电工程施工近 30 年，最早于 70 年代初，修建奥地利施立格混凝土坝时采用了确定性数字模拟技术对缆机浇筑混凝土方案进行优选，实践表明，模拟的浇筑速度和进程与实际施工情况非常吻和。80 年代初，我国首先在二滩工程大坝施工组织设计中采用该技术，进行了类似的研究，效果较好。此后越来越多的水电工程开始应用，应用范围从辅助施工组织设计扩展到结构设计、三维动态显示等；从仿真单一的混凝土坝浇筑到仿真土石坝施工、截流施工、地下工程施工等；应用目标从静态的方案优选发展到动态的实时控制等；从最初把仿真成果仅仅作为一种不重要的决策参考，逐渐发展成水电工程、尤其是大型水电工程规划、设计和施工管理中不可缺少的技术手段。如水口水电站大坝施工采用了计算机仿真实时控制技术；三峡工程二期混凝土大坝浇筑已开发了功能强大的计算机仿真系统，可以快速评价承包商提交的施工总进度计划，能够对技术措施进行定量分析，快速比较多种浇筑方案，对混凝土施工进行各种因素的敏感性分析，对工程进度进行实时控制，还可对浇筑过程进行三维动态显示等。另外，三峡工程大江截流及二期围堰工程施工过程的仿真研究，基于可视化技术及计算机图形、图像技术、多媒体技术等，将大江截流、二期围堰填筑施工全过程以二维动态方式生动逼真地展示了出来。目前该研究已扩展到对整个三峡工程施工全过程的三维动态显示。

除此之外，从结构应力分析的角度出发，大坝施工过程应力场、温度场计算机仿真研究也悄然兴起，并在一些工程的设计阶段得到应用，效果很好，如大连理工大学开发的沙牌高碾压混凝土拱坝施工过程计算机仿真系统。可以预计，将施工过程的应力仿真和施工措施仿真相结合同时辅以三维动态显示技术的日子即将来临，这必然为计算机仿真技术在水电工程施工中的应用开辟了更广阔的空间。

计算机仿真技术在水电工程施工中得到了比较成功的应用，收到了较好的经济效益，并逐渐流行为一种趋势。目前，该技术在设计阶段的方案优选方面应用效果较为理想，但在施工期间的实时控制方面，应用效果则不尽如人意。究其原因，“瓶颈”主要是现场实时数据的收集、整理、应用存在较大的困难，仿真中对辅助作业考虑的欠缺，限制了仿真系统充分发挥这方面的功能。对于混凝土高坝要解决如下课题：首先是温控防裂技术上的突破，包括大坝混凝土危害性裂缝预防处理和安全性评价；坝基或坝肩不良地质构造的可靠处理技术和

安全评价；以及坝身泄洪消能区安全防护技术和对坝体及两岸边坡的安全影响评价。对于高土石坝首先是坝体新型防渗结构的研究和长期运行安全性评价；坝基处理技术和渗透稳定以及地震工况下的震动液化等问题。建立一套大坝建设、运行、维护、退役的全寿命安全系列技术标准。应开发一套完整的大坝数字仿真技术，包括计算分析、可视化技术、隐患探测技术和自动化大坝安全监测和决策反馈系统，掌握大坝全寿命周期的形态，确保大坝可靠运行，延长大坝正常工作年限。

4.2 大坝基础处理技术

虽然我国坝工基础技术的水平有了很大的提高，但在基础理论、施工机械化、工艺方法、快速施工、高性能材料、检测手段等方面与国际先进水平还有差距，还应加强研究。

4.2.1 基础理论研究

与其它工程技术比较起来，地基与基础工程理论上不够成熟、不够完善，或不实用，在很大程度上处于经验和半经验状态，属于一种技艺。因此，加强理论研究，将工程地质条件、水文地质分析与基础处理工程耦合进行系统综合分析和研究，并争取在地基与基础工程理论上取得实用性成果，仍然是一项长期的任务。

4.2.2 施工机械化研究

与发达国家比较起来，我们的施工的机械化和自动化程度整体上仍然落后，大型基础工程设备的生产能力落后。一些施工方法或其中的工序仍然属于笨重体力劳动。今后应当大力研制开发先进的地基处理和基础工程机械，提高施工的机械化和自动化水平。

4.2.3 施工新工艺研究

大多数地基与基础工程施工技术的生产效率仍然低于发达国家，单位工程产品的能源和材料消耗高于发达国家。今后要努力开发新的工艺方法，降低物耗，提高劳动效率。

4.2.4 化学灌浆技术研究

我国化学灌浆技术近期应用在前 50 年的基础上更具活力的继续向前发展，而无公害、耐久性好、环保性能好、适应工程各种苛刻要求且价格低廉的化学灌浆浆材的开发、应用和推广；化学灌浆技术的研究、改进和提高；化学灌浆设备、仪器生产的定型化、系列化、成套化、标准化和环保化及产品质量的持续改进和提高必然是其发展的方向。无论是灌浆工程、混凝土防渗或预应力锚固工程，在复杂水文地质条件下，材料和结构的长期运用性能和使用寿命都缺乏系统研究，要加大研究力度。

4.2.5 监测和检测新技术研究

虽然我国完成了许多非常出色的工程，但由于施工原因导致的工程质量事故也时有发生。检测技术有了长足的进步，但仍然不能满足工程建设的需要，改善监测和检验手段，努力提高工程质量，是十分重要的任务。边坡及基础加固锚杆锚索耐久性及长期使用的安全性能评估还有待于进一步研究。

4.3 高坝泄洪消能技术

我国目前正处于水电建设高峰期，高坝泄洪消能技术研究具有广泛的技术需求和良好的发展前景，围绕一系列的高坝建设，还有大量的研究工作要做，也必将进一步促进高坝泄洪消能技术的进一步发展。在今后的研究工作中，需重视并关注如下问题：

4.3.1 高坝泄洪消能技术的基础性理论研究亟待加强

从发展历史与现状看，高坝泄洪消能仍然是一门实践性很强的应用性学科，其研究方法目前仍以试验研究为主要技术手段，在解决实际工程问题时，往往需要与已建工程成败的经验教训与研究者的经验积累紧密结合。尽管如此，同其它学科一样，基础理论方面的研究依然十分重要。而目前的情况是，大量研究工作往往受限于研究周期与经费，只能立足于解决具体工程的生产实际问题，而缺乏系统而深入的总结归纳与理论分析，致使该学科的基础理论研究相对比较薄弱，且进展缓慢，如高速水流水气两相流理论、空化空蚀理论、岩石冲刷理论、高速水流数值模拟计算理论等在近 20～30 年内国内外都未能取得突破性进展。应当认识到，理论研究与发展的不足，制约了学科的进一步发展。对此应给予高度重视并加大研究力度。

4.3.2 若干重大关键技术急待突破

高水头大流量泄流建筑物新型消能工和消能防冲安全技术研究；高水头大流量泄洪洞掺气减蚀、特别是掺气设施对侧墙的保护措施新技术研究；泄洪雾化影响预测方法及防护措施研究；泄流结构流激振动及灾变过程监测系统研究；基于泄流激励的结构模态参数识别方法和泄流结构的损伤诊断和分级预警方法研究等。

4.3.3 需要尽快自主开发高速水流数值模拟计算的高水准原创性计算软件

我国学者目前在水工水力学研究中普遍采用国外的 Fluent、StarCD、Mike 等通用性大型商业软件，但上述计算软件，在解决与高速水流有关的工程水力学问题时仍存在不少困难，难以解决复杂的工程实际难题，为此需要尽快开发研制出适应高速水流特性的专门计算软件。

4.3.4 要重视对高坝建设中环境制约因素的研究

当前我国的水电开发已进入生态环境制约的发展阶段，在不断获取建坝效益的同时，人们对大坝建设的环境影响问题日益关注。因此，必须重视大坝建设中的环境影响问题，并积极寻求减免其不利影响的工程措施与非工程措施。仅工程措施而言，与高坝泄洪消能研究相关的包括低雾化泄洪消能技术、泄洪雾化预测、鱼道水力学、分层取水水力学等。

4.3.5 需关注枢纽安全运行和科学管理问题

在不远的将来，随着我国一大批巨型水电站的不断建成与投产，大坝安全运行与科学管理问题将会日益受到各方面的高度关注。我国已建的一些高坝工程，虽然其规模与技术难度与目前在建中的大型工程相比尚有一定差距，但有的已出现这样或那样的破坏，从抗御风险、确保工程安全的角度出发，应高度重视对巨型水电工程泄洪安全与运行调度方式等的深入研究，包括建立泄洪安全的评价指标体系与分析方法，进一步完善泄水建筑物的水力学安全监测技术等。

4.4 高边坡处理技术

水利水电工程中经常遇到高边坡稳定问题，高边坡稳定不仅会影响工程的建设投资和安全运行，有时候甚至直接决定着工程修建的可行性。我国曾有几十个水利水电工程在施工中发生过边坡失稳问题，如天生桥二级水电站厂区高边坡、漫湾水电站左岸坝肩高边坡、龙羊峡水电站下游虎山坡边坡等。这些边坡的治理不但增加了工程投资，还拖延了工期，有的边坡工程甚至已经成为制约工程进度和成败的关键。

我国在建和将建的一批大型骨干水电站，如龙滩、小湾、拉西瓦、锦屏等工程都存在着严重的高陡边坡稳定问题。因此，加快水利水电高边坡工程的科研步伐，积极推进高边坡工程勘测、设计、施工、监测技术的发展，已经成为水利水电科研攻关的重大课题。在今后的研究工作中，需重视并关注如下问题：

4.4.1 复杂地质条件下岩体工程特性及评价方法

工程岩体表现为由岩块和节理、裂隙、断层等不连续结构面共同组成地质结构体，具有非均质、不连续性、各向异性等特征，岩体宏观力学特性的研究就是对一定范围和尺度的岩体在一定的荷载作用下力学性质的研究，是岩石力学最基本、也是最困难的研究课题之一。

(1) 复杂地质条件下岩体变形、强度及流变特性试验方法与技术。西部地区工程具有地质结构复杂、高地应力、坡高边陡、开挖规模大等特征，岩体力学特性不仅受地质结构影响，还受到应力状态及路径的影响，表现出显著的尺寸效应、地质结构效应和应力状态效应，已

有的试验方法在获取与表征其力学特性与效应特征方面存在诸多难点，因此，作为工程建设的关键技术，复杂地质条件、多荷载作用及应力路径下岩体变形、强度及流变特性试验方法与技术有待加强与发展。

(2) 复杂条件下工程岩体渗流特性测试及分析技术。由于地质结构的复杂性，使得岩体的渗透特性在空间上表现为强烈的各向异性，在高地应力区与应力状态呈明显的耦合特征；目前尚未形成成熟的方法与技术，测试资料相对较少，岩体渗流特性的认识评价与工程建设的要求差距较大。

(3) 复杂条件下地应力测试技术及应力场反演。由于西部地区地形地貌复杂，河谷下切剧烈，导致地应力量值高、变化大、分布规律复杂、地下洞室群的埋深大，所要求的地应力测深和精度均高于目前的方法与技术；而如何合理布置测点，采用合理的数学模型与反演分析方法正确表达地应力场分布规律也是目前工程界所关注的问题。

(4) 复杂地质条件和高地应力区高陡边坡开挖卸荷岩体分区方法及利用标准。深切河谷所形成的卸荷岩体是西部地区的独特地质现象，河谷下切以及坝基开挖，引起边坡卸荷、岩体结构松弛，力学性质劣化，破坏了岩体的完整性，降低了岩体质量。但由于岩体卸荷问题和地质条件的复杂性，目前对边坡卸荷带的划分仍然存在很多的不确定性和局限性，难点在于如何采用行之有效的方法对数百米甚至上千米的高陡边坡进行卸荷岩体分区。另一方面，坝基开挖将带来岩体松弛和高边坡稳定等一系列问题，需要尽可能地减少坡脚开挖，以减少边坡治理和加固工程量。卸荷岩体利用标准直接决定建基面的选择和优化，关系到坝基开挖工程量以及施工期和运行期安全。

(5)高边坡岩石力学智能反馈分析方法及工程应用研究。包括考虑开挖损伤弱化岩石力学参数反演方法；考虑开挖引起岩石损伤弱化累积的动态智能反演分析与预测方法与灾害调控的综合集成智能系统。

