

水资源配置模型研究现状与展望

游进军, 甘泓, 王浩

(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100044)

摘要: 针对水资源开发利用面临的问题, 阐述了水资源配置的意义和作用, 分析了优化和模拟两种常用的水资源配置技术的特点和选用原则, 介绍了国内外水资源配置模型的研究现状, 评述了几类比较有代表性的水资源配置方法以及相应软件。结合当前水资源领域研究现状和发展方向, 论文评述了当前水资源配置模型研究的特点, 分析了在天然和人工侧支循环耦合的水资源系统模拟框架下研究水资源配置及相关问题的必要性, 并展望了本领域发展趋势。

关键词: 水资源系统; 水资源配置; 优化技术; 模拟技术

中图分类号: TV 213 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2005)03-0001-05

Advance in water allocation model and prospect

YOU Jin-jun, GAN Hong, WANG Hao

(Water Resources Institute, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Water allocation is necessary for water-related decision analysis. In this paper, the significance and function of water allocation are described briefly aiming at current problems in water exploitation. Integration with new computation and information technology is a trend in developing water allocation model. Several typical water allocation models and corresponding software are introduced and reviewed. Demand-oriented simulation and optimization are two major techniques to solve water allocation model. Therefore, major advantages and differences of the two techniques are compared and the principle to choose water allocation method is discussed. Based on the current situation of research related to water issues, some comments about the study on water allocation are presented. The paper points out, to construct rational and practical water allocation model, relations between natural water cycle and movement of water-exploitation must be taken into account under a uniform framework. Finally, the prospect in this field is put forward according to the discussion.

Key words: water resources system; water resources allocation; optimization technich; simulation

1 引言

目前水资源短缺和水环境恶化问题已严重影响了我国经济社会的可持续发展。水资源配置是实现水资源在不同区域和用水户的有效公平分配,从而达到水资源可持续利用的重要手段。通过水资源配置可以实现对流域水循环及其影响的自然与社会诸因素进行整体调控。目前水资源开发利用和人类活动结合日趋紧密,水资源短缺等各类问题的有效解决方案必须建立在流域或区域基础之上,甚至必须考虑和相关流域和区域的关系。这就要求在水资源天然循环和供用

耗排人工侧支循环的统一框架下完成水资源配置。考虑未来发展需求,以包括地表水、地下水在内的水资源系统为对象进行配置,为决策者提供清晰全面的分析成果以适用于水资源的综合管理规划。

水资源系统规模的日趋增大、影响因素逐渐增多,导致其结构更趋复杂,从而对水资源配置提出了更高更新的要求。从最初的水量分配到目前协调考虑流域和区域经济、环境和生态各方面需求进行有效的水量宏观调控,水资源配置研究日益受到重视。本文在讨论现有的水资源配置技术的基础上,概括了这些方法所具有的共性,并对未来发展趋势作了展望。

收稿日期: 2004-10-10; 修稿日期: 2005-01-20

基金项目: 全国水资源综合规划专题研究“流域及区域通用化水资源供需分析及配置模型分析系统研制”资助

作者简介: 游进军(1977-),男(汉族),四川成都人,博士研究生,从事水文学及水资源方面的研究。

<http://www.cnki.net>

2 水资源配置方法概述

一般认为水资源配置是指在流域或特定的区域范围内,遵循有效性、公平性和可持续性的原则,利用各种工程与非工程措施,按照市场经济的规律和资源配置准则,通过合理抑制需求、保障有效供给、维护和改善生态环境质量等手段和措施,对多种可利用水源在区域间和各用水部门间进行的调配^[1]。可以看出当前的水资源配置问题,不再是简单的用户间水量分配,而是从流域和区域整体出发,在分析区域水资源条件和水资源供需特点,综合统筹不同情况和需求,确定各类可利用的水资源在供水设施、运行管理等各类约束条件下对不同区域各类用水户的有效合理分配。并在此基础上形成合理的配置格局,得出区域不同发展模式下的水资源供用耗排过程,分析经济用水对天然水循环过程和相关生态环境的影响,确定水资源开发利用与经济发展以及生态环境保护需求相协调的总体布局。要满足这样的综合性目标,就必须在考虑天然水循环和水资源开发利用侧支循环的总体框架下研究水资源配置,以供需平衡分析为核心、各层次的水量平衡为依据,对整个系统进行模拟得到可供决策参考的综合结果。

