

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.02.020

灌区水资源合理配置研究进展

齐学斌^{1,2}, 黄仲冬^{1,3}, 乔冬梅^{1,4}, 张现超^{1,3}, 李平^{1,4}, Mathias N Andersen⁵

(1. 水利部中国农业科学院农田灌溉研究所, 河南 新乡 453002; 2. 中国农业科学院河南新乡农业水土环境野外科学观测试验站, 河南 新乡 453002; 3. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081;

4. 中国农业科学院农业水资源高效安全利用重点开放实验室, 河南 新乡 453002; 5. Department of Agroecology and Environment, Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, Blichers Allé 20, Postboks 50, DK-8830 Tjele, Denmark)

摘要: 灌区水资源合理配置是提高灌区水资源利用效率及保障粮食安全的重要途径, 也是实现灌区水资源可持续利用的有效调控措施。从灌区水资源管理政策、水资源循环转化规律、水资源优化配置模型与方法和水文生态4个方面, 对国内外该领域的研究现状进行了对比分析。研究发现, 国内灌区水资源配置主要存在4方面的问题: 水资源合理配置与保护政策落实不到位、水资源的统一管理机制不健全、水资源优化配置模型实用性不强和水资源优化配置基础条件较为薄弱。建议加强灌区水资源的统一管理政策与机制、变化环境下水资源循环转化规律、水资源承载力基础理论与评价新方法、水文生态调控技术、水资源实时风险调度与智能化管理技术以及水资源优化配置耦合技术研究。

关键词: 灌区; 水循环; 优化模型; 水文生态; 水管理

中图分类号: TV211.1; G353.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2015)02-0287-09

灌区水资源合理配置是流域或区域水资源合理配置的重要方面, 也是人类可持续开发和利用水资源的有效调控措施之一。随着水资源合理配置实践的不断深化, 灌区水资源合理配置的概念逐步明确, 其内涵日益丰富^[1]。灌区水资源合理配置内容一般包括水量在灌区农业用水、居民生活用水、工业用水及景观生态用水之间的优化配置, 水量在灌溉渠系间的优化配置, 水量在不同作物及其不同生育期之间的优化配置。其中农业用水是灌区用水的主体, 也是灌区水资源合理配置的核心。

近年来, 随着中国经济与社会的快速发展, 水资源短缺形势愈来愈严峻, 农业作为用水大户, 农业水资源“瓶颈”制约问题愈加凸显。目前, 中国农田有效灌溉面积达0.6亿hm², 在占耕地面积一半的有效灌溉面积上, 生产了占全国75%的粮食和90%以上的经济作物, 在灌区缺水越来越严重的情况下, 如何实现灌区水资源的优化配置, 使其发挥最大效益, 进而保障中国粮食安全值得关注。因此, 有必要对中国灌区水资源配置现状进行系统梳理, 弄清楚目前存在的主要问题, 并充分了解国外在该研究领域的发展动态与最新进展, 对于提高中国灌区水资源合理配置研究水平, 实现灌区水资源的优化配置与可持续开发利用, 保障国家粮食安全具有重要意义。

1 中国灌区水资源配置存在的主要问题

1.1 灌区水资源合理配置与保护政策有待加强

在灌区水资源管理方面, 虽然有了《中华人民共和国水法》、《水污染防治法》、《关于实行最严格水资源管理制度的意见》等法规与文件, 特别是明确提出了实施水资源管理“三条红线”, 即水资源开发利用控

收稿日期: 2014-06-30; 网络出版时间: 2015-03-16

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150316.1454.020.html>

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费资助项目(201203077); “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012AA101404)

作者简介: 齐学斌(1963—), 男, 陕西户县人, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事灌区水资源与水环境研究。

E-mail: qxb6301@sina.cn

制红线、用水效率控制红线和水功能区限制纳污红线，并将水资源管理提高到了一个空前的高度，但目前灌区还缺少量化的、具有可操作性的约束性管理指标，还没有形成水资源管理的硬性约束。在灌区水资源管理制度建设、政策机制建设、社会参与机制建设、水管队伍建设、水价形成机制和运行管理模式等方面也较为薄弱。

1.2 灌区水资源的统一管理 with 统一调度机制不健全

目前灌区水资源一般由多个部门共同管理。地表水一般由灌区管理局(站)管理，主要负责灌区规划制定、水利工程设施的日常管理和维修养护、防汛排涝和防汛抢险、灌溉试验、水量分配、水价制定与水费收缴等；地下水一般由地方水行政主管部门管理(水利局或水务局)。尽管两个主管部门同属于水利部门，但由于职能划分界限不清，加之各自利益的不同，很难做到水资源的统一管理。要实现灌区水资源的合理配置与优化调度，必须打破水资源行政管理上的“条块分割”现象，建立灌区水资源的统一管理机构，只有这样才能实现灌区水资源的统一管理、统一调度、统一配置，充分发挥灌区水资源的最大效益。

