

水资源学科发展

一、引言

水资源学是对水资源进行评价,制定综合开发和合理利用水资源的规划,解决水资源供需矛盾,以及对水资源实行管理和保护的科学体系。其研究范畴主要包括三方面的内容,一是水资源形成、演化、运动的机理及空间分布以及时程变化的客观规律,侧重于水资源系统自身研究;二是为满足经济社会发展需求的水资源开发利用的科学途径,侧重于水资源系统与社会经济系统之间的关系研究;三是水资源开发利用引起的环境响应,以及对相关负面响应的控制与减缓途径,侧重于水资源与生态环境系统之间的关系研究。水资源科学技术知识源于水文学、工程科学、环境科学、生态学、管理科学、经济学和社会科学在水资源领域延伸、综合与发展。^[1]

水资源学科早期发展源于全球范围的水资源评价活动,其后随着缺水矛盾和用水竞争性的突出,地区、部门和目标间的水资源合理配置成为关注的焦点。同时,工业化和城镇化引发的水污染加剧,水环境问题也成为水资源研究的热点,各国纷纷构建流域河流、湖泊和地下水水质模型,制订地表水和地下水水质保护标准和技术方案。进入 21 世纪以来,可持续发展战略的实施有力地促进了水资源学科发展,面向可持续发展的水资源实践理论方法体系逐步形成。

二、发展现状及主要成果

(一)我国水资源研究主要进展

我国是一个水资源问题十分突出的国家,国家治水实践对水资源知识提出了迫切需求,为水资源学科发展提供了良好土壤。基础层面,我国水资源研究者针对高强度人类活动对水循环的扰动,提出“自然—人工”二元水循环模式,并探索开发具有自主知识产权的水循环综合模拟模型^[2];应用基础层面,变化环境下的水资源评价和规划方法不断创新,水资源管理技术方法不断发展,水资源可持续利用战略不断完善;应用层面,水资源科学调配技术、各行业节水技术、非常规水源利用技术、水资源保护技术、生态需水定量技术和水资源综合管理技术发展迅速。进入 21 世纪,为综合解决国家面临的水资源问题,我国大力开展节水防污型社会建设,其基本理论与方法技术体系正在不断地发展和完善。

(二)近年来国内水资源研究主要成果述评

1. 水资源基础理论与基本规律研究

已完成国家“973”计划项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”,在水循

环系统模拟、水资源评价方法、水资源演变规律、水资源综合调配与管理等方面取得了重要进展^[3],已有四项课题成果获国家科技进步奖,代表性成果如“黄河流域水资源演变规律与二元演化模型”,被国内外同行专家鉴定为“国际领先水平”,其中水资源动态评价方法、水资源二元演化模型、流域水资源演变规律被评价为“三项原创性成果”获2005年度国家科技进步二等奖。IAHS前主席竹内邦良先生认为该项研究“对国际水文水资源科学研究做出了重大贡献”。课题出版了《分布式流域水文模型原理与实践》等7部专著,发表了130多篇论文,近40篇为SCI或EI检索,并形成了一支优秀的团队,主要技术骨干荣获全国水利青年科技英才、中国水利学会杰出青年奖、北京市茅以升青年科技奖等,所申请的“流域水循环模拟与调控”项目获国家创新群体基金资助。

国家“973”计划还设立了“我国生存环境演变和北方干旱化趋势的预测研究”和“首都背景及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控原理”等项目,分别在水资源演变的气候背景和水污染机制方面取得了许多有意义的成果^[4]。另外,国家先后实施了“西北地区农业与生态节水应用基础研究”、“长江流域调水等工程对河口环境的影响与对策”、“新水沙环境下的黄河口演变及整治与水土资源优化配置研究”等重点基金项目,在节水和水资源调控基础研究方面取得了进展。

2. 区域水资源的开发利用研究

西北是我国降雨量最少,生态环境最脆弱的地区。国家“九五”攻关项目“西北水资源合理利用及生态保护研究”提出了区域生态环境保护准则和面向生态的水资源合理配置方案^[6],总专题成果“西北地区水资源合理配置和承载能力研究”获国家科技进步二等奖。中国工程院“西北地区水资源配置、生态环境建设和可持续发展战略研究”咨询项目,确立了人与自然和谐共处的发展方针和节水防污型社会建设发展模式,并提出了促进西北可持续发展的十项战略^[7]。

