

水文科学研究进展的回顾与展望

徐宗学¹, 李景玉²

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 国土资源部中国土地勘测规划院, 北京 100035)

摘要: 对水文科学的研究现状、主要进展和发展趋势进行了系统深入的总结和分析, 其结果表明, 社会需求是水文科学发展的根本动力, 技术进步是水文科学发展的源泉。水文科学不仅要研究地表水文过程, 还要研究各圈层界面上水分和能量交换过程, 不仅要研究水在运动转化过程中的物理过程, 还要研究水中各种化学成分的化学过程, 特别需要加强水在水文循环和运动中生物过程的研究, 从而使水文学向生态水文学的方向迈进。目前, 生态水文学、全球气候变化影响是水文学研究的热点领域之一。今后除了进一步继续完善和深化水文科学的理论体系, 还要不断丰富水文科学的社会服务功能, 为经济建设和社会发展提供科技支撑。

关键词: 水文循环; 水资源; 地表水; 地下水

中图分类号: P33; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2010)04-0450-10

水文学作为地球科学的一门分支科学, 主要研究地球系统中水的存在、分布、运动、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。同时, 水文学也是水利工程一级学科下的5个二级学科之一。其研究内容除了水的形成、循环、时空分布特征、化学和物理性质以外, 还包括水资源开发利用和保护, 水旱灾害的形成、预测预报、防治, 水利工程和其它有关土木、道路、桥涵、电力工程等的规划、设计、施工、管理中的水文水利计算技术, 为防洪抗旱、合理开发和利用水资源, 不断改善人类生存和发展条件提供科学依据^[1]。水文学的研究领域十分宽广, 从大气到海洋, 从陆地表面到地下, 都是水文科学的研究对象; 水圈同大气圈、岩石圈和生物圈等地球自然圈层的相互关系, 也是水文学的研究领域; 水文科学不仅研究水量, 而且研究水质, 不仅研究现时水情的瞬息变化, 而且探求地球上水的生命史, 预测其未来的演变趋势^[2-3]。水文科学不仅是水利工程其它分支学科如农田水利工程、水文学及水资源、水利工程建筑与施工、河口海岸工程等专业的的基础, 也是诸如地理科学、环境科学、资源科学、生态科学等学科的基础, 是一门非常重要而且其应用十分广泛的科学。本文对水文科学的发展历程进行了简要的梳理和总结, 分析了近期的主要热点研究领域, 并对未来若干年的发展趋势与主要研究领域进行了分析和展望。

1 水文科学发展回顾

水文循环(又称水循环) 与水量平衡是水文学的两大基本规律, 地球上的各种水体通过水文循环紧密地联系在一起, 对水循环的研究是水文学研究的核心内容^[4]。人们在长期的社会实践活动中逐渐认识到了水文循环的基本规律, 使水文科学逐渐发展成为一门近代自然科学^[5]。按照中国目前的学科分类, 水文学属于地球科学的二级学科, 同时也属于水利工程一级学科下面的五个二级学科之一。虽然仅仅是一门二级学科, 但其分支科学十分庞大, 内容十分广泛, 按照不同分类标准有许多不同的分支学科。例如, 按研究方法不同分为地理水文学、系统水文学、随机水文学、遥感水文学、实验水文学、同位素水文学、数字水文学等; 按

收稿日期: 2009-08-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979005); 北京师范大学“京师学者”特聘教授资助项目

作者简介: 徐宗学(1962 -), 男, 山东淄博人, 教授, 博士, 主要从事水文水资源方面研究。

E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

研究对象不同可以分为流域水文学、海洋水文学、河流水文学、沼泽水文学、湖泊水文学、河口水文学、冰川水文学、湿地水文学、干旱水文学、水文气象学、地下水水文学等;按应用范围不同可以分为工程水文学、农业水文学、城市水文学、环境水文学、森林水文学、生态水文学等,可见,其内容之广,与国民经济关系之密切是一般其它二级学科所罕见的^[2]。

可以说水文科学是一门既古老而又年轻的学科,最早可以追溯到公元前3000多年前,当时古埃及已在尼罗河观测水位,也是最早的水文测验实践。在中国,公元前1400年前后,殷墟甲骨文中已出现关于降雨和洪水的记载;公元前251年,李冰在都江堰用石人小尺观测水位;公元前88年前后,王充提出了关于水文循环成因的科学解释;公元1424年,中国开始采用测雨器观测雨量;1663年,英国科学家雷恩发明自记雨量计;1736年,中国首次绘制降水量等值线图;1775年,法国水文学家Chezy发表明渠均匀流公式——Chezy公式;1790年,德国水文学家沃尔特曼发明流速仪,这些成果可以说是水文科学的萌芽^[4-5]。

19世纪,以牛顿力学为基础的古典科学得到了快速发展,伴随着这一科学快速发展的黄金时代,水文科学也得到了迅速发展,作为一门独立的学科,从1850年前后逐渐形成了自己的一套方法论。1851年,爱尔兰科学家Mulvaney提出了汇流时间的概念,并提出了最初的推理公式计算小流域最大洪峰流量,设计制作了原始雨量器;1856年,法国科学家Darcy基于牛顿力学创立地下水渗流理论的基本定理——Darcy定律。1865年,中国在长江汉口设立水位站,开创了中国现代水位观测的新纪元。1871年,法国科学家Saint-Venant提出水流连续方程组——圣维南方程组。1889年,爱尔兰科学家Manning提出了著名的水力学计算公式——Manning公式;Darcy定律为研究土壤水、地下水动力学以及地下水资源的形成与演化奠定了基础,Manning公式和圣维南方程为研究河道和坡面洪水运动以及流域汇流规律奠定了基础,这一阶段也是水文学作为一门相对独立的科学而发展的奠基阶段^[5]。

