

DOI :10.3880/j.issn.1006-7647.2009.04.019

现代水资源配置研究现状及发展趋势

魏 婧,梅亚东,杨 娜,许银山

(武汉大学水资源与水电工程国家重点实验室,湖北 武汉 430072)

摘要 结合水资源的现状与存在的问题,说明水资源配置对可持续发展的重要意义,阐述现代理论方法下的水资源配置,包括基于模拟方法的、优化的、水权的、博弈论的、复杂适应系统的水资源配置方式,并在此基础上展望该研究领域未来的发展方向。

关键词 水资源配置 研究现状 发展趋势 可持续发展

中图分类号 :TV213 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2009)04-0073-05

Research status and development trend of the modern water resources allocation//WEI Jing, MEI Ya-dong, YANG Na, XU Yin-shan(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract :The significance of water resources allocation on sustainable development is explained along with the status and problems of water resources. Water resources allocation based on modern theories and methods is described systematically, including water resources allocation based on simulation methods, optimization methods, water rights, game theory and complex adaptive systems. On this basis, future directions of research are proposed.

Key words :water resources allocation ; research status ; development trend ; sustainable development

水是人类赖以生存和发展不可缺少的宝贵资源,又是自然环境的重要组成部分,是可持续发展的基础条件。随着人口与经济的增长,水资源的需求量不断增加,水环境又不断恶化,水资源短缺已成为全球性问题^[1-2]。对水资源进行合理优化配置,正是兼顾人类生存与发展行之有效的水资源综合管理措施。应用系统科学等现代理论方法对水资源进行优化配置和综合管理始于 20 世纪五六十年代,随着计算机技术和水文水资源等学科的发展,已从最初的较单一用水调配问题如水库调度、灌区用水计划等,发展到综合性区域(流域)及跨流域水资源调配;调配目标从单一的经济目标发展到综合考虑社会、经济、环境效益的公平、效率和可持续性目标;调配水源从地表水发展到地表水、地下水、再生水等多水源联合调配;调配内容从水量调控发展为水量水质的初步联合调控等;从调配机理上更注重与水循环要素之间的效应,更注重与经济系统、社会系统的结合,建立了包括水文、经济、制度等组分的水资源综合管理模型。

1 基于模拟方法的水资源配置

在基于模拟方法的水资源配置中,分配水的规则已知,包括水在各部门之间的分配规则、取水与留用规则、水库的蓄放水规则等。基于模拟方法的水资源配置方式一般由水资源模拟模型来实现。模拟模型扮演了评判者的角色,用来评估水资源系统在全球气候变化、干旱和用水优先权的不断改变等情况下的系统运行状态。模拟模型包括流域径流模拟模型、流域水质模拟模型、流域水权模拟模型和综合流域模拟模型^[3]。其配置效果可体现在水量和水质 2 个方面。

1979 年,美国麻省理工学院(MIT)完成了阿根廷河 R Colorado 流域的水资源开发规划,以模拟模型技术对流域水量的利用进行了研究,提出了多目标规划理论和水资源规划的数学模型方法,并加以应用,是模拟模型技术应用最为成功和具有影响力的例子。美国加利福尼亚州水工程系统调控运用也是一个较典型的成功实践。为解决水分配问题,该州以中央峡谷工程枢纽(CVP)和州水资源工程枢纽

(SWP)为中心对加利福尼亚州水系统进行合理的调控运用,以蓄留北部地区的冬季径流来供给萨克拉门托峡谷的夏季灌溉和输出到中部及南部区域,对全州水资源的时空调配起着决定性作用。以计算机模拟为核心的 CVP-SWP 流域水工程系统联合进行模拟模型成功地用于实际水资源分配和调控运行过程中。

