

WROOM 模型及其在渭河流域水量调度中的应用

李海辰¹, 吴学春², 雷晓辉¹, 李晓春³, 汪雅梅³

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 南京 210029;
3. 陕西省江河水库管理局, 西安 710018)

摘要: 通用水资源优化调配模型 WROOM 作为将优化与模拟技术相结合的水资源系统模型, 能很好地进行水资源调度问题求解。现根据渭河流域水量调度实际需求, 对 WROOM 模型进行了改进, 建立了渭河流域水量调度年度模型及月调度模型, 实现了渭河流域水量调度方案自动化编制, 提高了水量调度管理工作的科学化水平。

关键词: WROOM 模型; 渭河流域; 水量调度; 行政管理; 调度方案; 水量调度系统

中图分类号: TV213.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0029-05

Introduction of WROOM and Application in Weihe River Basin

LI Hai chen¹, WU Xue chun², LEI Xiao hui¹, LI Xiao chun³, WANG Ya mei³

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. The South to North Water Transfer Project of Jiangsu Water Resources Limited Liability Company, Nanjing 210029, China;

3. Administration Bureau of River Reservoir, Shaanxi Province, Xi'an 710018, China)

Abstract: WROOM is a water resources model combining optimization with simulation technology and can solve water resources scheduling problems efficiently. According to the practical demand of water resources scheduling in Wei River Basin, the annual water scheduling model and monthly water scheduling model which based on WROOM is established. So water scheduling plan of Weihe River Basin can be established automatically, and the scientific level of water scheduling administrative management is improved.

Key words: WROOM; Weihe River basin; water administrative management; scheduling plan; water scheduling system

渭河流经甘肃、宁夏、陕西 3 个省份, 干流全长 818 km, 流域总面积 13 48 万 km², 在陕西省境内河长 502 km, 流域面积 6 71 万 km², 占全省总面积的 32.6%, 集中了陕西省 64% 的人口、56% 的耕地、72% 的灌溉面积和 65% 的国内生产总值, 是陕西省经济社会发展的核心地带。20 世纪 80 年代以来, 渭河出现了水资源短缺、水污染严重、河道严重淤积等问题, 严重制约了当地经济社会健康发展^[1-3]。为此, 陕西省政府先后颁布了《黄河水量调度条例》、《陕西省渭河水量调度办法》、《陕西省渭河全线整治规划及实施方案》等, 以加强渭河流域管理。但目前渭河水资源调度管理仍然面临调度手段落后、信息整合困难等一些问题, 迫切需要加强水资源调度模型理论研究及应用系统建设^[4]。

1 WROOM 模型理论体系

1.1 WROOM 模型简介

WROOM (Water Resources Optimal Operation Model)

模型是一个优化与模拟技术相结合的水资源系统模型, 既可以考虑各种复杂的规则, 尽可能逼真地描述真实的水资源系统, 也可以实现在模拟的同时追求某种目标最优。WROOM 模型采用数学规划的思想, 把水资源系统中的各种对象、关系、规则等都用约束方程的方式进行描述, 同时在目标函数里面体现水资源调度需要考虑的各个目标, 从而构造一个大规模的(非)线性规划问题。然后通过对该(非)线性规划问题的求解, 得到调度期内的水资源供需平衡结果。

相较于其他模型, WROOM 模型具有以下几个优点: (1) 该模型同时采用 GMS, Java 两种开发方式, 可以实现模型与系统的无缝衔接, 方便应用系统开发; (2) 该模型建立在一个通用的水源网络概化的基础上, 实现了模型与数据的分离, 易于根据实际需求情况进行模型改进; (3) 该模型实现了多水源、多用户、多时段连续水资源分配, 支持水量调度问题求解。

1.2 WROOM 模型的概化

WROOM 模型采用点、线、面结合的方法, 把水资源系统

收稿日期: 2014-02-12 修回日期: 2014-03-06 网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201101026; 201101024; 201301001; 20131102); “十二五”国家科技支撑计划项目(2013BA B05B05); 环保部公益基金项目(2013467042); 国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)(2013CB036406)

作者简介: 李海辰(1988-), 男, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事水文水资源方面的研究。E-mail: ltd374779007@gmail.com