东北地区是我国粮食安全和生态安全的保障基地。中国工程院重大咨询项目“东北地区有关水资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究”,对水资源的供需态势、生态环境保护、水资源宏观配置格局、重大水利工程建设进行了系统研究,并提出了水安全保障战略和相关政策性建议^[8]。

黄淮海是我国最缺水的地区之一,在南水北调工程总体规划中设立的专项“黄淮海流域水资源合理配置研究”,该研究提出了以三次供需平衡为主线的跨流域水资源配置方法,确定了黄淮海流域需调水量和南水北调东中线工程合理调水规模^[9]。“南水北调节水规划要点”为实施南水北调遵循“三先三后”的原则提供了决策依据;“首都圈水资源保障研究”、“我国西南国际河流水资源开发战略与公平利用研究”等项目对研究区水资源的可持续利用都具有重要的促进作用。

3. 重大水战略问题与关键技术攻关研究

水战略研究方面,中国工程院重大咨询项目“中国可持续发展水资源战略研究”提出了以水资源的可持续利用支撑我国经济社会可持续发展的总体方略,以及包括防洪减灾、农业用水战略、城市水资源利用、综合防污减灾、水资源配置、水资源供需平衡、南水北调措施和西部水资源开发利用等八项具体战略^[5]。

关键技术研发方面,国家“十五”重大科技攻关项目“水安全保障关键技术研究”,围绕开源和节流两大基本调控途径,对于生态需水定量技术、水资源实时调度技术、洪水资源化技术、面源水污染控制技术、城市污水再生利用技术、人工增雨技术、海水循环冷却技术、海水淡化技术和生活用海水技术方面取得了系统成果,黄河、黑河和塔里木河的水资源调度系统已研制成功并投入运行。

4. 水资源综合管理与政策措施研究

围绕水资源综合管理、水务管理体制和监管机制等主题,近几年开展了许多相应的研究工作,包括水权及水市场、水利与国民经济协调发展、总量控制与定额管理、水价政策、取水许可与水资源费征收、水资源管理体制与机制、省际河流关键性指标控制等。“中国可持续发展水资源与水环境信息共享技术研究”等项目在水资源信息化管理方面都取得了有益的成果。自然科学基金重点项目“面向可持续发展的水价理论与实践研究”中,提出全成本水价理论,并形成了水价核算方法与模型。水利部科技创新计划项目“水环境价值核算与水资源保护准则研究”,建立了流域水环境价值计算实用化模型。

另外,我国与国外一些国家的政府及有关国际组织开展了一系列合作研究,在综合管理体制与机制、水权制度建设、水权行政管理体制、水经济价值及政策影响、水资源环境经济核算、水资源需求管理等方面均取得了较大的进展。这些,对我国提高水资源管理水平,改善水资源管理环境起到了积极的作用。

三、国际比较

(一)国际水资源研究进展

当前国际水资源前沿方向主要包括变化环境下的水资源演变与评价研究、水资源开发利用与生态环境相互作用机制、水资源高效利用与非常规水源开发技术研发、可持续水资源管理与公共政策制定等方面,这在许多与水相关的国际重大研究计划所设立的主题中充分体现。国际水文计划(IHP)一直持续关注水资源可持续利用与综合管理问题,第IV~VII期的设立了变化环境中的水文学和水资源可持续发展、脆弱环境中的水文学和水资源发展等主题。针对水文研究与水资源管理间的脱节问题,UNESCO和WHO还联合发起了“服务于环境、生活和政策的水文计划(HELP)”,重点研究水资源与食物、健康、环境、气候和社会冲突的关系。此外,国际地圈生物圈计划(IGBP)、地球系统科学联盟(ES-SP)和世界气候研究计划(WCRP)等计划对于上述方向也给予了足够关注^[10]。