因此，岩体力学赋存环境识别与力学特性评价既要考虑到河谷下切和开挖所形成的卸荷裂隙岩体，又要考虑到高地应力作用下的深部岩体。而业已形成的岩体力学赋存环境识别与力学特性评价方法尚难于反映裂隙岩体的卸荷特征和高地应力条件下的力学特性，急需发展相应的识别与评价方法。

4.4.2 复杂条件高陡边坡岩体失稳机制与稳定性分析方法

(1) 地震动力过程对高陡边坡岩体影响规律及分析方法

岩质高边坡的地震稳定性与边坡所遭受的地震动特性密切相关，因此研究地震动输入问题是强震区高边坡地震安全性评价的前提和基础。对于边坡输入地震动的影响研究多集中在

垂直入射上，国外学者曾研究过斜入射对斜坡地震反应的影响，但没有明确给出对边坡地震稳定性的影响。地震动输入的问题是工程抗震领域的前沿课题。这方面的研究刚刚开始，有许多问题有待深入解决。高边坡动力分析的地震输入机制，包括近场强地面运动的特征、近场地面运动衰减关系以及近场强地面运动估计方法等都有待深入研究。

传统的拟静力法不能完全反应地震作用下的边坡失稳机理。鉴于传统拟静力法的局限性，一些学者提出边坡的地震稳定性应采用位移而不是用安全系数来评价的重要观点。在采用传统的极限平衡法进行 Newmark 动力稳定分析时仅考虑静力平衡，而不能考虑变形协调。这是一个尚未解决的难题，尽管采用极限分析上限法可以解决 Newmark 动力分析法所面临的困难，但目前的研究成果还限于二维边坡。

边坡地震动力数值分析方法的理论尚不完善，如何考虑地震作用下岩质边坡中的断层和软弱夹层的刚度随应力的变化以及节理裂隙扩展引起的强度参数变化；如何考虑地震作用下岩质边坡中的结构面反复开合和滑移所引起的渗流参数和渗流场的改变及其对边坡抗震稳定性的影响；如何考虑预应力锚索和锚杆等主要支护措施进行地震反应分析等，是高边坡抗震稳定性分析的难点。

(2) 强降雨和泄洪雨雾对复杂地质高陡边坡岩体渗流影响规律及分析方法

大量边坡变形失稳实例表明，强降雨产生的渗透力以及渗流过程中发生的水岩耦合作用是导致滑坡最直接的因素。但在强降雨和泄洪雨雾对复杂地质高陡边坡岩体渗流影响研究方面，有关边坡岩体饱和/非饱和渗流机理、饱和/非饱和水力耦合机理、以及水岩耦合作用下岩体和结构面强度参数的演化特征等关键问题尚未得到解决。尤其在水岩耦合方面，过去对单裂隙在简单应力条件下的渗透特性研究比较多，对裂隙岩体在复杂应力作用下的耦合机理研究很少；在低水头作用下渗流与应力耦合的研究较多，在大梯度高水压作用下裂隙岩体渗透特性研究得很少。

考虑强降雨和泄洪雨雾条件的复杂地质高陡边坡岩体渗流分析方法主要有等效连续介质的方法和不连续介质方法。但对于渗流特殊边界的处理，如降雨入渗边界、排水孔(群)、排水洞、防渗帷幕等数值模拟，虽有较多研究，但总体上，模拟的精度较低。考虑水岩耦合的渗流分析的难点在于如何客观地描述水岩耦合作用效应，相应的耦合算法和数值计算格式还很不完善。基于不连续节理岩体的渗流场及水岩耦合渗流分析方法研究才刚刚起步，离实际工程应用有相当的差距。

因此，如何建立描述强降雨和泄洪雾化雨入渗机理的渗流模型、如何建立反映水岩耦合作用的耦合模型、如何建立基于上述模型的、能反映边坡岩体结构特征和工程渗流控制措施

的高精度的渗流数值分析方法是关键技术难点。

(3) 高陡边坡开挖卸荷损伤演化规律与分析方法

水电工程高边坡在坝基和坝肩开挖过程中经受强烈工程改造作用。开挖过程中边坡岩体一方面经受爆破动力作用产生动力损伤；另一方面开挖改变边坡边界条件，岩体产生卸荷回弹，边坡应力场重分布。两者迭加作用形成开挖扰动区，从坡面向坡内形成应力和变形壳状结构特征。尤其在开挖扰动区范围内，卸荷裂隙大量发育甚至出现深裂缝，从而使岩体物理力学性质显著弱化。开挖扰动区及其特征是控制边坡岩体变形和稳定性的重要因素。因此，边坡岩体的动力损伤、卸荷回弹机理以及开挖扰动区的特征是施工期高陡边坡稳定性分析的关键所在。然而，开挖扰动区 及其特征不仅与开挖方式、开挖顺序、爆破动力作用等施工因素有关，而且与边坡地质条件和赋存环境，如边坡岩体结构、高地应力、地下水渗流等密切相关。目前，对上述问题的研究还很不深入。

如何确定开挖扰动区岩体动态强度、本构模型以及爆破损伤特性、进行边坡开挖的静力与动力耦合分析、建立边坡开挖加固全过程的数值仿真系统是高陡边坡开挖爆破计算分析的难点

(4) 高陡边坡岩体多场耦合与变形破坏机理

边坡岩体的物理力学性质既受地质环境的影响，又受工程作用的改造，而且二者是相互作用和相互影响的。大规模开挖卸荷、大幅度库水变化等工程作用改变岩体的边界条件、受力状态以及赋存环境，导致岩体发生变形或破坏；而锚固、防渗等工程措施可在一定程度上改善岩体的渗流及力学特性。在工程作用过程中，岩体的渗透特性、力学特性都将发生变化，而这种变化反过来又将进一步改变岩体的赋存环境和变形状态。因此，边坡岩体中存在多场耦合作用。其中，边坡岩体的工程作用、渗流与应力之间的耦合对边坡变形破坏的影响最为显著。

边坡岩体多场耦合与变形破坏机理，虽然目前都有研究，但尚未形成完整的方法体系，需要进行在理论模型创新和分析技术的突破。

(5) 高陡边坡稳定性分析与评价方法

纵观边坡稳定性分析方法，极限平衡和极限分析方法仍然是主流分析方法，基于连续介质力学理论的应力应变分析方法日益受到重视，基于非连续介质力学理论的边坡稳定分析方法已成为有益补充。在极限平衡和极限分析方法中，三维分析方法具有严格的理论基础，也更实用，但基于相关联流动法则的极限分析方法要求材料在破坏时按摩擦角剪胀。当材料的摩擦角较大时，这种假定不仅与实际情况出入较大，而且还会导致速度多边形难以闭合、计

算稳定性差。因而限制了这一方法在岩质边坡的推广和使用。基于相关联流动法则的三维极限分析的另一个技术难题是求解多自由度安全系数极小值的问题。

为了与传统极限平衡方法的安全系数挂钩，基于连续介质的有限元方法正尝试用强度折减技术来求解边坡稳定的安全系数，并取得了有益的成果，但该方法在强度折减中存在诸多理论和技术难点，离实际工程应用还有较大差距。由于不连续介质力学可以考虑裂隙岩体的不连续性，近年来许多学者致力于这方面的研究。如离散元、界面元、DDA、流形元等方法为研究岩质高边坡变形和稳定性提供了分析手段，但针对复杂的具体高陡边坡问题，这些方法有时还无能为力。

4.4.3 复杂地质岩体开挖工程爆破技术与安全控制标准研究

(1) 高地应力条件下柱状节理岩体的爆破破碎与损伤特性

岩石爆破的破碎和损伤机理非常复杂，涉及到爆炸冲击波和爆生高温高压气体的联合作用、岩石的动力特性与强度、岩体的结构特征及地形地貌特征等多方面因素。待建的白鹤滩水电站，岩体节理裂隙发育，把握此类节理岩体的动态强度、本构模型以及爆破破碎与损伤特性，是岩石高陡边坡和大型地下洞室群开挖爆破设计与安全控制的前提。然而，由于实验设备、实验手段的局限性以及爆破动力学问题本身的复杂性，相关研究工作还仅仅处于起步阶段，目前主要集中在实验研究以及基于实验结果的唯象性分析方面。

基于岩石内部固有的微裂纹在动载荷作用下的扩展聚合特性分析，研究岩石动态强度准则和变形模型，确定爆破荷载作用下岩体损伤特性，建立爆破损伤判据，是本课题设法重点解决的技术难题之一。

(2) 复杂地质条件下精确毫秒级时差控制爆破的减震机理

在给定爆破规模条件下，采用毫秒级精确时差控制爆破，由于段间延迟时间精度的提高以及一次起爆段数的增大，炮孔空间展布(实质是爆心距不同)引起的振动叠加问题将更加复杂，有可能导致基于传统的爆破振动措施与手段的失效。因此，我们尚需深入研究毫秒级精确时差控制爆破系统的减震机理。

(3) 与毫秒级高精度时差控制爆破技术相适应的高陡边坡与地下洞室群爆破安全控制标准

针对传统爆破开挖技术下岩石高边坡和地下洞室群的爆破安全控制标准，国内外开展了深入系统的研究工作，已积累了较丰富的工程实践经验。但是针对毫秒级高精度时差控制爆破下的复杂地质条件下高陡边坡与地下洞室群的爆破安全控制标准，国外积累的资料并不多，国内此方面几乎是空白。

国内外的爆破振动安全控制一般采用与振动频率和持续时间无关的质点峰值振动速度指标，并由此推算允许的最大单响药量。在毫秒级高精度时差控制爆破条件下，大规模岩石开挖诱发的爆破振动特性(包括幅频构成、能量分布及持续时间等)与传统爆破技术条件有显著不同，因此必然带来高陡边坡岩体和大型地下洞室围岩爆破振动响应及破坏、损伤特性的差异，需要对现有爆破振动控制标准的合理性及实用性作进一步的评估与论证，建立与毫秒级高精度时差控制爆破技术相适应的高陡边坡与地下洞室群爆破安全控制标准。

4.4.4 复杂地质条件岩体开挖工程加固综合方法与锚固安全控制标准

(1) 预应力锚索长期耐久性研究

在锚固工程实践中，由于错误的设计、低劣的施工，以及在恶劣环境下长期使用，使材料的性能劣化，或因使用条件的变化，都会引起预应力锚固体系的病害或失效等问题。正确评价锚固工程的安全性，对于统一工程验收标准，促进工程质量的提高，及时发现加固存在隐患的工程，都是迫切需要研究和解决的重要问题。

(2) 抗滑桩机械化施工的配套工艺体系

抗滑桩机械化施工的首要问题是成孔工艺。水电工程中的高边坡往往处于地形条件复杂的深沟及峡谷中，成孔(槽)设备及配套能源供应设备到达工作面的难度一般偏大。解决施工设备轻型化问题将是本体系的关键。采用抗滑桩加固治理边坡时，抗滑桩桩体是承担边坡稳定的主要承力体。因此，抗滑桩自身的刚度就显得尤为重要。抗滑桩自身的刚度除取决于桩体大小外，还与桩体混凝土及钢筋布排方式密切相关。如何确保在无振捣情况下混凝土自密实及钢筋笼所附加的强度也是抗滑桩应用中的重要问题。

4.4.5 高陡边坡安全监测技术与预警方法

(1) 复杂条件下高陡边坡监测新技术研究和工程应用

研究采用复杂条件下高陡边坡监测新技术——GPS 一机多天线新方法、InSAR 和 GPS 集成方法来建立高边坡远程自动化形变监测系统，以提高系统的可靠性，克服常规方法的缺点，降低安全监测系统的成本。

(2) 高陡边坡岩体锚固安全监测分析和安全评价方法研究

锚固作为一个重要的岩体加固施工已被广泛地应用于边坡施工开挖与支护中。采用数值模拟等方法开展锚固安全评价方法的研究，有着重要的理论意义与工程应用价值。同时也构成了大型水电工程重要的技术难点和研究方向。

(3) 基于安全监测的适时分析、反馈及预警方法体系研究

随着岩土工程中安全监测手段的硬件和软件迅速发展，监测范围不断扩大，监测自动化

系统、监测数据信息管理系统、安全预警系统技术也在不断发展。安全监测在边坡工程中的应用主要体现在监控工程施工期和运行期的安全，检验已实施的工程措施的效果，为工程实践积累经验。国内监测评价体系、健康诊断、预警准则和方法体系的研究起步较晚，尚未形成完善的理论方法技术体系。安全监控与预警体系的建立，对边坡安全、分析评价及研究成果的验证意义重大，是今后发展和提高的方向。