20世纪前半叶,随着生产力的不断发展,人们期望能够更科学地了解和掌握洪水和干旱的变化规律,并通过建造水利工程与洪水和干旱作斗争,这一社会发展的客观需要,导致了工程水文学的快速发展。1914年,美国水文学家Hazen首先用正态概率格纸选配流量频率曲线,把概率理论引入水文计算;1924年,美国水文学家福斯特提出皮尔逊Ⅲ型频率曲线分析方法;1931年,苏联水文学家Velikanov提出等流时线的概念;1932年,美国水文学家Sherman提出了单位线的概念;1935年,美国水文学家Horton提出下渗理论曲线——Horton下渗公式;1935年,美国水文学家MaCarthy提出用于河道流量演算的马斯京根法;1945年,美国水文学家Clark首先提出瞬时单位线的概念;1957年,爱尔兰水文学家Nash深入分析了瞬时单位线的物理机制,并用数学语言描述流域汇流过程。这些理论和方法的提出,不仅为许多水利工程的设计、建设与运行管理提供了理论依据,也全面奠定了工程水文学的基本内容。现在工程水文学的很多内容都是这一阶段的产物,例如频率分析方法、产汇流计算理论与方法等,而且时至今日还在水利工程实践中普遍采用^[5]。

20世纪后半叶,随着世界各国经济的快速发展,尤其是60、70年代电子计算机的发明和应用,在全世界范围内引发了以计算机技术为核心的信息革命,使现代科学技术得到了突飞猛进的发展,与此相对应,水文科学也得到了前所未有的迅猛发展^[6]。1965年,国际水文十年开始启动,并于1975年开始全面执行国际水文计划,这一计划目前已进入第7阶段,世界各国的水文学家进一步加强合作,各种新理论、新方法不断涌现^[7]。例如,以计算机技术为标志的基于物理机制的分布式水文模型近年来得到了极为广泛的研究和应用,以遥感技术为依托的遥感水文学得到了异常快速的发展,并迅速在水资源管理、防洪减灾等生产实践中得到了十分广泛的推广和应用^[8]。从学科发展来看,近30年来,由于各国经济社会的急速发展,以水资源短缺、水污染加剧和生态退化为主要标志的水问题不断涌现,与此相对应,先后诞生了主要以研究水资源短缺问题为核心的水资源水文学,以研究水环境为核心的环境水文学,以及以研究生态和水文过程相互关系为主线的生态水文学。近年来,随着全球气候变化日益受到重视,以研究气候变化对水文循环的影响为主要内容的全球变化水文学正在成为国际水文学界研究的热点领域,其有关研究成果如雨后春笋不断涌现,中国相关部门也积极参加各种国际水文合作项目和活动,在有关研究领域尤其是关于水循环不同要素的研究、“四水”转化、气候变化对水循环的影响等相关领域,也开展了大量深入系统的研究工作,取得了十分丰硕的

研究成果^[9-11]。

从水文学的发展过程可以看出,水文学的研究领域越来越宽广,与人类社会的关系越来越密切,在经济社会中的地位 and 作用越来越重要。学科发展的每一项成就,无不体现了社会的现实需要,也无不深深打上了不同时代科学技术发展水平的烙印。

2 水文科学发展动态

20 世纪 60 年代以来,随着计算机技术的飞速发展,遥感遥测技术的应用,一些新理论和边缘学科的渗透,加之人口膨胀、水资源紧缺、水环境恶化和气候变化的驱使,使得水文科学的发展面临着前所未有的机遇和挑战。特别是近二三十年来,国际水文学术活动频繁,中国广大水文工作者也积极参与各种国际交流与合作,开展了大量深入系统的研究工作,推动水文科学发生了深刻的变革和发展,从而使水文科学进入了现代水文学的新阶段^[6,11]。

2.1 国际水文合作不断加强

国际水文计划(IHP, International Hydrological Programme) 开始于“国际水文十年”,于 1964 年由联合国教科文组织(UNESCO) 第 13 次大会批准,1965 年 1 月 1 日开始执行^[3]。后来考虑到 10 年时间有限,不足以解决水文科学发展及其实际应用的大量问题,需要有一个长期的国际水文科学合作计划,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。为此,联合国教科文组织和世界气象组织(WMO) 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 年) 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。由于联合国教科文组织调整预算周期,国际水文计划第二阶段只有 3 年(1981~1983 年)。第三阶段计划恢复为 6 年(1984~1989 年),第四阶段计划 6 年(1990~1995 年),第五阶段计划 6 年(1996~2001 年),第六阶段计划 6 年(2002~2007 年)。现正在开展的是第七阶段计划(2008~2013 年)。国际水文计划是一个以水文科学研究和教育为重点的计划,它进行一系列的国际性、全球性的水文科学研究,并进行水文科学的国际培训和知识传播,以期提高各国政府决策人员、科技人员和一般群众对水文科学的认识,重点放在应用水文学与水资源的调查评价、开发利用、管理保护以及人类活动对水资源和水环境的影响,最终目的是为了帮助解决重大的水资源问题和与水有关的社会经济发展问题。第一阶段侧重人类活动影响、水资源与自然环境之间关系的研究;第二阶段致力于将研究领域扩大到各个特定的地理、气候区域,并朝着综合利用水资源的方向发展;第三阶段主题是为经济社会发展合理管理水资源;第四阶段研究重点是大气-土壤-植被之间的水循环关系以及全球气候变化对陆地水文过程的影响。第五阶段的主题是“脆弱环境中的水文水资源开发”,相对以前的 4 个阶段,后面几个阶段更加突出了水文科学对可持续水资源规划与管理的支撑作用。第六阶段的主题是“面对风险和社会挑战下的水系统相互作用”。现在已进入第七阶段,其主题为“水资源短缺社会对水系统的响应和依赖性”。国际水文计划的实施和开展,对于加强水文科学研究的国际合作与区域合作,起到了巨大的推动作用,尤其是目前在 IHP 框架下成立的 HELP(Hydrology for the Environment, Life and Policy) 以及全球 11 个 FRIEND(Flow Regimes from International Experimental and Network Data) 国际合作项目,对于促进水文科学研究的区域合作与交流,做出了巨大的贡献^[7]。