Rosegrant 等^[4]建立了 1 个整体经济-水文模拟模型,并应用于智利的迈波河(Maipo)流域。该模型框架阐明了水配置、农场主投入、农业生产力、非农业用水需求量和资源衰竭之间的关系,并以此估算水资源配置的改进和水利用带来的社会和经济效益。Dai 等^[5]将水质成分浓度约束引入 MODSIMQ 流域网络模型中。由实例研究进行的模型校核证实了 MODSIMQ 模型合理地重现了校核期的历史流量和含盐度水平。该模型在美国科罗拉多州阿肯色河(Arkansas)流域中的应用,成功地模拟了包括众多水交换机构对流域河道外储水管理利用的复杂的法律和行政问题,多种管理方案的结果表明,地下水与地表水的合理联合应用可同时满足用水户的水量要求和含盐度控制要求。

在中国,经济社会的快速发展和严峻的水资源形势更加促进了水资源调配理论与方法的发展。翁文斌等^[6]指出在一个地区或流域进行水资源规划时,应考虑地表水和地下水的相互联系和转化,以及它们的动态变化和随机性,从而使整个系统的水资源得到充分合理的开发和利用。通过对北京市大石河流域地表水和地下水的联合模拟计算,说明在我国北方地区进行地表水和地下水联合开发利用可有效利用水资源,提高供水保证率。

2 基于优化的水资源配置模型

基于优化的水资源配置模型由目标函数和约束条件组成,可分为单目标优化和多目标优化,其中的模拟部分目的在于计算总体的水量平衡。优化模型有 2 种基本类型:一种是水文优化模型,其目标是在水文规范的要求下优化配置部门内部的水资源;另一种是经济优化模型,通过水资源的优化配置,优化部门间的水资源配置。另外其他准则,如公平性和环境质量等也应该在模型中考虑到^[3]。

Afzal 等^[7]针对巴基斯坦某个地区的灌溉系统建立了线性规划模型,对不同水质的水量使用问题进行优化。在劣质地下水和有限运河水可供使用的条件下,模型能得到一定时期内最优的作物耕种面积和地下水开采量等成果,在一定程度上体现了水质水量联合优化配置的思想。Khare 等^[8]建立了基

于线性规划的经济-工程优化模型,探索地下水与地表水资源联合应用的潜力,并将该模型用于 Krishna 与 Pennar 流域水资源联合配置中,结果表明该优化模型可行并易于用在连接河渠的控制中。Abolpour 等^[9]将自适应神经模糊推理系统(ANFIS)模型与模糊强化学习(FRL)模型整合得到一种改进的优化模型——自适应神经模糊强化学习(ANFRL)模型,用于解决具有不确定性背景的大规模复杂流域的水资源优化配置问题。该模型在爱尔兰法兰斯省北部 Kor 流域的应用结果表明,流域的水分配效率和可靠性比利用传统的优化模型提高 16%。

“八五”计划期间(1991~1995 年)许新宜等^[10]提出了基于宏观经济的水资源优化配置理论与方法,主要从经济属性来研究水资源配置决策。王劲峰等^[11-12]提出区域调水量的空间分配、时间分配和部门分配的边际效益均衡模型和优化配置理论模型。谢新民等^[13]在分析宁夏自然条件、水资源特点和当前社会经济发展趋势等基础上,基于社会经济可持续发展和水资源可持续利用的观点,分析宁夏水资源优化配置的目标及要求,建立了水资源优化配置模型系统。王好芳等^[14]根据水资源配置的目标建立了水量分析、水质分析、经济分析、生态环境分析等子模型,并在此基础上,根据大系统理论和多目标决策理论建立了基于量与质的面向经济发展和生态环境保护的多目标协调配置模型,为流域或区域的水资源可持续开发与社会经济的协调发展提供参考。

20 世纪 90 年代中期以后,模拟和优化综合模型也应用于水资源配置中。尹明万等^[15]结合大连市大沙河流域水资源实际情况,研制出第 1 个针对小流域规划的水资源配置优化与模拟耦合模型。另外,水资源管理模型与地理信息系统、水文模型和经济模型的耦合也不断出现。翁文斌等^[16]将区域水资源规划纳入宏观经济范畴,阐述了基于宏观经济的区域水资源系统的概念,并以此为基础,建立了区域水资源规划多目标集成系统。该系统以宏观经济子模型及其他子模型为基础,在多目标分析模型中集系统要素于一体,形成系统的总控模型。该系统还集预测、模拟、优化及决策分析等功能为一体,以建立一个完善的区域水资源规划分析系统。