概化为 5 种基本元素: 计算单元、河网、节点、水库、地下水, 建立起供水、退水关系及上下游关系, 完成系统的概化, 具体过程见图 1。

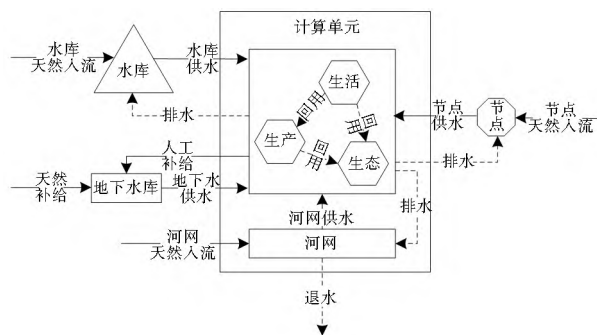


图 1 复杂水资源系统概化方法概念图

Fig. 1 The conceptual diagram of generalization method for complex water resources system

1.3 WROOM 模型结构

WROOM 模型的理论基础是水量平衡^[59], 水资源系统的水量平衡可以概括为 3 类: 水库水量平衡、节点水量平衡、计算单元水量平衡。每一种水量平衡对应应有约束条件, 包括: 水源供水对象约束、水库库容约束、河道渠道过流约束、水库蒸渗损失约束、河道损失约束、控制断面流量约束, 另外增加两项约束条件—水利工程约束、调度规则约束。

1.3.1 目标设置

综合效益最大化是水资源调度模型的目标函数, 但这是一个复杂的目标函数, 应能够涵盖不同的效益目标, 并且刻画出不同目标之间的非线性关系。由于水资源系统的复杂性, 因此, 这个目标函数仅是理论上可行。因此在目标函数尽可能多的前提下, 引入目标权重及专家经验简化目标函数的构建。目标设定时考虑了尽量满足各用水户用水计划建议、控制断面流量达标情况, 同时加权考虑了各用水户历史用水耗水情况, 能有效避免个别用水户谎报用水计划建议给水量调度方案带来的影响。概化的目标函数为:

$$OBJ_{\text{目标}} = W_{\text{人类}} \sum_{i=1}^n W_i X_i + W_{\text{生态}} \sum_{j=1}^m W_j X_j + W_{\text{历史}} \sum_{i=1}^n N_i K_i \quad (1)$$

式中: $W_{\text{人类}}$ 为人类用水重要程度权重; W_i 为第 i 个用水户重要程度权重; X_i 为第 i 个用水户需求满足程度; $W_{\text{生态}}$ 为生态需水重要程度权重; W_j 为第 j 个控制断面重要程度权重; X_j 为第 j 个控制断面流量达标程度; $W_{\text{历史}}$ 为历史用水情况的重要程度权重; N_i 为第 i 个用水户历史用水数据可靠性权重; K_i 为第 i 个用水户分配水量合理程度; n 为用水户数量; m 为控制断面数。

1.3.2 约束条件

(1) 工程约束条件。工程约束主要是水库约束^{[10][21]}, 主要包括 3 个方面: 水量平衡; 水库限制水位; 水库的损失。水库是水量调度的一个重要执行手段, 因此, 水库的水量平衡是非常重要的一个环节。水库的水量平衡变量有: 区间天然入流、水库上游来水(包括上游供水渠道来水、上游退水渠道退水等)、水库弃水、水库下游供水、水库下游弃水、水库蒸发、水库下渗和水库时段末库容等, 水库的水量平衡公式为:

$$W_{\text{区间入流}} + W_{\text{上游来水}} = W_{\text{弃水}} + W_{\text{洪水}} + S_{\text{损}} \quad (2)$$