国际水文科学协会(IAHS, International Association of Hydrological Sciences) 是国际上比较有影响的水文学学术组织,下属 9 个委员会,涉及地表水、地下水、陆面侵蚀与泥沙、冰雪、水质、水资源系统、水文遥感与资料传输、大气-土壤-植被关系和同位素示踪等方面^[7]。20 世纪 90 年代以后,IAHS 召开了一系列直接与水资源可持续管理相关的水文学基础研究和应用方面的学术研讨会。以生态水文学和水资源管理专题为例,探索的主要问题包括:水文循环与生态系统变化的联系是什么?反过来生态系统的变化及其影响导致的水文后果是什么?水文学的研究不仅需要认识如何作用于水文循环的物理过程,同时也需要探索对水文循环的生物控制及气候、水文和环境的相互作用,从而深化对陆面生态系统的影响、以及全球气候变化和人类活

动对国民经济和社会可持续发展影响的认识,以达到保护人类生存环境的目的。国际地球科学在面向 21 世纪的发展中十分重视水文学和生态学交叉的方向研究,生态水文学已经成为近代水文学发展的一个重要方向,其主要研究内容涉及土壤-植被-大气转化模型的研制,河流生态系统多样性、时间和空间的变异性分析,生态系统变化与河流泥沙输送与氮负荷的响应关系,以及生态水文模型等^[12]。21 世纪初,围绕着水文学未来的发展方向,IAHS 组织发起了全球范围内关于今后水文科学研究方向的大讨论,经过近 3 年的广泛讨论,最终达成了围绕着 PUB(Prediction of Ungauged Basin) 即无观测资料流域水文预测,开展数据同化技术、充分利用遥感遥测等资料,开发具有物理机理的分布式水文模型为中心进行研究的共识,目前,许多国家已成立了自己的 PUB 国家委员会,有力地推动和促进了水文科学在世界各地的研究工作。

2.2 水文科学研究的热点领域

近二三十年来,水文科学得到了快速发展,雷达测雨、中子仪和时域反射仪(TDR)测土壤含水量、放射性示踪测流、卫星遥感获取水文资料等现代技术的应用,使人们能够获得使用常规方法所无法获得的水文信息。然而,摆在广大水文学者面前还有很多需要继续进一步深入探讨和研究的问题,例如,最近受到广大水文工作者青睐的主要研究问题包括^[3,6]:

(1) 水文循环与生物圈的相互作用 传统的水文学研究只考虑水量的自然变化,现代水文循环需要考虑地球生物圈、全球气候变化以及人类活动等各个方面的影响。国际地圈生物圈计划(IGBP)代表国际地球科学发展的前沿,水文循环和生物圈的相互作用是 IGBP 的核心内容之一^[3]。它注重陆面生态-水文过程与空间格局的变化规律和人类活动影响的关键问题,例如:植被如何与水文循环的物理过程相互作用?改变陆面生态过程的直接原因是什么?通过这些研究,将为认识自然变化和人类活动影响下的土地利用/土地覆被变化与陆地表层生命物质过程、评估人类活动对生物圈的影响、保护生态环境和维持水资源可持续利用提供科学基础和决策依据。

(2) 气候变化对水循环的影响 传统观念认为,对于陆地水文过程而言,长系列水文过程的均值是稳定不变的,年径流出现的丰枯现象,被视为围绕均值的波动性变化。作为水利工程设计基本依据的水文计算都是以几十年至几百年时间尺度的水文过程稳定不变为前提,未来被看作是过去的重复或外延。但现在人们已经认识到,一个地区的水文循环过程并不总是处于统计平衡状态,而是呈现不同尺度的变化。20 世纪科学研究进展表明,陆面生态系统对大尺度水文循环具有十分重要的反馈作用^[6]。全球气候变化对水文循环的影响是 21 世纪水文科学研究的前沿问题之一。其致力于研究的科学问题包括:全球气候变化对区域水循环规律有何影响?如何认识大气圈-水圈-生物圈的相互作用?如何认识水资源的时空演变特征?其基本规律是什么?