3 基于水权的水资源配置

水资源产权,简称为水权,一般是指水资源所有权、使用权、水产品与服务经营权等与水资源有关的一组权利的总称^[17]。基于水权的水资源配置研究始于 20 世纪后期。2000 年海牙世界水论坛部长级

会议上 Faisal 提出“必须对水实行分权管理并让大机构参与,即中央政府将权力分散给地方政府,有一些工作让私营部门、财务自理机构和公众协会(如用水户协会)承担,靠市场和水价来改进各部门的用水量分配,要在水资源管理中体现综合性、面向市场、用水户参与和环境保护四大方面”^[18]。

Charalambous^[19]以塞浦路斯为例,对有限的水资源配置如何充分考虑生态、社会、经济间的均衡进行了研究,并强调为应对不断增加的水短缺,应该制定将水作为生态、社会的一种自然资源和经济价值的重要部分的水资源综合管理政策。

水权转让是水资源优化配置的重要手段,引入市场机制配置水资源是一种有效途径。杨力敏^[20]论证了东阳-义乌水权交易的内涵,指出东阳-义乌水权转让中转让的不是水资源的使用权,而是地方政府对其所管辖地区水资源的管理支配权,是水体管理支配权的有偿转移。Bjornlund^[21]则以南澳大利亚为例,介绍了设定水权、允许水市场交易后带来的灌溉用水效率提高的经验。王慧敏等^[22]结合复杂适应系统,建立了水权交易 CAS 模型,引入了相应的运行机制,并在 SWARM 仿真平台基础上验证了理论的合理性。结论表明:市场机制的引入对配置水资源是有效的,可提高单位用水效率、效益和政府满意度等。

为保证水资源利用的可持续发展,流域初始水权分配问题的研究是当前国内外水利界、经济学界关注的主要研究内容。张红亚等^[23]建立了水量分配指标体系,构建水权分配的层次结构图,应用模糊综合决策和层次分析法,进行多方案、多层次的模糊优选,建立初始水权分配的数学模型,并对我国南水北调东线一期工程的调水量进行了分配。中华人民共和国水利部正式公布的《水量分配暂行办法》于 2008 年 2 月 1 日起正式施行,这标志着我国初始水权分配制度已经基本确立。

4 基于博弈论的水资源配置

博弈论是研究各个理性决策个体在其行为发生直接相互作用时的决策及均衡问题的理论。水资源作为有限而脆弱的资源,在其开发利用过程中显著的特征之一就是各利用或管理主体之间行为的相互作用,即局中人的互动问题,因而博弈论在水资源领域的应用备受关注。与前 3 种配置方式比较,基于博弈论的配置思想在水量配置中应用较多,而在综合考虑水质方面有待进一步研究。

Henderson 等^[24]建立了博弈模型,用于模拟内在的集体行为过程。博弈者是流域状态和国家管理机

构。基本的发现是博弈者在不同规则游戏中的选择基本相似,而且与非消费性的用户(如发电、环境、用水和盐分控制以及娱乐)相比,这种选择更受消费性水用户的欢迎,并且现有的规则不必要地约束了上游和下游的水资源配置。Beeke 和 Willian 对五大湖流域的全流域合作、美国和加拿大不合作、完全不合作 3 种情况的分配结果进行比较研究,得到不合作虽使某些州获得了局部利益但导致全流域整体利益受损的结论^[25]。

肖志娟等^[26]应用博弈论原理与方法求解应急调水的合理补偿量,解决调水各方的利益冲突,提出了 3 种补偿方式,并用博弈原理对 3 种方式进行了分析,求解在纳什均衡条件下,利用水权交易方式和行政调节方式实现水资源配置目标的补偿量方案。尹云松等^[27]运用博弈论对流域不同地区在水资源数量与质量分配方面的双重冲突进行分析,寻求实现流域各地区水资源数量与质量分配合作均衡的有效途径。