式中: $S_{\text{损}}$ 包括蒸发和渗漏。

(2) 水电站约束条件。水电站是水资源系统中的一个特殊对象, 它追求自身的发电量最大^[12-14]。模型中做了简化处理, 将其追求的目标定为在发电用水计划建议范围内追求用水量最大。发电用水是非消耗性用水, 水经发电使用后仍可用于供水。模型设置发电供水渠道, 将发电后的水量充分用于满足下游计算单元的用水需求。超出下游计算单元需求的部分则通过水电站弃水渠道退水到下游河道中。

$$W_{\text{上游来水}} = W_{\text{弃水}} + W_{\text{洪水}} \quad (3)$$

(3) 节点约束条件。节点水量平衡描述了节点的上游来水及下游供水之间的水量平衡关系^[15], 其水量平衡关系式为:

$$W_{\text{区间入流}} + W_{\text{上游来水}} = W_{\text{弃水}} + W_{\text{洪水}} \quad (4)$$

(4) 计算单元约束条件。计算单元的约束条件包括: 供需平衡相关约束、供水约束、退水相关约束、流域用水总量指标约束。

2 渭河流域水量调度基本情况

渭河流域水量调度原则一般为: 在调度期内对各用水单位用水量实行总量控制; 采用“年调度总量控制, 月调度逐旬调度”方式; 统计控制断面流量和引水口水量, 控制控制断面流量在合理范围。

根据渭河流域水量调度的原则, 制定水量调度方案的流程为: (1) 调度期(上一年 11 月至当年 6 月)之前, 各用水单位制定整个调度期内各月用水计划, 并上报流域管理局; (2) 流域管理局根据水文预报和各用水单位用水计划进行水量审核, 若用水计划不合理, 则对各用水计划进行内部调整, 内部调整的原则是对不符合合理流量范围的控制断面的上游用户进行等比例缩减或增加, 直到各控制断面流量均在合理范围之内; (3) 流域管理局上报黄河水利委员会经过内部调整后的总用水计划值, 经审批后下达最终的年总水量指标; (4) 流域管理局根据年总水量指标再次对用水计划进行调整, 月计划指标可在年总水量指标的限定下根据实际情况进行分配; (5) 流域管理局制定用水计划并下达至各基层用水单位。

3 WROOM 模型在渭河流域水量调度中的应用

本文在深入分析渭河流域水量调度工程、用水单元、输水河道/渠道等信息的基础上, 概化出了渭河流域水资源网络图(图 2), 并根据渭河流域水量调度的现状及管理模式, 对 WROOM 模型进行适用性的改进, 使模型可以直接服务于渭河流域水量调度方案编制业务。

同时, 以该模型为基础进行了应用系统研究, 使模型更易于为生产所用, 大大提高了流域水量调度管理的信息化、科学化水平。渭河流域水量调度应用系统研究以满足渭河流域水量调度管理需求为目的, 以 WROOM 模型优化算法为核心, 以渭河流域水量调度方案编制流程为脉络, 涵盖了 7 个功能模块: 基本信息管理、来水信息管理、用水计划建议、用水计划上报、调度方案编制、实际用水统计、水量调度评价。