(二)主要发展方向比较

1. 变化环境下的水资源演变及其科学评价

随着人类活动对水循环影响的加剧,变化环境下的流域水资源演变与调控已成为现代水资源研究的重大命题和前沿领域,包括气候变化、土地利用变化(LUCC)和大规模调水等方面,如在IGBP二期研究就专门设立了“变化环境中水文和水资源的脆弱性”研究

主题^[11]。

在国内,变化环境下的水循环演变和水资源评价研究近年来引起学术界的广泛重视。国家“973”计划项目“海河流域水循环演变机理与水资源高效利用”以我国受人类活动影响最深的海河流域为例,围绕强人类活动干扰下的流域水循环与水资源演变机理、流域水环境与生态系统的演变与修复机理、水资源利用效用的评价优化与调控方法开展研究。

2. 水资源与生态环境系统演变的互动机制

人类活动干扰下的流域水循环演变,改变了生物赖以生存的水分条件,导致不同尺度上生态系统演变,同时生态演变也带来相应的水文效应,因此流域水资源演变作用下的生态演替、反馈与适应机制已成为生态水文学(Eco-Hydrology)研究的核心内容^[12],在UNESCO IHP-V和IHP-VI研究计划中,均设置“地表生态水文过程”专项^[13]。在国内,国家“九五”、“十五”攻关开展了综合遥感信息和生物机理对水分与生态演变机制的研究,并将植被生态演替模型与水文模型耦合。此外,流域水循环演变同样改变了污染物迁移转化的载体条件和动力机制,对流域水环境过程也产生显著影响。国内外许多学者从环境学的角度着手,对点源污染物排放和水体水质演化进行模拟研究,进一步加大对地下水的保护与开发利用的研究。

3. 水资源合理配置与高效利用技术

目前,国内外水资源配置在决策目标上开始追求经济效益、社会净福利和环境可持续最大综合目标,决策机制考虑水平衡、生态环境、社会公平和经济效益等综合机制,水资源配置的模拟模型、优化模型、博弈模型与综合模型均有长足发展,整体模型也日渐受到青睐。我国水资源配置理论与技术方法一直处于比较先进的水平,“八五”期间,提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论与方法,“九五”期间发展为面向生态的水资源配置理论方法,并形成了西北生态需水计算方法,“十五”期间形成了广义水资源配置理论方法,同时将水资源调度模型与配置模型嵌套耦合,开发了应用于管理的水资源调配模型系统^[14]。

水资源高效利用方面,国内外始终把提高灌溉水利用率、作物水分生产效率作为农业水资源高效利用的重点,提出限水灌溉、非充分灌溉与调亏灌溉模式,并在农田水分循环规律及节水调控机理、农业生物节水基础和农业节水管理技术等方面取得了突破。城市方面,近年来工业节水向着节水技术集成和用水系统优化方向发展,生活用水侧重于器具节水和水的重复利用。2005年我国发布了《中国节水技术政策大纲》,较全面地涵盖了国内节水技术和经济政策。

4. 非常规水源开发利用技术

在经济发展所带来的新鲜水需求压力较大的美国和日本,降水较小而蒸发较大的以色列和澳大利亚,以及出于改善水质和降低成本考虑的法国和德国,污水再生利用、海水利用等替代性水资源开发利用得到很快的发展。洪水资源化涉及包括技术、经济、生态环境的容许和防洪安全保障等诸多问题,国际上较少考虑利用洪水资源解决缺水问题,主要利用洪水资源维持或恢复湿地或是改善景观,但对雨水收集利用都较为重视,如德国则在雨水收集利用技术上处于领先地位。受缺水影响,我国许多城市地区开始将再生水、海水

和雨洪水当做重要的第二水源,西北一些省区也因地制宜地开发了一些先进的集雨技术,雨水积蓄利用逐步形成规模,得到国际社会的广泛认同。农业微咸水利用在我国北方地区得到了深入研究和广泛的推广,在国际上也处于领先。