(3) 人类活动对水循环的影响 近年来,水文学家十分关注土地利用/覆被变化与水循环以及碳循环的关系,致力于探讨的科学问题包括:典型流域的水循环演变机理,水文循环与生态系统的相互作用,地表水与地下水交换的机制与作用,“大气-土壤-植被”界面过程中的物质与能量转化规律,分布式水文模型,区域水文循环演化与土地利用/覆被影响的定量研究^[3]。借助上述研究,将回答以下主要问题:人类活动对水循环及水资源有哪些影响?人类活动如何对水的变化规律产生影响?有何地区或区域特征规律?如何量化人类活动对水循环和水资源的变化及影响?

3 水文科学发展展望

社会需求是水文科学诞生的根本原因,也是水文科学不断发展的动力和源泉。过去几十年来,随着世界各国经济社会的快速发展,由此也产生了众多的水问题,无论是水多还是水少,对社会都会带来不利影响,干旱和洪涝灾害自人类社会产生以来就没有停息过,而探究干旱洪涝产生的原因,提出防洪抗旱的根本措施就成为广大水文工作者的历史使命。围绕着这一神圣的历史使命,广大水文工作者前赴后继,在科学的道路上不断攀登和探索,为经济社会建设和发展提供科学支撑的同时,也不断发展和完善了水文科学的学科体

系,取得了大量丰富的研究成果。例如,设计洪水计算理论与方法、联机实施洪水预报技术与方法、流域水文模型的研究较好地满足了防洪减灾的科技需求,水资源评价和水质研究、水资源联合配置和高效利用、江河水文情势研究以及气候变化对水文和水资源影响评价广泛开展,为水资源可持续利用提供了坚实的科学基础。随着新理论和新方法如信息论、系统论、控制论、随机理论、模糊数学、人工神经网络等方法的引入,水文科学相继出现了许多新的研究方法和分支学科,如系统水文学、随机水文学、环境水文学、遥感水文学等,使水文科学进入了一个异常活跃的发展时期,形成了百花齐放和百家争鸣的格局,这也是进入现代水文学新阶段的一个特色。目前,随着经济社会的快速发展,水质不断恶化,生态退化日趋严重,水资源供需矛盾越来越突出,水文科学需要研究解决的问题越来越复杂,面临着前所未有的挑战。先进技术和多学科理论不断涌现,为水文学研究提供了前所未有的机遇。无资料流域水文预测、不确定性和尺度问题、生态水文学、水文模型及其参数辨识、气候变化的水文响应、水资源可持续利用、城市水循环与水资源管理。同位素技术和遥感技术在水文学中的应用等,都将是未来相当长一段时间内国际水文科学关注的热点问题和亟待深入探索与研究的领域^[10-11]。

3.1 水文基础理论研究

(1) 水文尺度与水文相似性问题 水文尺度问题与水文相似性问题密切相关,如果能寻找出水文相似性,就可以通过这种相似性来处理水文尺度问题。例如,水文学家近些年来研究发现,有些水文现象受到分形理论的支配,这就是说,它的局部与整体之间存在着称之为自相似性的水文相似性。按照分形理论,在一定尺度范围内,具有自相似性的水文现象,其不同尺度的规律性之间的关系,取决于一种称为标度变换的简单变换。因此,对于具有自相似性的水文现象,通过标度变换就可以将该水文现象从一种尺度下获得的规律变换成另一种尺度的规律。由于水文现象的复杂性,水文学家目前对水文相似性的了解还刚刚开始,有待于进一步的深入探讨和研究。

(2) 产汇流理论和分布式水文模型 水文产汇流理论的研究,迫切需要建立认识陆地水循环演化格局的空间信息支撑系统、陆地水循环过程变化的实验研究支撑系统和可定量描述自然变化、人类活动影响的分布式水文模型等。分布式水文模型能客观地反映气候和下垫面因子的空间分布对流域降雨径流形成的影响,能够相对真实地模拟现实世界的流域降雨径流形成的物理过程。随着计算机技术、GIS 技术、RS 技术、雷达测雨技术和水文理论不断丰富与发展,分布式水文模型将会成为未来相当长一段时间内水文学研究的热点课题和重要方向之一^[13]。

(3) 水文时间序列演变机理 水文时间序列的长期演变既有确定性的一面,又有随机性的一面。在确定性规律中包含着随机性,在随机性中包含着确定性规律。无论用周期分析、趋势分析,还是用随机分析、模糊分析、混沌分析、分形分析和信息熵分析,都至多只能识别水文时间序列的局部特性,而不能识别其全部特性。正因为如此,至今尚无法在实用精度范围内揭示水文时间序列的长期演变规律。这也是水文中长期预测预报精度仍不能满足实际生产需要的原因之一。今后相当长一段时间内,将围绕着水文时间序列的长期演变规律开展更为深入系统的研究工作,以期为现行的水利设计、规划与管理工作提供更充分、坚实的理论依据和科技支撑。

(4) 地表水与地下水的相互作用 正确分析地下水与地表水之间的相互关系,定量估算两者之间的相互转化,研究地下水和地表水相互作用,以及在水量和水质两方面的时空演变规律,对于水资源评价及其合理开发利用、水污染的防治与预警、保护地下水与地表水交错带的生态环境等均具有重要的理论和实际意义。然而,地下水与地表水的相互作用受地形、水文地质、气候和人为因素的综合影响,补排关系复杂,尤其是在华北、西北等干旱半干旱地区,定量揭示地表水、地下水的补排关系,对于当地水资源合理开发与利用具有十分重要的意义,也是亟待研究的热点领域^[14]。