1.3 灌区水资源优化配置模型与方法实用性不强

近年来，随着科学技术的迅速发展，灌区水资源管理新技术与新方法不断涌现。灌区水资源优化配置与调控的对象由单水源、单用水部门发展到复杂的多水源、多用水部门；配置内容由单纯的水量配置发展到水量、水质统一调配；配置目标由单目标发展到多目标，并且在新的优化理论、技术和算法下使多目标的问题求解变得非常简单；配置模型由单一数学规划模型发展到数学规划与向量优化理论、模拟技术等多种方法的混合模型。但由于灌区水资源下垫面与边界条件以及农业用水系统的复杂性，如何将水资源优化配置模型计算结果用于指导灌区的实际配水，目前还比较困难；另外，由于模型的通用性不强，很难将基于某个灌区研发的模型应用到其他灌区进行使用。上述情况直接限制了灌区水资源优化配置模型的推广应用，因此，迫切需要研发功能强大、通用性强、操作简便及实用的灌区水资源优化配置模型与方法。

1.4 灌区水资源优化配置基础条件较为薄弱

要进行灌区水资源的优化配置，如果没有大量详实的信息作为支撑，即使再好的模型与方法，也只能是空谈。灌区信息化为实现灌区水资源优化配置提供了平台。灌区信息化管理就是充分利用现代信息技术，深入开发和广泛利用灌区信息资源，大大提高信息采集和加工的准确性以及传输的时效性，做出及时准确的反馈和预测，为灌区管理部门提供科学的决策依据，全面提升灌区管理的效率和效能。目前，中国灌区信息测量技术主要是水文和工业上成熟技术的直接移植，主要存在环境适应性差和成本较高等问题，由于灌区的环境对电子设备来说相对恶劣，而且点多面广，因此对产品的稳定性和成本就极其敏感。影响灌区信息化发展的另外一些因素是，资金投入不足、监测力量普遍比较薄弱、复合型人才匮乏及网络建设滞后等诸多问题。目前，在灌区水资源管理系统中，地表水输配水系统斗渠以上工程较为完善，量测设备较为齐全，信息容易获取，但田间作物需水信息、地下水开采量信息、灌水信息等往往缺乏实测数据，这就直接限制了灌区水资源优化配置模型作用的发挥。加强灌区信息化等基础条件建设，可为灌区水资源优化配置创造条件^[2]。

2 国内外灌区水资源配置研究现状

2.1 灌区水资源管理政策

2.1.1 国内研究现状

近年来，针对灌区水资源管理中出现的管理薄弱、水的利用效率不高及生态环境恶化等突出问题，中国进行了大量的研究工作，相继出台了《取水许可和水资源费征收管理条例》、《实行最严格水资源管理制度考核办法》、《关于加强地下水超采区水资源管理工作的意见》、《关于加强灌溉用水定额管理的指导意见》等，水资源管理工作逐渐步入正规。但总体来讲，中国水资源管理还较为粗放：一方面地下水无限制开发，缺乏有效管理；另一方面，在水资源管理中，忽视了地下水自身的特点，地下水资源评价、规划、立法、监测和监督管理等基础工作也相对滞后；第三，水资源管理存在重开发、轻保护现象，忽视地下水的生态环境

功能, 引发一系列生态环境问题, 对地下水水质保护缺乏有效的监管措施。可见, 中国在灌区水资源管理政策与法规方面存在立法滞后以及相应的行政管理不协调, 与国外发达国家相比差距较大。

2.1.2 国外研究现状

美国注重灌区综合性的水资源管理, 强调水资源的综合利用, 而非单一水资源管理。不仅重视水资源开发对当地经济发展的影响, 而且重视水资源开发、利用对其他地区资源和生态环境的影响, 并将水文与生物、环境、社会需要以及经济需要统筹起来, 综合考虑水资源开发、利用、节约和保护^[3]。为解决灌区地下水衰竭问题, 普遍做法是识别出地下水衰竭的地区, 加以控制。例如, 在占有权制的各州, 一旦管理机构确定出现地下水衰竭问题的地方, 就不允许在该地区打新井; 在适宜使用权制的内布拉斯加和亚利桑那州, 都建立了有关地下水衰竭的法令, 控制地下水的开采; 在绝对所有权的德克萨斯州, 也对灌溉径流加以控制, 并开展节水普及教育计划, 加强地下水的保护。

以色列的水资源管理立法很有特色。鉴于水是以色列的生命线和战略资源, 《水法》规定水资源是公共财产, 由国家控制, 私人不得拥有水资源, 所有的水污染, 包括点源和非点源污染都被禁止。以色列在灌区水资源管理方面采用先进的信息技术和自动化技术进行高效管理, 并针对不同绿化植物的品种, 不同需水量和需水时间, 全部采用智能控制供水, 避免水资源浪费。智能控制供水系统能根据相应区域的用水数据, 计算出最恰当的供水压力, 用水高时送水压力自动增加, 用水量小时送水压力自动减小。农业灌溉用水几乎全部采用计算机自动化控制系统, 设置水分传感器, 按时定量灌溉, 极大地提高了灌溉水的利用效率^[4]。以色列还制订了一系列法规来改进污水处理厂出水的水质, 以促进回用, 并减少环境和健康风险。一个重要目标是利用回用的污水代替淡水作为灌溉用水。目前, 以色列几乎 50% 的灌溉用水源于处理过的污水。