3.1 基本信息管理模块

本功能模块对本流域的一些基本信息及模型计算的一

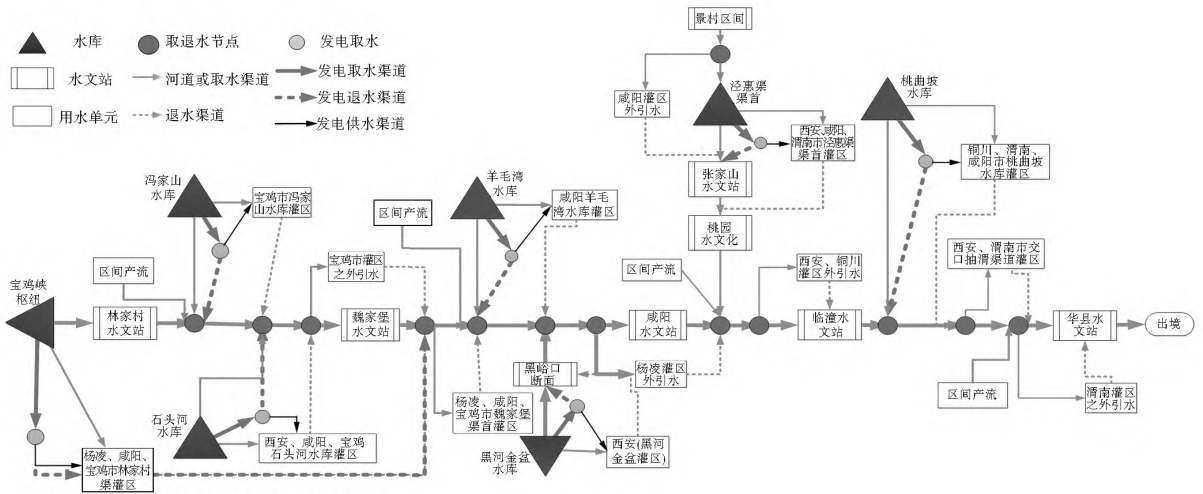


图2 渭河流域干流水资源网络概化图

Fig. 2 The water resources generalized network diagram of Wei River Basin

些基本参数提供查看和修改功能。包括流域概况展示、流域水资源概况展示、流域用耗水情况展示、生态流量限定参数管理等。

3.2 来水信息管理模块

来水预报是 WROOM 模型的边界条件方案,同时也是水量调度工作的依据。在调度期开始前,由流域水文预报部门提供当前调度期的水文预报结果,系统利用同频率法将原本的单一总量预报插补延长为来水过程预报,并通过相关水文站历史实测资料预报相关区间断面调度期的产流情况,具体步骤如下:(1) 根据要求选定计算时段:最小 1 个月、最小 3 个月、最小 8 个月(一个调度年);(2) 计算各个时段的水量频率曲线,在代表年的逐月径流过程上,统计最小 1 个月的流量、连续最小 3 个月的流量,并要求长时段的水量包含短时段的水量在内;(3) 利用公式(5-7)计算缩放倍比:

$$K_{1P} = \frac{Q_{1P}}{Q_{1D}} \quad (5)$$

$$K_{3P} = \frac{Q_{3P} - Q_{1P}}{Q_{3D} - Q_{1D}} \quad (6)$$

$$K_{8P} = \frac{Q_{8P} - Q_{3P}}{Q_{8D} - Q_{3D}} \quad (7)$$

(4) 用各自的缩放倍比乘对应的代表年的各月流量而得。遇较短年径流系列时,应该利用上下游站或邻近河流测站实测径流资料,延长设计断面的径流系列。

3.3 用水计划管理模块

地市及灌区上报的用水计划也是 WROOM 模型的边界条件方案之一,该模型通过读取各地市及灌区上报的 EXCEL 格式文件完成各地市、各灌区用水计划建议的收集,并在不同尺度上(时间、地区、行业)完成数据的统计工作,并存入数据库。分地区,分行业的用水计划统计数据可以作为 WROOM 模型的输入数据。该模块实现了流域管理单位的办公自动化,电子报表的使用提高了数据上报的准确性和文件传送的及时性,同时,通过使用数据库技术提高了数据的可保存性和安全性。

3.4 用水计划建议上报模块

按照业务规范流程,用水计划建议模块可以对有调度计

划的时段进行用水计划上报报表的编制工作。通过概化的水资源网络模型,利用水计划管理模块中收集的用水计划数据,完成干流河段(北道至华县段)、泾河(杨家坪、雨落坪至张家山段)及北洛河的取水统计,作为报表上报黄河水利委员会。

3.5 调度方案编制模块

调度方案编制是整个软件系统核心的部分,是最重要的功能之一。利用根据实际需求改进后的 WROOM 模型进行水量调度方案的编制,具体步骤如下:(1) 模型概化。水资源用户概化为 4 类:工业用水、农业用水、城镇及生活用水、其他用水;本区域的取水位置概化为:河道上各取退水节点、水库供给;水资源的传输渠道概化为:河道或供水渠道、退水渠道、发电取水渠道、发电供水渠道、发电退水渠道;(2) 模型率定。以率定期的来水量、实际用水量作为输入,以模型计算出的各主要节点入流、水量平衡结果作为率定目标,调整概化网络、用水效率、区间接产流、控制断面流量限定参数、计算单元用水计划建议参数、计算单元多年平均用水参数;(3) 调度方案设置。设定水库调度期初始的水库库容及分行业用水权重、确定水库在调度期可供水量,将预测来水量、用水计划建议及黄委用水总量限制指标作为 WROOM 的边界条件方案,根据总量控制原则,严格按照流量控制断面的流量限定,对流域整体调度方案采用优化模型进行计算。