(5) 人类活动对水循环的影响 近年来,随着中国经济社会的快速发展,土地利用变化剧烈,城市化进程加快,人类活动对水循环的影响巨大。不少地方河道遭围垦、湖泊被填埋、河道变迁剧烈,昔日河网密布的水乡逐渐被高楼林立的城市建筑与道路所取代,几十年前一条宽阔顺直、波涛汹涌的河道,被沿途的水

库大坝、橡胶坝、取水口蚕食吞噬,只剩下残肢断臂,十几年前的碧水绿波被泛着白沫的污水所取代。如何认识人类活动对水文循环的影响,关系到水文科学的理论基础问题,也是十分重要又十分现实的问题。水文循环机理复杂,不仅与陆地表层系统中各种自然地理要素时空分布密切相关,而且与农业开发、都市化等土地利用/土地覆被直接相关联。自然变化和人类活动加剧情况下的水循环演变格局与过程机理,有待重新认识;受人类活动影响等变化环境下的水资源可利用量的测算科学依据尚不够充分;水资源安全与生态需水、节水潜力、国民经济发展之间的量化关系需要研究。因此,开展人类活动对水循环影响的研究,具有重要的科学意义和研究价值^[15]。

(6) 气候变化对水文循环时空分布的影响 全球气候变化将影响到大气、海洋和陆地的相互作用过程,全球气候变化与全球水危机、洪旱灾害等极端事件有着密切的关系,这是因为由此引起的地球上太阳辐射分布的改变将影响到天然蒸发、大气中的水汽输送和降水的时空分布。研究气候变化对水文循环时空分布的影响,将同时对水文气象规律、设计暴雨洪水产生新的认识。20世纪科学研究与进展显示,陆地生态系统对大尺度水文循环有十分重要的反馈作用,全球变化对水文水资源的影响将是21世纪水文科学研究的前沿问题之一^[3,16]。

3.2 水文应用技术研究

(1) 新技术应用研究 人类社会已进入以信息技术、基因技术、纳米技术和空间技术为主要特征的时代,在这个时代中,科学与技术的相互推动更为密切,理论与应用的相互转化更为迅速。当前及今后相当长一段时期内,对水文科学发展影响比较重大的新技术,应开展必要的前瞻性研究,包括地理信息系统(GIS)技术、雷达测雨技术、遥感技术、同位素技术等^[8,17-18]。

(2) 水文测验方法 在固守断面的测验方式以及与之配套的管理规则(包括技术标准)方面,迫切需要研究水文测验精简模式,通过试点进行检验。以水流基本规律、水文监测资料分析研究为基础,通过建立资料系列随机生成模型,生成不同精度资料系列,用以研究不同水文资料精度条件下的水文预报、水文分析计算成果,确定能满足水文预报、水文分析计算的精度指标。在此基础上,通过选择不同类型测站,研究水文测验的测次精简、垂线精简模式;或通过分析研究当代先进的水文测验方法的精度,引入能满足水文预报、水文分析计算精度要求的短历时测验新方法。通过地理信息系统、数字高程、数据仓库、联机分析处理、数据挖掘等新技术的应用,提高水文测验技术含量和信息服务水平。

(3) 实时洪旱灾害预测预报 要研究定量降雨预报模式与水文预报模型的相互耦合与应用,研究不同水利工程运用模式下的洪水情势模拟,研究水库群的联合优化调度方法;研究突发性洪水、旱情预测和中长期河道径流的预测预报方法,开发作业运行系统,提高实时洪水、旱情的预测预报能力和水平。在洪水预测预报理论方面,一要继续开展北方地区产汇流变化规律的研究,提出与之相适应的流域产汇流预报模型;二要继续开展水文气象耦合技术、洪水预报和调度相结合的研究,提高洪水预报精度,增长有效预见期;三是继续加强具有物理基础的分布式流域水文模拟技术的应用研究,研究和解决变化环境中的水文预测预报问题^[19-20]。

(4) 水文分析计算方法 在水文分析计算方面,除了继续加强PMP/PMF以及频率线型、参数估计方法等传统问题的研究外,洪水频率分析方法方面,要继续研究频率曲线外延的合理极限和如何进行洪水移置的问题;在水文气象法方面,要研究短缺资料地区PMP/PMF的估算方法。另外,要开展全球气候变暖对设计洪水的影响研究,建立和开发水文设计成果合理性检查系统和设计洪水数据库,为变化环境下的水文分析与计算工作提供可靠的理论依据。

(5) 水文风险率与不确定性分析 水循环过程是十分复杂的自然过程,蕴涵着随机性、模糊性等多种不确定性特征,受到人们认识水平的限制,目前尚不能完全用确定性物理规律加以描述。在水文生产实践中由于水文过程自身的随机性,观测、监测误差,计算方法与模型的不完善等,都可能给工程设计、预测与决策结果带来不确定性和风险。为了科学地揭示水文循环机理,提高实时洪水预报、中长期水资源预测与规划的可靠性,需要对水文不确定性与风险率问题进行深入研究,不断改进流域水文模拟模型,提高水文模拟和

预测精度,为水文科学研究和水资源规划管理提供更加可靠的理论方法和技术手段^[21]。

(6) 水利工程对上下游地区水循环的影响 大型水利工程尤其像三峡、南水北调这样的大型、巨型水利枢纽建成后,势必对上下游地区生态环境、水文循环、河势流态等产生很大的影响,迫切需要研究大型水利工程建成后对上下游河床的冲淤变化、河势变化以及江湖关系的调整、洪水演进规律等重大科学问题,全面评价蓄、泄、分洪等各类防洪措施及其组合的蓄泄效果和长期影响,为江河防洪和水资源规划利用提供科学依据。