5. 可持续水资源综合管理

国际目前对“水资源可持续管理”理念达成了共识,IAHS 在 2000 年召开了“水资源综合管理研讨会”,指出未来的水资源管理必须在政府和公众共同管理的框架下,实行以流域为单元的水土资源统一协同管理。建设水利公用信息平台及大规模的综合应用系统成为国际水资源管理科技发展的重要动向,如美国田纳西流域采用先进的计算机和数学模型以及强大的数据接收系统,对区内 60 余座水库实行统一优化调度和管理。

我国水资源可持续管理理念也在不断发展并逐步在管理实践中落实。从早期的水资源综合管理理念的引进,到水资源管理综合考虑水资源系统自然循环功能和水资源环境承载能力,并遵循社会规律和生态环境规律,标志着水资源可持续管理研究不断深化。在管理实践上,国家运用综合的手段调控人们的涉水行为,大力推进节水型社会建设,水资源可持续管理实践不断深入。

对比国内外研究现状,可以发现我国水资源学科基本方向与国际发展趋势一致,整体处于国际先进水平,特别是近年来形成的水资源开发利用宏观战略、人类活动扰动下的流域水资源演变基础理论,以及长期科技攻关形成的水资源合理配置理论与方法研究,在国际均处于较领先的水平,但仍有一些水资源应用技术仍然落后于世界先进水平,如工业节水技术、海水和再生水等非常规水源开发利用技术、水资源信息化管理和数字流域技术等,与世界先进水平相比仍有差距。

四、战略需求与发展目标

(一)水资源学科发展需求分析

1. 实现水资源可持续与安全供给的需求

要保障经济社会可持续发展的水资源安全持续供给,需在基础层面实现对水资源形成、演化的机理及未来变化环境下的水资源演化规律的科学认知,需加强水资源评价、规划和科学开发利用途径的研究,对水资源学科发展提出现实需求。

2. 实现水资源高效利用与公平消费的需求

要促进水资源的高效利用和公平消费,需开展水资源承载能力和科学调控研究,开发先进的节水灌溉技术和替代水源利用技术,采取多样化水资源战略,需权衡区际之间、代际之间的用水福利关系,对水资源学科发展提供理论支持。

3. 实现水生态健康与环境友好维系的需求

要建设健康友好的生态环境,需揭示水对生态安全的控制机制和作为环境要素的基础作用,研制不同类型生态需水计算方法和允许污染排放的技术标准,并制定经济—生态—社会系统中的水分配策略,对水资源学科发展提出技术支持。

4. 实现水资源现代化管理的需求

要实现水资源的现代化科学有效的管理,需要建立一套机制健全、运转灵活的管理体制,需要引进现代化信息和管理手段,需要科学制定一系列切合实际的经济调控标准,从而对于水资源学科发展提出政策支持。

5. 促进水利科学技术知识创新的需求

水利科技创新是创新型国家建设的重要组成部分,我国水资源研究处于国际先进水平,在注重解决水资源问题的同时,还要充分利用我国水资源学科发展的良好土壤,形成有中国特色的现代水资源学科知识体系,为国际水科学发展做出贡献。

(二)学科发展目标

将解决国家突出的水资源问题作为学科发展的立足点,紧密围绕水利发展与改革的重点领域和方向,全面提升水资源科技创新能力,为国家和地方的水资源管理、政策制定等决策活动提供科技支撑,为国家水安全、粮食安全、生态安全提供水资源保障的科学途径,为环境保护、实现人与自然和谐相处提供水资源知识。同时,充分发挥科学研究的前瞻性和先导型特点,加大现代水资源科学的基础理论、方法和技术创新,促进具有中国特色的现代水资源科学知识体系的形成,为创新型国家建设做出贡献。

五、对策与建议

(一)水资源学科发展的重点领域

未来 15 年我国水资源研究的优先方向是现代环境下的水资源基础理论和水资源安全保障的应用技术方法研究,具体包括以下 7 个方面的重点领域。

1. 现代环境下的流域水循环演变与水资源评价

确立和完善符合国情的“自然—人工”二元流域水循环演变基础理论,在完善水情监测体系的基础上,重点研发具有自主知识产权的流域水循环及其伴生过程的综合模型系统,揭示强烈人类活动影响下的“四水”转化机制以及流域水资源演变客观规律和再生性维持机理。在此基础上,建立和发展适于变化环境且面向科学发展的新一代水资源评价理论、方法和模型技术,实现以降水为主体且综合水量—水质—效用于一体的水资源系统评价。