澳大利亚政府 20 世纪 90 年代以来, 不断推进水改革的进程, 提出了一系列水资源改革措施, 使澳大利亚水资源状况在可持续利用方面呈现出新的态势。澳大利亚对于灌区节水的调节主要有以下几方面: ① 开放水权交易, 其中用水额度可以自由交易, 促使水资源向使用价值高的方面转移, 使用水户更直接地参与供水管理; ② 改革水价, 促进节水, 制定全成本水价, 确保水的分配和收费结构能够对提高用水效率产生激励作用; ③ 采纳流域水资源一体化的水资源管理机制, 实施可交易的水权, 分配水给环境, 达到环境与发展的平衡; ④ 在灌溉工程管理上, 已逐步实施由政府管理转为私人企业管理, 并采取必要的措施使工程实现良性运行^[5]。在灌区地下水利用和管理方面也有着长期的经验积累。如评价含水层的可持续开采量, 并确定水资源的可持续使用限度; 重视地表水与地下水资源的统一管理、地下水与地表水的相互作用、地下水的环境价值; 设立监测目标和调控机制, 以评价政策手段的应用是否达到了管理目标, 对地下水的监测也起到重要作用; 重视土地利用活动对地下水水质的影响及地下水资源保护等。

德国非常重视灌区地下水监测制度建设, 并取得成效。地下水监测的目的是: 及时消除地下水质量的危险变化、补救和降低污染造成的危害、评估保护措施效用, 这一职责属于联邦州政府。监测体系能够及时清除危害地下水的物质, 并在恰当的时期采取合适的保护措施。为了保护地下水不受污染, 德国在农业生产中使用化肥、农药的法律更为严格。不仅对生产化肥、农药的企业制定了严格的生产许可证申报程序, 而且对农业施肥、喷药也有相当严格的规定。德国使用喷灌不仅仅节约了地下水资源, 而且节省劳力和能源、改善农产品质量, 是百利而无一害的节水技术^[6]。

巴西能够比较好地保护和合理利用水资源, 主要得益于立法和各种规章制度。从联邦政府到州市各级政府均有负责管理和保护水资源的部门, 并同各地非官方的保护水资源和环境组织相配合, 协调解决各方在用水问题上的冲突, 督促执行水法。巴西在灌区水资源方面引进最重要的理念是水资源综合管理, 将水资源综合管理定义为“为流域利益相关者提供基础, 以促进和协调可持续水资源管理和发展方面的多目标”。从大的方面来说, 水资源综合管理理念为巴西目前正在实施解决水问题的公共策略和制度提供了概念和方法^[7]。

由此可见, 国外在灌区水资源管理政策与措施方面, 特别重视水资源综合管理政策与措施的制定, 注重综合决策与管理的一体化, 重视水资源的可持续开发利用以及生态环境保护, 并不断完善水资源管理体制与运行模式, 以适应社会、经济与环境发展需要。国外完善的法律法规体系, 对于保护水资源起到了重要

作用。

2.2 灌区水资源循环转化规律

2.2.1 国内研究现状

中国在水资源循环转化方面的研究起步相对较晚,但发展很快。20世纪80年代中后期,雷志栋和杨诗秀^[8]提出了大气水、地表水、土壤水、地下水之间的“四水”转化概念,从理论和实践上对给水度概念做出了正确解释。1995年康绍忠等^[9]建立麦田“五水”(大气水、地表水、地下水、土壤水和植物水)转化的动力学模式,揭示了麦田水分微循环的规律。2006年王浩等^[10]提出了水资源全口径层次化动态评价方法,将分布式水文模型与集总式水资源调配模型耦合,建立了二元水资源评价模型。2011年夏军等^[11]将分布式水文模型与地下水数值模型耦合,建立了变化环境下跨流域调水的大尺度水文循环模型,不仅考虑了自然的产汇流规律,同时考虑了人类活动的影响。由此可见,在灌区水资源循环转化规律研究方面,中国经历了从田间尺度至区域或流域尺度、从集中参数至分布式参数、从单一水文过程至水文与社会复杂系统的转变过程,研究工作向更广、更深方向发展。

2.2.2 国外研究现状

“四水”转化关系的研究是陆面水文循环的一个主要部分。20世纪初,随着近代水文学的发展,以产汇流理论为基础建立的概念性水文模型得以广泛应用,逐步揭示了大气降水、地表水、土壤水和地下水之间相互转化、相互制约的关系。在降雨入渗的研究中,最有名的是HORTON、GREEN和AMPT、PHILIP入渗模型^[12]。特别是1966年,Philip在分析和总结前人成果的基础上,提出了较完整的关于“土壤-植物-大气连续体”的概念,将“土壤-植物-大气连续体”作为一个整体,用连续、系统、动态的观点和统一的能量标准,定量研究系统中水分运移、热能传输的物理学和生理学机理及其调控理论,奠定了现代农田水分研究的理论基础^[13]。此后,随着GIS和遥感技术的发展,遥感技术在估算潜在蒸散量的应用得到了极大的发展^[14]。20世纪90年代初,国际地圈生物圈计划将水文循环生物圈方面列为其四大核心课题之一,SPAC(Soil-Plant-Atmosphere Continuum)系统的研究已经成为当前学术界的热点之一^[15]。可见,在灌区水资源循环转化规律研究方面,国外更加关注从系统的角度进行研究,并重视新技术与新方法的引入,研究工作更为深入。

