

# 流域级水量调度模型研究述评

鲁帆, 王浩, 蒋云钟, 董延军, 王海潮

(中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100044)

**【摘要】** 流域水量统一调度与跨流域调水是实现水资源合理配置与支撑流域可持续发展的两大重要举措。文中结合流域水量统一调度与跨流域调水的实际背景介绍了流域级水量调度模型的相关研究进展, 并根据实践需求对流域级水量调度模型今后的研究趋势进行了初步展望。

**【关键词】** 流域; 跨流域调水; 水量调度模型

中图分类号: TV 68

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2007)08-0016-04

## A review of research on water resources regulation model on river basin level

LU Fan, WANG Hao, JIANG Yun-zhong, DONG Yan-jun, WANG Hai-chao

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

**Abstract** Both the integrated regulation of river basin water resources and the inter-basin water transfer are two important measures to realize reasonable allocation of water resources and support sustainable development of river basin. The advances of the research on the water resources regulation model on river basin level are introduced here in based on the actual background of the integrated regulation of river basin water resources and the inter-basin water transfer and then a preliminary prospect on the future development tendency of the research is made in accordance with the practical demand on the river basin level water resources regulation.

**Key words** river basin; inter-basin water transfer; water regulation model

### 1 研究背景

随着国民经济的迅速发展和人口增长, 用水量不断攀升, 我国北方流域普遍存在地表径流时空分布不均、水环境急剧恶化、水资源供给严重不足的特点, 不利的水资源条件造成流域用水具有强烈的竞争性, 流域水资源严重短缺已成为制约其经济、社会和生态环境可持续发展的“瓶颈”。解决这一举世瞩目的“良方”就是实现流域水量统一调度及跨流域调水。

近年来, 我国按照以资源为核心的治水思路, 依据可持续发展的要求, 成功实施了以黄河、黑河和塔里木河调水为代表的多项水量调度工作, 特别强调水资源配置、节约和保护, 注重人与自然和谐相处, 在维护经济社会可持续发展、建设修复生态等方面发挥了显著作用。坚持人与自然和谐为中心的调度理念日益深入人心, 水量调度实践已呈现出三个较为明显的

变化趋势, 即从应急调度发展到常规调度, 从单纯的水量调度到水量与水质的统筹考虑, 从单纯服务于生产生活到为兼顾改善生态环境调水。黄河调度按照各省区全年配水总量固定比例、月配水指标可调的原则, 在确保黄河不断流和防凌减灾的前提下进行水量分配, 提出了维持黄河健康生命的构想; 黑河、塔里木河调度以逐步恢复下游生态系统为主要调度目标; 引江济太力图通过水资源的合理调度改善太湖水生态环境; 扎龙湿地补水以维系扎龙湿地功能为目标; 南四湖生态补水以及引岳济淀则直接立足于生态抢救和恢复。逐步形成了抗旱应急、中期供需平衡、长期生

收稿日期: 2007-02-20

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划项目“南水北调中线水资源调度关键技术研究”(2006BA B04A 07); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2006CB403404)。

作者简介: 鲁帆(1981-), 男, 湖北天门人, 博士研究生。

态维系的综合调度体系<sup>[1]</sup>。

在流域水量调度蓬勃开展的同时,跨流域调水成为缓解缺水地区水资源供需矛盾、支撑缺水地区可持续发展的必然选择。目前,我国已经规划选定了南水北调工程东线、中线、西线的调水水源、调水线路和供水范围,与长江、黄河、淮河和海河四大江河相互联接,形成了“四横三纵”的工程总体布局,东、中线的工程建设正在紧锣密鼓地进行。国内著名的跨流域调水工程还包括江苏的江水北调工程、广东的东深供水工程、引滦济津工程、山东的引黄济青工程、甘肃的引大入秦工程等,我国综合利用跨流域调水工程居世界第三位<sup>[2]</sup>。

流域水量统一调度及跨流域调水同属流域级水量调度问题,涉及地区多、范围广、距离长,各地区的来水情势和需水情势季节性变化大且存在一定的不确定性,流域及地区间水事关系复杂,调度目标向防洪、供水、灌溉、发电、养殖、旅游、航运及改善生态环境等方面综合利用的多目标方向转化,水利工程结构复杂,调水方式形式多样化,其调度研究涉及到水文气象、水资源、水力学、水利工程、经济、生态、系统工程等多个学科,是一个典型的多目标复杂群决策问题。如何综合应用各学科的知识,根据调度问题的实际需求建立科学实用的水量调度模型辅助水量调度决策具有重要的理论与现实意义。