(7) 多元水文数据同化问题 近十几年来,随着社会的快速发展和科学技术的不断进步,水文资料采集手段、仪器设备种类、技术方法等都发生了很大变化,遥测、遥感(RS)、雷达、全球定位系统(GPS)等现代化技术方法的应用,极大地拓展了水文信息来源渠道。一方面,新的水文信息采集和处理技术的应用,不仅使各种水文信息向多元化发展,而且不同源信息在时空尺度上存在很大差别,传统的水文资料整编方法已难以适应多元海量水文信息处理的需要。另一方面,随着水文服务领域的不断拓展,水文研究工作的不断深入以及社会对水文信息更广泛的需要,尤其是近年数字水文科学的兴起,对水文资料提出了更高更新的要求。多元多尺度水文信息融合与应用技术研究将是未来相当长一段时间内亟待研究和解决的问题之一,也将成为水文科学研究的热点问题之一^[20]。

3.3 水文分支科学研究

(1) 数字水文学 数字化技术正在对人类的生产和生活产生极其深刻的影响,对水文科学而言,不仅使水文信息的采集、传输、储存、处理和显示方法发生了根本性的改变,而且也使揭示和探索水文规律的手段发生了巨大变化,从而导致了数字水文学的诞生。数字化技术给揭示和探索水文规律或机理带来的影响更值得水文学家关注。在数字化平台上开展水文研究,可以在一定程度上克服传统研究方法的某些局限性,得到用传统研究方法几乎无法得到的结论。如水文学家已能根据数字高程模型(DEM)构建的数字流域平台直接从机理上求得流域的瞬时单位线,这些将有力的推动和促进数字水文学的研究工作^[13]。

(2) 同位素水文学 同位素水文学在未来相当长一段时间内,将是一个十分活跃和成果辈出的研究领域,其主要研究内容包括:① 利用示踪技术直接观察地表水及地下水出流的动力特征,确定干旱和半干旱地区的地下水流量和包气带水分运动情况;② 利用示踪技术进行水资源评价;③ 利用荧光示踪物,研究山区湖泊分流过程的模拟和径流产生过程;④ 应用示踪技术改进径流模拟过程,识别不同径流分量,了解雨水去向、水和化学物质的滞留时间以及地下水渗流,与水文测验相结合,定量分析污染物的传输过程。

(3) 生态水文学 生态水文学是现代水文科学与生态科学交叉中发展的一个亮点,它以生态过程和生态格局的水文学机制研究为核心,以植物与水分关系为基础,将尺度问题贯穿于整个研究之中,研究对象涉及旱地、湿地、森林、草地、山地、湖泊、河流等。生态水文学的发展将对生态环境建设产生重要的促进和推动作用,因此,也将会成为今后一段时间内水文学研究的热点问题和重要研究方向之一^[21]。

(4) 干旱水文学 干旱水文学是水文学一个古老的分支,过去几十年来,针对湿润地区的水文问题,世界各国水文工作者开展了许多系统深入地研究,取得了大量富有成效的成果。然而,关于干旱水文学的研究却几乎一直停滞不前,直到现在,人们对于干旱地区的降雨径流关系、水循环机理等基本问题还没有弄清楚。从水文模型来看,无论是传统的概念性水文模型,还是近几年新兴起的分布式水文模型,多数模型都是针对湿润地区开发的,而对于干旱地区一直缺少简单实用而且具有相当精度的水文模型。另一方面,随着经济社会的快速发展,干旱地区水资源的合理配置和利用问题逐步受到人们的极大重视,作为其理论基础的干旱地区水循环基本规律、降雨径流关系以及以径流耗散过程为主体的水文模型将成为近几年迫切需要深入探讨和研究的领域之一。

(5) 城市水文学 作为城镇化发展的前提和基础,城市水问题越来越受到人们的关注。主要包括城市防洪、城市排涝、城市供水、城市雨水资源利用、城市水污染防治、城市水环境以及城市地下水的开发与利用等内容。而城市水文学又是其它相关内容的基础和支撑。通过开展城市水文学研究,可以研究城市流域暴雨洪水的产汇流机制,开发雨洪计算模型,探讨城市防洪和排水工程规划中的设计标准与安全性和经济性的

关系,研究城市非点源污染物的迁移扩散规律,探讨城市雨洪资源和其它非传统水资源的利用方式等。开展城市水文学的研究工作对于解决中国城市发展中存在的具体问题,减轻城市洪涝灾害,促进经济社会可持续发展,构建和谐社会都具有十分重要的意义。