5 基于复杂适应系统的水资源配置

Holland^[28]于 1994 年提出的复杂适应系统 (complex adaptive system, CAS) 理论是复杂性科学研究的新突破,它的提出为研究复杂系统问题提供了一种新的思想。复杂适应系统是以自组织、适应性、跨领域的不同成分和分布控制为特征的。其中具有适应性的主体是其核心概念,状态空间是非闭合和不可预测的,是开放和不断演进的,系统是分层的,而且不是所有的系统特性都可观察得到。CAS 理论在水资源领域的应用研究发端于国外,始于 20 世纪末期,主要应用于水资源的开发、利用、配置与管理等方面。随着研究的深入,人们发现水资源在面对动态性、复杂性和不确定性时应具有更多的适应性和弹性以保持水资源系统的可持续性,从而开展了以适应性管理为主旨的水资源综合管理。基于复杂适应系统的水资源配置不仅要研究流域水资源这一复杂巨系统中宏观经济系统、水资源系统和生态环境系统在其运动发展过程中的相互依存与相互制约的定量关系,还要研究流域内主体与环境之间、各主体之间的复杂关系,包括与环境的物质、能量和信息的交换与反馈关系,各主体(如区域、部门、个人等)之间在水资源配置中具有复杂目标和利益关系等。

Hare 等^[29]建立了一个基于主体的综合分析模型,包括农场模型、地下水污染模型、政策者模型、农户决策模型和市场模型等 5 个部分,考察不同污染控制经济政策(如收入税、化肥使用税和排污费等)对农户各种生产决策的影响。Becu 等^[30]提出多智

能体系统 (multi-agent system, MAS) — CATCHSCAPE 模型,并用于解决泰国北部流域上游灌溉管理对下游农业生产力影响这一争论不断扩大的议题。该模型可以模拟整个流域的特征和农户的个人决策,其中的生物物理模拟可通过分布式水平衡、灌溉方案管理和作物蔬菜动力学特征来模拟水文系统,社会动力学特征由一套资源管理过程(水、土地、现金、劳动力)来描述,水资源管理根据实际不同层次的控制(个体、方案、流域)来描述。

Pahl-Wostl^[31]指出自然资源系统的非闭合性、不确定性、开放性和不断演化性符合复杂适应系统的特征,并以水资源系统管理为例,提出将考虑了人类—技术—环境系统复杂性的综合资源管理付诸实践,为实现可共享的和具有适应性的资源管理方法提供了依据。这些方法能够应对由迅速变化的社会经济条件和全球气候变化带来的不断增加的不确定性。Rammel 等^[32]指出自然资源的可持续管理是一个需要不断提高的开放的演进过程,因此自然资源管理需要具备应对不同时间、不同空间、不同社会尺度、嵌套的层次、难以简化的不确定性、各参数间的相互作用和不断出现的新特性的能力,并吸取复杂适应系统理论、演化理论和进化经济的理论,提出对于自然资源系统管理的协同演进的观点,揭示了存在于自然资源、社会机构和个体行为之间的相互作用。

在国内,从自适应科学角度关注水资源系统或水资源配置的研究比较广泛,为 CAS 理论研究水资源配置问题奠定了理论和实践基础。赵建世等^[33]基于复杂适应系统,建立了流域层面上的水资源系统整体模型,用于分析和研究流域的水资源管理和配置。该模型将水资源系统中水文、生产、生活、生态环境和管理制度等子系统的相互作用通过内生变量进行联接,从而取代以往组合模型仅仅通过计算结果的传递来描述子系统间作用的方式。

6 展 望

总体看来,随着水资源问题的日益突出,关于水资源优化配置和综合管理的研究领域也在不断扩展,并在理论与方法上逐步得到完善。但要实现水资源系统的可持续性发展,目前仍需在以下议题做深入研究。