年方案编制完成当前调度年所有月份的用水计划,月方案的编制要根据当前调度年已完成调度月份的执行情况及年方案中当月的用水计划,重新设定月用水量限制指标,完成月方案的编制。

3.6 实际用水量统计模块

实际用水量统计模块包括实际用水量数据导入功能和报表管理功能。各地市、各灌区统计的各自调度期实际用水量情况,通过 EXCEL 文件传递,导入系统数据库中,并能通过系统界面查询查看已经导入年份的各地市、各灌区分行业实际用水量情况。已有实际用水量数据的年份或月份可以通过报表编制功能编制相应时段的流域用水量情况报表。同时报表管理功能也提供了历史用水量报表的查询查看管理功能。

3.7 水量调度评价模块

水量调度评价是对整个调度业务流程中各个环节的分析评价,其功能包括:水量调度简报管理功能;将实际来水量与预测来水量进行对比分析;对实际来水量的丰、平、枯水平进行评价;将当前结束调度期的流域实际用水与历年实际用水进行对比分析;将调度计划与实际用水过程进行对比得到

计划的执行情况评价。

3.8 应用结果分析

为检验系统运行的可靠性,同时采用系统运行计算和人工经验编制两种方法进行渭河流域2012年-2013年水量调度计划编制,并对两种方法得到的结果进行了对比,见表1。

表1 系统计算结果与人工经验编制结果对比

Table 1 Comparison of results of the calculation and artificial experience

万 m³

地区	采用方法	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	调度年合计
宝鸡峡	人工经验编制法	1 980	5 670	4 900	3 700	6 110	3 200	3 890	5 900	35 350
	模型计算	1 890	5 877	4 834	3 557	6 346	3 384	3 754	5 877	35 519
交口抽渭	人工经验编制法	1 433	4 250	3 398	2 217	4 380	4 753	3 498	5 781	29 710
	模型计算	1 455	4 500	3 109	2 504	4 669	4 383	3 172	5 101	28 893
石头河	人工经验编制法	1 790	2 134	1 899	1 356	1 139	2 090	2 110	2 987	15 505
	模型计算	1 980	1 980	1 980	1 251	1 350	1 980	1 976	3 301	15 798
桃曲坡	人工经验编制法	770	1 346	390	289	798	690	832	1 011	6 126
	模型计算	780	1 435	450	320	820	780	760	860	6 205
宝鸡市	人工经验编制法	699	6 020	3 998	2 543	5 690	689	2 791	3 980	26 410
	模型计算	735	5 900	4 118	2 772	5 878	588	2 838	4 406	27 235
西安市	人工经验编制法	2 567	3 590	3 380	3 798	3 401	2 677	4 112	4 123	27 648
	模型计算	2 675	3 277	3 581	3 927	3 207	2 594	4 212	3 960	27 433
铜川市	人工经验编制法	566	490	233	310	571	513	203	499	3 385
	模型计算	593	523	263	263	583	563	263	423	3 474
杨陵区	人工经验编制法	77	67	38	22	79	69	81	77	510
	模型计算	85	45	39	31	89	53	78	65	485
渭南市	人工经验编制法	330	340	165	490	1 187	450	621	811	4 394
	模型计算	377	377	179	577	1 037	537	577	777	4 438
羊毛湾	人工经验编制法	380	430	655	385	560	460	225	710	3 805
	模型计算	370	450	670	370	650	480	270	640	3 900

从表1对比人工经验编制与系统自动生成结果可以看出,系统编制的水量调度方案报表在总体上与人工经验编制的报表在数值上没有很大差别,地市或灌区的分水指标也没有太大差距。相对于人工经验编制法来说,系统编制的结果更加详细,指标更加细化,更符合水量精细调度的要求。

