

# 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题

王浩<sup>1</sup>, 严登华<sup>1</sup>, 贾仰文<sup>1</sup>, 胡东来<sup>1</sup>, 王凌河<sup>1,2</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044; 2. 大连理工大学土木水利学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 在对国内外水问题进行科学识别的基础上, 分析了水循环的“自然-人工”二元演变模式, 明晰了水循环及伴生水化学、水生态和水沙过程的相互关系, 初步阐述了现代水文水资源学科体系的构成。在对国际水文水资源研究发展趋势及热点和前沿问题进行阐释的基础上, 结合中国水文水资源研究现状及水问题解决的实践需求, 论述了中国水文水资源研究的学科体系的构成, 并分析其重大研究方向。在变化环境和高强度人类活动影响下, 水循环在驱动力、结构及参数等方面已呈现出显著“自然-人工”二元特征。现代水文水资源研究正由传统“还原细化”研究向综合交叉方向发展, 并由传统基于单个水文环节的研究过渡到基于二元水循环过程的研究上来, 原型观测与数学模拟的结合已成为其关键研究手段。中国水文水资源研究需要进一步强化水循环及伴生过程演变机理识别与定量模拟方面的基础研究, 完善水资源评价、配置、调度、水权分配、水价定价理论和技术等方面的应用基础研究, 服务于节水型社会建设、水环境保护与水生态修复、水资源综合管理、防灾减灾与应急管理、民生水利及现代水利建设与管理等实践需求。

**关键词:** 水文水资源学; 自然-人工二元模式; 发展趋势; 热点问题; 研究体系

**中图分类号:** TV213.4; TV213.9      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2010)04-0479-11

随着人类水土资源开发活动的深入, 水循环过程呈现出显著的“自然-人工”二元驱动特征。在理论和技术方法革新的基础上, 科学识别水循环的演变规律及其驱动机制, 充分发挥区域水资源的经济社会及生态与环境效率与效益, 通过水循环与水资源的多维调控, 维护水安全、生态安全与环境安全, 是实现可持续发展及人与自然和谐的重大实践需求, 也是水文水资源研究的关键所在。

自1851年Mulvaney首次提出汇流时间概念以来, 水文学已经历了近160年的发展; 自20世纪中期以来, 水资源学也经历近60年的发展<sup>[1-4]</sup>。在上述发展过程中, 围绕不同发展阶段上水利开发与管理的实践需求, 水文水资源研究已形成相对完整的学科体系。自20世纪80年代以来, 随着世界性水危机凸现, 水文水资源研究面临着更为复杂和具有挑战性的问题; 在解决水问题的实践中, 特别是现代技术手段的推动下, 水文水资源研究的理论和方法得到了快速发展。随着经济社会发展和新的水问题出现, 尚需进一步创新水文水资源理论和方法, 服务于水资源的安全、高效与可持续利用<sup>[5-7]</sup>。

本文在对国内外水问题进行科学识别的基础上, 分析水循环的“自然-人工”二元演变模式和水循环及其伴生水化学、水生态和水沙过程的相互作用关系, 初步构建现代水文水资源学科体系; 在对国际水文水资源研究发展趋势及前沿和热点问题总结分析的基础上, 结合中国水文水资源研究现状及国家需求, 构建水文水资源研究体系; 进而明晰在水文水资源研究领域中的重要研究方向。

## 1 水问题及基本科学识别

### 1.1 中国面临的主要水问题

世界面临着深刻的水危机, 中国的水问题尤为严重, 水多、水少、水脏、水浑与水生态退化并存, 水灾

收稿日期: 2008-08-10

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体基金资助项目(50721006); 科技基础性工作专项资助项目(2007FY140900)

作者简介: 王浩(1953-), 男, 北京人, 博士, 中国工程院院士, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: wanghao@iwhr.com

害事件频繁发生,水问题现已经成为实现可持续发展的重大障碍性因素。

1950~2006年,全国多年平均洪涝受灾面积为967.019万 $\text{hm}^2$ ,成灾面积为542.439万 $\text{hm}^2$ ;因灾死亡人口为4792人,直接经济损失(1990~2006年)1136.68亿元。1950~2006年全国旱灾受灾面积为2159.810万 $\text{hm}^2$ ,成灾面积为949.613万 $\text{hm}^2$ ;年均粮食损失154.05亿kg,相当于近年来粮食总产量的3%。2006年,全国地表水总体水质属中度污染;劣于III类水质标准的国家控制水质断面占60%,在27个国控重点湖泊中,优于III类水质标准的湖泊仅占29%。中国水生态退化问题也十分严重,2005年全国水土流失面积仍占国土总面积的37.1%;湿地面积持续减少,地下水漏斗呈扩张趋势。以海河流域为例,自20世纪50年代以来,湿地退化面积超过83%;在太行山山前京九铁路沿线的单个地下水漏斗已发展成地下水严重“超采带”<sup>[8-9]</sup>。