4 结 语

随着科学技术的不断进步和生产实践日益深化的现实需求,水文科学研究已从单个孤立的水文过程向多尺度耦合过程发展,这也是系统科学在水文科学中的具体反映。例如关于水量平衡的研究,已从一个河段、一个流域、一个地区发展到全国、全球尺度,使得人们对水文循环和水资源的理解更全面、更宏观、更深刻;通过对大气-植被-土壤-地下水系统中水分迁移和转化关系的系统实验与理论研究,揭示水文循环中生态过程的演变规律,探索其相互作用机理;水文规律的研究,侧重探讨在自然因素和人类活动共同作用下水文过程及其要素的变化规律,探索物理规律与统计规律相结合的水文循环现象。大气水、地表水、土壤水和地下水的相互关系,地表水、地下水与水量、水质、水盐平衡及其要素的计算方法也是水文学研究的重要内容;水和能量的耦合机理研究是现代水文科学的一个重要研究方向,可以揭示地球表面环境变化和水循环之间的相互关系,为研究水资源的供用耗排规律提供科学依据。未来在应用层面、在服务于水资源开发利用方面,水文科学将更加重视环境生态影响方面的研究,并致力于为水资源综合规划与综合管理提供科学依据和支撑。现代社会的不断进步,对水文科学提出了更高更深层次的要求,一方面,作为一门自然科学,理论的深化和完善需要继续加强;另一方面,作为一门应用科学,需要为生产实践和经济建设提供更深入和更为广泛的服务与支撑,这就要求水文工作者不仅要进一步完善和丰富水文科学的理论体系,另一方面,也需要深入思考和探讨水文科学的社会服务功能,理论研究与生产实践两手抓,在不断丰富和完善水文科学理论体系的同时,进一步强化和完善水文科学的服务功能,为经济建设和社会发展提供科技支撑。

近年来,随着各国经济社会的快速发展,人类活动对水域环境过度和无序的干扰,以及气候变化等因素影响的加剧,使洪涝灾害的孕灾环境从未像今天这样严峻,洪涝灾害对社会稳定、经济发展和生态环境的破坏作用从未像今天这样强烈。水文科学作为研究地球上水的时空分布与运动规律的科学,在这样的背景下,对水文科学的社会需求从未像今天这样迫切。健康的水循环和不断发展完善的水文科学已成为当今社会发展不可或缺的重要保障,支撑社会经济可持续发展的水资源、水环境、水生态成为社会发展的重要因素。摆在广大水文工作者面前的任务还十分艰巨,广大水文工作者只有不断进取、努力奋斗、勇于创新,才会不断促进水文科学的健康发展,无愧于社会和时代赋予我们的神圣使命。今后要在水文科学基础研究方面花大力气,加强水文科学基本规律的研究,深化气候变化和人类活动对水文循环影响的研究,加快提升水文预测、预报、预警技术水平,为水旱灾害预测与评估、水资源可持续利用与管理工作提供技术支撑。

致谢: 本文第一作者系国际水文科学协会(IAHS)中国国家委员会副主席、联合国教科文组织(UNESCO)国际水文计划(IHP)中国国家委员会委员、全球水系统计划中国委员会(CNC-GWSP)委员,近年来作为专家先后应邀参加了国家自然科学基金委员会《水利学科发展战略研究报告》、中国水利学会《水利学科发展报告》的编写、咨询以及国家自然科学基金委员会水文水资源与水环境研究前沿“双清论坛”、水利科学与海洋工程学科发展战略论坛暨院长联席会议、中国水文科技与发展高层论坛、中国科学院《中国未来20年技术预见研究》项目咨询等工作,本文参考了以上活动中有关专家的发言以及部分文字材料,在此向有关专家一并致以衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 中国大百科全书出版社编辑部. 中国大百科全书: 大气科学/海洋科学/水文科学卷[M]. 北京: 中国大百科全书出版社, 1998. (Editorial Board of Encyclopedia of China Publishing House. Encyclopedia of China: Atmospheric sciences/ marine science/ hydrological sciences[M]. Beijing: Encyclopedia of China Publishing House, 1998. (in Chinese))