4 结论与展望

WROOM模型是一个优化与模拟技术相结合的水资源系统模型,既可以考虑各种复杂的规则,尽可能逼真地描述真实的水资源系统,也可以实现在模拟的同时追求某种目标最优。本文以WROOM模型为基础,针对渭河流域水量调度管理需求,建立渭河流域水量调度年调度模型及月调度模型,利用资源整合和信息共享手段,初步构建了陕西省渭河流域水量调度决策支持系统。应用该系统对2012年渭河流域水量调度方案进行自动化编制,并与人工经验编制的结果进行对比验证。分析认为该决策支持系统计算结果可靠,且结果更加详细。应用该系统可以实现渭河流域水量调度方案自动化编制,从而提高其水量调度管理工作的科学化水平。

渭河流域水量调度系统仍处于初级阶段,仅能满足当前水量调度管理工作的基本需求。下一步重点研究方向包括:(1)开发B/S架构的新一代渭河流域水量调度系统,将水量调度管理工作中的所有相关部门、单位作为多用户纳入系

统,实现多用户同时在线访问,通过网络传输提高水量调度相关数据、指令传递的高效性、安全性,提高水量调度工作的效率和先进性。(2)开展渭河流域水量应急调度研究。近年来各种水问题频发、突发。开展应急情况下的水量调度研究,可以为渭河流域严重干旱、渭河干支流预警控制断面流量降至预警流量等紧急情况下的应急水量调度工作提供技术支撑和应对方案参考,有利于在突发水问题时最大限度保障城乡居民生活用水,合理安排农业、工业和生态环境用水,防止渭河断流。

参考文献(References):

- [1] 于翠松. 水库群防洪联合调度研究综述及展望[J]. 水文, 2002, 22(5): 27-30. (YU Cui song. State and Prospect on the Application in Multi reservoir Flood Control Operation [J]. Hydrology, 2002, 22(5): 27-30. (in Chinese))
- [2] 邓坤, 张璇, 杨永, 等. 流域水资源调度研究综述[J]. 水资源, 2011, 32(4): 1-3. (DENG Kun, ZHANG Xuan, YANG Yong, et al. River Basin Water Resources Scheduling Research Reviewed [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2011, 32(4): 1-3. (in Chinese))
- [3] 王厥谋. 丹江口水库防洪优化调度模型简[J]. 水利水电技术, 1985, (8): 54-58. (WANG Jue mou. Flood Control and Optimal