此外,突发性的自然和人为水患灾害事件频繁发生,给供用水安全、水环境安全和水生态安全的维系带来了严重挑战。以2005年为例,接连发生了多次危害极大的水污染事件:11月14日石油吉化公司双苯厂爆炸中排放的大量苯类物质,给松花江造成了严重污染;11月24日重庆热江县一家化工厂爆炸,对周边农田造成苯污染,并危及到重庆的城市供水;12月中旬广东韶关冶炼厂含镉废水排放,严重污染珠江水系,危及到广州供水。近年来,太湖、巢湖、滇池等淡水湖泊藻类多次大规模爆发,在严重破坏湖泊水生态系统的同时,给当地饮水安全造成了严重威胁。此外,自然灾害的频繁发生,也给水资源的应急保障带来了严重挑战。2008年年初的南方雨雪冰冻灾害和2008年的汶川地震,均给当地的水源供给造成了严重破坏甚至是毁灭性的灾害<sup>[10]</sup>。

## 1.2 “自然-人工”二元水循环演变模式

水问题的本质是自然和人类活动共同作用下水循环在演变过程中所产生的资源、环境和生态效应超出区域承载能力。为此,在进行水循环多维调控过程中,水循环演变模式与演变机制的科学识别是前提和关键。

在太阳光能和地球重力势能的作用下,水循环得以发生发展。水循环在垂直方向上含有云的形成、降水、冠层截留、地表填洼、入渗、蒸腾、蒸发等基本过程;在水平方向含有坡面产流、河道汇流以及地下水补给和排泄等基本过程;结合大气水汽传输,形成陆地水循环、海上水循环和海陆间水循环等自然营力驱动下的“一元”演变模式。然而,随着人类水土资源开发活动的日渐深入,上述“一元”水循环演变模式逐渐被“自然-人工”二元水循环的模式所取代。人类对水资源的开发利用,直接改变了水的时空分布态势及有水力联系区域水文情势的变化;人类对土地资源的开发,改变了影响产汇流过程的下垫面条件,使得流域水文情势发生分异。此外,温室气体排放,改变了水循环大气过程的动力条件,从而导致区域水循环发生演变<sup>[11-12]</sup>。

“自然-人工”二元水循环演变模式在动力条件、水循环结构和循环参数等方面均较之自然一元水循环演变模式不同,能更为客观和科学地表达全球变化和人类活动影响下水循环的演变特征。从动力条件来看,“自然-人工”二元水循环模式不仅考虑太阳光能、重力势能等自然营力,同时还考虑人工热释放等人类活动的影响。在循环结构上,“自然-人工”二元水循环模式不仅要“对坡面-河道”这一主导水循环过程进行描述,同时还将“取水-输水-用水-耗水-排水”这一人工侧枝水循环过程进行客观表达,并与主循环过程相耦合。在水循环参数表达方面,“自然-人工”二元水循环模式不仅含有降水、径流、地下水等基本水文要素参数,同时还含有侧枝水循环中取水量、输水效率、用水量、耗水率以及用耗水效率基本参数<sup>[5]</sup>。

需要指出的是,随着人口增长和社会经济发展,人类活动对水循环演变的贡献日趋增强;在进行水问题的多维调控过程中,要以“自然-人工”二元水循环演变模式为指导,进行水循环演变规律的定量识别。

## 1.3 水循环及伴生过程的相互作用及其综合效应

在传统的水文水资源研究中,重点关注的是以水量为基本表达的“坡面-河道”水循环过程和人工侧枝水循环过程,缺少对水循环伴生的水化学、水生态和水沙过程的整体科学识别和多维调控,难以满足变化环境下供用水、水环境和水生态安全整体调控的需要。

水是自然界中物质迁移转化的重要介质,环境物质(包括营养物、污染物、泥沙等等)随着水循环过程的发生发展而发生迁移与转化;为此,水循环过程的演变从根本上制约着水化学过程、水生态过程和水沙过程

的变化,是供用水安全、水环境安全和水生态安全维系的前提和基础。流域/区域生态格局的变化,将改变区域下垫面条件,导致冠层截留、入渗、蒸腾等基本水文过程的变化;同时生态过程的变化,还改变了坡面和河道的粗糙度特征,影响到产流和汇流过程及水沙运移过程的变化。水化学过程和水沙过程的变化,将改变生态演变过程中生境条件的变化。泥沙是吸附类污染物的重要载体,水沙过程的变化将影响水化学过程的变化;在特定水质要求下,泥沙还是污染物的重要构成之一。需要指出的是,水沙过程的变化还影响到坡面和河流形态的发育,从而影响水文过程的变化。

由此可见,要科学识别区域水循环的演变机理并进行综合调控,需要将水循环及其伴生过程进行综合分析 with 定量表达,以评价其综合效应,这也是现代水文水资源研究关键。