2. 生态系统需水与水资源合理配置

重点研究流域典型生态系统与水循环系统间耦合机制与水生态服务功能形成机制,明确典型生态系统对于水分条件从适应到退化的临界阈值,形成流域水生态服务功能评价,缺水流域水生态系统服务功能目标制定和基本生态用水定量技术,研制气候—水文—水域生态系统耦合模型,制定面向生态的水文调控方案。

加强与和谐社会建设相适应的全属性水资源配置理论与方法,完善与水资源高效利用相适应的广义水资源配置理论与方法,研发全口径水源综合调配技术。此外,还要针对

重点流域和工程需求开展研究,如长江、黄河等重大江河综合治理及南水北调等跨流域调水工程相配套的水资源调配技术,新疆、山西、西南地区的水资源开发利用问题。对各个区域或流域,要提出相应的水资源水环境承载能力指标,以指导区域或流域制定经济发展规划。结合近年来我国南方一些区域发生的严重干旱,如广东、广西、海南的经常性旱情,云贵高原的缺水问题、滇东黔东的缺水问题、重庆 2005 年大旱等,应深入开展丰水地区在遇特殊干旱年份时的成因分析及相应对策研究。

3. 各业综合节水与非常规水综合利用

应深入研究水资源需求变化趋势,借鉴发达国家或地区先进的综合用水指标和经济社会发展规模,研究经济社会与水资源需求的关系,制定我国合理的水资源需求方案。在完善节水制度法规的基础上,重点研发工业用水循环利用技术、推进企业用水网络集成技术的开发与应用,优化企业用水网络系统,完善企业用水计量管理体系。推行农业用水总量控制与定额管理制度,开发旱作节水与生物节水配套技术,加快发展耐旱节水农作物品种选育的分子生物学技术;发展城镇生活节水技术及器具开发,推广村镇集中供水技术。

着力发展城市污水再生处理技术和成套设备,研发再生水各种用水途径的水质监测技术、用水技术和安全性评价技术,完善再生水利用的政策措施。研发规模化的海水淡化热能设备、海水淡化装备和多联体耦合关键设备。重点研发雨水蓄水设施施工与防冻胀技术、雨水回灌地下水技术、雨水利用管理与调度技术和水质控制技术等。洪水利用技术重点研发汛限水位优化技术和洪水预报调度技术。

4. 水污染防治与水环境保护

一是以水循环为基础的流域水污染形成与防治的基础研究,包括水污染形成机制研究、水环境演化与污染扩散的仿真系统研发、水环境安全目标制定与评估方法研究等;二是污染物排放量削减与控制研究,包括水体纳污能力与允许排污总量确定研究、排污指标分解与控制技术和企业清洁生产技术;三是水环境监测、评价与管理理论与方法,制定面源和点源污染监控指标体系,加强水质监测技术和监测设备研发,开展水污染经济损失的定量评估方法研究。加强淮河、海河、辽河、松花江、太湖、三峡水库、小浪底水库、南水北调工程水环境安全评估与风险防范技术研究。

5. 水资源开发利用的生态环境效应和地下水资源利用

地表水开发的生态效应研究重点包括:河流生态功能及生态水文学机制研究;蓄、引水工程对于河流系统的影响及其减缓措施研究;跨流域调水的生态环境影响;河道整治工程与河流生态修复,包括河道整治对生物栖息地的影响评价理论方法、基于河流生态健康的河流生态恢复理论与方法。

研究地表环境变化条件下的地下水形成条件和循环规律,以及地下水勘探开发利用和地表水地下水联合运用问题,研究浅层地下水开发利用的生态环境效应和合理的生态地下潜水位,以及深层地下水补—径—排关系及其再生能力,确定合理的深层地下水开采量和开采方式。