2.3 灌区水资源优化配置模型与方法

2.3.1 国内研究现状

中国灌区水资源科学分配方面的研究始于20世纪60年代,最初的研究以水库优化调度为先导。从20世纪80年代初开始,水资源配置理论与方法研究步入快速发展期。曾赛星和李寿声^[16]运用动态规划法,确定内蒙古河套灌区各种作物的灌水定额及灌水次数;贺北方等^[17]对多水库多目标最优控制运用的模拟与方法,灌区渠系优化配水、大型灌区水资源优化分配模型、多水源引水灌区水资源调配模型及应用进行了研究;王浩等^[18]提出了“二元水循环”理论,并耦合分布式水文模型、水资源合理配置模型、多目标决策分析模型,开发了“天然-人工”二元水循环模型,应用于三川河、海河等流域水资源管理;张展羽等^[19]根据农业水土资源相互关联、相互制约的特点,将水土资源优化配置作为大系统问题进行研究,建立了缺水灌区农业水土资源优化配置模型。由此可见,在灌区水资源优化配置模型与方法研究方面,国内随着计算机科学的发展,研究工作不断深入,经历了从线性至非线性、单目标至多目标、确定性至随机性、解析模型至数值模型、低微至高微、单个系统至复杂大系统的转变过程,水资源优化配置模型考虑的因素更多,功能更强。

2.3.2 国外研究现状

国外灌区水资源配置研究源于20世纪40年代由Masse提出的水库优化调度问题。20世纪70年代以来,伴随数学规划和模拟技术的发展及其在水资源领域的应用,水资源优化配置的研究成果不断增多。Romjin和Taminga^[20]考虑了水的多功能性和多种利益的关系,强调决策者和决策分析者间的合作,建立了水资源量分配问题的多层次模型,体现了水资源配置问题的多目标和层次结构的特点。Willis^[21]应用线性规划方法求解了1个地表水库与4个地下水含水单元构成的地表水、地下水运行管理问题,地下水运动用基本方程的有

限差分式表达, 目标为供水费用最小或当供水不足情况下缺水损失最小。20 世纪 90 年代以来, 由于水污染和水危机的加剧, 传统的以供水量和经济效益最大为水资源优化配置目标的模式已不能满足需要, 国外开始在水资源优化配置中注重水质约束、水资源环境效益以及水资源可持续利用研究, 使得水资源量与质管理方法的研究产生了更大的活力。Fleming 等^[22]以经济效益最大为目标, 考虑了水质运移的滞后作用, 并用水力梯度作为约束来控制污染扩散, 建立了地下水水质水量管理模型。Carlos 等^[23]以经济效益最大为目标, 建立考虑了不同用水部门对水质不同要求的污水、地表水、地下水等多种水源管理模型。Fortes 等^[24]以概念性的半分布式水量平衡模型为基础, 在 GIS 上建立了提高水利用率的灌溉制度模拟模型——GISAREG 模型。可见, 国外在灌区水资源优化配置模型与方法研究方面与国内类似, 也是随着计算机技术和系统论的发展研究工作不断深入, 但国外更加关注水资源优化配置过程中的生态环境问题, 以及水资源可持续利用问题, 并重视模型的实际应用及用于管理者的决策。

2.4 灌区水文生态研究

2.4.1 国内研究现状

1998 年, 冯国章提出水文生态系统的概念, 指出水文生态系统是由水文系统和生态系统复合而成的, 集水文循环与生态进化及其共同的自然环境和人工环境于一体, 具有耗散结构和远离平衡态的、开放的、动态的和非线性的复杂巨系统^[25]。代俊峰和崔远来^[26]研究指出: 灌溉水文学是重点研究灌溉对灌区不同尺度的水分循环、水量转化的影响, 及其对灌区生产力影响的一门学科, 它包括地表径流、非饱和带水流、植物冠层截留、蒸发蒸腾、地下水流、河流、渠道流等多个水文过程, 各个过程之间既相互联系又相互影响。李佩成^[27]研究指出: 灌区水文系统是人为地修筑引、输、配水渠道(管道)系统, 将河水或井水引至田间, 浇灌农田的灌溉工程; 依靠灌溉工程保证作物、林果茁壮成长所需水分, 配合光、热、气、土壤资源和生物资源的组合, 形成具有良好农业生产条件的新的生态系统——灌区水文生态系统。张建云等^[28]研究提出, 变化环境对流域产汇流产生重要影响, 改变了原有河道的产汇流规律, 因此, 研究变化环境下灌区水文生态问题及水资源规划管理具有十分重要的科学意义。可见, 国内关于灌区水文生态研究, 还仅局限于概念与内涵的界定, 还处于初步探讨阶段, 灌区水文生态究竟要研究哪些内容? 如何给予科学定义? 如何与灌区水资源优化配置与管理相结合? 如何考虑变化环境对其的影响等? 还有很多工作要做。