## 2 模型研究进展

### 2.1 流域水量调度模型研究进展

流域水量调度模型研究源自实践需求,我国20世纪60年代就开始了以水库优化调度为先导的水资源分配研究。自20世纪70年代起,我国的水资源污染、生态系统破坏情况日趋严重,因此生态环境的保护与恢复成为水库调度的重要目标之一。近年来,随着实践的逐步开展和研究的不断深入,以黄河流域为代表的国内流域水量调度模型研究,充分吸取系统科学、控制科学和信息科学的先进理论、方法和技术,不仅在理论研究上取得了长足的进步和创新,而且在实际应用中获得了显著的经济和社会效益。“八五”期间,黄河水利委员会开展了“黄河流域水资源合理分配及优化调度”研究,对流域水量调度与管理起到了较好的示范作用。1996~2000年,黄河水利委员会完成了“黄河三门峡以下非汛期水量调度系统研究”<sup>[3]</sup>,旨在研究小浪底水库建成生效后黄河三门峡以下河段水资源的合理配置问题,但其研究范围仅限于黄河下游。2002年完成的“黄河水资源实时水量分

配”研究将黄河干流划分为上游子系统和三门峡—小浪底子系统分别进行流域模拟,以潼关流量进行耦合,采用系统递阶、长短嵌套、滚动修正的方法模拟水量调度过程,第一次较为全面系统地研究黄河水资源实时调度问题<sup>[4]</sup>。清华大学王光谦等在黄河和塔里木河水量调度方案编制研究中,参考各流域现行的水量调度方案编制工作,提出了流域水量调度的自适应法和适度优化法<sup>[5,6]</sup>。自适应法针对流域来水和用水系列具有不确定性和随机性的特点,为控制各用水单位用水总量,将自适应控制理论引入流域水量调度,使整个调度期内各用水单位的用水比例始终逼近既定的分水指标。适度优化法是在自适应法基础上,考虑流域内降雨的影响、工农业生产需水预测、地表地下水、作物生产灌溉等多种因素,选取适当的优化指标,对年可供水量在流域内进行优化分配。中国水利水电科学研究院在“十五”国家科技攻关计划重大项目《黑河流域水资源调配管理信息系统研究》中提出了以“模拟—配置—评价—调度”为基本环节的流域水资源调配四层总控结构、基于流域二元水循环模式和面向水资源全属性功能的流域水资源合理配置理论与方法和“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”的水资源实时调度方法<sup>[7]</sup>,实现了黑河流域强烈用水竞争条件下的国民经济发展和生态环境保护的“双赢”,为流域水资源调配研究提供了较为完整的框架体系。

一些发达国家在流域水资源一体化管理方面的研究起步较早,结合各类实际需求对流域水量调度模型进行了大量深入的研究,同国内相比主要具有两大优势:一是调度目标涵盖防洪、经济、水质、生态等各个方面,调度方法包括模拟、优化、模拟与优化相结合三类,同时与模型相配套的流域一体化管理水平较高,具有较好的监测设施和调控水平;二是开发了一些具有较强实用性的软件产品用于水资源调度模拟,如RIVERWARE、MKEBASIN、EMS Waterware、IQQM、Aquarius等<sup>[8]</sup>。相比而言,国内研究虽然在部分领域具有一定深度并取得了研究成果,但在模型通用化方面还存在困难,缺乏成熟可靠的系统模拟模型以及相应软件。

### 2.2 跨流域水量调度模型研究进展

随着跨流域调水工程的大量兴建,国内外专家学者针对跨流域调水工程提出了许多水量调度决策模型与方法,从模型的目的来归纳大致分为两大类:一类是规划调度模型,主要是综合考虑经济、生态、环境等因素来确定水源区可调水量、受水区范围和调水工

程规模,如Weiner & Arie Ben-Zvi应用随机DP模型研究了Mediterranean-Dead Sea Project跨流域调水系统的优化运行问题,Marino & Loaiciga采用改进POA法对美国中央河谷工程的9库优化运行问题进行了研究<sup>[2]</sup>。国内在此方面的研究大量集中于南水北调工程,通过优化、模拟、系统仿真、神经网络等系统工程理论与方法的综合利用<sup>[9-11]</sup>,确定了南水北调东、中线工程的调水规模、工程规模及水资源调配原则,为工程建设及未来的水量调度运行做好了铺垫;另一类是实际水量调度决策模型,用于已建调水工程的调度运行与管理,主要包括中长期水量调度以及水库、泵站、水闸等水利工程的实时调度等研究<sup>[12-13]</sup>。目前南水北调东、中线的调水规划均建立于历史长系列水文及水资源资料的分析,某种意义上讲是一种设计指标,工程建成后实际运行期间供水区、受水区水资源储存状况、受水区需水量等与通过长系列资料分析概化的设计指标比,均有一定的差距。如何结合调度期间沿线各地的水资源分布情况,协调各地区、各部门、多目标之间的水资源供求关系,通过政府宏观调控与市场机制对外调水进行合理分配,制定沿线各时段的供水计划,充分发挥工程的经济效益、社会效益、生态环境效益,是跨流域调水工程供水调度面临的重大课题。