供需分析是水资源配置的核心与基础,需要结合水源、用水户以及水利工程和各种可行供排水线路所构成的系统网络对水源在各种约束下的运移转换进行模拟。根据系统网络图及水资源供需调配原则,利用系统分析方法建立供需分析计算模型,进行不同方案的水资源配置分析。从实用角度和求解技术的可行性来说,以水资源系统为对象建立配置模型有优化和模拟两种方法。模拟模型具有直观易懂、仿真性强等优点,适合构建输入输出式的系统响应结构。而优化模型则通过建立目标函数和系统约束的方式,通过模型的求解可以得出满足给定要求下效益较好的结果。一般而言,模拟模型便于结合实际情况进行相应的调整,根据需要对实际发生的过程进行概化和描述,便于结合专业人员的经验。而优化模型可以更严格的反映各类约束,具有较强的结构性。但必须合理的权衡各种影响决策的因素,避免考虑因素过多而出现“维数灾”使得模型难以求解。优化模型可以采用各种成熟的优化方法求解,包括人工智能在内的各种优化计算技术的发展,为优化模型解决复杂系统的水资源配置问题提供了更广阔的前景。无论采用何种配置技术,配置模型必须能反映水资源量的需求与供给、水环境的污染与治理、水的

生态平衡三重平衡关系。参数率定及模型可靠性分析也是必不可少的步骤,通过回归分析和统计分析技术等方法对已知过程进行模拟计算可以检验模型合理性和精度,并率定各类参数,测试模型性能和可靠性。结合各流域特点确定一套合理的模型率定指标和参数调整方法。模型计算结果应具有全面合理的评价指标体系进行方案对比分析和效果评估。

3 国内研究进展

国内学者在 20 世纪 60 年代就开始了以水库优化调度为手段的水资源分配研究。自 80 年代起,由于水资源规划管理的需要,采用系统优化和模拟进行水资源配置的研究逐渐受到重视。南京水文水资源研究采用系统工程方法对北京地区水资源系统进行了研究,建立了地下水和地表水联合优化调度的系统仿真模型,并在国家“七五”攻关项目中进一步完善并应用^[2]。刘健民等(1993)采用大系统递阶分析方法建立了模拟和优化相结合的三层递阶水资源供水模拟模型,并对京津唐地区的供水规划和优化调度进行了应用研究^[3]。中国水科院等单位(1997)系统地总结了以往工作经验,将宏观经济、系统方法与区域水资源规划实践相结合,提出了基于宏观经济的多层次、多目标、群决策方法的水资源优化配置理论,开发出了华北宏观经济水资源优化配置模型,为大系统水资源配置研究开辟了新道路^[4]。黄河水利委员会(1998)进行了“黄河流域水资源合理分配及优化调度研究”,综合分析区域经济发展、生态环境保护与水资源条件,是我国第一个对全流域进行水资源配置研究,对构建模型软件实施大流域水资源配置起到了典范作用^[5]。

中国工程院“西北水资源”项目组(2003)经过广泛深入研究,提出了水资源配置必须服务于生态环境建设和可持续发展战略,实现人与自然和谐共存,在水资源可持续利用和保护生态环境的条件下合理配置水资源。并在对西北干旱半干旱地区水循环转换机理研究的基础上,得出生态环境和社会经济系统的耗水各占 50% 的基本配置格局。该项研究为面向生态的水资源配置研究奠定了理论基础^[6]。

不少学者结合当前发展需求和新技术研究了水资源系统配置的一些理论和方法。甘泓、杨小柳等(2000)给出了水资源配置的目标量度和分配机制,提出了水资源配置动态模拟模型,开发了相应的决策支持系统,研制出可适用于巨型水资源系统的智能型模拟模型^[7]。王浩等(2002)提出了水资源配置

“三次平衡”和水资源可持续利用的思想,系统阐述了基于流域的水资源系统分析方法,提出了协调国民经济用水和生态用水矛盾下的水资源配置理论^[9]。赵建世等(2002)考虑水资源系统机理复杂性的基础上,应用复杂适应系统理论的基本原理和方法提出了水资源配置理论和模型^[10]。冯耀龙等(2003)系统分析了面向可持续发展的区域水资源优化配置的内涵与原则,建立了优化配置模型,给出了其实用可行的求解方法^[11]。尹明万等(2004)在探讨水资源系统及水资源配置模型概念的基础上,介绍了全面考虑生活用水、生产用水和生态环境用水要求的、系统反映各种水源及工程供水特点的水资源配置模型的建模思路和技巧,给出了可以应用于大型复杂水资源系统的水资源配置系统模型实例^[12]。