### 1.4 现代水文水资源学科体系构成

结合水文水资源研究发展、国内外水问题及其基本科学识别,现代水文水资源的学科体系可划分为环节层、过程层、调控层、海陆循环层和地球科学层等 5 个层次(图 1)。

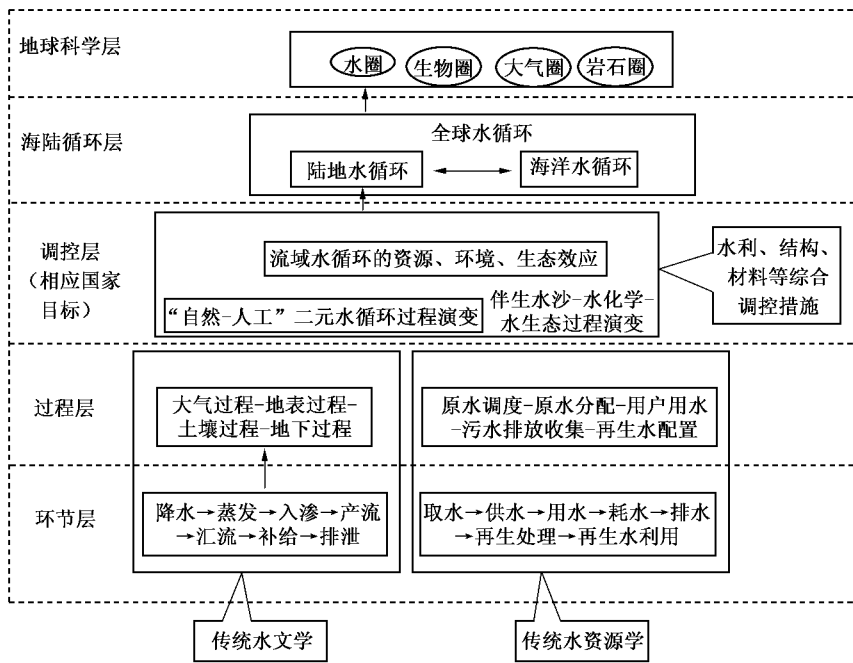


图 1 现代水文水资源学科体系构成

Fig. 1 Subject system constitutions of modern hydrology and water resources

在环节层,主要包括降水、蒸发、入渗、产流、汇流、补给、排泄等天然水循环环节,以及取水、供水、用水、耗水、排水、再生处理和再生水利用等人工侧枝水循环(或社会水循环)环节,亦分别为传统水文学和水资源学的主体研究内容。在对各水文环节进行有机整合的基础上,形成大气过程、地表过程、土壤过程、地下水过程等基本天然水循环过程和原水调度、原水分配、用户用水、污水排放收集和再生水配置等基本人工侧枝水循环过程,构成现代水文水资源学科体系的过程层。面向国家目标,对天然水循环过程和人工侧枝水循环过程进行耦合,形成“自然-人工”二元驱动下水循环过程,即为调控层研究的主体。在调控层的研究中,还需要进一步对水循环伴生的水化学、水沙和生态过程的演变及流域/区域尺度上水循环的资源、环境和生态效应进行研究,并从水利、材料、结构等方面提出相应的调控措施。调控层是现代水文水资源学科研究的关键所在。在流域水循环的基础上,形成陆地水循环;陆地水循环研究与海洋水循环研究的相结合,可对全球水循环的演变机制及规律进行识别,构成现代水文水资源研究的海陆循环层。全球水循环研究与生物圈、大气圈、岩石圈的研究相整合,即构成了整个地球科学层的研究内容<sup>[13]</sup>。

## 2 国内外研究前沿和热点问题

### 2.1 水文水资源学研究的总体发展趋势

纵观国内外水文水资源相关研究发展历程,现代水文水资源研究进一步拓宽了其研究思路,革新了传统研究范式,在研究对象、技术途径和观测实验手段等方面均有新的突破。

(1) 总体思路——从“还原”向“综合交叉”发展 20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<sup>[14]</sup>。

自20世纪90年以来,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2个方面的交叉融合而言,主要有以下5个方面的发展趋势<sup>[3-5]</sup>: 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。

(2) 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,通过陆气耦合研究,保证了水循环4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) 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。

(4) 技术途径——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,高度重视野外原型观测实验,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<sup>[11]</sup>。

(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)、气象站、水质监测站/断面等4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,中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(或撮布)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。

## 2.2 水文学研究重点领域及热点研究问题

### 2.2.1 重点关注领域

随着全球气候变化和人类活动对水循环影响的日益加剧,以及异常水文事件对人类生产生活的影响日趋频繁,水文学关注的重点是变化环境下水循环的演变机理;同时,也在逐步革新水文演变规律识别的技术途径<sup>[14-15]</sup>。