2.4.2 国外研究现状

Dunbar 和 Acreman^[29]将水文生态学定义为: 在一定的空间和时间尺度上, 利用水文学、水力学、地貌学、生物学以及生态学的综合知识评估淡水生物区系及生态系统对非生物因素的响应的学科。Wallender 和 Grismer^[30]认为灌溉水文学是研究灌溉农业生态系统中物质的运输、转化、累积等特点以及因社会、环境和资源保护等原因而引起的水资源短缺条件下(包括供水量减少和水质恶化)农产品产量可持续性的学科, 研究对象的空间尺度从微观尺度变化到几百平方公里, 时间尺度从秒跨越到几个世纪。David^[31]认为, 水文生态学是寻找生态系统与水之间复杂联系, 将水文学中的物理过程与生态学中的生物进程结合起来用于科学研究的学科, 包含不同尺度的研究内容, 对于全球和地区尺度, 水文学过程与气候、陆地植被之间的相互作用决定了人类和生态环境的水资源利用量。以上可见, 关于灌区水文生态研究, 国外该领域的研究历史不长, 仅限于对水文生态学概念的探讨与分析, 但国外对水文生态学的定义内容更为丰富、内涵更为宽泛。

3 灌区水资源合理配置研究发展建议

综观近年来国内外研究成果, 尽管灌区水资源合理配置与管理的理论和实践研究已取得了长足的进步, 研究方法也不断完善, 但仍面临着诸多挑战和困难, 特别是同国外发达国家相比, 中国在灌区水资源合理配置研究领域还有不小差距, 建议加强以下 6 方面研究:

3.1 加强灌区水资源的统一管理政策与机制研究

当前在水资源管理机构设置上部门之间、流域和区域之间的事权划分不明晰, 在水资源开发、保护与管

理中职责交叉,不利于水资源的统一和高效管理,有时甚至成为制约条件,因此,必须改革现行的灌区水资源管理模式,对灌区地表水与地下水进行统一管理,建立统一的管理机构。另外,灌区水资源管理应充分采取经济和法律的手段,争取立法解决地表水与地下水的统一水权问题,在此基础上制定并渠结合的合理水价。为了形成灌区良性经济激励和运行机制,在水资源调配中必须引入有效的经济手段,利用市场调控加以配置。生态是水资源配置合理性判别重要标准之一,应从生态目标的适宜性、生态用水保障程度等多方面对灌区水资源配置进行系统评价。

3.2 重视变化环境下灌区水资源循环转化规律研究

人类活动的加入,使得传统意义上的自然水循环系统已不能准确反映实际水循环过程。随着田间尺度水文循环研究向灌区水循环关系研究的过度,水文循环模型也由自然系统水文模型转为“人工-自然”二元水文循环模型,研究人类活动下灌区水循环转化关系将会是水循环研究的前沿之一。对灌区的水资源研究,还应考虑与之相关的社会、经济和资源等因素的协调关系,以实现水资源的高效可持续利用,这里的协调关系包括各行政区之间的用水调度协调、灌区多种水源供水量和供水时间的协调、水量与水质的协调以及水循环系统与灌区系统之间的协调。同时,应进一步研究变化环境下的灌区自然水循环系统与“取水—输水—用水—排水—回归”人工水循环过程的二元水循环系统水循环基础理论、演变机理及二者互作机制,探究灌区降水、地表水、地下水、外调水、中水之间相互循环转化关系,研发变化环境下灌区水资源评价新技术与二元水循环模拟模型,分析基于蒸发总量控制的水资源规划和管理新方法,构建灌区水资源高效利用技术、灌区社会水循环系统模拟与过程优化技术。

3.3 加强灌区水资源承载力基础理论与评价新方法研究

当前灌区水资源承载能力的研究过分偏重于实用研究,忽视水资源承载力内涵的系统分析和基础理论的研究。随着人类活动的加强,原有的一元流域天然水循环模式受到严重挑战,人类活动不仅改变了流域降水、蒸发、入渗、产流和汇流特性,而且在原有的天然水循环内产生了人工侧支循环,形成了天然循环与人工循环此消彼长的二元动态水循环过程。具有二元结构的流域水资源演化不仅构成了社会经济发展的基础,是生态环境的控制因素,同时也是诸多水问题的共同症结所在,也是水资源承载力研究的一个基石。因此,开展基于水-生态-社会经济复合系统下的自然-人工二元模式的水文循环过程与机制研究是灌区水资源承载力研究的一个重要趋势。同时,必须深入分析水资源在自然和社会中的循环转化规律,将水文及水资源作为纽带贯穿整个水资源承载力的研究体系中,从本质上探明水资源承载力复杂系统中水资源、社会经济和生态与环境等因素之间的互动关系,实现水资源承载力量化模型与分布式水文模型的耦合,将水资源承载力评价模型从集总式向分布式转移。