总体而言,我国水资源严重短缺、水生态环境问题日益严重,国内学者对水资源配置理论和应用研究以及相应决策分析作了较多工作。但由于研究范围和投入力量的限制,各类研究通常以具体问题为导向,应用范围有限。对模型以及软件开发尚缺少必要的投入,与国外研究和应用水平尚有一定差距。

4 国外研究进展

国外对水资源配置研究更多是在水资源系统模拟的框架下进行。Shafer J. M. 等(1978)提出在水资源系统模拟框架下的水资源配置和管理,并建立了流域管理模型^[13]。由于水资源短缺的普遍性,世界银行(1995)在总结各种水资源配置方法不同地区应用的基础上,提出了以经济目标为导向,在深入分析用水户和各方利益相关者的边际成本和效益下配置水资源的机制^[14]。McKinney 等(2002)提出基于 GIS 的 GIS 系统(OOGIS)的水资源模拟系统框架,作了流域水资源配置研究的尝试^[15]。90 年代以来,水资源系统规划管理软件得到了长足发展,为水资源配置提供了更多的工具。相对而言,国外在水资源模拟的软件产品上处于领先优势,开发的模型具有较高的应用价值,充分利用计算机技术完成系统化集成。MIKEBASIN 是由丹麦水利与环境研究所(DHI)开发的集成式流域水资源规划管理决策支持软件^[16]。其最大特点是基于 GIS 开发和应用,以 ArcView 为平台引导用户自主建立模型,提供不同时空尺度的水资源系统模拟计算以及结果分析展示、数据交互及等功能。MIKEBASIN 以河流水系为主干,工程、用户以及分汇水点等为节点和相应水力连线构建流域系统图,以用户建立的系统和各类

对象相应的属性实现动态模拟。模型考虑了地表水和地下水的联合供水,对不同方式下的水库运行以及库群联合调度提供了计算方法,并对系统中的农业灌区、水电站及污水处理厂设置了相关计算。通过可修改调整的优先序或规则进行水量分配计算,并配有不同的扩展专业模块供用户选择。目前该软件在国内包括长江、珠江、海河等多个流域和省区的水资源规划管理得到了应用。

WMS 是美国杨百翰大学与陆军工程兵团共同开发的可用于流域模拟的软件,属于 EMS 软件系统的一个组成部分^[17]。该软件重视水文学和水动力学机理,从宏观和微观两个层次同时反映流域水资源运移转换。WMS 以通用的数据接口提供多达十余种的水文模型和水力学模型,并提供多种相关的扩展功能模块供用户选用,并内嵌了完整的 GIS 工具,可以实现流域描绘和各种 GIS 功能分析。该模型提供融汇地表水和地下水转化影响的二维分布式水文模型,也可以进行水质变化和泥沙传输沉积的模拟,并提供随机模拟以及对各类参数的不确定性分析。目前该软件已被引入国内,并在部分研究中得到了应用。

Waterware 是奥地利环境软件与服务公司开发的流域综合管理软件,其功能包括流域的水资源配置管理、水资源配置、污染控制以及水资源开发利用的环境影响评价^[18]。软件中集成了 GIS 分析工具、模拟模型和专家系统,以面向对象数据库为支持,结合 GIS 直观显示分析结果。Waterware 立足于社会经济、环境和技术三个方面分析流域水资源问题,得出合理的水资源以及污染物排放指标的分配。模型以面向对象技术构建,以流域内的水利工程、用水节点、控制站点、河道等基本元素组成的网络为模拟基础,采用水质控制约束下的经济及环境用水分配的效益最大化为目标,实现整个系统的水量计算。

Aquarius 是由美国农业部(USDA)为主开发的流域水资源模拟模型^[19],该模型以概化建立的水资源系统网络为基础,采用各类经济用水边际效益大致均衡为经济准则进行水源优化分配,并采用非线性规划技术寻求最优解。该模型以面向对象技术构架系统,系统网络图中的各类概化后的元素均以面向对象编程技术中的类表达,并将其设计为符合软件标准的 COM 组件。模型以流域系统内相关的客观实体为建模对象,可对水库、水电站、灌区、市政以及工业用水户、各类分汇水节点以及生态景观及娱乐用水要求进行概化反映,并将其有机耦合在一个

整体框架之中。

ICMS (Interactive Component Modeling System) 是澳大利亚研制的水资源系统管理模型^[20]。ICMS 由一系列功能组件构成,包括模型创建组件(ICMSBuilder)、模型库(Model libraries, MDL)、方案生成(Project)、结果显示(ICMS Views)四部分。其主要特点是强大的交互性和方案生成的灵活性,通过组件式的开发实现由用户选择系统模拟方法。其中 ICMSBuilder 是系统支撑平台并提供系统网络图创建功能;MDL 是各专业模块的组合,可以由用户选择嵌入系统中使用;Project 在已建立的系统图和选定的计算模型方法基础上,自动生成计算方案并进行模拟计算。ICMS Views 以图表形式直观展示计算结果。