(1) 变化环境下的水循环演变机理和演变规律 该领域研究是进行水文水资源多维调控依据,受到学术界和政府部门的高度重视;其核心任务就是客观评价不同时空尺度上水循环各要素过程发生的趋势性、周期性、随机性等演变规律,定量识别驱动水循环演变的各项自然和人工影响因素的贡献及作用方式,对水循环的历史过程进行“再现”,对未来发展进行预测,服务于调控决策。在国家基础科学研究项目(973)课题“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”研究中,提出了中国北方地区水文水资源演变的5大基本规律,分别是:①水循环水平通量减少,垂直通量增加;②径流性水资源减少,有效的广义水资源量增加;③河道径流减少,不重复的地下水资源量增加;④流域干流中下游径流量在减少,支流就地利用量增加;⑤随着人类活动的持续,上述演变趋势将加剧。该研究领域将是水文的一个长期关注领域,也水文学发展的基础。

(2) 基于物理机制的分布式水文模型研究 相对于传统水文研究的集总式水平衡分析模拟技术而言,基于物理机制的分布式水文模拟,可定量描述不同时空尺度上各水文要素过程,被认为是识别水循环演变规律的有效技术途径,是当前国内外水文研究的重点领域之一。自20世纪50年代以来,国内外已开发出数以千计水文模型,整体可划分为3个阶段:20世纪50~60年代“黑箱子”模型(又称为系统模型)、20世纪60年代以来的集总式概念模型即“灰箱”模型、20世纪80年代中期以来具有物理机制的“白箱”模型研究阶段。当前,基于物理机制的分布式水文模型在研究和推广中尚存在以下问题<sup>[5,16]</sup>:①大尺度流域水循环过程的物理概化及整体模拟;②天然水循环过程与人工水侧枝循环过程的耦合模拟;③不同尺度水文参数及过程的时空分异的有效描述;④极端水文事件的快速响应与精确预测、分析;⑤尺度转换问题;⑥水文过

程及其伴生过程的综合/耦合模拟; ⑦ 参数获取及实时更新问题。

(3) 水文循环过程与生态环境相互作用机制及生态需水研究 由于人类非理性的水资源开发活动, 在一定的时空尺度上过多地影响、占用和控制了水资源, 导致生态系统的用水量被挤占而出现生态退化; 与此同时, 人类的土地资源开发活动, 导致影响地表产汇流过程的下垫面条件发生改变而使得水文情势被改变。为此, 人类需要对其水土资源的开发活动进行科学调控, 维持水安全、生态安全和环境安全, 促进“人-水”和谐。然而, 要满足上述实践需求, 人类需要对水循环过程与生态环境的相互作用机制进行定量识别, 并科学核算生态需水量。如前所述, 该领域属现代水文学与生态科学的交叉研究, 也是当前学术界关注重点领域之一。纵观国内外相关研究, 大多数生态水文研究均是在情景分析的基础上进行“松散式”的机理识别, 未能从水文过程和生态过程发生的物理机制上进行紧密耦合; 在生态需水评价中, 未能有明确的生态目标, 也缺少水分-生态相互作用机理的科学辨识<sup>[17-18]</sup>。

(4) 水循环气-陆耦合研究 为克服传统水循环研究中人为割裂各水循环过程的有机联系和整体性的不足, 提高水文分析模拟的预见期和模拟精度, 自本世纪以来, 国内外开展了大量水循环气-陆耦合模拟研究。水循环气-陆耦合模式研究, 有助于解决下述水文问题: ① 无资料流域水文预报; ② 建立洪水干旱预警系统; ③ 研究气候与水文要素的相互反馈, 模拟大尺度流域的水文气候过程, 认识流域尺度水文循环, 进行流域水资源综合评价和水资源管理; ④ 水文模式模拟的径流和土壤湿度分布有利于改进和提高大气模式预报精度。

当前水循环气-陆耦合研究包括单向数据传递、部分双向耦合以及基于物理机制的紧密双向耦合 3 种研究方式; 但多数研究属于单向耦合或部分耦合, 即利用含有陆面过程的大气模式的输出(主要是降水和蒸发)驱动水文模式, 而水文模式输出的径流、土壤湿度等未对大气模式形成反馈。自 20 世纪 90 年代以来, 国内外水文学界加强了模式耦合研究。在此基础上, Pietroniro 归纳提出了大气水文模式耦合理论的概念性框架: 利用一个共同的陆面模式耦合大气模式和水文模式, 加强大气模式对陆面过程的描述, 改善水文模式预报能力, 为大气模式提供更精确的水分能量输入; 并利用不同层次多级嵌套, 实现大气模式和水文模式的双向耦合, 然后对 2 个模式分别进行率定。

本领域研究是探寻变化环境下水循环演变的有效技术途径之一, 受到水文水资源研究领域和气象研究领域的共同重视, 但相关理论和技术手段尚不成熟, 有着很大的发展空间<sup>[19-20]</sup>。

(5) 缺乏观测资料流域的水文预测(PUB) 本领域研究的任务是: 在无观测资料或缺观测资料的流域, 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)。本领域研究涉及 6 大基础科学问题: 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。