4.5 地下工程技术

我国的地下工程技术虽然取得了长足的进步，但在基础理论研究、技术创新、新型材料研发等方面仍存在不少差距。

4.5.1 基础理论

目前岩土工程科学中普遍采用的三维非线性有限元分析，预测大型地下厂房的塑性区、破损区，与实际开挖和运行过程的监测成果仍有较大差异。应根据监测资料进行反演分析，修正计算假定和数学模型，提高数值分析的精度，据以指导支护设计。岩爆机理研究工作以试验和监测为手段，主要包括室内岩石力学性质试验和现场微震、声发射和钻孔摄像等监测，从岩石力学性质、破坏细观或微观特征以及现场开挖过程中围岩破裂演化机制等来研究岩爆发生内在机制和控制条件。但是限于试验手段、试验设备和理论模型的局限性，尚未取得满意的结果。现有的水道设计理论和规范，尚停留在 20 年前的水平，未能充分利用围岩的承载能力，致使混凝土衬砌厚度和钢筋用量偏大，与实际受力状况差别大，急需加以改进和提高。

4.5.2 技术创新

地应力对地下工程的洞室稳定影响很大。目前普遍采用的地应力测量和分析方法无论是量值还是方向，误差较大，相应制订的对策措施有一定的盲目性。常规的地质勘探目前精度不高，综合运用工程物探技术，开展相应的理论和分析方法研究，提高物探地质预报的准确性，对降低地质灾害风险、提高施工安全、加快施工进度，意义重大。岩爆防治技术、大流量高水压突水防治技术及不良地质体塌方防治技术尚未得到有效解决。如锦屏二级水电站引水隧洞，无论从理论上还是从实践上，都未找到满意的根治办法。不良地质体的塌方预警预报和治理技术也尚需提高。现行的地下工程安全监测，都是在开挖过程中埋设应力、变形、渗流、渗压等监测仪器，定期采集数据，提供相关信息，评价地下结构工作性态，或采取相应措施。2004 年，葛修润院士倡导，在小湾水电站地下厂房开挖中，采用计算机信息技术和数码摄像监测技术，可动态演示地下厂房岩壁变形情况。虽然此项新技术尚存在缺陷，但应继续深化研究。

4.5.3 新材料研发

新奥法理论的核心理念是开挖过程中应适时进行喷锚支护，控制围岩有害变形，充分发挥围岩承载力。但对于断层破碎带等Ⅴ类围岩，自稳时间短，普通锚杆造孔难；对于一些涌水量大的围岩，现有的喷混凝土不能很快凝固封闭围岩。需研发新型喷混凝土材料和新型锚杆，以适应复杂的工程地质和水文地质条件。研究性能更好的化学维纤维掺入喷混凝土中，替代挂网喷混凝土作永久支护。对于现在常用的预应力锚索，也应研究其使用寿命和防腐技术。作为炸药发明的中国，爆破器材的品种和性能已落后于发达国家。国外早就有预裂爆破和光面爆破的专用药卷，我国始终停留在把常规药卷绑扎在竹片上。国外的数码电子雷管，起爆精确、安全可靠，我国的差距较大。

5 结语

根据国家经济社会发展规划，我国水利水电工程建设将进入一个新的快速发展期，正在和将要建设一大批世界级的规模宏大、技术水平世界领先的水电站。这些水电站多具有坝高库大、地形地质条件复杂、地震烈度高、泄洪流量大以及装机规模大、大多为地下电站等特点，我国水利水电工程建设必将迎来新的机遇和挑战。

在水利水电工程建设的规划、设计、施工、运行全过程中，应在保护环境、维护健康河流前提下做好规划；应采用更有效的理论、数值分析方法、测试技术、先进原型监测和仿真分析技术做好设计；采用新工艺、新材料、新技术和精细化管理，提升高效快速安全施工技术；进一步完善水利水电工程长期安全可靠运行标准评定体系。只有立足于自主创新，攻克一系列重大的科学技术难题，基于流域健康可持续发展的理念，着力推动水利水电工程建设的科技进步，才有望实现宏伟的战略目标。

参考文献

[1] 《我国大坝技术发展水平与工程实例》编委会. 我国大坝技术发展水平与工程实例. 北京：我国水利水电出版社，2007

[2] 邴凤山，何景.20 世纪我国水电建设的坝工技术成就[A].水电能源科学，2002，20（4）：1-3

[3] 贾金生，蒋国澄，姜福田，郝巨涛. 坝程技术的国际交流与开发[A].水力发电，2004， 30（12）：95-98

[4] 张宗亮. 超高堆石大坝工程程设计与技术创新[A].岩土工程学报.2007，29（8）：1184-1193

[5] 朱晟，闻世强. 当代沥青混凝土心墙坝的进展[A].人民长江，2004，35（9）：9-11

[6] 孔令兵，李新. 高坝工程技术研究[A].水利水电技术，2001，32（11）：9-13

[7] 柴军瑞，刘浩吾. 高拱坝研究新进展[A].水利水电科技进展，2001，21（6）：1-4

[8] 国外混凝土面板堆石坝建设进展[A].水力水电快报，2007，28（3）：17-21

[9] 巴亚尔多•马特龙. 混凝土面板堆石坝的最新进展[A]. 水利水电快报，2003，24（2）：1-3

[10] 郭军. 减少工程投资缩短工期的大坝设计和施工技术[A].我国水利水电科学研究院学报，2006，4（3）：213-219
[11] 碾压混凝土坝筑坝技术专业委员会. 碾压混凝土坝筑坝技术[A].水利工程建设，2004，26-27
[12] 刘数华，方坤河，何林. 碾压混凝土坝筑坝及材料新进展[B].南水北调与水利科技，2004，2（5）：52-53
[13] 张宗亮，赵亚明，刘强，杨建敏. 堆石坝工程设计实践与技术创新[A].水力发电，2006，32（11）：42-44
[14] 谭靖夷. 我国坝工技术的发展[A].水力发电，2004，30（12）60-63
[15] 水工结构专业委员会. 我国高坝建设进展[B].水利工程建设，2004（8）：48-50
[16] 梅锦煜，郑桂斌. 我国碾压混凝土筑坝技术的新进展[A].水力发电，2005，31（6）：54-56
[17] 朱晟，徐胜. 现代混凝土面板堆石坝的进展[A].水利水电科技进展，1999，2
[18] 蒋国澄，赵增凯.我国混凝土面板堆石坝的近期进展[B].贵州水力发电，2004，18（5）：1-4
[19] 王柏乐，刘瑛珍，吴鹤鹤.我国土石坝工程建设新进展[A].水力发电，2005，31（1）：63-65
[20] 北美水电与大坝工程建设进展情况[A].水力水电快报，2005，26（4）：4-9
[21] 我国水力发电工程学会.我国水力发电论文集 2008. 北京：我国电力出版社，2008
[22] 中国水力发电工程学会. 改革开发 30 年我国水电科技进步成就综述. 水力发电，2008，
[23] 朱伯芳，张超然主编，高拱坝结构安全关键技术研究，中国水利水电出版社，2010
[24] 潘家铮、何璟主编，中国大坝五十年，中国水利水电出版社，2000 年.
[25] 彭程主编，21 世纪中国水电工程，中国水利水电出版社，2006 年.
[26] 贾金生 等，2005 年中国与世界大坝建设情况，中国大坝委员会网页.
[27] 刘宁等主编，当代水利科技前沿，中国水利水电出版社，2006 年.
[28] 倪汉根，高效消能工，大连理工大学出版社，2000 年.
[29] 刘士和，高速水流，科学出版社，2005 年.
[30] 许唯临 等，高坝泄洪消能研究//曹楚生、谢士楞，新世纪水利工程科技前言，天津大学出版社，2006 年.
[31] 童显武，中国水工水力学发展综述(1)、(2)水力发电，2004,30(1) (2)
[32] 高季章 郭军，高坝泄洪消能技术的发展水平，中国大坝技术发展与工程实例，中国水利水电出版社，2007。
[33] 周建平，杨泽艳，陈观福。我国高坝建设的现状和面临的挑战。水利学报，37（12）：1433-1439,2006,12
[34] 陶忠平。水利水电工程建设中不良地基基础处理方法研究。水利水电技术，38（12）：27-30,2007
[35] 郑守仁，刘宁，三峡工程大坝建基岩面开挖轮廓设计及实践。人民长江，31（6）：1-3，2006,6。
[36] 张东升，张宏先，李立刚。小浪底水利枢纽坝基防渗与基础处理技术创新。黄河水利职业技术学院学报，15（1）：7-10，2003,1。
[37] 王裕湘，鲁布革水电站地下厂房岩壁吊车梁设计，水力发电，1988(12)；
[38]]马洪琪，广蓄电站地下厂房开挖及岩锚吊车梁施工，水利水电施工，1993(4)；
[39] 关雷、夏松雨，广蓄电站斜井混凝土衬砌滑模施工技术，水力发电，1993(7)；
[40] 熊训邦等，XHM-7 型斜井滑模系统的研制与应用，水力发电，1998(8)；
[41] 钱兴喜，永久船闸地下输水系统模板工程简介，云南水电，2002(4)；
[42] 马洪琪，我国水电站地下工程施工技术回顾与展望，水力发电，2006(2)；
[43] 楼加丁，聚焦电法（BEAM）在隧道超前预报中的研究初探，工程物探， 2009（总第 106 期）；
[44] 马洪琪、周宇、和孙文，中国水利水电地下工程施工，中国水利电力出版社，2010；
[45] 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院，雅砻江锦屏二级水电站引水隧洞围岩稳定性与支护衬砌结构设计研究综合报告，2010 年 10 月

3.7　高坝大库的防止地震灾变技术

1、前言

1.1 研究的指导思想

认清当前我国高坝建设“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震安全问题及其一旦发生严重灾变“不堪设想”的次生灾害后果；认真面对高坝建设中抗震科技支撑赶不上工程发展规模和速度需求的严峻挑战，加强工程抗震的风险意识，紧密结合我国国情和工程实际，突出重点，在现有进展基础上，深化研究，确保高坝工程的抗震安全。

1.2 研究中的战略重点

防止遭遇超出设计预计的最大可能的极端地震时，发生库水失控下泄、导致严重次生灾害的“溃坝”灾变。

1.3 研究的技术思路

（1） 坚持对高坝工程抗震安全的评估必须建立在综合分析坝址地震动输入、坝体-地基-库水整个系统的地震响应及坝体和地基材料动态特性和抗力这三个相互配套不可或缺因素基础上的基本理念；

（2）以与时俱进和求实精神，突破不能反映实际的传统方法和途径，敢于不断探索。

1.4 研究的主要内容

（1） 合理确定最大可信地震及其相应的地震动参数；

（2） 基于更切合实际的材料性能试验和分析模型，深入研究各类坝体损伤破坏过程及溃决机理，确定表征溃坝的指标体系及其设计可操作的定量判别准则。

1.5 研究的技术途径

（1） 结合实际工程，依托“产、学、研”结合的创新平台；

（2） 加强协作，积极借鉴相关学科成果，充分发挥学科交叉优势；

（3） 在分析计算和试验中，应用高性能并行计算、CT 试验技术等高新技术。

2、高坝大库的防止地震灾变技术研究的战略意义

2.1 水电建设中的高坝大库是我国基础设施建设中的重要组成部分

水和能源是人类社会发展的重要物质基础，直接关系到社会和国民经济的可持续发展、人民物质和精神生活的提高与改善，根据我国国情，也是影响我国经社会发展的重要制约因素。

水是人类生存不可替代的最根本需要，作为基础自然资源和战略性经济资源的水资源是

国家综合国力的组成部分。这方面我国的国情是：人均水资源极为短缺，仅为世界人均占有量的 1/4，在世界银行统计的 153 个国家中排行第 88 位。预测到 2030 年人口增至 16 亿时，人均水资源量仅 1760m^3 少于国际公认的用水紧张国家的标准。而且受季风气候条件影响，时间分布很不均匀，年内汛期洪水径流量约占 2/3，年际变化剧烈，洪旱灾害频发。空间分布也极不均衡，从东南向西北递减，且与土地资源不相匹配。通过水库大坝的水工程建设，尽可能调节利用汛期洪水，对抗旱防洪都有重大战略意义。