- [2] 国家自然科学基金委员会. 学科发展战略研究报告: 水利科学与海洋工程[M]. 北京: 科学出版社 2007. (National Natural Science Foundation of China. Development strategy research report: Water science and ocean engineering[M]. Beijing: Science Press ,2007. (in Chinese))
- [3] 水利部国际合作与科技司. 当代水利科技前沿[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2006. (Ministry of Water Resources , Department of International Cooperation , Science and Technology. Advances of sciences and technology in water sciences [M]. Beijing: China WaterPower Press ,2006. (in Chinese))
- [4] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社 2004. (RUI Xiao-fang. Principle of hydrology [M]. Beijing: China WaterPower Press ,2004. (in Chinese))
- [5] Maidmen D R. 水文学手册[M]. 张建云,李纪生,译. 北京: 科学出版社 2002. (Maidment D R. Handbook of hydrology [M]. Beijing: Science Press ,2002. (in Chinese))
- [6] 叶守泽,夏军. 水文科学研究世纪回眸与展望[J]. 水科学进展. 2002, 13(1): 93-104. (YE Shou-ze , XIA Jun. Century's retrospect and looking into the future of hydrological science [J]. Advances in Water Science ,2002 , 13(1): 93-104. (in Chinese))
- [7] 夏军,左其亭. 国际水文科学研究新的进展[J]. 地球科学进展, 2006, 21(3): 256-261. (XIA Jun , ZUO Qi-ting. Advances in international hydrological science research [J]. Advances in Earth Science ,2006 , 21(3): 256-261. (in Chinese))
- [8] 傅国斌,刘昌明. 遥感技术在水文学中的应用与研究进展[J]. 水科学进展 2001, 12(4): 547-559. (FU Guo-bin , LIU Chang-ming. Advances in applications of remote sensing data to hydrology [J]. Advances in Water Science ,2001 , 12(4): 547-559. (in Chinese))
- [9] 汪静萍,潘理中. 水科学研究进展: 1995 ~ 1998 [J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 96-100. (WANG Jing-ping , PAN Li-zhong. Advances in water science research: 1995 ~ 1998 [J]. Advances in Water Science ,1999 , 10(1): 96-100. (in Chinese))
- [10] 储开凤,汪静萍. 我国水文循环与地表水研究进展: 1998 ~ 2001 年[J]. 水科学进展, 2004, 15(3): 408-413. (CHU Kai-feng , WANG Jing-ping. Advances in research on hydrological cycle and surface water [J]. Advances in Water Science ,2004 , 15(3): 408-413. (in Chinese))
- [11] 储开凤,汪静萍. 中国水文循环与水体研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(3): 468-474. (CHU Kai-feng , WANG Jing-ping. Advances in the research on hydrological cycle and water in the China [J]. Advances in Water Science ,2007 , 18(3): 468-474. (in Chinese))
- [12] 周砾,刘金平,陈丽芳,等. 当前国际水文学科技领域的研究方向[J]. 水文, 2005, 25(4): 30-32. (ZHOU Li , LIU Jin-ping , CHEN Li-fang , et al. Current research trend in the international technology field of hydrology [J]. Journal of China Hydrology ,2005 , 25(4): 30-32. (in Chinese))
- [13] 张金存,芮孝芳. 分布式水文模型构建理论与方法述评[J]. 水科学进展 2007, 18(2): 286-292. (ZHANG Jin-cun , RUI Xiao-fang. Discussion of theory and methods for building a distributed hydrologic model [J]. Advances in Water Science ,2007 , 18(2): 286-292. (in Chinese))
- [14] 杨建峰. 地下水-土壤水-大气水界面水分转移研究综述[J]. 水科学进展, 1999, 10(2): 183-189. (YANG Jian-feng. A review on water exchange through interface between groundwater , soil moisture and atmospheric water [J]. Advances in Water Science ,1999 , 10(2): 183-189. (in Chinese))
- [15] 陆桂华,何海. 全球水循环研究进展[J]. 水科学进展 2006, 17(3): 419-424. (LU Gui-hua , HE Hai. View of global hydrological cycle [J]. Advances in Water Science ,2006 , 17(3): 419-424. (in Chinese))
- [16] 穆荣平. 中国未来 20 年技术预见[M]. 北京: 科学出版社 2008. (MU Rong-ping. Technology foresight of China towards 20 [M]. Beijing: Science Press ,2008. (in Chinese))
- [17] 杨扬,张建云,戚建国,等. 雷达测雨及其在水文中应用的回顾与展望[J]. 水科学进展 2000, 11(1): 92-98. (YANG Yang , ZHANG Jian-yun , QI Jian-guo , et al. Review and prospect on the application of weather radar in hydrology [J]. Advances in Water Science ,2000 , 11(1): 92-98. (in Chinese))
- [18] 彭盛华,赵俊琳,袁弘任. GIS 技术在水资源和环境领域中的应用[J]. 水科学进展 2001, 12(2): 264-269. (PENG Sheng-hua , ZHAO Jun-lin , YUAN Hong-ren. Application of GIS to water resources and water environment [J]. Advances in Water Science ,2001 , 12(2): 264-269. (in Chinese))
- [19] 王厥谋. 水文预报发展概况[C]//水文情报预报文集. 郑州: 黄河水利出版社 2000. (WANG Jue-mou. Development of

- hydrological forecasting [C]// Proceedings of Hydrological Information and Forecasting. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2000. (in Chinese)
- [20] 刘金平, 张建云. 中国水文预报技术的发展与展望 [J]. 水文, 2005, 25(6): 1-5. (LIU Jin-ping, ZHANG Jian-yun. Development and prospects of hydrological forecasting technique in China [J]. Journal of China Hydrology, 2005, 25(6): 1-5. (in Chinese))
- [21] 李爱花, 刘恒, 耿雷华, 等. 水利工程风险分析研究现状综述 [J]. 水科学进展, 2009, 20(3): 453-459. (LI Ai-hua, LIU Heng, GENG Lei-hua, et al. Review of risk analysis of hydraulic engineering system [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(3): 453-459. (in Chinese))
- [22] BAIRD A J, WILBY R L. 生态水文学 [M]. 赵文智, 王根绪, 译. 北京: 海洋出版社, 2002. (BAIRD A J, WILBY R L. Eco-hydrology [M]. Beijing: China Ocean Press, 2002. (in Chinese))

Progress in hydrological sciences: Past , present and future*

XU Zong-xue¹ , LI Jing-yu²

(1. Key Laboratory of Water and Sediment Sciences , Ministry of Education; College of Water Sciences , Beijing Normal

University , Beijing 100875 , China; 2. China Institute of Land Surveying and Planning , Ministry of Land and Resources , Beijing 100035 , China)

Abstract: The paper reviews and summaries the state-of-the-art , major progresses , and future perspectives in hydrological sciences. The study reveals that the societal need is the fundamental driving force and the advance in science and technology is the source for the development of hydrological sciences. In hydrological sciences , land surface hydrological processes should be investigated , as well as the water and energy exchanges among the atmosphere , land surface and groundwater. Physical processes of water transfer and movement should be investigated , as well as the chemical processes of different chemical compositions dissolved in the water. The study , in particular , the need for including the biological processes in hydrological cycle and water movement should be strengthened towards ecohydrology. At present , both ecohydrology and impact of climate change are very active in hydrological sciences under the changing environment. The theory of hydrological sciences should be further improved and developed. The socio-economic benefits of hydrological services should be enriched and strengthened in the future. Hydrological science could thus play an active role to support socio-economic development.

Key words: hydrological cycle; water resources; surface water; groundwater

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50979005) .