世界上尚存在大范围的水文无资料或缺资料区域, 开展 PUBs 研究可对上述地区的水文演变特征进行科学识别。本领域一经提出, 就受到政府部门的高度重视, 相关研究成果也在实践中得到了广泛应用。如在 2008 年中国汶川地震唐家山堰塞湖的综合治理中, 就采用了该项技术, 对入湖水量和堰前水位进行较高精度预测。

### 2.2.2 热点问题

当前, 水文学研究的热点问题主要包括: ① 水文气象数据聚合与降解、数据同化与现代水文监测技术; ② 流域水文尺度问题与水文模型建模及校正新方法; ③ 全球气候变化下的水文水资源响应; ④ 水文气象耦合模拟与水文预报; ⑤ 水文循环过程-物质循环过程的相互作用与流域水环境; ⑥ 生态水文学与湿地修复; ⑦ 城市水文学与河流湖泊恢复等等。

## 2.3 水资源学研究重点领域及热点问题

### 2.3.1 重点领域

实现水资源的安全、高效和持续利用,是当前人类发展进程中所面临的重大实践需求,也是水资源研究的中心任务。围绕上述中心任务,国内外在水资源评价与价值量核算、水资源配置、水资源调度、水资源利用效率评价和水资源管理等方面开展了深入研究,并成为水资源研究的重点领域。

(1) 水资源评价 水资源评价是进行水资源综合管理与调控的关键基础。综观国际组织和有关国家的水资源评价,具有以下4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。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”和国家基础科学研究项目(973)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<sup>[11-12]</sup>。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) 水资源价值量核算 在经济社会发展过程中,由于忽视了自然资源的价值和对资源基础的保护,掠夺性开发严重,从而导致经济产值虚幻增加,资源基础持续削弱。因此传统的价值理论已不能满足新形势的要求,需要寻求一种能代表经济发展实际效果的新的价值评价体系。1993年国民核算体系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,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。

自20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。中国作为发展中国家,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<sup>[21-22]</sup>。

(3) 水资源合理配置 水资源配置相关研究自20世纪80年代正式提出后,在之后的水资源规划管理中得到了重视。北方地区缺水及其日趋严重的生态环境变化是中国首要解决的问题之一,针对这一状况,从“六五”攻关到“八五”攻关计划中,国家将北方地区的水资源问题列为国家科技攻关计划,重点研究了水资源配置的基础理论以及与社会经济发展之间协调关系和相应的解决措施,在攻关中相继提出了水资源评价方法、“四水”转化模式和地下水地表水的联合调配以及基于宏观经济的水资源合理配置理论与方法。而后针对西北地区水资源匮乏与区域生态环境恶化关系密切的问题,又在“九五”攻关中提出面向生态的水资源配置,在“十五”攻关中提出基于实时调度的水资源配置,到目前提出基于水量水质联合调控和蒸散发控制为核心的水资源配置。水资源配置的研究通过国家层面的攻关项目为主线形成了比较完整的水资源配置理论体系。

(4) 水资源实时调度 水资源实时调度的思想早在水库调度实践中形成,但直到20世纪70年代计算机、遥测遥感技术和通信技术迅速发展之后,实时调度技术才开始在水利部门逐渐得到实际应用。20世纪80年代中期,中国水利部水利调度中心开始研究水库防洪系统实时调度,接着开始在长江、黄河、淮河等

大河的重点河段建立江河防洪实时预报调度系统。从实时调度技术的发展而言,随着预报和管理技术的逐渐现代化,实时调度决策思想才越来越受到人们的重视,实时优化调度理论与方法也在由单一用途的单一模型向多用途模型系统方向发展,并开始走向定性与定量、统计推断与人工智能相结合的智能化道路。

流域水资源实时调控是一个新的课题,目前国内还没有一个可操作的完整的流域水资源实时调控系统,水资源实时调控仍只停留在经验分析的基础上。进行流域水资源实时调度研究已不再局限于水资源系统中的某个或某些子系统,需要将流域看成一个整体来研究,研究流域二元水循环的各个环节和流域水资源调度的理论与方法,将各子系统相互耦合以真实地反应流域水系统。同时,需要将现代化的信息技术引入到流域水资源实时调度系统中,不断充实流域水资源实时调度的方法和手段。在国家“十五”科技攻关项目课题“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”中,原创性地提出了“宏观总控,长短嵌套,实时决策,滚动修正”的水资源实时调度总控方案<sup>[11]</sup>。

(5) 水资源高效利用评价与节水型社会建设 早期的水资源高效利用评价研究更主要的是集中于从单一工程单项效益分析入手研究其水资源利用综合效益,随着资源、环境和生态问题日益突出,水资源高效利用评价更加重视综合效益的评价。目前,水资源高效利用评价包括经济效益评价、社会效益评价和生态效益评价。