能源是经济和社会展最重要的战略资源之一，能源安全为各国所普遍关注，对我国实现全面建设小康社会和迈向基本实现现代化的中长期战略目标有决定性作用，尤其是作为国民但经济的先行和基础产业的电力二次能源更为重要。这方面我国的国情是：经济规模总量大，而能源资源相对贫乏，人均拥有量只相当于世界平均水平一半；特别是以煤电占近 76%的二次能源结构，已日益受到环境和水资源容量的制约而难以持续，虽然在中长期内以煤电为主的能源结构尚难根本改变，但降低其占有量已刻不容缓。我国正加速发展风电、太阳能和生物质能等可再生能源和核能，有广阔前景。但由于其质量特性、经济、技术、资源方面的原因，据有关方面预测，至少在 2030 年前在电源装机中，风电、太阳能、生物质、核能所占比重仅分别为 7.5%、2.0%、1.5%和 7.0%，而包括抽水蓄能在内的水电能源占 22.3%，将仍是减少煤电改善能源结构的主力。我国的水能资源位居世界之首，水电作为可再生清洁能源，是集国土整治、河流开发、防洪抗旱、优化能源结构、地区经济振兴、扶贫、生态改善于一体的可持续工程。高坝大库在调节性能好、装机容量大、综合效益高的水电工程建设中，具有无可替代的重大作用。

当前，随着全球环境意识和可持续发展要求的日益增强，国际社会对高坝大库功能和作用的认识正不断深化。特别在我国，在充分重视移民安置、生态和环境影响的前提下，积极有序的进行水库大坝建设更是切合我国国情和为社会经济发展所急需，已成为我国基础设施建设中不可或缺的重要组成部分。

2.2 震情严峻是我国高坝建设中必须面对的基本国情。

我国大陆处于地壳几大板块的夹持之中，位于世界上两个最活跃的地震带交汇部位，东濒环太平洋地震带西支，西部和西南部是欧亚地震带所经之处，是一个多地震国家。我国大陆属欧亚板块东部，地震具有发生在大陆内部的板内特点。板内地震由于地壳较厚、岩龄较老、强度较高，积聚的能量大而导致地震的强度大，且震源大多在 10-30km 深度内，内陆浅源地震的震害破坏都较重。因此，我国不仅地震区域广阔而分散，大部分国土面积都属地震区，而且地震也频繁而又强烈，是世界上蒙受地震灾害最为严重的国家。而西部地区是我国

主要地震区，地震的强度和发震频度都很高，近代我国 82％的强震，包括最近发生的汶川大地震，都发生在该地区。

我国大江大河的源头和约 80%集中在西部。水能资源集中在西部高山崇岭的陡峻河谷中，其地形地质条件适宜于修建移民淹地相对较少而调节性能好的高坝大库。我国量大面广的众多水坝很多都位于地震区。高 100m 以上的坝，约有 1/3 是在地震区。20 世纪 80 年代起我国在全国规划 12 个大型水电基地，近年来又规划把云南怒江流域中下游划为第 13 个水电基地。这些水电基地规划的大多是沿大江大河干流分布的大型梯级电站。大部分水电基地位于西部强地震区。特别是近年来在西部修建的高坝，其设计地震加速度值都很高，地震往往成为设计中的控制工况。我国西部高坝大库场址所处陡峻河谷，大多和区域性地质构造关联，因而西部水电建设中的高坝大库难以避让高地震区。诸如：我国近期在西部强震区建设一系列高坝中，锦屏一级拱坝最大坝高 305m，设计地震加速度 0.2g；双江口堆石坝最大坝高 314m，设计地震加速度 0.205g；大岗山拱坝最大坝高 210m，设计地震加速度 0.557g；溪洛渡拱坝最大坝高 273m，设计地震加速度 0.32g；二滩拱坝最大坝高 240m，设计地震加速度 0.2g；白鹤滩拱坝最大坝高 275m，设计地震加速度 0.325g；小湾拱坝最大坝高 292m，设计地震加速度 0.31g；糯扎渡堆石坝最大坝高 262m，设计地震加速度 0.28g。所以，震情严峻是我国高坝建设中无可避让而必须面对的又一个基本国情。

2.3 高坝大库地地震灾变的严重次生灾害后果

地震有很大的不确定性，地震预报至今仍为尚待解决的世界性难题，且突发性强，很难预警。高坝大库一旦受灾溃决，溃坝形成的人为洪峰对下游造成的严重次生灾害，远甚于工程本身的经济损失，在经济、社会和政治方面都将导致不堪设想的严重后果。在汶川地震中，为防止仅 2 亿多方库容的唐家山堰塞湖的溃决，曾牵动了中央领导和全国人民的心，更何况几百亿方库容的高坝大库！

因此，我国高坝大库“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震问题及其一旦发生严重灾变引起“不堪设想”的次生灾害后果，这些客观因素凸显了我国西南地区高坝大库防止地震灾变、确保抗震安全的战略重要性。高坝大库防止地震灾变的研究，是关系我国经济社会发展全局的防灾减灾重大工作中的重要内容，也是我国水利水电建设中的一个必须面对和急需解决的前沿性关键技术问题。

3、对我国强震区修建高坝的地震风险评估

3.1 国内外已有大坝震例的启迪

世界不少多地震国家，在地震区都修建有众多大坝。已有一些遭受震害实例，但迄今因

地震溃决的极少，仅限于设计和施工不良的低坝。美国唯一遭受地震后溃决的土坝，是位于加州的高仅 7.63m 的谢菲尔德混凝土面板均质土坝。在 1925 年的圣•巴巴拉 6.3 级地震中，(距震中 11.2km，烈度Ⅷ-Ⅸ度)，由于坝体防渗和排水设计不良，压实较差的坝基地震液化，使坝体中部绕其左端向下游滑出 60m。在日本 6 次重大地震中溃决的小土坝中，仅有 1 座坝高超过 10m。混凝土坝在地震中溃决的，仅有 1999 年台湾 7.3 级的集集大地震中高 21.4m 的石岗重力坝。由于发震的车笼埔断层引发的次断裂通过右侧坝轴线，使该处坝段两侧产生了约 7.8m 的垂直错动，导致该处部分坝段完全毁坏，库水流失。坝基中活断层错断，是目前尚无法抗御和必须避让的“抗断”问题。就“抗震”而言，全球有一些遭受强震震损的百米级混凝土坝，但无一因强震震动而溃决的混凝土坝。对重力坝而言，包括以重力维持稳定的大头坝等在内，比较典型的只有三个坝高超过百米、经受过 6 级以上强震、坝址烈度在Ⅷ度以上并都有显著震害的实例。即：印度的柯依那重力坝坝高 103m、我国的新丰江大坝坝高 105m 和伊朗西菲罗大坝坝高 106m。这些坝的主要震损均在下游折坡附近的坝体断面突变处出现上下游贯穿的裂缝。对拱坝而言，最为典型的震害实例是美国的帕柯依玛(Pacoima)拱坝。该坝建于 1928 年，坝高 113m，坝顶高程 614.58m，是当时美国最高的拱坝。在 1971 年和 1994 年两次遭受震级分别达 6.6 和 6.8 的圣费尔南多和北岭地震。坝基加速度在 0.5g 以上。坝体的主要震害为：坝体与左岸重力墩间垂直径向横缝张开。因下游诃流向左拐弯，左岸坝肩山体两面临空，在重力墩下部 2m-3m 深处岩体沿倾向河床的缓倾角底滑面有滑移。两次地震在相同部位出现类似的损害。我国台湾德基双曲拱坝坝高 181m。在 1999 年 7.3 级的集集地震中，大坝离震中约 60km，在坝顶下游溢流孔底部记录到峰值加速度为 0.87g，估计坝址地面峰值加速度约 0.3g。坝体基本完好。

在我国 2008 年的汶川大地震中，各类大坝总体上经受住了特大地震的考验。震区的众多中小型水坝虽有不同程度可修复的震害,但无一垮坝。近震区 4 个不同类型百米以上高坝,虽经受超设计水准的强震，但均保持了结构整体稳定和挡水功能。其中Ⅸ度区的紫坪铺面板堆石坝(高 158m) 的面板遭受开裂、错位、隆起等震害，但防渗系统基本完好，坝体有震陷，但整体保持稳定。Ⅸ度区的沙牌碾压混凝土拱坝(高 130m) ，坝体和两岸抗力体均完好无损。Ⅷ度区的宝珠寺混凝土重力坝(高 132m)坝体无明显损伤，地基边坡基本正常。Ⅷ度区的碧口心墙堆石坝 (高 101m) ，坝体沉降、下游坡表层滑移，坝体结构仍完好。

综上所述，世界已有震例及汶川地震震情表明：

（1）我国现行抗震规范的设防标准，与国外同类标准相比是较高的，其合理性在汶川地震中得到验证；

（2）按规范进行抗震设计、施工质量良好的大坝，其抗震安全一般能有保障。因此，在我国西部强震区修建高坝大库不仅是必要的，原则上也是有科学依据和可行的。

3.2 300m 级高坝大库的地震风险

尽管国内外已有大坝震例增强了在我国西部强震区修建高坝大库的信心，但也应当看到，300m 级高坝大库工程特有的极端复杂性。每个大坝工程都有其独特的水文泥沙、地形地质、生态环境条件及不同的主要功能要求和社会影响，涉及到多学科的交义。目前，工程设计中的许多技术问题，尚缺乏较深入的理论解答，在相当程度上仍需有赖于工程实践经验。特别是其抗震设计，由于地震动的不确定性和结构动态响应的复杂性，困难更大。目前在大坝抗震设计规范中，对大坝地震响应的分析，大多仍基本沿用基于已有工程实践经验和类比的传统理念和方法，其中有些方法并不能完全反映高坝在强震作用下的实际性态，同时不能解释震害实例。加上遭受过强震的大坝震例，远较房屋建筑和道桥等工程为少，在汶川大地震中经受强震检验的少量高坝，其坝高也都在 160 米以下。而目前我国在西部强地震区建设的一系列具有 300m 级高坝大库工程，对此迄今国内外都既缺乏工程实践的先例，更无遭受震害的实例。160 米以下的高坝与 300 米级的高坝相比，可能存在从量变到质变的本质差异。此外，近期我国处于水电开发高潮，包括规划、设计和科研在内的前期工作不够充分，往往只能依据已有的规范和方法。因此，面临工程提出的前所未遇的前沿性技术难题，在当前科研进展所提供的科技支撑赶不上超大型工程建设发展的规模和速度的现状下，必然存在着一定的震害风险。

3.3 关于“水库地震”的风险

“水库地震”是在我国强震区修建 300m 级高坝大库对环境影响的另一个风险因素。特别在汶川大地震后，水库地震问题，深为国内外所关注。包括对“汶川大地震是否和邻近震中的紫坪铺水库蓄水有关？”甚至“是否和三峡工程蓄水有关？”等疑虑。

3.3.1 发生水库地震的机率

“水库地震”是指由于水库蓄水导致环境物理状态的改变，从而在库区和坝址引发地震的现象。库区系指水库正常蓄水位淹没的范围。

自从 1931 年希腊 60m 高的马拉松(Marathon)大坝水库在 1929 年蓄水后发生一系列地震，以及 1935 年美国米德湖(Lake Mead)高 220m 的胡佛(Hoover)大坝蓄水后发生地震以来，世界上已有 30 多个国家先后报导了 100 多个与水库蓄水有关的事例，但对其中一些事例是否与水库蓄水有关尚存有争议。其中被较普遍确认的不到一半。在最近国际大坝委员会(ICOLD)颁布的公报《水库触发地震－知识概述》中，列出了 39 个水库地震震例。但无论怎样统计，在

全球为数众多的水库中，因水库蓄水引发水库地震的事例所占比率终归是极小的。高坝中的比率虽略高，但被确认的也不多。且在所有的这些震例中，震级达到对工程抗震有意义的 5 级以上的，为数更少。迄今震级超过 6 级的，仅有 4 例，即印度 103m 高的柯依那(Koyna)大坝(M=6.5)、希腊 120m 高的克雷玛斯特(Kremasta)大坝(M=6.3)、我国高 105m 的新丰江大坝(M=6.1)和赞比亚边境高 122m 的卡里巴(Kariba)大坝(M=6.0)[2]。最高震级在 6.5 级以下。

所以，迄今全球水库蓄水引发水库地震震例占水库总数的比例是极小的，并非修建高坝大库就一定会引发水库地震。

3.3.2 水库地震的成因分类

水库地震的成因机制很复杂，至今并未解决。主要是由于目前对水库地震源处所处岩层深部高温高压条件下，岩体性态和水体运动规律的认识还很不足。因此，还很难建立一个物理作模型对这一复杂的过程进行描述，主要只能以统计和类比方法探讨其本质规律。已有研究表明，水库地震按其成因大致可区分为两种不同类型：