6.1 自然—人工二元耦合的水资源配置

水资源系统本质上是自然系统和社会系统耦合的复合系统。需要在传统水资源系统模型中强化对这种耦合作用的描述,研究基于自然和人工二元水循环的协调经济需水和生态需水的水资源配置。王浩等^[34]针对西北及黄淮海流域水资源特点,提出面

向生态的水资源配置和基于自然—人工二元循环的水资源配置模式,将传统的‘实测—还原’水文认知过程拓展为‘实测—分离—耦合’,保持了实测水文系列和还原系列的动态耦合关系,突出了人类活动的定量影响和水分—生态相互作用机理,反映了经济用水和生态用水之间的动态竞争关系,以及生产过程和生态过程中水分的有效利用程度。

另外,最近 10 几年来,在气候变化和人类剧烈活动双重作用下,原先的水资源量时空分布规律及频率、过程特性、水资源质量已发生改变,已影响到水资源可利用量及需求量,对区域水资源配置和经济社会发展也产生了影响。面对水文要素变异及水资源短缺,人们又会采取相应的应对行动和各种措施(即自适应行为)降低区域经济社会对水文要素变异的脆弱性。正是这种相互作用,极大地增加了水文要素变异下的水资源系统响应研究的复杂性,使其成为一项挑战性工作。

6.2 水资源全要素配置问题

水资源全要素配置问题是目前研究的一个新热点,得到了中华人民共和国水利部和中华人民共和国科技部的认同,并以‘十一五’国家科技支撑计划“东北地区水资源全要素优化配置与安全保障技术研究”重点项目课题的形式予以支持。水资源全要素配置是指在水资源开发利用中要合理解决河道外生产、生活、生态用水与河道内生态环境用水、水力发电、航运等用水需求之间的矛盾,需要对水量与水质、水位、水面、流量、流速等水资源全要素进行配置。该课题研究包括基于‘二元’水循环的水资源系统诊断技术研究、面向循环经济的社会发展模式与节水防污关键技术研究、生态环境保护准则与需耗水量计算方法研究、水资源全要素优化配置理论技术体系及应用、初始水权分配理论技术体系与试点研究、水资源实时监控管理系统研究及示范。

6.3 水资源配置中的多主体问题

水资源配置中的主体包括流域级政府主体、农业生产主体、农业家庭主体、工业企业主体、服务业主体、城市家庭主体、生态主体、水电站主体和污水处理厂主体。每个主体都具有各自的行为和适应性,其适应性表现为各自具有优化目标。在市场经济大环境下,水资源配置中各类水主体的主体意识增强,传统的以整体效益最大为准则的分水模式已不适应要求。各个主体在水资源配置中的关系十分复杂,如何描述水资源系统的层次结构和主体之间的相互关系仍然需要深入研究。

参考文献:

[1] 翟丽妮,梅亚东,李娜,等.水库生态与环境调度研究综

- 述[J]. 人民长江, 2007, 38(8) :56-57, 60.
- [2] 左其亭, 陈曦. 面向可持续发展的水资源规划与管理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [3] 赵建世. 基于复杂适应理论的水资源优化配置整体模型研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [4] ROSEGRANT M W, RINGLER C, MCKINNEY D C, et al. integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: the maipo river basin [J]. Agricultural Economics, 2000, 24(1) :33-46.
- [5] DAI T W, LABADIE J W. River basin network model for integrated water quantity/quality management [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 2001, 127(5) :295-305.
- [6] 翁文斌, 姚汝祥, 廖松, 等. 大石河流域地面和地下水联合运用的模拟计算[J]. 水文, 1984(5) :19-27.
- [7] AFZAL J, NOBLE D H. Optimization model for alternative use of different quality irrigation waters [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118 :218-228.
- [8] KHARE D, JAT M K, SUNDER J D. Assessment of water resources allocation options: conjunctive use planning in a link canal command [J]. Resources Conservation & Recycling, 2006, 51(8) :487-506.
- [9] ABOLPOUR B, JAVAN M, KARAMOUM M. Water allocation improvement in river basin using adaptive neural fuzzy reinforcement learning approach[J]. Applied Soft Computing, 2007(7) :265-285.
- [10] 许新宜, 王浩, 甘泓, 等. 华北地区宏观经济水资源规划理论与方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997.
- [11] 王劲峰, 刘昌明, 王志勇, 等. 水资源空间配置的边际效益均衡模型[J]. 中国科学, 2001, 17(4) :421-427.
- [12] 王劲峰, 刘昌明, 于静洁, 等. 区际调水时空优化配置理论模型探讨[J]. 水利学报, 2001, 32(4) :7-14.
- [13] 谢新民, 裴源生, 秦大庸. 二十一世纪初期宁夏所面临的挑战与对策[J]. 水利规划设计, 2002(2) :19-25, 39.
- [14] 王好芳, 董增川. 基于量与质的多目标水资源配置模型[J]. 人民黄河, 2004, 26(6) :14-15.
- [15] 尹明万, 李令跃. 大连市大沙河河流域规划[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 1999.
- [16] 翁文斌, 蔡喜明, 王浩, 等. 宏观经济水资源规划多目标决策分析方法研究及应用[J]. 水利学报, 1995, 26(2) :1-11.
- [17] 彭祥, 胡和平. 不同水权模式下流域水资源配置博弈的一般性解释[J]. 水利水电技术, 2006, 37(2) :53-56.
- [18] 佟金萍. 基于 CAS 的流域水资源配置机制研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [19] CHARALAMBOUS C N. Water management under drought conditions [J]. Desalination, 2001, 38(9) :3-6.
- [20] 杨力敏. 从“东阳-义乌”水权转让看转型期国有资产(水资源)管理体制变革[J]. 人民珠江, 2002(3) :61-64.
- [21] BJORN LUND H. Farmer participation in markets for temporary and permanent water in southeastern Australia [J]. Agricultural Water Management, 2003, 3(11) :57-76.
- [22] 王慧敏, 佟金萍, 林晨, 等. 基于 CAS 的水权交易模型设计与仿真[J]. 系统工程理论与实践, 2007(11) :164-170, 176.
- [23] 张红亚, 方国华, 吴文静, 等. 初始水权分配数学模型的建立及其应用[J]. 水利水运工程学报, 2006(2) :41-46.
- [24] HENDERSON J L, LORD W B. Gaming evaluation of Colorado River drought management institutional options [J]. Water Resources Bulletin, 1995, 31(5) :907-924.
- [25] 刘伟莉. 博弈论在水资源配置中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [26] 肖志娟, 解建仓, 孔珂, 等. 应急调水效益补偿的博弈分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(6) :817-821.
- [27] 尹云松, 孟枫平, 糜仲春. 流域水资源数量与质量分配双重冲突的博弈分析[J]. 数量经济技术经济研究, 2004(1) :136-140.
- [28] HOLLAND J H. 隐秩序——适应性造就复杂性[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [29] HARE M, MEDUGNO D, HEEB J, et al. An applied methodology for participatory model building of agent-based models for urban water management [M]. Germany: SCS-European Publishing House, 2002.
- [30] BECU N, PEREZ P, WALKER A, et al. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand description of the CATCHSCAPE model [J]. Ecological Modeling, 2003, 170 :319-331.
- [31] PAHL-WOSTL C. The implications of complexity for integrated resources management [J]. Environmental Modeling & Software, 2007, 22(5) :561-569.
- [32] RAMMEL C, STAGL S, WILFING H. Managing complex adaptive systems: a co-evolutionary perspective on natural resource management [J]. Ecological Economics, 2007, 63 :21-21.
- [33] 赵建世, 王忠静, 翁文斌. 水资源系统整体模型研究[J]. 中国科学: E 辑, 技术科学, 2004, 34(S1) :60-73.
- [34] 王浩, 陈敏建, 秦大庸. 西北地区水资源合理配置和承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.

(收稿日期 2008-11-14 编辑 方宇彤)