节水型社会建设是21世纪初中国政府提出的一项重大治水方略,旨在通过管理体制、机制和法制建设,促进水资源的高效利用、水污染的综合治理和水生态的修复。中国已在多批试点建设的基础上,在全国范围内推广节水型社会建设,并作为节约型社会建设的重要缓解。当前,中国节水型社会建设中仍存在以下问题:缺位的理论体系、现行政策操作性较差、建设评价体系不健全、缺乏系统的后效评价机制;新技术的推广应用体系不完善;节水的经济调节监管手段不健全以及公众参与机制相对落后。

(6) 水资源综合管理与数字流域建设 水资源综合管理是在不危及重要生态系统可持续性的同时,促进水、土及相关资源的协调开发和管理,以公平的方式实现经济效益和社会福利最大化的一个过程。水资源综合管理不是目的,而是实现效率、公平和环境可持续3个战略目标。水价的科学制定和水权分配是进行水资源综合管理的两大核心手段。在21世纪初,中国学者提出了资源水价、工程水价和环境水价三重结构水价体系及定价具体操作的方式,对水资源价值和用户水价作了清晰界定,提出了可操作的计算和操作方法,从理论上为水的资源权属管理与相关产权管理的分离奠定了基础;2004年在三重水价理论上取得了更进一步的突破,提出了基于水资源绿色核算的投入占用产出分析技术与生产函数、最优化方法相结合的经济社会用水合理定价模型,以及考虑经济社会部门最基本用水的经济社会与生态环境竞争用水的水价模型。就水权研究而言,当前已提出自然水权和国民经济水权、政府预留水量、政府监管水量等概念,给出了初始水权分配的指导思想、基本原则与分配范围,以及初始水权分配类别、分配级别、分配对象、表征指标与分配程序等。

为提高水资源的管理和决策效率,自本世纪初以来,国内外开展了广泛的数字流域建设。在中国,已较为成功地开展了“数字黄河”等多个一级流域的“数字流域”工程建设。在当前的数字流域建设中,在数据采集、传输、存储、虚拟仿真等方面取得了较大进展,但在大多数数字流域建设过程中,缺少水循环及伴生水化学、水生态、水沙过程的模拟预报模型作为支撑。

### 2.3.2 热点问题

纵观国内外相关研究,水资源研究领域的热点问题主要包括:①水资源配置与管理新方法;②集成经济、环境、生态、水文与水资源管理的综合模型;③水资源分配系统的水质安全与公共健康;④地下水含水层保护修复;⑤水资源管理决策的不确定性和风险分析;⑥流域管理中的公众参与等等。

## 3 中国水文水资源研究体系及其研究方向

### 3.1 中国水文水资源研究体系

结合水问题的国家需求,中国水文水资源研究体系包括基础研究、应用基础研究和应用研究3个层次。在基础研究层次,主要是对“自然-人工”二元驱动下的水循环及伴生水化学、水生态和水沙过程进行识别,



并探寻规律识别的有效技术途径; 在应用基础研究层面, 主要是进行水资源评价、配置、调度、水权分配、水价等价等方面理论和技术研究; 在应用研究层次, 主要是开展节水型社会建设、水环境保护与水生态建设、水资源综合管理、防灾减灾与应急管理、饮水安全和水利工程建设等方面研究, 直接服务国家的水利开发和管理、水生态修复、水环境治理与民生水利。

### 3.2 中国水文水资源的研究方向

综合国内外水文水资源研究的新进展和中国水问题解决的实践需求, 中国水文水资源研究可概化为以下8个研究方向。

(1) 流域水循环演变模式与调控基础研究 流域“自然-人工”水循环与水资源演变机理与模式; 基于全属性功能的流域水循环综合调控基础理论与方法; 流域水循环多维临界调控定量标准与模式研究。

(2) 流域水循环综合模拟与数字流域平台研究 “自然-人工”二元水循环多元信息采集与同化技术; 水循环大气-地表-土壤-间环节地下水过程的综合模拟; 流域水量循环及伴生水化学、泥沙、生态过程综合模拟; 流域环境虚拟与集成型数字流域平台构建技术。

(3) 现代环境下的流域水资源综合评价方法研究 大气水、地表水、土壤水、地下水资源量实时动态评价; 水质水量实时动态评价; 水资源利用效率/效益评价; 水资源量、质、效用一体化评价。

(4) 水资源合理配置理论与技术研究 水资源合理配置决策机制与基础理论; 水资源系统分析与需求预测方法及关键技术; 水资源合理配置模型构建技术; 水资源配置评价技术。

(5) 水资源实时调度理论与技术研究 实时来水预测预报技术; 实时需水预测预报技术; 实时调度方案生成技术; 调度方案动态修正技术; 实时调度方案实时评价技术; 调度指挥与决策支持系统建设技术。

(6) 节水型社会建设基础理论与关键技术研究 节水型社会建设的基础理论与模式; 节水型社会建设的规划方法与标准技术; 总量控制管理与水资源高效利用关键技术; 节水型社会制度建设与政策研究。