一类是与岩溶、矿洞和包括构造表层在内的地表岩体应力调整有关、而与构造深部能量释放无直接关联的“非构造型”的浅层微震。这类水库地震一般都在水库蓄水或水位变动较大后不久发生，常与水位有一定的相关性。其最大震级不会超过 3~4 级，对工程和库区不致造成危害。绝大多数都可归属于此类非构造型水库地震。

另一类是由库水触发穿过或邻近库区的、已处于临界状态的发震断层的“构造型”水库地震。其在水库蓄水后的微震震中常逐渐呈现出与发震构造有一定关联的较连续的条带状，震级强度随之增大，直至发生主震，在其后的岩层应力余震将持续一段时间。由于库水向岩层深部渗透过程较缓慢，主震发生的时间一般部要滞后于水库蓄至最高水位或发生显著变化的时刻。主震的最大震级可能较高，是工程抗震所主要关心的。迄今全球震级超过 6 级的 4 例水库触发地震都属此类前震-主震-余震型。

文献中有把这两类水库地震分别称为外成因和内成因的水库地震。

全球已有水库地震的震例中，绝大多数水库地震震例都可归属于影响不大的非构造型的水库地震。为社会和工程界所关心的则主要是为数很少的、由水库触发发震构造内在能量的构造型水库地震。

3.3.3 库水在水库地震中的作用

水库地震的成因机制中，关键是对库水在水库地震中的作用。对此虽然存在诸多观点，尚待更多研究和论证，但目前较为普遍的共识是认为库水的渗透及其重量是主要因素。

对构造型水库地震，已有不少对库水自重影响的研究，但这些计算水体自重对地壳岩体

应力场的计算模型大多较为粗略，对地下深处岩性参数发的取值和断层形态变化的了解也很困难。因而也难以较精确定量。但定性上这些研究都表明，即使是百米以上高坝的库水自重，对地表以下十余公里深处、作为初始破裂点的震源附近的岩体应力场影响，与岩体自重影响相比，也是微不足道而可以被忽略的。诚然，也曾有学者认为，在一定条件下，即使微小的应力变化也足以影响地震的发生。但问题是在过于简化的模型和参数假定下，给出的微量结果的精度可能在误差范围内，难以取信。而且一般认为库区的重力荷载无助于断层两侧的相对错动，更何况被触发的发震断层的应力状态是否确已处于与其临界值仅相差某个微量的问题，更只能是一个难以验证的猜测。此外，一般还认为，与库水自重有关的构造型水库地震应在蓄水至最高水位后不久就发生的。

因此可以认为，库水对构造型水库地震主要的触发作用，应是其向深部渗透的孔隙压力减少断层面的法向应力，并减弱其抗剪强度参数，导致总体抗剪强度降低而引发断层构造面失稳。目前这个概念在大坝工程界是被较普遍接受的，虽然处于地下十余公里处高温高压的水体渗透和岩体力学性态也并还不太清楚。

3.3.4 库水触发构造型水库地震的条件和特征

基于库水渗透是引发水库地震中的主要作用的概念，可以探讨对构造型水库地震的一系列认知：

(1) 由于水库蓄水后库水自重对震源处岩层应力状态的附加影响，与发震断层接近临界状态的应力场比较是较为微弱的，主要是库水向构造深部渗透的触发作用。

(2) 库水触发水库地震需要有一定的地震地质和水文地质背景条件，即：

(a) 在库区内及其邻近地区有发震构造；

(b) 该发震构造在建库前已接近临界状态；

(c) 库区存在蓄水后库水由库盆向岩层深部渗透的水文地质条件。

显然，具备这些背景条件的高坝大库并不多，因而可以解释，为什么在各国已建的众多高坝大库中，发生较强的构造型水库地震的震例极少。

(3) 构造型水库地震与其所触发的天然地震实际并无本质差异，其主震震级不会超过被触发断层的可能发生的天然地震的震级上限；

(4) 库水渗透过程使其主震发生时间滞后，渗透阻力使震源深度相对较浅，震源深度一般约在 5 公里左右；

(5) 在无区域性活动断裂的情况下，库水渗透影响范围一般不会超过库区的第一分水岭；从而确定了水库地震归属的空间范围；其渗透影响范围一般在离库岸约(5-10)km 以内；

(6) 就断层性状而言，按照摩尔－库仑理论，从库水作用对断层面应力状态影响的分析看，库区的重力荷载一般无助于各类断层两侧的相对错动，而在库水渗压作用下的走滑断层和正倾断层较之逆冲断层更易于被触发，迄今全球已有的 4 个震级为 6.0-6.5 级的构造型水库地震，其发震断层都是正断层或走滑断层，而非逆冲断层；

(7) 已有震例表明，一般在库水达到最高水位并经历几个升降过程后，向深部渗透导致对构造应力场的影响已渐趋稳定，水库地震现随之衰减以至停止。库坝区的地震活动性恢复到蓄水前的正常的本底地震活动状态。

3.3.5 水库地震的判别

基于以上分析及对已有水库地震震例的统计结果，从水库蓄水后库区发生的地震中判断其是否与蓄水有关的判别标志大致可归纳为以下几点：

(1) 从时间相关性看，一般在水库蓄水或水位有较大变动的初期，微震活动的频度和强度与该地区建库前的本底地震比较会有显著增加，且常与水位变化有一定的相关性。对于构造型水库地震，主震发生的时间上往往会较水位变化滞后。在水库蓄至最高水位后，或主震发生以后，随着库区岩体应力的逐渐调整，库区地震活动性也逐渐回复至该地区的本底状态。

(2) 从空间相关性看，受库水沿断裂带渗透范围所限，一般认为震中应位于水库边缘 5~10km 左右的范围以内。对非构造型水库地震，其震中一般呈团状散布。太多都可在空间位置上找到对应的岩溶或矿洞等对应地段。对构造型水库地震，除了从震中位置分布及强度变化趋势判别外，往往要作更多的监测分析。

(3) 从地震地质环境看，水库蓄水引发地震需要有特定的地震地质环境条件。库区内要存在引发构造型水库地震的发震断裂构造和库水向深部渗透的水文地质条件；或者存在引发非构造型地震的裂隙岩体、岩溶或矿洞等地段。需要指出的是，断层本身也并非都一定都是透水通道，有的老断层可能是阻水的，需要分析鉴别。

(4) 从地震本身的特征看，与天然地震相比较，水库触发地震的震源较浅，一般在 5km 左右；其地震动随震中距衰减较快；非构造型水库地震多为微震群型；构造型水库地震与天然的构造型地震并无本质差异，但前者一般都为前震－主震－余震型，迄今全球已有的 4 个震级为 6.1~6.5 级的构造型水库地震都属此类型；主震与最大余震的比值高；在震级-频度关系 (log N=a-b M) 中的 b 值也较高；地震动加速度的主频及垂直和水平分量的比值都较高；同样震级下的地面震感稍强。

3.3.6 水库地震的危险性分析

对与水库蓄水有关的地震安全性的评价，首先要根据库区内断层的活动性及其性状和规

模、库盆向岩体深部的渗透条件、坝高、库容、岩性及结构面和岩溶的发育程度等主要影响因素，确定可能发生水库触发地震的库段；各库段可能的最大震级，则主要基于国内外已有的水库触发地震事例和工程类比原则，根据主要影响因素，采用确定性方法进行综合评定，或者以各种聚类分析方法给出不同震级段的发生概率。

3.3.7 水库地震的监测

自六十年代新丰江工程发生水库地震以来，我国大坝工程界对水库地震问题一直都非常重视。对水库地震的研究和判断，目前判断的主要依据是蓄水前后库区地震活动性的监测和对比，并基于统计学理论从监测结果中探讨并加深对其一般规律性的认识。为此，我国现行《水工建筑物抗震设计规范》要求，对坝高大于 100m、库容大于 5 亿 m3 的水库，如有可能发生大于 6 度的水库诱发地震时，应在水库蓄水前就设置专门的高精度地震监测台网，进行地震前期监测，以便可取得本地区建库蓄水前的本底地震活动规律，与蓄水后进行比较。在小浪底、紫坪铺等工程都按规范要求在水库蓄水前设立了台网。特别是对三峡工程，在其蓄水前，建立了我国第一个专门监测水库地震数字遥测台网，包括 24 个固定台、3 个中继站、1 个台网中心、8 个流动台站和 2 个非遥测台站。最近，在金沙江下游 4 个梯级电站库区，正建立由 62 个固定台站和 8 个流动台站所组成的空前规模的水库地震监测台网。

根据已有对水库地震的研究成果及水库地震监测台网资料分析，可以认为：紫坪铺水库和三峡工程的蓄水既不具有触发汶川大地震的条件，而汶川大地震也不具备水库触发地震的特征。

总之，迄今全球水库蓄水引发水库地震震例占水库总数的比例是极小的；绝大多数水库地震震例属于影响不大的非构造型的水库地震；社会和工程界最为关心的构造型水库触发地震，只有在特定的地震地质和水文地质条件下才能发生，其最大震级不可能超过被其触发断层的自然地震最大震级。目前全球仅有 4 个最大震级超过 6 级的水库地震震例，其最大震级不超过 6.5 级。

综上所述，对于在我国强震区修建 300m 级高坝大库地震风险，应为持以下态度：既不能“因噎废食”，也不“盲目冒进”，但也决不能“掉以轻心”。

4、我国高坝抗震防灾能力建设的现状

我国已建水库 8 万多座，居世界之首。截止 2004 年底的统计，全世界 48000 多座高 15m 以上的大坝中，我国占 46%，共 22000 多座。到 2005 年底，我国已建和在建的高 30m 以上

的大坝共 4860 座，加上在建的在 5200 座。全世界坝高 100m 以上的大坝有 800 多座，我国占 140 多座，其中 200m 以有 9 座，大多都有抗震问题。

近年来，在我国水利水电建设迅速发展的推动下，大坝抗震研究取得了不少前沿性进展。强调了工程结构抗震安全评价必须包括地震动输入、结构地震响应、结构抗力这三个不可或缺且相互配套的组成部分的理念。针对长期来混凝土大坝抗震研究的现状是，对结构地震响应的研究日益精细, 而对地震动输入和结构抗力研究相当粗放的“两头大、中间小”。近期着重加强了对地震动输入和结构抗力这两方面的研究，以力求对工程抗震安全作出更全面合理的综合评价。取得的主要进展如下。

4.1 地震动输入

地震动输入是工程抗震安全评价的首要前提。当前研究的主要内容和成果为：

(1) 建立合理的大坝抗震设防水准框架：结合我国国情和水工建筑物的特点和要求，建立和逐步改进了与功能目标相匹配的水工建筑物抗震设防标准的框架体系；提出了对重要的高坝大库，应增加对坝址预期可能发生的‘最大可信地震’、按不‘溃坝’的性能目标进行校核的规定；对水库地震进行了持续的研究，认为，就与大坝抗震安全有关的构造型水库触发地震而言，与天然的构造型地震并无本质差异，水库蓄水仅起到对已接近破裂状态的发震断层的触发作用，因此，不应将其另列入大坝抗震设防水准的框架内。

(2) 确定与坝址场地相关的主要地震动参数：在对美国西部 145 个基岩上记到的强震加速度记录的谱分析基础上，定义有效峰值加速度(EPA)，替代传统峰值加速度(PGA)作为设防主要参数；在地震危险性分析基础上，在满足场址设计地震动峰值加速度前提下，从有贡献的少数潜在震源中，在沿其主干断裂的各可能地震中，依据最大概率原则，确定“设定地震”后，求得场地相关地震动反应谱，替代不能反映实际地震的“一致概率反应谱”；研发了基于渐进谱理论生成适合我国国情的幅值和频率都非平稳的人工地震加速度时程方法和程序，替代了目前广泛应用的仅幅值非平稳而频率为平稳的人工地震加速度时程，以适应高拱坝非线性地震响应分析要求。

(3) 正确选择地震动输入机制：首先，明确了作为地震动输入主要参数的设计地震动峰值加速度的基本概念。阐明按《中国地震动参数区划图》或坝址专门的地震危险性分析所给出的是:“工程场地所在地区半无限空间均质岩体在平坦自由地表的最大水平向地震动峰值加速度”。这里既未考虑工程场地实际的地形条件和岩体具体的地质条件，也不涉及到在该场址要建造的工程结构类型整个工程场区地震作用强度的工程抗震设计指标。其次，对重要大坝工程的坝体结构和地基动态相互作用的重要性已基本形成共识。因而需要把坝体结构和地基