6. 水资源综合管理

研发水资源规划与管理技术,包括水资源价值核算及有偿使用技术、需水预测技术、

水资源承载能力计算技术、用水权分配方法与技术、总量控制与定额管理技术研究、水市场建立与水权交易规则研究等;加强水资源管理经济调节机制研究,包括水资源价格体系研究、水资源费和排污费构成与标准制定;进行水资源实时管理技术研究,重点是水情监测和预报技术、计划用水管理、水资源实时调度技术以及应急和突发事件管理技术等;开展水资源管理体制与政策研究,包括涉水事务管理体制研究、节水激励政策研究、虚拟水研究、节水法律法规制定等。

7. 水资源管理信息化建设及数字流域建设

在大力完善多元化的信息采集体系、数字流域虚拟现实系统以及基于 GIS 技术的数字流域基础数据库的基础上,研发水资源配置模型、分布式流域二元水循环数学整体模拟系统,建立流域和区域的水资源统一管理系统、防洪减灾系统、水环境信息系统等应用系统,加强 3S 技术、通信和计算机网络技术、数据库技术、计算机辅助设计和管理技术,在线分析技术、数据仓库技术、数据挖掘和知识发现技术、人工智能与专家系统和决策支持技术的应用。

(二) 学科发展建议

一是强化水资源科学基础理论和应用技术自主创新。针对我国流域水资源受人工扰动程度深的实际,加强原始性的基础科学理论的创新,从节水防污型社会建设的实际需求出发,加大具有自主知识实用型应用技术的研发。

二是坚持走“产—学—研”相结合的学科发展路子。坚持从实际需求出发,将管理和产业部门的需求与经验、研究单位应用创新优势和高等学校的基础研究长处结合起来,形成合力,加快水资源学科的发展。

三是推进水资源与其他相关学科的交叉融合。充分认识水资源学科的综合性和交叉性特征,推动水资源学与水文学、生态学、环境科学、大气科学、地质科学的交叉,强化经济学、管理学、社会学在水资源领域的延展,形成新的学科增长点。

四是加强现代高新技术在水资源学科领域的应用。在提升传统研究方法在水资源学科应用的同时,高度注重 3S 技术、计算机技术、数据库技术、网络信息技术、测试实验技术以及其他领域的思维方式方法在水资源领域的应用。

五是尽快建立并不断完善水资源学科知识体系。在加强其他学科知识在水资源领域中的综合、应用和发展的同时,加快水资源学科基础层面、应用基础层面和应用层面知识构架的建立和完善,形成系统的学科知识体系。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 国家技术前瞻研究组. 中国技术前瞻报告. 北京:科学技术文献出版社,2005.
- [3] 刘昌明. 黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理研究进展. 中国基础科学, 2002,(3): 22-26.

2007—2008 水利学科发展报告

- [4] 科学技术部基础研究司,科学技术部基础研究管理中心. 国家重点基础研究发展计划(973 计划)发展报告(1998~2005). 2006.
- [5] 钱正英,张光斗. 中国可持续发展水资源战略研究综合报告. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [6] 王浩,等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究. 郑州:黄河水利出版社,2003.
- [7] 钱正英主编. 西北地区水资源配置、生态环境建设和可持续发展战略研究. 北京:科学出版社,2004.
- [8] 钱正英. 东北地区有关水资源配置、生态与环境保护和可持续发展的若干战略问题研究. 北京:科学出版社,2007.
- [9] 王浩,等. 黄淮海流域水资源合理配置,北京:科学出版社,2003.
- [10] 秦大河. 全球水循环与水资源. 北京:气象出版社,2003.
- [11] IGBP. Global Change and the Earth System; A planet under pressure. Executive Summary[A]. In: Steffen W, Eliott S, eds. Royal Swedish Academy of Sciences, 2004.
- [12] Zalewsk M(edit), Integrated Watershed Management-Ecohydrology - Phytotechnology - manual, UNEP, 2004.
- [13] UNESCO. Water Interactions: Systems at Risk and Social Challenges Issues and Strategies- 6th Phase of the International Hydrological Programme 2002-2007, UNESCO, 2002
- [14]王浩. 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,(1).

撰稿人:王 浩 王建华 甘 泓 张海涛 严登华 肖玉泉