(7) 水环境保护与生态修复技术研究 水资源及生态环境价值核算方法与技术; 水生态服务功能评价与生态需水计算方法; 水环境评价与水环境演变模拟及保护技术方法; 水环境保护与生态修复管理决策系统。

(8) 水资源综合管理理论与技术研究 水资源综合管理体制机制及其制度安排研究; 水权/水市场基础理论及其制度设计; 水资源价值与水价理论方法及其实际应用; 需水管理、水环境保护、生态补偿机制性政策研究; 基于八大总量(地表水、地下水、ET、生态用水、国民经济用水、入河污染排放、入海水质水量、入河泥沙等)控制的水资源综合调控; 区域用水安全的应急联动。

## 4 结 语

变化环境和高强度人类活动影响下, 水循环已经具有显著的“自然-人工”二元驱动力、结构及参数特征。现代水文水资源学整体上由“还原细化”向“综合交叉”、自然水循环与社会水循环相结合的方向发展; 并以水循环过程作为主体研究对象, 原型观测与数字模拟作为关键研究手段。结合国家重大实践需求, 通过自主创新, 构建中国特色的水文水资源研究理论与技术体系, 加强水循环模式与调控基础理论研究, 建设适合中国国情的模型体系及数字平台, 革新水资源调配、节水型社会建设、水生态建设与水环境保护、水资源综合管理等方面的理论与技术, 维护水安全、生态安全与环境安全。

### 参考文献:

- [1] ALLAN T. Productive efficiency and allocative efficiency: Why better water management may not solve the problem[J]. *Agricultural water Management*, 1999, 40(3): 71-75.
- [2] GAO Ge, HUANG Chao-ying. Climate change and its impact on water resources in North China[J]. *Advances in Sciences*, 2001, 18, 718-732.
- [3] IGBP. *Global change and the earth system: A planet under pressure*[M]. Netherlands: Springer, 2004.

- [4] IOSLOVICH I , GUTMAN P. A model for the global optimization of water prices and usage for the case of spatially distributed sources and consumers [J]. *Mathematics and Computer in Simulation* ,2001 ,56( 1) : 347-356.
- [5] JIA Y , WANG H , ZHOU Z , et al. Development of the WEP-L distributed hydrological model and dynamic assessment of water resources in the Yellow River Basin [J]. *J Hydrol* ,2006 ,331: 606-629.
- [6] TISDELL J G. The environmental impact of water markets: An Australian case-study [J]. *Journal of Environmental Management* , 2001 ,62: 113-120.
- [7] UNESCO. Guidelines for conducting water resources assessment: A contribution to IHP-IV project M-4-1( a) [R]. [S. l. ]: Milorad Miloradov and Prvoslav Marjanovic ,1998.
- [8] 国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部. 2006 年中国水旱灾害公报 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2008: 11-26. ( Office of State Flood Control and Drought Relief Headquarters , Ministry of Water Resources. Bulletin of Flood and Drought Disaster in China 2006. Gazette of Ministry of Water Resources of [R]. Beijing: Ministry of Water Resources. 2008: 11-26. ( in Chinese) )
- [9] 中华人民共和国水利部. 2006 年中国水土保持公报 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部公报. 2008: 27-39. ( Ministry of Water Resources. Bulletin of Soil and Water Conservation bulletin in China 2006 [R]. Beijing: Ministry of Water Resources. 2008: 27-39. ( in Chinese) )
- [10] 国家环境保护总局. 2006 年全国环境质量公报 [R]. 北京: 国家环境保护总局, 2007. ( State Environmental Protection Administration. Bulletin of Environment Quality in China 2006 [R]. Beijing: State Environmental Protection Administration ,2007. ( in Chinese) )
- [11] 中国水利水电科学研究院. “十五”国家重点科技攻关项目“黑河流域水资源调配管理信息系统研究”专题“黑河流域水循环系统的分布式模拟”报告( 2001BA610A-02-01) [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2002. ( China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Distributed model of hydrological cycle system in Heihe River basin( 2001BA610A-02-01) [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research ,2002. ( in Chinese) )
- [12] 中国水利水电科学研究院. 国家重点基础研究( 973) 发展规划项目“黄河流域水资源演化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”( G1999043602) 报告 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004. ( China Institute of Water Resources and Hydropower Research. The State “973” Project , Evolutionary Pattern of Water Resources and Dual Evolution Model of the Yellow River Basin( G1999043602) [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research ,2004. ( in Chinese) )
- [13] 陈志恺, 王维第, 刘国纬. 中国水利百科全书: 水文与水资源分册 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004. ( CHEN Zhikai , WANG Wei-di , LIU Guo-wei. Water conservancy encyclopedia China: Hydrology and water resources [M]. Beijing: China WaterPower Press ,2004. ( in Chinese) )
- [14] 赵生才. 全球变化与中国水循环前沿科学问题: 香山科学会议第 187 次学术讨论会 [J]. *地球科学进展* ,2002 ,17( 4) : 628-630. ( ZHAO Sheng-cai. Frontier science issues in globe change and water cycle in China : Xiangshan science conference of No. 187 [J]. *Advances in Earth Science*. 2002 ,17( 4) : 628-630. ( in Chinese) )
- [15] 李家洋, 陈泮勤, 葛全胜, 等. 全球变化与人类活动的相互作用: 我国下阶段全球变化研究工作的重点 [J]. *地球科学进展* ,2005 ,20( 4) : 371-375. ( LI Jia-yang , CHEN Pan-qin , GE Quan-sheng , et al. Global change and human activities: Priorities of the global change research in next phase in China [J]. *Advance in Earth Science* ,2005 ,20( 4) : 371-375. ( in Chinese) )
- [16] 胡和平, 田富强. 物理性流域水文模型研究新进展 [J]. *水利学报* ,2007 ,38( 5) : 511-517. ( HU He-ping , TIAN Fu-qiang. Advancement in research of physically based watershed hydrological model [J]. *Journal of Hydraulic Engineering* ,2007 ,38( 5) : 511-517. ( in Chinese) )
- [17] 陈敏建, 王浩, 王芳. 内陆干旱区水分驱动的生态演变机理 [J]. *生态学报* ,2004 ,24( 10) : 2108-2114. ( CHEN Min-Jian , WAN Hao , WANG Fang. Water-driver ecological evolution mechanism in inland arid region [J]. *Acta Ecologica Sinica* ,2004 ,24( 10) : 2108-2114. ( in Chinese) )
- [18] 杨志峰, 崔保山, 刘静玲, 等. 生态环境需水量理论、方法与实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2004. ( YANG Zhi-feng , CHUI Bao-shan , LIU Jing-ling. The theory , methods and practice of the eco-environmental water requirement [M]. Beijing: Science Press ,2004. ( in Chinese) )
- [19] 郭生练, 刘春蓁. 大尺度水文模型及其与气候模型的联结耦合研究 [J]. *水利学报* ,1997( 7) : 37-41. ( GUO Sheng-lian ,