作为整个开放系统的波动问题求解其地震响应。辐射阻尼效应是坝体结构和地基动态相互作用的主要因素。自由场入射地震动输入机制和坝体结构体系的动力分析数学模型中考虑振动能量向远域地基逸散的所谓辐射阻尼的处理方式密切关联。澄清了当前在这方面存在的一些概念上的混淆和方法上的缺陷。

总之，针对当前我解高拱坝抗震设计中的地震动输入中存在的一系列共性和基础性的关键技术问题，就合理确定设防水准框架、正确选择地震动参数和理解输入机制等方面，进行了全面系统的深化研究。分析和澄清了工程应用中存在的诸多基本概念上的混淆，提出和探讨了解决的途径及其理论依据，为坝址地震动输入提供了一整套紧密结合我国国情和大坝工程特点的、更合理和可操作的新的思路、方法和自主研发的确定地震动参数的软件。成果已经在许多高拱坝工程抗震实际中被应用，并为水工抗震规范的修订提供了科学依据。

4.2 坝体结构地震响应

结构地震响应是坝体抗震安全性评价的核心。

4.2.1 高混凝土坝的结构地震响应

我国修建的混凝土高坝中很多是拱坝，特别是 300m 级高坝中大多为拱坝。作为三维空间结构的拱坝，其坝体结构的地震响应远较通常作为二维平面问题的重力坝为复杂，故以高拱坝地震响应分析方法研究为例，其分析和抗震安全评估方法也都适用于重力坝。目前我国高混凝土坝的结构地震响应分析已都采用动力法。近年来主要研究内容为：

(1) 研发大坝—地基系统整体非线性地震反应 分析方法和软件：研发了切近工程实际的大坝—地基整体系统的有限元数值分析模型，在拱坝地震响应分析模型中同时考虑了以下相互关联的重要因素：拱坝、地基和库水间的动力相互作用、地基的质量和能量向远域地基逸散的辐射阻尼、坝体内横缝间必然发生的瞬间往复开合、邻近坝体的近域地基的地形和包括潜在滑动岩块在内的各类地质构造、沿坝基地震动输入的空间不均匀性等因素，在时域内作为波动问题显式求解非线性方程。

(2) 提出了一个地震失稳判断准则的新概念及方法，以替代不能反映实际地震响应的“刚体极限平衡”传统方法；提出把坝体、地基和库水作为整个体系，以在强震作用下产生的、包括坝体和地基接触面局部开裂和滑移在内的位移响应的突变，作为失稳的极限状态。

(3) 建置微机群高性能并行计算平台及研发相应软件：采用中科院梁国平教授的有限元语言（FEPG）和（PFEPG）软件开发基于 PC 微机群平台的并行程序；对高拱坝抗震动力分析研发了相应的并行计算程序，并为实际拱坝工程进行了计算分析，初步取得了显著效果，为水工混凝土结构动力分析的深化开拓了新途径。但高性能并行计算在高坝地震场响应分析

中的应用，虽前景广阔，但仍处于起步阶段，主要困难在于相应计算软件和与之匹配硬件的研发。

(4) 开展了坝体结构抗震的动力模型试验验证：建置了我国第一个大型三向六自由度模拟地震振动台，被国际著名专家确认为是当时世界最好的混凝土坝试验设备；在大坝、库水和地基整个体系的动力相似律及其模型材料的制备、考虑坝体横缝开合及近域地基质量和辐射阻尼及渗透压力等的模型设计和测试技术等方面提出和实现了一系列创新思路，较系统和完整地形成了水工混凝土结构先进的抗震试验体系；进行了很多实际工程的抗震动力模型试验，使成为抗震安全评阶中与迅速发展的计算分析相辅相成的组成部分，受到了国内外同行的重视。

4.2.2 高土石坝的结构地震响应

土石坝的坝体结构地震响应主要归结为坝坡稳定和坝体变形，包括与此相应的渗漏破坏。

（1）作为其抗震设计主要内容的坝坡稳定校核，迄今国内外仍多采用基于传统的“刚体极限平衡法”的拟静力法。已有震害表明，拟静力法不能正确评价土石坝的抗震安全，因而近年来高土石坝的抗震设计也正在向采用动力法发展。例如：美国自从提堂坝垮坍和费尔南多坝遭受震害以来，在其垦务局和陆军工程师兵团等主要建坝单位，高土石坝的地震响应分析已主要采用动力法。在我国现行规范中，土石坝的地震响应分析虽仍采用拟静力法，但对Ⅷ度以上地区的高土石坝或存在可液化土的地基，也要求以动力法进行校核后综合判断其抗震安全性。目前土石坝的动力分析大多仍采用基于等价粘弹性模型和不排水孔隙压力试验的二维等效有效应力非线性分析方法。有效应力法考虑了孔隙压力的影响，可以评价可液化土料的抗震安全性。其中的孔隙压力通常取应力和振动周次数的函数，也有选取体应变或剪应变、能量、内时参数作变量的。孔隙压力的增长实际常采用不同振动周次和固结比的动三轴试验结果。由于等效线性方法存在不能考虑应力路径影响和直接给出残余变形等问题，为此，近期也开展了以时变的切线模量替代时程中采用等效的割线模量的“真非线性”动力分析方法。这种方法将土料作为粘弹塑性变形介质，本构模型由初始加荷曲线、移动的骨干曲线和开放的滞回圈组成。采用试验测定的孔隙压力增长，并可结合 Biot 固结理论，计入孔隙压力在空间的扩散和随时间的消散，并可以直接给出坝体的残余变形。应当较等效线性方法更接近实际。

（2）虽然目前在土石坝的抗震设计中仍以基于刚体极限平衡法校核坝坡稳定安全度为主，但其坝体地震变形分析是其抗震安全评价的主要发展方向。目前常用与刚体极限平衡法相应的“Newmark 滑块位移法”。但滑动块及其临界加速度的确定、土料在地震过程中抗剪

强度的降低和剪胀现象等都尚有待深究。

目前多采用对土石坝坝体作整体变形分析。将坝体作为连续粘弹性介质采用等效线性法先求得坝体地震响应，再根据计算求得的动剪应力比和试验求得的残余剪切和体积变形，基于应变势概念转化为等效结点力或作为初应变后，最后用静力法求解坝体地震永久残余变形。这些方法应都不如上述〝真非线性方法〞直接计算残余变形精确。

由于土石坝坝料的强非线性、动态本构特性及孔隙压力影响的复杂性，在土料本构关系和定量分析方法上迄今尚未能形成较为一致的共识。

（3）在土石坝的缩尺模型的动力试验中，很难寻求满足相似律要求的坝体和地基模型材料，主要是在一般振动台试验中，无法满足增加重力加速度的相似要求。而通过离心机内安装振动台进行动力模型试验，对于高坝，受设备条件所限，由于模型尺寸过小，很难保证测试精度，目前尚在探索中。

但无论是高混凝土坝或高土石坝的坝体结构地震响应，都正逐步向更接近情况的方向进展，初步发展了结合我国国情和大坝工程特点的、更合理和可操作的新的思路、方法和自主研发的动力分析软件，已在实际工程中应用并为国际坝工界所关注。

4.3 坝体材料的动态特性和抗力

4.3.1 大坝混凝土的动态特性和抗力

大坝混凝土动态抗力是当前混凝土大坝抗震安全评价中的薄弱环节。目前，主要进行了以下几个方面的开创性研究：

(1) 进行全级配大坝混凝土动力特性试验研究： 采用不同设备和加载方式，建立全级配静、动态弯拉试验、声发射检测的试验设备和测试条件，比较全级配和湿筛试件差异及干湿条件、不同龄期影响，确证静态预载对动态弯拉强度影响，研究混凝土受拉的包括软化段的本构关系全过程；对试验结果从破坏机理上提出理论解释和依据。

(2) 开展大坝混凝土三维动态细观力学分析研究其内部结构破损发展过程：在全级配大坝混凝土细观力学建模方问面解决了一系列关键性技术难题；研发了在时域中对试件的抗折强度进行了有静态预载的非线性静动态分析方法；编制和应用了其三维动态细观力学分的串行和并行的计算程序；分析与试验结果取得了相互印证。

(3) 应用 C T 技术探索混凝土内部破坏机理：系统探索和解决混凝土 CT 试验时的试验技术问题；研制了与医用 CT 配套的便携式材料试验机，解决了动态加载的一系列关键技术问题；进行了混凝土试件静力、动力压缩试验，静力拉伸试验的 CT 实时扫描；研究了混凝土 CT 图像识别和分析技术，进行了其细观裂纹形态特征和损伤的定量分析；揭示了静、动

载下内部结构细观破坏形态的差异，印证了对破坏机理的解释；应用 3DMAX 软件完成了能显示混凝土空间裂纹形态，及其扩展过程的重建三维裂纹图像和动画显示。

4.3.2 土石坝料的动态特性和抗力

土石坝坝料的强非线性动态变形和强度特性较大坝混凝土材料更为复杂。目前国内外在不同坝料的本构关系、强度特性、孔隙压力和残余变形影响等方面都进行了不少研究，但迄今尚难达成较普遍接受的共识，往往导致分析结果差异显著。坝料的强非线性特性，土石坝的地震响应对其静荷载作用下的初始状态十分敏感，但目前即使在同一个分析中，材料在静、动荷载作用下的本构模型也难统一。因此，坝体材料的动态特性与本构关系，特别是近年来修建较多的面板堆石坝堆石料在高围压下的流变和动态特性的研究，仍有待深化。

总之，无论是高混凝土坝或高土石坝，其坝体材料动态特性和抗力的研究都是抗震安全评价中的关键因素，存在着很多需要深化研究的问题。

综上所述，当前在我国高坝抗震防灾能力建设中存在的主要问题是：尽管近年来在工程实践推动下，我国大坝抗震设计、科研取得长足进展、总体上已接近国际先进水平。但仍赶不上我国水电水利工程建设发展的规模和速度。还不足以为建设中尚无先例的世界一流工程的抗震安全提供充分的具有前瞻性的、创新性科技支撑。

5、我国高坝抗震中长期发展的战略重点

基于我国国情，且由于水库大坝、特别是高坝大库“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震问题及其一旦发生严重灾变“不堪设想”的次生灾害后果，以及考虑到地震的不确定性和地震预报是尚未解决的世界性难题，水库大坝的抗震防灾战略重点应当是：防止遭遇超出设计预计的最大可能的极端地震时，发生库水失控下泄、导致严重次生灾害的 “溃坝”灾变。为此，必须合理确定坝址可能发生的最大地震，即所谓的〝最大可信地震〞，以及设计中对各类坝型‘溃坝’极限状态的定量准则。这两个问题是当前在大坝抗震安全评估中的主要障碍和亟待解决的前沿课题。

汶川地震后，国家发展改革委员会发文要求对一些重要工程需校核其在重现期为 10,000 年的极限地震作用下的抗震安全性。且不论重现期为 10,000 年的地震是否为极限地震，由于缺乏与该极限地震设防标准相应的功能目标的规定，校核结果只能为设计人员提供相对比较的定性参考，仍难以对工程是否会发生严重次生灾害的灾变作出评价，突显解决上述高坝大库工程抗震防灾战略重点的迫切性和重要性。

5.1. 最大可信地震的确定

5.1.1 采用概率法和确定性方法

通常将最大可信地震定义为与坝址地震地质条件相关的预期可能发生的极限地震。在一些国家常将其取为重现期固定为 10,000 年的地震。实际重现期为万年一遇的地震并不一定是最大可信地震。而且主要问题是，将工程场址地震危险性分析给出的震级概率曲线外延至重现期为 10,000 年的小概率地震事件，有相当的任意性，其可靠性受到质疑。

较为合理的途径是采用与场址相关的、确定性的“设定地震”方法。即：在可能在坝址产生设计加速度值的少量关键性潜在震源区中选择‘设定地震’，取所在潜在震源的震级上限为震级，并假定在其沿各潜在震源区的主干断裂距坝址最近处发生，再按选定的加速度衰减规律，确定其各自在坝址产生的地震动输入参数，从中选择对坝址影响最大者，作为与场址相关的、实际可能发生的最大可信地震。

5.1.2 地震动衰减关系

无论是概率法或确定性法都涉及到基岩地震动衰减关系的问题。基岩地震动衰减关系无论对地震区划、危险性分析、设定地震和地震动输入的结果都有较大影响。它是在对岩基上实测强震加速度记录统计分析和归纳的基础上拟合的。与所记录的地震的强、弱、远、近及发震的地质构造及其破裂模式等相关特性及台站所在地的场地条件及与发震构造的相对位置有关。受强震记录数量和范围的限制，现有地震动衰减关系大多只描述特定震级条件下地震动参数（幅值、频谱或持续时间）随距离的衰减规律。且主要是在远场和中等大小地震中测得的资料。