3.4 强化灌区水文生态系统调控技术研究

水文生态学的目标是水资源的可持续利用、人与自然的和谐发展。当前,中国灌区水环境问题十分严峻,应该针对灌区大尺度上降雨、地表水和地下水等在农田、灌排沟渠、水库塘堰之间的复杂转化关系,重点研究复杂灌排沟渠、塘、库关系下水分转化关系及其对灌区水肥高效利用与生态系统的影响,探索不同地表、地下控制水位与陆地、湿地生态系统及水肥利用效率之间相互关系,提出维持生态健康的灌区生态需水及关键点的生态水位或流量控制指标与阈值标准。另外,要建立全面的灌区水文生态系统监测网络,加强灌区生态系统和水文因子的监测,尤其要注重监测数据的长期积累。同时,要注重新技术、新方法在灌区水文生态系统研究中的应用,利用国外先进的建模理论,结合中国灌区水文资料,建立符合中国水文实际的研究模型,探明水文过程和生态变化的耦合机理,从而为中国生态灌区建设奠定基础。

3.5 加强灌区水资源实时风险调度与智能化管理技术研究

灌区水资源监测技术与方法是灌溉多水源调控的基础,发展水资源监测技术与方法在国家科学与发展中有着重要作用,新的水资源测量与监测技术和方法有助于保持中国在水资源科学和技术的地位,并强化国家的经济发展。将遥感技术、地理信息系统、全球卫星定位系统等现代高新技术应用于灌溉水资源监测,以及将水文、水资源、生态、模拟技术和优化算法等领域的最新研究成果应用于灌溉多水源优化配置与调控将是

发展方向。另外,还需研究灌溉多水源多尺度同步监测技术、面向增加水文预报及需水预测精度的水资源云计算技术,构建扩充水资源需求决策边界的云服务体系,探索提高水资源效能的多水源平衡配置与智慧调度技术、保障水资源精准配送的过程控制技术,提出不断标准化的水联网与水效能匹配评价过程控制技术,阐明气候变化和不同区域水管理计划的有效性之间的关系,提出干早期最佳的需求管理策略。

3.6 重视灌区水资源优化配置耦合技术研究

随着灌区功能的不断扩大与影响因素的不断增加,面对多种水源复杂的循环转化关系,单一的研究方法已不能准确反映灌区水源循环的实际情况,将多种方法耦合,扬长避短,充分发挥各优化方法的优势,将会是研究灌区水源循环转化关系的重要途径之一。另外,还需深入研究基于水资源可持续利用的灌区地表水、地下水、再生水、外调水和微咸水等多水源优化配置原则,探讨基于用水户利益驱动的多水源多功能水权转换准则,分析气候变化及人类活动增强与不同区域调配水计划有效性的关系,研发基于“经济社会发展、生态环境保护、水资源可持续开发利用”动态平衡的灌溉多水源调控模型及与遥感技术相结合的决策支持系统,最终构建基于生态友好型的不同灌溉模式与不同时空条件下的多水源调配模式与方案。

4 结论与建议

灌区水资源合理配置是农业高效用水研究的热点问题,经过几十年的发展,在灌区“四水”转化机理、灌区水资源优化调度模型、灌区水管理政策与法规等方面已取得了丰硕的成果,形成了一个相对完整的学科体系与技术管理方案。相较于国外的成熟技术,国内在灌区水资源合理配置政策、水资源的统一管理运行机制、灌区水资源适时优化调度模型、灌区水资源生态调控系统建设方面存在许多不足之处。进入21世纪以来,由于受气候变化及人类活动的影响,灌区水资源边界条件及循环结构发生重大改变,已引起多学科领域的广泛关注,使得灌区水资源合理配置研究进入一个新的发展阶段。因此,在今后的研究中,需要加强灌区水资源的统一管理政策与机制研究,解决多种水资源配置中的政策依据问题;强化变化条件下灌区水循环与转化机理研究,建立不同类型灌区水资源调控指标体系;通过水资源多元耦合模型与智能控制系统研究,构建水资源实时风险调度与智能化管理系统;通过灌区水文生态系统复杂转化关系、水资源云计算技术和智慧调度技术研究,提出基于生态友好型的不同灌溉模式与不同时空条件下的多水源调配模式与方案,为灌区水资源可持续开发利用及农业的可持续发展提供理论支撑。

参考文献:

- [1] 王浩,严登华,贾仰文,等. 现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J]. 水科学进展,2010,21(4):479-489. (WANG Hao,YAN Denghua,JIA Yangwen, et al. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues[J]. Advances in Water Science, 2010,21(4):479-489. (in Chinese))
- [2] 纵岗,沈鹏. 我国灌区信息化建设中存在的问题与对策[J]. 湖北水利水电职业技术学院学报,2010,6(3):28-30. (ZONG Gang,SHEN Peng. On problems and countermeasures of informatization construction in irrigation-developed areas of China [J]. Journal of Hubei Water Resources Technical College, 2010,6(3):28-30. (in Chinese))
- [3] 邹体峰. 美国水资源综合管理实践与思考[J]. 中国水能与电气化,2012,84(1):41-45. (ZU Tifeng. Practices and thinking of the overall management of water resource in the United States[J]. Journal of China Water Power & Electrification, 2012,84(1):41-45. (in Chinese))
- [4] 马乃毅,徐敏. 以色列水资源管理实践经验及对中国西北干旱区的启示[J]. 海外之窗,2013(2):117-119. (MA Naiyi,XU Min. Inspiration of Israel's water resources management practice to water resources management in arid area of Northwest of China [J]. Journal of Overseas Window, 2013(2):117-119. (in Chinese))
- [5] 邹玮. 澳大利亚可持续发展水政策对中国水资源管理的启示[J]. 水利经济,2013,31(1):48-52. (ZU Wei. Inspiration of sustainable water policies in Australia to water resources management in China [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2013,31(1):48-52. (in Chinese))

- [6] 赵辉,齐学斌. 地下水资源管理新技术与新方法[J]. 中国水利,2009(15):30-33. (ZHAO Hui, QI Xuebin. New skill and method of groundwater resources management[J]. Journal of China Water Resources, 2009(15):30-33. (in Chinese))
- [7] 何宝根. 巴西水资源考察实践及对我们的启示[J]. 人民珠江,2011(增刊1):79-81. (HE Baogen. Brazil water resources investigation practice and its enlightenment to us[J]. Journal of Pearl River, 2011 (suppl 1):79-81. (in Chinese))
- [8] 雷志栋,杨诗秀. 田间土壤水分入渗的空间分布[J]. 水利学报,1987(3):1-9. (LEI Zhidong, YANG Shixiu. Spatial distribution of infiltration in the field [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987(3):1-9. (in Chinese))
- [9] 康绍忠,蔡焕杰,刘晓明,等. 农田“五水”相互转化的动力学模式及其应用[J]. 西北农业大学学报,1995,23(2):1-8. (KANG Shaozhong, CAI Huanjie, LIU Xiaoming, et al. The dynamic model of air-surface-ground-soil and plant water interrelation and its application[J]. Acta Univ Agri Boreali-Occidentalis, 1995,23(2):1-8. (in Chinese))
- [10] 王浩,王建华,贾仰文,等. 现代环境下的流域水资源评价方法研究[J]. 水文,2006,26(3):18-21. (WANG Hao, WANG Jianhua, JIA Yangwen, et al. A study on the method of water resources assessment in river basin under the present environment[J]. Journal of China Hydrology, 2006,26(3):18-21. (in Chinese))
- [11] 夏军,刘春蓁,任国玉. 气候变化对我国水资源影响研究面临的机遇与挑战[J]. 地球科学进展[J],2011,26(1):1-12. (XIA Jun, LIU Chunzhen, REN Guoyu. Opportunity and challenge of the climate change impact on the water resource of China[J]. Advance in Earth Science,2011,26(1):1-12. (in Chinese))
- [12] GREE W H, AMPT G A. Studies on soil physics: Flow of air and water through soils [J]. J Agric Sci, 1911, 4(1):1-24.
- [13] PHILIP J R. The theory of infiltration; The infiltration equation and its solution [J]. J Soil Sci,1957, 83(5): 345-357.
- [14] 孟春红,路振广,马细霞,等. 灌区水资源合理配置的模糊物元综合评价[J]. 人民黄河,2013,35(9):86-88. (MENG Chunhong, LU Zhenguang, MA Xixia, et al. Research on comprehensive evaluation for optimal deployment of water resources for irrigation area[J]. Journal of Yellow River, 2013,35(9):86-88. (in Chinese))
- [15] 张俊娥,陆垂裕,秦大庸,等. 基于分布式水文模型的区域“四水”转化[J]. 水科学进展,2011,22(5):595-604. (ZHANG Jun'e, LU Chuiyu, QIN Dayong, et al. Regional“four-water”transformation based on distributed hydrological model [J]. Advances in Water Science, 2011,22(5):595-604. (in Chinese))
- [16] 曾赛星,李寿声. 灌溉水量分配大系统分解协调模型[J]. 河海大学学报,1990(1):67-75. (ZENG Saixing, LI Shousheng. A large system model of optimum water allocation for irrigation[J]. Journal of Hohai University,1990(1):67-75. (in Chinese))
- [17] 贺北方,丁大发,马细霞. 多库多目标最优控制运用的模型与方法[J]. 水利学报,1995(3):84-89. (HE Beifang, DING Dafa, MA Xixia. The model and method of multireservoir multiobjective optimum control operation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1995(3):84-89. (in Chinese))
- [18] 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[J]. 水利学报,2006,37(12):1496-1502. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, et al. Theory and methodology of water resources assessment based on dualistic water cycle model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(12):1496-1502. (in Chinese))
- [19] 张展羽,司涵,冯宝平,等. 缺水灌区农业水土资源优化配置模型[J]. 水利学报,2014,45(4):403-409. (ZHANG Zhanyu, SI Han, FENG Baoping, et al. An optimal model for agriculture water and soil resources configuration in water shortage irrigation area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014,45(4):403-409. (in Chinese))
- [20] Romjin E, TAMINGA M. Multi-objective decision making theory and methodology[M]. North Holland: Elsevier Science Publishing Co, 1983.
- [21] WILLIS R. Multiple-criteria decision-making: A retrospective analysis[J]. IEEE Trans SYST, Man, Cybern, SYST, 1987, 15(3):213-220.
- [22] FLEMING R A, ADAMS R M, KIM C S. Regulating groundwater pollution: Effects of geophysical response assumptions on economic efficiency [J]. Water Resources Research, 1995, 31: 1069-1076.
- [23] CARLOS P, GIDEON O, ABRAHAM M. Optimal operation of regional system with diverse water quality sources [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1997, 123(2): 105-115.
- [24] FORTES P S, PLATONOV A E, PEREIR A L S. GISAREG-a GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use and environmental control[J]. Agricultural Water Management, 2005, 77(1/2/3):159-179.
- [25] 王金凤,周维博. 水文生态学与生态水文学的区别与联系[J]. 人民黄河,2012,34(7):36-39. (WANG Jinfeng, ZHOU Wei-bo. Difference and relation between hydro-ecology and eco-hydrology[J]. Journal of Yellow River. 2012,34(7):36-39. (in Chinese))