- LIU Chun-zhen. Study on the macro-scale hydrological model and its coupling with atmospheric models [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(7): 37-41. (in Chinese)
- [20] 陆桂华,吴志勇,雷文等. 陆气耦合模型在实时暴雨洪水预报中的应用[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 847-852. (LU Gui-hua, WU Zhi-yong, LEI Wen, et al. Application of a coupled atmospheric-hydrological modeling system to real-time flood forecast [J]. *Advance in Water Science*. 2006, 17(6): 847-852. (in Chinese))
- [21] 王浩,陈敏建,秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 208-218 (WANG Hao, CHEN Min-jian, QING Da-yong, et al. Study on the water resources reasonable disposition and supporting capacity in North-west China [M]. Zhengzhou: Yellow River Press, 2003: 208-218. (in Chinese))
- [22] 赵丹,邵东国,刘丙军. 灌区水资源优化配置方法及应用[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(4): 69-73. (ZHAO Dan, SHAO Dong-guo, LIU Bing-jun. Method of disposition on water resources of irrigation district and its applications [J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(4): 69-73. (in Chinese))

## Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues\*

WANG Hao<sup>1</sup>, YAN Deng-hua<sup>1</sup>, JIA Yang-wen<sup>1</sup>, HU Dong-lai<sup>1</sup>, WANG Ling-he<sup>1,2</sup>

(1. *Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing, 100044;*

*2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116023)*

**Abstract:** On the basis of identifying water problems at home and abroad, this paper analyses the evolution pattern of the natural-artificial dualistic water cycle, clarifies the interactions among hydrological processes, and associated hydrochemistry, water ecology and flow-sediment processes, as well as preliminarily describes the subject system constitution of modern hydrology and water resources. Based on describing the development trend of international hydrology and water resources and hot issues and frontier problems, and combining with research status of hydrology and water resources and practical demands on solving water problems in China, we discuss the subject system of hydrology and water resources in China, and analyze the important research directions. Under the influences of environmental change and strong human activities, water cycle shows obviously the natural-artificial characters on all aspects of dynamics, structure and parameters. Modern hydrology and water resources research is changing from traditional methodology of decomposition and refinement to present emphasis on integration and crossover, and from single-hydrological-variable oriented research to integrated hydrological processes oriented research. Prototype observation and numerical simulation become a critical study method in these fields. Hydrology and water resources research needs further strengthening on the basic research of mechanism identification and quantitative simulation of the water cycle and associated processes, improving on the application basic research of assessment, allocation and regulation of water resources, water right distribution, and water pricing theory and technology, to serve water-saving society establishment, water environmental protection and ecological construction, integrated water resources management, disaster prevention and mitigation and emergency treatment, drinking water safety, hydraulic engineering construction, and other practical needs.

**Key words:** hydrology and water resources; natural-artificial dualistic mode; development trend; hot issues; research system

---

\* The study is financially supported by the Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (No. 50721006).