迄今全球主要是美国和日本积累了较多的强震加速度记录。日本的地震大多为板块间的地震，美国大陆的地震则大多与板块内部断裂有关。我国有学者认为，从地震基本成因环境看，我国大陆地区地震活动是属于欧亚板块内部（块内）地震类型，即大陆地震构造系的地震。大陆地震构造系的主体位于北纬 20^{o} -50^{o} 之间，横贯欧亚大陆和北美大陆。其东西两半区呈现反对称的地震活动。绝大多数地震发生在地壳内的浅源地震，且以表现水平错动为主。中国大陆和北美大陆在构造地壳组成、现代受力状态及地震成因、地震特点等方面都有一定的可比性，即相似性。两地区地震又属同一“隆壳地震”。因此，两个地区地震记录的相互借用还是具有一定的构造基础的。

在我国目前在确定峰值加速度衰减关系时采用的是由烈度转换的办法。即：以有丰富强地震动记录和地震烈度资料的美国西部为参考区，利用我国丰富的地震烈度资料，基于不同地区烈度衰减关系的差异和地震动参数衰减规律类同的假定，按照等震级、等距离或者映射

法进行两个地区间地震烈度和地震动参数间的转换，使两地区相应点对的震级与震中距有关的地震烈度和地震动参数相对应。因此，这只是在缺乏强震记录条件下采取的权宜方法。所基于的假定存在着一些值得进一步商榷之点：

（1）首先地震烈度是一个宏观的综合的震害定性描述，是指一定地区范围内（如 1 km^2 左右）的平均状态。震害中仅有部分是由地震动诸因素综合决定的。其它则都取决于与地震动关系不大的地质准静力现象，如断层位错、滑坡等地基失效现象。而地震动参数中的峰值加速度则仅为影响地震作用的 3 个主要因素之一。强震记录是在一个固定地点取得的，而在与烈度对应的地区范围内，各点间的峰值加速度常是变化复杂，会有相当差异。

（2）作为参考区的美国西部地震烈度衰减关系中的震级都是由震中烈度按经验公式换算得出的；且体现烈度衰减的等震线都取为圆形。而我国在确定地震烈度模型参数时，主要采用仪器测定的震级，而烈度等震线则取为有长、短轴之分的椭圆型。

(3) 在确定最大可信地震时需要的是岩基上的地震动衰减关系，而烈度反映的是一般场地土上的震害现象。

(4) 由地震烈度转换地震动参数所基于的不同地区烈度衰减关系的差异和地震动参数衰减规律类同的假定，对地震动反应谱的衰减关系尤为难以理解，因为很难假定不同地区地震动反应谱各个周期分量的衰减规律，会都和反映综合震害程度的地震烈度衰减关系的差异类同。

因此，当前在我国尚缺乏足够的实测强震加速度记录以归纳地震动衰减关系之际，直接采用有一定的可比性和相似性的、主要基于美国西部实测强震加速度记录的地震动衰减关系，可能较之通过烈度转换的方法更为适宜。

现有地震动衰减关系大多只描述特定震级条件下地震动参数（幅值、频谱或持续时间）随距离的衰减规律，事实上发震断层的破裂模式、场地条件等因素对地震动参数的影响也非常显著。尤其在近场条件下，除震级和距离对地震动的影响外，近场地震动的一些特征难以忽视，如：上盘效应、破裂的方向性效应、沉积盆地对地震动的影响等。我国高坝坝址的最大可信地震很多是由近场大震决定。越来越多的研究表明，近断层大震的地震动衰减规律与远场的差异较大，由远场资料估计近场，容易在小震时低估地震动参数，在大震时又高估地震动参数。但受强震记录数量和范围的限制，现有地震动衰减公式的统计分析工作，主要基于较远场和中等大小地震资料。近几年，随着世界范围内强震仪布设普及，美国、日本、土耳其和中国台湾都获得了一些近断层地震记录。最近在美国，由太平洋地震工程研究中心资助，在以美国西部为主并补充国际主要近场大震强震动数据资料的基础上，建立适用于美国

西部浅源地震条件的〝新一代的地震动衰减关系 (NGE)。与已有的地震动衰减关系相比，在新的衰减关系中，一定程度上考虑了近场地震动特征和震源体的影响等因素。研究工作由五个团队分别进行。其中 Abrahamson 和 Silva 团队的统计记录较丰富且符会工程关注的基岩条件、考虑了断裂方式和上盘效应、计算的基岩峰加速度及其规一化反应谱与实测值较接近。可以考虑在确定我国高坝坝址最大可信地震中采用。

5.1.3 近场大震特征和有限断层法

但在上述确定最大可信地震的确定性法中，仍存在着显著影响坝址地震动输入的严重缺点。首先，最大可信地震是被作为点源对待的。实际大坝的最大可信地震一般都是邻近发震断层的大震，需要将发震断层按三维空间面源处理。例如，汶川大地震中，发震的龙门山断裂带的映秀－北川断层，断裂长度达 300Km，震源深度达 15Km 以上，破裂持续达 120 秒。将这样在几百平方公里面积中逐渐破裂的过程，相对于一般仅十余公里以外的场址，作为瞬时同时发生的点源对待，显然是不符合实际的。其次，由于我国缺乏足够的强震记录，目前应用的衰减关系主要依据美国西部震级小于 7 级、震中距为(10-100)km 的基岩强震记录，将其外延后应用于近场大震的大坝最大可信地震小概率事件，存在较大的不确定性。最后，在衰减关系中的距离 R，其概念因常涉及到震源深度的处理而仍较模糊。这些都是在大坝地震灾变评估中确定最大可信地震时，需要克服的主要障碍。更何况还需要考虑近场大震的断层破裂方向性和上盘效应等影响。

改进的基本思路是采用 ‘随机有限断层法’直接生成最大可信地震的地震动。即：将关键潜在震源的主干断层划分为一系列可作为点源的子断裂，其破裂具有一定的模态、速率和时间序列。顺序叠加各点源对坝址的作用，直接给出近场强震的坝址地震动。当然，所有断层参数，诸如：走向、倾向、倾角、破裂面积、长度和宽度、以及沿整个断层面的平均滑动量等参数，都要通过理论或半经验关系式求得。

5.1.4 大震后的余震

地震的发生一般都伴随着主震、余震。地震序列是指在一定的空间范围和时间段内连续发生的一系列大小地震，且其发震机制具有某种内在联系或有共同发震构造的一组地震总称。据地震部门统计，有余震的震型序列几乎占了全部六级以上地震序列的 70％-85％，震害实例表明，有些情况下，余震在工程的倒塌过程中起决定性的作用。高坝在经受超设计最大可信地震后即使尚来未溃决，但一般会进入非线性阶段而产生较大损伤。在主震发生后发震断裂应力调整过程中发生的众多余震，其震级都低于主震，且其强度和数量都随时间不断减弱和减少。但从防止溃坝灾变的角度，经损伤后的高坝-地基体系，特别是在泄水设施遭受严重震

害、工程尚来不及检修或汛期可能有较大洪水到来的情况下，在再经受余震时就可能发生溃坝灾变，这对混凝土高坝尤为重要。因此，总结主余震关系特性，预测未来强余震的强度、发生时间及地点，对防止高坝的地震溃坝灾变有重要意义。从目前已有的不完全统计资料看，余震与主震的等级之间基本上呈现正相关的关系，主震与最大余震的优势震级差约在 1-2 级间，其在空间的距离大致呈正态分布，且优势距离约在 10km-40km 之间，从两者在时间上的间隔看，主震发生后 5-10 天左右的时段内余震频度高，能量释放大，衰减很快，强余震也基本上集中在这个时段。但上述统计的样本数量有限，离散性较大，且不同地区间也会有相当差异，随着对高坝极限地震抗震安全性的更多关注，势必加强对余震的研究。

总之，目前采用的以重现期为 10,000 年作为最大可信地震并不可取，以烈度转换的办法确定地震动参数衰减关系也值得商榷。及直接取基于美国西部实测强震加速度记录的地震动衰减关系，采用与场址相关的、确定性的“设定地震”方法确定最大可信地震似更为合理。对近场大震宜采用〝有限断层法〞直接生成地震动加速度时间历程，并需加强对余震的研究。

5.2 高坝“溃坝”灾变的定量评估

最大可信地震相应的性能目标是不发生库水失控下泄的溃坝灾变事故。在国外一些规范和导则中，有把最大设计地震取为最大可信地震的规定。实际上，两者对应的性能目标是完全不同的，一般最大设计地震对应的性能目标是允许产生可修复的损坏。两者在概念上是不同的，不应混淆。

在对各类高坝的溃坝灾变的评估中，目前虽然对水坝的溃坝的技术问题已有较多研究，但主要都针对其溃决后下泄人造洪峰导致的灾害后果，评估溃坝流量过程和下游洪水演进过程，为水库大坝风险综合评价提供技术支撑。但高坝工程的溃坝灾变事故的后果是不堪设想和难以承受的，必须防患于未然，确保工程安全，避免造成重大次生灾害的地震灾变的发生。而在对防止各类高坝的溃坝灾变的设计可操作的定量准则方面，却尚缺乏共识，成为当前迫切需要解决的技术难题。

5.2.1 混凝土坝的溃坝灾变定量准则

迄今，在各国的抗震设计中，对混凝土坝抗震安全的校核，包地对坝体强度及其坝基抗滑稳定。坝体强度不足引起的局部开裂一般并不就会导致溃坝灾变，特别是作为高次超静定结构的拱坝，更具有较强的应力重分布的自我调整能力。印度的柯依那坝、我国的新丰江坝和伊朗西菲罗坝等高度超过百米的重力型大坝，遭受Ⅷ度以上强震后，尽管头在上部都发生了贯穿上、下游的裂缝，但经加固修复后，都已重新投入正常运行，并未导致溃坝灾变事故。至于拱坝即使横缝开裂过大引起止水局部破坏，也不致就会导致溃坝灾变。意大利的瓦扬拱

坝因近坝库岸大规模坍滑引起了高水头漫坝溢流，我国汶川地震中一些混凝土重力坝也发生过漫坝溢流，但坝体都基本无损。因此，对混凝土坝溃坝灾变的判别指标应当是坝体和坝基的整体失稳。对于拱坝，其坝肩岩体的超常变形以至失稳更是导致其溃坝灾变的关键。高混凝土坝坝体-地基系统的失稳是变形积累的结果。因此，整体变形应是评估混凝土坝的溃坝灾变的指标。目前在高坝抗震设计的稳定校核中，仍都基本采用传统的‘刚体极限平衡法’。刚体就不可能有变形。对于往复的地震作用，瞬间达到极限平衡，并不能标志失稳。特别对拱坝，把坝肩岩块作为刚体，将其与坝体分割开来校核其抗震稳定。这实际是一种不计坝体和地基动态变形耦合，以及岩块动态响应的静力方法，因而并不能反映整个坝体与地基系统实际的地震动态稳定性状。由于拱坝结构应力状态对坝肩变位十分敏感，即使坝肩岩体尚未最终失稳，如局部开裂和滑移导致其与坝体的动态耦合变形过大，也会使坝体严重受损。所以，传统‘刚体极限平衡法’的安全系数小于 1.0 未必就失稳，而即便其安全系数大于 1.0，也未必就安全。这已在美国帕柯伊玛拱坝遭受的 1971 年和 1994 年两次强震中，左岸坝肩岩体的震害中有所验证。因此显然，不能以传统‘刚体极限平衡法’的安全系数作为评估高混凝土坝 ‘溃坝’灾变的定量准则。

由于每个高坝工程的地质、地形条件和坝型、坝高等都不可能相同，很难对其地震时标志溃坝定灾变的变形值给出确定的定量准则。随着地震作用的逐步加大，坝体-地基系统的变形响应也会相应加大。当坝体-地基系统的坝顶拱冠和两岸拱座一些标志性部位变形轨迹随地震作用加大而出现拐点时，表明系统发生结构性突变，以表征其已接近临界状态。把坝址最大可信地震的地震动和与坝体-地基系统临界状态相应的地震动输入的比值，作为评估高坝‘溃坝’灾变的定量准则，已经通过若干高拱坝工程实例计算，表明是可行的。但目前在评估高坝 ‘溃坝’灾变的定量准则中尚存在一定的如下障碍。