### 3 模型研究展望

从国内外流域水量调度与跨流域调水的实际需求及研究现状可以看出,流域级水量调度模型研究具有以下一些发展趋势。

(1)以“预报—配置—调度”为基本环节的流域水资源调配体系研究。水量调度研究的系统性和整体性相对还比较薄弱,现状基于专家经验的流域水量实时调度没有与流域水资源合理配置以及流域水循环很好地结合起来,难以保证长期配置的合理性。预报环节包括来水预报和需水预测,是水资源调配的科学基础。系统调度所依据的来水量及来水过程主要取决于径流预报环节,径流预报的精度直接影响到调度精度。如何综合气象、下垫面、人类活动等多源信息,精细模拟变化环境下的流域水循环过程,建立更科学的径流预报模型辅助水量调度决策至关重要。需水预测包括工业、农业、生活、生态用水的预测,直接影响到水资源调度的效益。水资源配置和水资源调度是实现水资源合理调控的两个不可分割的步骤,应首先确定水资源配置的目标与具体规则,通过水资源合理配置实现规划层面的水资源合理调控,通过水资源调

度将配置方案落实到调控实践当中,实现水资源宏观配置方案和实时调度方案的耦合与嵌套,建立更为完善的流域水资源调配框架体系。

(2)不同时间尺度调度模型的衔接研究。流域级水量调度模型从时间尺度划分通常包括年调度模型、月调度模型和实时调度模型。由于不同调度时段下各地区来水及需水过程的不确定性,水量调度实质上是要解决一系列复杂的不确定性问题。调度模型应能吸取“宏观总控、长短嵌套、实时决策、滚动修正”的思想,随时间的向前推移,结合最新的来水和用水预报信息,根据一定的准则对水量调度计划进行自适应修正。实时调度方案既能保证完成中长期水量调度预案,又要便于水利工程运行。

(3)复杂水资源系统的建模及模型解法研究。流域级水资源系统模拟的范围大、要素多,首先应根据调度目标和模拟精度,识别水量调度的主要过程和影响因素,抽取关键环节并忽略次要信息,对整个系统进行合理概化和数学建模,其中调度对象、调度目标和调度方法的选取是几个比较关键的问题;其次,系统的多目标、多变量特性使得模型求解可能会存在一定困难,如何利用现代数学和系统科学的先进算法也是模型必须考虑的重要问题,在很大程度上还会推进模型的发展。

(4)通用化流域级水量调度模拟模型研究。由于研究范围和投入力量的限制,国内流域级水量调度模型的研究多以实际问题的分析和解决为导向,以具体实例为研究对象,应用范围较小,所采用的方法和开发的模型还不具备通用性。应充分吸取国外已有模型与软件的先进经验,将面向对象、地理信息系统等先进技术与已有的调度模型相耦合,拓广现有模型的应用范围,推动国内水资源领域应用软件的综合性、系统性和实用性。

## 4 结语

随着社会的发展和认识的不断深入,水资源领域所需要考虑的问题必将更加复杂,各类数据的监测和分析水平也会逐步提高,流域水量调度与跨流域调水将进一步向科学化、现代化发展,流域级水量调度模型的研究方兴未艾。根据实际需求系统构建流域级水量调度模型辅助水量调度决策,促进人水和谐,任重道远。

### 参考文献:

- [1] 索丽生. 深化以资源为核心的治水思路切实加强水资源调度工  
(下转第22页)

果以径流深作为标准, 率定期的 8 场洪水的径流深相对误差均小于 20%, 拟合良好。而验证期的 6 场洪水中, 每种算法计算的径流深都有 3 场误差大于 20%。(2) 如果以洪峰流量作为标准, 率定期的 8 场洪水中, 洪峰流量相对误差有 2 场大于 20%; 验证期的 6 场洪水中, 改进的多流向法和多流向法计算的洪峰流量误差均小于 20%; 单流向洪峰流量误差有 4 场大于 20%。(3) 如果以确定性系数作为标准, 率定期的 8 场洪水中, 4 场达到甲等, 4 场达到乙等; 验证期的 6 场洪水中, 改进多流向算法一场达到甲等, 5 场达到乙等, 场次洪水的平均确定性系数为 0.80。多流向算法和单流向算法各 1 场达到甲等, 3 场达到乙等, 2 场达到丙等, 场次洪水的平均确定性系数分别为 0.80 和 0.78。