5 总结与展望

水资源配置模型研究经过长期的发展,无论广度和深度以及应用的计算技术和手段都有长足发展,主要表现为以下几个方面:

(1) 问题涉及范围扩大。目前水资源配置研究已经突破了以往单纯考虑水资源供需平衡分析的范畴,扩展到将整个流域或区域水资源系统作为整体,研究天然以及人类活动影响下的水量运动、相互影响。合理的配置方案必须要协调流域社会经济状况和发展指标、需水预测、节水状况和潜力、水资源保护等各方面相关因素。并逐渐在水量配置中考虑生态环境用水的需求,提出了合理协调生态用水和经济用水之间的关系,而不是以简单的满足经供水效益最大化为目标,体现了基本理念的转变。

(2) 指导性功能提高。以往水资源配置以模拟水量分配为中心,提供各种可能的配置方案。而目前的研究则更充分的考虑到水资源需求的发展以及水资源开发利用可能的途径和方向,如考虑一些潜在的用水需求和水资源利用的新方向。从而能在不同的情况下得出有效合理的水资源开发利用方案,提出合理的水资源配置总体格局。

(3) 软件工程技术的引入和系统集成性的加强。由于所考虑的问题领域扩大,配置模型需要包含多个具有相对独立但相互关联的专业模块,从而形成一个复杂的模型系统。有机结合各类功能模块并实现有效合理的交互,对软件集成提出了更高的要求,超越了以往单纯编制程序完成实现单一专业功能模块的范畴。这就需要全局统筹各专业模块及其相互关系的设计,同时以软件工程技术完成整个

系统框架体系的构建、以软件技术标准规范设计系统内各专业功能多层次和关系。

(4) 实用性和可操作性的提高。由于流域系统的复杂性,同一问题考虑深度和处理方式不同,对资料等各方面支撑条件提出的要求也就不同。这就要求软件对同一类问题能承载不同的分析方式,具有一定普适性。水资源系统模拟决策的用户一般是专业技术人员,要使其能完成从资料准备、运行和结果分析等过程,模型必须有较强可操作性。

分析未来社会经济发展对水资源开发利用对水资源配置的要求,该领域研究发展趋势:①充分考虑水资源配置工作所具有的宏观性。水资源配置不能仅仅停留于对一个区域范围内部的水量调配工作上,而应当从大流域整体角度出发,系统分析流域中各个子区域自身水资源条件和水资源供需特点,对流域内各种可利用水源对于各区域不同用水要求的用户在工程能力约束条件下进行配置,以合理的水资源配置格局为区域发展总体布局提供参考。②重视生态环境方面的要求。当前水资源配置不能仅仅局限于满足水资源数量上的供需平衡,而是应当追求区域发展与水相关的各类主要因素的平衡,包括水质平衡、水土平衡、和水生态平衡。当前的水资源开发需要满足生态环境需水的要求,提出防止生态环境破坏的预防措施以及恢复和改善的措施。目前对于生态需水的认识和计算已经有了一些理论上的突破,为水资源配置在这方面的深入研究提供了基础。③突破单纯使用优化模型或模拟模型思路,结合优化方法和模拟计算。由于水资源配置的复杂性,仅使用数学优化方法难以贴近于实际,完全采用模拟的方法则又无法有效控制众多的参数、条件,以经验处理大量的组合因素必然忽略许多可能的优解。当前计算机的软硬件技术飞速发展,大规模复杂系统的优化技术也有很多创新和提高,使得复杂模型能够得到求解。所以可以采用优化-模拟-评价的总体思路得到水资源配置模型的决策方案结果,通过在简化目标和约束下寻求优解,再利用模拟模型得到进一步的结果便于方案选取评价。这样便于发挥优化方法的搜索能力在庞大的可行空间中寻找出优或次优的配置方案集,同时发挥模拟模型仿真性、可靠性强的优势。④提高决策方案的比选和配置效果的评价水平。配置方案的选择始终是一个多目标决策问题,不能仅在水资源问题本身层次上完成方案的比较和评价,应当以完善可行的指标体系对得到的方案集进行比较选择,在综合社会、经济和环