- [26] 代俊峰, 崔远来. 灌溉水文学及其研究进展[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 294-300. (DAI Junfeng, CUI Yuanlai. Progress in study of the irrigation hydrology[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2): 294-300. (in Chinese))
- [27] 李佩成. 论水文生态学的建立及其历史使命[J]. 灌溉排水学报, 2012, 31(1): 1-4. (LI Peicheng. The establishment and historic mission of hydroecology[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(1): 1-4. (in Chinese))
- [28] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识[J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303-310. (ZHANG Jianyun, HE Ruimin, QI Jing, et al. A new perspective on water issues in North China[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(3): 303-310. (in Chinese))
- [29] DUNBAR M J, ACREMAN M C. Applied hydro-ecological sciences for the twenty-first century[M]. Wallingford: IAH S Press, 2001: 117-128.
- [30] WALLENDER W W, GRISMER M E. Irrigation hydrology: Crossing scales [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2002, 128(4): 203-211.
- [31] DAVID D B. An ecologist's perspective of ecohydrology [J]. Bulletin of the Ecological Society of America, 2005, 86: 296-306.

Research advances on the reasonable water resources allocation in irrigation district*

QI Xuebin^{1,2}, HUANG Zhongdong^{1,3}, QIAO Dongmei^{1,4},
ZHANG Xianchao^{1,3}, LI Ping^{1,4}, Mathias N Andersen⁵

(1. Farmland Irrigation Research Institute of CAAS of Henan province, Xinxiang 453002, China; 2. Agriculture Water and Soil Environmental Field Science Research Station of Xinxiang of CAAS of Henan Province, Xinxiang 453002, China; 3. Graduate School of Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 4. Key Laboratory of High-efficient and Safe Utilization of Agriculture Water Resources of CAAS of Henan Province, Xinxiang 453002, China; 5. Department of Agroecology and Environment, Faculty of Agricultural Sciences, Aarhus University, Blichers Allé 20, Postboks 50, DK-8830 Tjele, Denmark)

Abstract: The rational allocation of water resources for irrigation is important to improve the efficiency in utilization of water resources and ensuring food security, but also effective control measures need to be in place for the sustainable utilization of water resources in an irrigation area. The progress of research on the rational allocation of water resources in irrigation districts both at home and abroad may be summarized in four key aspects of the policy regarding water resources management: ① The mechanism of water resource cycle and ② Transformation in irrigation district, ③ The water resources optimal allocation model and ④ The hydrological ecosystem analysis in irrigation district. Our analysis showed that there are four major problems in domestic irrigation water resources allocation: Policies for rational water resources allocation and protection are not in place, unified management mechanism of water resources is not perfect, the model for optimal water resources allocation is not practical, and the basic conditions for optimal allocation of water resources is relatively weak. In order to solve those problems in water resources allocation practice, six important aspects must be the focus in China in future research: More attention need to paid to studying the unified management policy and mechanism of water resources, studying the water resources cycle and transformation under environmental change, studying new methods for water resources carrying capacity and evaluation in irrigation districts, studying the water resources control technology in irrigation districts by hydrology ecological system, studying the technologies of real-time risk dispatching and intelligent management in irrigation districts, and finally studying the technology of coupling optimal allocation technology in irrigation districts.

Key words: irrigation district; hydrological cycle; optimization model; water ecosystem; water management

* The study is financially supported by the National Key Technologies R&D Program of China during the 12th Five-year Plan Period (No. 2012AA101404).