显然，无论是坝体强度的、或者坝肩抗滑稳定的抗震校核，都要归结到坝体和地基的强度超限检验。其中主要的障碍是：在混凝土坝的线弹性有限元动力分析中，在关键的坝踵部位，存在应力集中这一长期困扰设计人员的难题。实际上，由于大体积地基材料中必然存在初始裂隙，坝踵的这种高应力集中现象可能并不真实存在。大体积地基中的这种初始裂隙十分复杂且随机分布，目前在大坝工程中通常只是以变形模量取代弹性模量来近似体现。

解决高拱坝分析中的这个久悬未决的难题的思路是：可以沿两条技术途径，分别对连续介质和非连续介质模型，采用不同的非线性动力分析方法。第一个非连续介质模型的途径是，在邻近坝踵拉应力集中的薄弱部位，不是如过去采用的那样，只考虑坝体和地基接触面的开裂，而同时也考虑了在地基岩体中某些裂隙面的局部开裂，作为接触问题求解。另一个途径

是，在作为连续介质的坝体和地基体系的动力分析中，计入坝体和地基材料的应变率效应和损伤演化规律，用损伤力学方法求解。这需要加强对大坝混凝土和坝基岩体的材料率效应规律和损伤特性的试验研究。损伤力学作高拱坝的动力分析，需要深入研究一系列问题，诸如：大坝混凝土和大体积岩体的复杂应力状态下的拉、压损伤演化规律，拉、压应力的区分，单边效应，循环加载下的残余应变等。两种途径都需要进行相当复杂的非线性动力分析。其中岩体的损伤演化规律及其抗拉强度的确定，更为困难。此外，为了避免过高估计开裂影响，对邻近坝踵网格的划分要进行细化，这将导致十分庞大的计算机时和计算机内的存储量。因而采用基于并行计算的高性能计算技术就势在必行。

5.2.2 土石坝的溃坝灾变定量准则

目前，对土石坝溃坝灾变的研究主要还限于研究溃决方式、溃坝水流、坝体冲蚀与溃口形态相互耦合的溃决过程。对在最大可信地震作用下，防止土石坝溃坝灾变的定量评价准则尚少有研究。在强震作用下，土石坝的震害形式主要为：坝坡失稳、地基失效、坝体变形和开裂、渗漏等。这些震害的严重发展，最终都能导致坝体严重变形，震陷过大。而即使局部坝体被库水漫越，就可引发致命的坝溃灾变。与混凝土坝相比，土石坝坝料因其强非线性特性和更为复杂的本构关系和孔隙压力影响，具有更大的不确定性。对其溃坝灾变的定量评估也许需要不止单一指标而是一个指标体系。但其抗震安全性似也需要以控制震动变形为核心。而目前对土石坝变形的分析方法并未能形成共识，更缺乏以变形指标为主的表征溃坝灾变的定量评估指标体系的共识。面板堆石坝是目前较普遍采用的堆石坝，被认为有较好的抗震性能。例如，汶川地震中高 158m 的紫坪铺面板堆石坝，虽然面板受损，但整体稳定性经受了超设计地震的考验。但已有研究表明，上部坝坡浅层滑动是堆石坝最常见的震害，如果再加上较大震陷，特别在高水位时及泄洪设施和发电设备遭受严重震害时，对漫顶风险不应掉以轻心。堆石坝如防渗系统局部破坏，坝体浸润线抬升而严重渗漏，并非只是水库漏空而已，也可能导致溃坝灾变。尤其是砂砾石堆石坝，我国沟后混凝土面板堆石坝因上部止水失效面而导致溃坝的教训，值得重视。

总之，无论是混凝土高坝或高土石坝，要对其溃坝灾变作定量判断，在确定判断指标、坝体材料特性、计算方法、及溃决准则等方面，都尚需克服一系列技术障碍。

综上所述，为完成〝防止遭遇超出设计预计的最大可能的极端地震时，发生库水失控下泄、导致严重次生灾害的溃坝灾变。〞 这一战略重点任务，我国大坝工程抗震界任重道远，需依托〝产、学、研〞结合的创新平台，发挥学科交义优势，直面解决一系列技术难题的严

峻挑战。

6. 中长期发展战略研究方案内容

在未来 10-20 年内，我国在水能资源丰富和集中的西部强震区加快开发水电势在必行的形势下，迫切需要为少有先例的世界一流高坝工程的抗震安全提供充分的具有前瞻性的、创新性科技支撑。从我国我国高坝抗震防灾能力建设的现状出发，为尽快满足工程抗震安全、特别是为防止导致严重次生灾害的溃坝灾变的战略重点任务的需求，建议开展下列中长期发展战略研究方案内容：

6.1 坝址地震动输入的研究

6.1.1 尽快建立适合我国条件的地震动衰减关系

地震动输入是工程抗震的前提。地震动输入所依据的地震动参数及其衰减规律的选择、坝址地震危险性分析、最大可信地震的确定等都需建立在适合我国具体条件的强震地录基础上，特别是邻近库坝区的强震记录。为此，急需在我国地震部门统一部署下，加强我国西部、特别是邻近库坝区的强震观测台站建设。并在此基础上，总结出适合我国条件的地震动衰减关系。

6.1.2 继续进行水库地震机理的探索

对于广受关注的水库地震问题，主要是针对可能导致震害的构造型水库地震，对库水向深部渗透的情况，以及震源处的高温高压环境下水体和岩体的特性，目前都尚难搞清，至于库坝区内的发震断裂是否已接近可能被触发的临界状态的问题，更属于目前尚未解决的地震预报的世界性难题。因此，水库地震的发震机理很难期望能在短期内得到解决。看来今后对水库地震的研究的主要途径仍将是：对基于已有认识评估后可能发生水库地震的重要工程，在蓄水前即设置监测台网，深化对监测资料和已有震例的分析比较，开展对高温高压环境下水体和岩体特性的研究，以求加强和总结对水库地震触发机制及其规律性的认识。

6.1.3 加强反映近场大震特征的有限断层法研究

为满足近断裂高坝坝址的极限地震，需要加强对近场大震特征和有限断层法的研究。关键是需要基于我国强地震特点，进一步深入研究能反映有‘障碍体(asperities)’的断裂面不平整性的滑动模型，以及根据我国的板内地震记录，回归诸断裂参数与地震矩的关系式。这是涉及工程地震和大坝抗震等的交叉学科有待地震和大坝工程部门共同协作深入研究解决的前沿课题。同时加强大震后强余震规律的研究。

6.2 坝体地震响应的研究

6.2.1 混凝土坝

在进一步完善现有坝体地震响应分析模型的基础上，深化对混凝土高坝在地震作用下的损伤破坏机理的研究，研发基于大坝混凝土和坝基岩体损伤特点的非线性的动态响应分析方法。研究在高混凝土坝地震响分析中，在复杂应力状态下，考虑大坝混凝土和地基岩体的损伤演化规律、单边效应、残余应变影响等的更合理有效的方法。继续探索表征高混凝土拱坝和重力坝溃坝的指标体系及其设计可操作的定量判别准则，积极推行提高分析精度和效率的高性能并行计算技术的应用。

6.2.2 土石坝

对高土石坝地震动输入参数，需进一步考虑工程场地实际地形和岩体地质等条件。在地震响应分析的模型中，需计入辐射阻尼和坝基及河谷地震动不均匀分布及三维输入的影响。土石坝地震溃坝灾变迫切需要开展以坝体的震动变形分析为基础、以地震残余变形为核心指标的抗震安全评价理论及方法的研究，发展以变形指标为主的抗震安全性评价指标体系及其定量准则。为此，需要对在地震作用下，土石坝的动力响应、孔隙压力及其扩散和消散、残余变形的分析方法等，取得基本共识。

6.3 坝体和坝基材料动态特性和抗力的研究

6.3.1 大坝混凝土材料

加强全级配大坝混凝土和地基岩体动态特性、抗力和应变率效应的研究，包括在循环加载下的拉、压应力-应变全过程的试验。研究大坝混凝土在静态预载、特别是长期加载下对其动态特性和抗力的影响。发展大坝混凝土在地震作用下作为不均匀复合介质的三维细观力学分析方法。继续深化 CT 技术在大坝混凝土内部损伤破坏机理研究中的应用及其与细现观力学分析结果的相互验证。探索专用工业 CT 及相应加载设备的研制和应用。

研发提高大坝混凝土抗拉强度、延性和耐久性的新材料，探讨诸如超高韧性水泥基复合材料等新材料的动态特性及其在高坝抗震薄弱部位的工程应用。

6.3.2 土石坝材料

土石坝动态特性和抗力的研究关键在于对材料本构关系的各类模型逐步形成较普遍接受的共识，这是计算结果有可比性和能相互验证的基础。

7 结 语

综上所述，对我国高坝大库的防止地震灾变技术的中长期发展战略研究， 需要根据我国

国情，认清其“无可替代”的重要作用、“难以避让”的抗震安全问题及其灾变的“不堪设想”严重次生灾害后果。突出防止极端地震时，发生“溃坝”灾变的战略重点。以合理确定最大可信地震及深入研究各类坝体损伤溃决机理及其定量判别准则为主要内容。遵照结合实际工程，依托〝产、学、研〞结合创新平台；加强协作，充分发挥学科交义优势；尽量应用高新技术的技术途径。

参考文献

[1] 钱正英，中国可持续发展水资源战略研究综合报告，中国人民政治协商会议 2000 年鉴，人民出版社，2001，113-1351。

[2] 贾金生, 袁玉兰, 马忠丽. 坝统计简述与世界大坝情况介绍、中国大坝技术发展水平与工程实例。 北京: 中国水利水电出版社, 2007。

[3] 汝乃华. 土石坝地震震害和统计。中国水力发电工程学会史料信息组、上海大坝科技咨询有限公司，2001。

[4] 陈厚群. 工程概论(第二版) 第二十章 水工建筑物的抗震。北京: 科学出版社， 1985。

[5] 陈生水, 李国英, 霍家平, 章为民. 汶川大地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及高面板坝的抗震性能。南京：南京水利科学研究院，2008。

[6] 陈厚群. 混凝土高坝强震震例分析和启迪(待发表)。北京: 水利学报，2009.1。

[7] 王海波. 大坝工程资料和抗震设计规范调研。北京:中国水利水电科学研究院，2008，2、

[8] Chinese National Committee on Large Dams，State of the Art Dam Construction in China. 2006。

[9] 朱伯芳. 1999 年台湾 921 集集大地震中的水利水电工程。水力发电学报，总第 80 期，2003.

[10] Indian COLD. Major dams in India, Koyna Dam. New Delhi: 1979

[11] 陈厚群. 大坝抗震 . 潘家铮等主编.中国大坝 50 年. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[12] W. Indermaur, R. P. Brenner, T. Arasteh. The effects of the 1990 Manjil Earthquake on Sefid Rud Buttress Dam, Dam Engineering. Vol.Ⅱ, Issue 4: 275-305。

[13] Ram P. Sharma, Brain T. Sasaki. Rehabilitation of Earthquake-Shaken Pacoima Arch Dam，Q51. ICOLD 16th Congress on Large Dams. Lausanne: 1985.

[14] Ram P. Sharma, Harry E. Jackson, Sree Kumar. Effects of the January 17,1994 Northridge Earthquake on Pacoima Arch Dam and Interim Remedial Repairs，Q75. ICOLD 20th

Congress on Large Dams. Florence: 1997.

[15] California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP) , Fourth Quick Report on CSMIP, Report OSMS 94-04, Strong-Motion Data from the Northridge/San Fernando Valley Earthquake of January 17,1994.

[16] 沙牌水电站双曲拱坝动力分析抗震复核研究。北京:中国水利水电科学研究院，2002

[17] 台湾电力公司.九二一集集大地震德基坝特别检查成果报告。台北:中兴工程顾问股份有限公司，1999.

[18] 汝乃华，姜忠胜，大坝事故与安全•拱坝。. 北京: 中国水利电力出版社, 1995.。

[19] Jean Proulx, Georges R. Darbre, Nathalie Kamileris. Analytical and ExperimentalInvestigation of Damping in Arch Dams Based on Recorded Earthquakes。Paper No. 68，13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B. C. Canada: 2004.

[20] Martin Wieland, Martin Aemmer, Roland Ruoss，The 249m High Arch Dam in Turkey and Its Seismic and Hydrological Design Aspects。Poyry Energy Ltd. Hardturmstrasse 161, CH-8037 Zurich, Switzerland.

[21] Chen Houqun，On the obstacles and way to access the seismic catastrophe foe high arch dams。Science in China，Series E，Technological Science，Vol.50. Supp.1,Oct.,2007.