- Scheduling Model in Danjiangkou Reservoir[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology, 1985, (8): 54-58. (in Chinese)
- [4] 王栋, 曹升乐, 员如安, 等. 水库群系统防洪联合调度的线性规划模型及仿射变换法[J]. 水利管理技术, 1998, 18(3): 1-5. (WANG Dong, CAO Sheng-le, YUAN Ru-an, et al. Joint Flood Control Scheduling of Reservoir Groups of Linear Programming Model and Affine Transformation Method[J]. Water Management Technology, 1998, 18(3): 1-5. (in Chinese))
- [5] Under O I, Mays L W. Model For Real Time Optimal Flood Control Operation of a Reservoir System[J]. Water Resources Management, 1990, (4): 24-45.
- [6] 沈佩君, 邵东国. 跨流域调水工程优化规划混合模拟模型研究[J]. 系统工程学报, 1992, 7(2): 43-52. (SHEN Pei-jun, SHAO Dong-guo. Interbasin Water Diversion Project Optimization Planning Hybrid Simulation Model Research[J]. Journal of Systems Engineering, 1992, 7(2): 43-52. (in Chinese))
- [7] 沈佩君, 张威升. 多种水资源的联合优化调度[J]. 水利学报, 1994, (5): 1-8. (SHEN Pei-jun, ZHANG Wei-sheng. A Variety of Joint Operation Optimization of Water Resources[J]. Journal of Water Conservancy, 1994, (5): 1-8. (in Chinese))
- [8] 郭元裕, 金兆森. 大系统试验选优理论研究[J]. 数学物理学报(A辑), 2004, 24(1): 8-15. (GUO Yuan-yu, JIN Zhao-sen. The Research of an Optimal Experimental Method for Large Scale Systems[J]. Journal of Mathematical Physics(A), 2004, 24(1): 8-15. (in Chinese))
- [9] LITTLE J D C. The Use of Storage Water in a Hydroelectric System [J]. Operational Research, 1955, (3): 187-197.
- [10] AHMED I. On the Determination of Multi Reservoir Operation Policy under Uncertainty [D]. Arizona: The University of Arizona, 2001.
- [11] 蔡治国, 王光谦, 魏加华. 黄河流域水量调度的自校正控制模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(12): 1660-1663. (CAI Zhi-guo, WANG Gang-qian, WEI Jia-hua. Self-tuning Control Model for the Yellow River Water Regulation System[J]. Tsinghua Univ. (Sci&Tech), 2004, 44(12): 1660-1663. (in Chinese))
- [12] 王煜, 王道席, 王军良, 等. GIS 在水量调度决策支持系统中的应用[J]. 水科学进展, 2003, 13(1): 114-117. (WANG Yu, WANG Dao-xi, WANG Jun-liang, et al. Application of GIS to the Water Dispatching Decision Support System[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 114-117. (in Chinese))
- [13] 付湘, 纪昌明. 多维动态规划模型及其应用[J]. 水电能源科学, 1997, 15(4): 1-6. (FU Xiang, JI Chang-ming. Multidimensional Dynamic Programming Model and Its Application[J]. Water and Electricity Energy Science, 1997, 15(4): 1-6. (in Chinese))
- [14] MOHAN S, RAIPURE D M. Multi Objective Analysis of Multi-reservoir System [J]. Water Resources Plan Mgmt, 1992, 9(5): 356-370.
- [15] 王煜, 杨立彬, 侯传河, 等. 利用面向对象技术研究开发水量调度决策支持系统[J]. 水科学进展, 2000, 11(4): 441-446. (WANG Yu, YANG Li-bin, HOU Chuan-he, et al. Using the Object Oriented Program to Research and Develop the Water Dispatching Decision Support System[J]. Advances in Water Science, 2000, 11(4): 441-446. (in Chinese))
- [16] 江西省水利科学研究院. 赣江流域水量分配方案研究[R]. 南昌: 江西省水利科学研究院, 2008. (Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences. Study on Water Allocation in Ganjiang River Basin[R]. Nanchang: Jiangxi Provincial Institute of Water Sciences, 2008. (in Chinese))

(上接第 24 页)

- [5] WERKHOVEN K, WAGENER T, REED P, et al. Characterization of Watershed Model Behavior Across A Hydroclimatic Gradient[J]. Water Resources Research, 2008, 44(1): W1429.
- [6] TANG Y, REED P, WERKHOVEN K, et al. Advancing The Identification and Evaluation of Distributed Rainfall-runoff Models Using Global Sensitivity Analysis[J]. Water Resources Research, 2007, 43(6): W6415.
- [7] TANG Y, REED P, WAGENER T, et al. Comparing Sensitivity Analysis Methods to Advance Lumped Watershed Model Identification and Evaluation[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2007, 11(2): 793-817.
- [8] 孟碟. 水文模型参数的灵敏度分析[J]. 水利水电技术, 2012, 43(2): 5-8. (MENG Die. Parameter Sensitivity Analysis of Hydrological Model[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2012, 43(2): 5-8. (in Chinese))
- [9] CHENG C T, ZHAO M Y, CHAU K W, et al. Using Genetic Algorithm and TOPSIS for Xinanjiang Model Calibration with A Single Procedure[J]. Journal of Hydrology, 2006, 316(1-4): 129-140.
- [10] CHENG C T, OU C P, CHAU K W. Combining A Fuzzy Optimal Model with A Genetic Algorithm to Solve Multiobjective Rainfall-runoff Model Calibration[J]. Journal of Hydrology, 2002, 268(1): 72-86.
- [11] 宋晓猛, 孔凡哲, 占车生, 等. 基于统计理论方法的水文模型参数敏感性分析[J]. 水科学进展, 2012, 23(5): 642-649. (SONG Xiaomeng, KONG Fan-zhe, ZHAN Che-sheng, et al. Advances in Water Science. 2012, 23(5): 642-649. (in Chinese))
- [12] 包为民. 水文预报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (BAO Wei-min. Hydrologic Forecasting[M]. Beijing: China Waterpower Press. (in Chinese))