境各个方面影响的基础上分析各种可行方案的经济、社会和环境各方面的效益进行取舍。由于涉及面广,决策因素众多,各方面的效益指标在价值量度上也不统一并且具有不确定性,所以必须引入合适的多目标决策方法。在得出合理可行的推荐配置方案后,还应当对其实施后可能产生的效果作尽量全面的评估,并考虑到所有能涉及的方面,组成全面的评价体系。可广泛吸收各方面专家的提议和社会公众需求,并能依据新形势新问题的产生出现而调整。

从国内外发展差异看,国内研究必须紧跟目前的新技术,在模型软件化方面投入更多力量。随着社会经济进一步发展,水资源领域所需要考虑的问题必将会更多更复杂,而各类数据收集分析的水平也相应逐步提高,以往由于资料等限制而不能研究的问题也可以进一步分析,使得专业问题分析考虑的尺度更细。而计算机软硬件技术的发展为更大规模的研究提供了基础,也对开发人员从宏观系统框架和微观方法技术上提出了更高要求。这两方面的发展必将共同推动水资源领域应用软件的综合性、系统性和实用性。加强对水资源配置理论和方法的研究对提高水资源管理水平有重要意义。通过对现有理论和技术的改进,注重对国际上同类软件的引进和消化,提高水资源配置的研究水平,为相关各项工作提供基础,同时增强决策部门对流域的总体认识,提高管理水平促进水利现代化。

参考文献:

- [1] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源综合规划技术大纲[Z]. 2003: 58- 63.
- [2] 张世法,汪静萍. 模拟模型在北京市水资源系统规划中的应用[J]. 北京水利科技, 1988, 34(4): 1- 15.
- [3] 刘健民,张世法,刘恒. 京津唐水资源系统供水规划和调度优化的递阶模型[J]. 水科学进展, 1993, 4(2): 98 - 105.
- [4] 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.
- [5] 常炳炎,薛松贵,张会言,等. 黄河流域水资源合理分配和优化调度[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.
- [6] 中国工程院“西北水资源”项目组. 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[J]. 中国工程科学, 2003, 5(4): 1- 26.
- [7] 甘泓,李令跃,尹明万. 水资源合理配置浅析[J]. 中国水利, 2000, (4): 20- 23.
- [8] 杨小柳,刘戈力,甘泓,等. 新疆经济发展与水资源合理配置及承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003.
- [9] 王浩,秦大庸,王建华. 流域水资源规划的系统观与方法论[J]. 水利学报, 2002, 33(8): 1- 6.
- [10] 赵建世,王忠静,翁文斌. 水资源配置系统的复杂适应原理与模型[J]. 地理学报, 2002, 57(6): 639- 647.
- [11] 冯耀龙,韩文秀,王宏江,等. 面向可持续发展的区域水资源优化配置研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003 (2): 133- 136.
- [12] 尹明万,谢新民,王浩,等. 基于生活、生产和生态环境用水的水资源配置模型[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 4- 8.
- [13] Shafer J M, Labadie J. Synthesis and Calibration of a River Basin Water Management Model[R]. Colorado State University, 1978.
- [14] Dinar, Ariel, Mark W Rosegrant, Ruth Meinzen-Dick. Water Allocation Mechanisms-Principles and Examples[M]. The World Bank, 1995.
- [15] McKinney D C and Cai X. Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method [J]. Environmental Modeling and Software, 2002, 17(5): 413- 425.
- [16] Kheireldin K, El-Dessouki. Object Oriented Programming: A Robust Tool for Water Resources Management [A]. Seventh Nile 2002 Conference, Comprehensive Water Resources Development of the Nile Basin: The Vision for the Next Century [C]. Cairo, Egypt, 1999. 3: 15- 19.
- [17] Nelson E J, Jones N L, et al. A Comprehensive Environment for Watershed Modeling and Hydrologic Analysis [A]. Proceedings of International Conference on Water Resources Engineering, American Society of Civil Engineers[C]. 1995. 8: 14- 18.
- [18] Fedra K. GIS and simulation models for water resources management: A case study of the Kelantan River, Malaysia[J]. GIS Development, 2002, (6): 39 - 43.
- [19] Thomas C B, Gustavo E D, Oli G B. Planning water allocation in river basin, AQUARIUS: A System's Approach [A]. Proceedings of 2nd Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, Subcommittee on Hydrology of the Advisory Committee on Water Information[C]. 2002. 6: 28- 81.
- [20] Rahman J M, Cuddy S M, Watson F G R. Tarsier and ICM S: Two approaches to framework development[A]. MODSIM 2001 International Congress on Modelling and Simulation[C]. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc, 2001. 4: 1625- 1630.