综合上述结果可发现, 不同地形指数计算方法所得到的地形指数分布曲线有所不同, 由此得到的 TOPMODEL 模拟结果也有一定的差异。改进的多流向法比多流向法的模拟精度有所改进, 主要体现在径流深和洪峰流量两方面, 对模拟精度有一定程度的提高, 而确定性系数不是很明显, 单流向法模拟的效果较差。这进一步验证了改进的多流向法不但为计算指数的计算提供了更好的依据, 同时也可以从一定程度上提高 TOPMODEL 的模拟精度。

### 3 结 语

介绍了地形指数的三种计算方法, 将 TOPMODEL 应用于地处湿润地区的东江流域中的星丰流域, 从 1972~1987 年中选择了 14 场次洪水进行模拟分析, 率定期和验证期的洪水模拟精度皆较高。通过对比分析单流向法、多流向法和改进的多流向法所得到

的洪水模拟结果, 得出改进的多流向法所得到的模拟结果精度更高, 从一定程度上可以提高洪水模拟精度, 为 TOPMODEL 的广泛应用提供了较为有力的依据。

### 参考文献:

- [1] Beven K, Kirkby M J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology [J]. Hydrological Science Bulletin, 1979, 24(1): 43-69.
- [2] Franchini M, Wendling J, Obled C, et al. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL [J]. Journal of Hydrology, 1996, 175: 293-338.
- [3] Duan J, Miller N L. Generalized power function for the subsurface transmissivity profile in TOPMODEL [J]. Water Resources Research, 1997, 33(11): 2559-2562.
- [4] 熊立华, 郭生练, 胡彩虹. TOPMODEL 在流域径流模拟中的应用研究 [J]. 水文, 2002, 22(5): 5-8.
- [5] 郭方, 任立良, 刘新仁. 以地形为基础的流域水文模型——TOPMODEL 及拓宽应用 [J]. 水科学进展, 2000, 11(3): 296-301.
- [6] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 等. TOPMODEL 模型在黑河干流出山径流模拟中的应用 [J]. 中国沙漠, 2003, 23(4): 428-434.
- [7] 刘青娥, 左其亭. TOPMODEL 模型探讨 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2002, 23(4): 82-86.
- [8] 余新晓, 赵玉涛, 张志强, 等. 基于地形指数的 TOPMODEL 研究进展与热点跟踪 [J]. 北京林业大学学报, 2002, 24(4): 117-121.
- [9] 解河海, 黄国如. 地形指数若干计算方法探讨 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2006, 34(1): 46-50.
- [10] 孔凡哲, 芮孝芳. TOPMODEL 中地形指数计算方法的探讨 [J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 41-45.
- [11] 中华人民共和国水利部. 水文情报预报规范 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

(责任编辑 林雁庆)

(上接第 18 页)

- 作 [J]. 中国水利, 2004 (5): 14-17.
- [2] 邵东国. 跨流域调水工程规划调度决策理论与应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001.
- [3] 陈效国, 席家治, 薛松贵. 黄河三门峡以下非汛期水量调度模型系统研究项目综述 [J]. 人民黄河, 2001, 23(12): 8-9.
- [4] 蔡治国. 流域水量调度模型研究与应用 [D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [5] 魏加华, 王光谦, 翁文斌, 等. 流域水量调度自适应模型研究 [J]. 中国科学 (E 辑 技术科学), 2004, 34(增刊): 185-192.
- [6] 蔡治国, 王光谦, 魏加华, 等. 塔里木河流域水量调度方法研究 [J]. 人民黄河, 2006, 28(1): 29-31.
- [7] 赵勇, 裴源生, 于福亮. 黑河流域水资源实时调度系统 [J]. 水利学报, 2006, 37(1): 82-88.
- [8] 游进军, 王浩, 甘泓. 水资源系统模拟模型研究进展 [J]. 水科学进展, 2006, 17(3): 425-429.
- [9] 赵勇, 解建仓, 马斌. 基于系统仿真理论的南水北调东线水量调度 [J]. 水利学报, 2002, (11): 38-43.
- [10] 王银堂, 胡四一, 周全林, 等. 南水北调中线工程水量优化调度研究 [J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 72-80.
- [11] 畅建霞, 黄强, 王义民, 等. 南水北调中线工程水量仿真调度模型研究 [J]. 水利学报, 2002, (12): 85-90.
- [12] 冯平, 胡明罡. 引滦入津引供水枢纽泵站机组的优化调度 [J]. 水力发电学报, 2001, 75(4): 90-95.
- [13] 朱劲木, 龙新平, 刘梅清, 等. 东深供水工程梯级泵站的优化调度 [J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 123-127.

(责任编辑 林雁庆)