

流域水资源水量水质集成管理模型研究进展

曾 勇,刘静玲,杨志峰

(北京师范大学环境学院,北京 100875)

摘要 将流域水资源水量水质集成管理模型分为优化模型、模拟模型、优化和模拟相结合模型以及决策支持系统四大类,按此分类总结了目前国内外研究的相关进展,并针对模型中出现的水量水质耦合项,分析了直接求解法、大系统分解协调技术、逐步求解法和情景优选法等水量水质变量的解耦原理和技术,并展望了流域水资源水量水质集成管理模型在水资源优化配置、生态环境需水配置和水资源冲突协调领域中的应用前景。

关键词 流域水资源,水量管理,水质管理,数学模型,解耦

中图分类号:TV213.4 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2006)01-0073-04

Advances in research of water quantity and water quality integrated management model for river basin water resources//
ZENG Yong, LIU Jing-ling, YANG Zhi-feng (Environmental School, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract : The water quantity and water quality integrated management models for river basin water resources were classified into the optimal model, simulation model, optimal simulation model, and decision-making support model, and advances in the research at home and abroad were summarized according to the classification. Moreover, some decoupling principles and techniques for water quantity and water quality variables, including the nonlinear optimal solution method, decomposition and coordination method, stepwise solution method, and scenario analysis method, were analyzed to deal with the water quantity and water quality coupling items in the models. Finally, the application of the water quantity and water quality integrated management model to optimal allocation of water resources and ecological water demand and coordination of water conflicts was prospected.

Key words : river basin water resources; water quantity management; water quality management; mathematical model; decoupling

随着流域人口的迅速增加、工农业发展和城市化进程的加快,增加了流域传统所需的生活、生产用水量,同时随着野生生物保护、栖息地保护、娱乐等生态环境需水的出现,加剧了对流域水资源系统的压力。为了有效地管理流域水资源,不仅要满足各种用水户的需水量要求,还要关注水中的各种成分是否满足使用要求和循环利用要求,因此,当代流域水资源管理要求在流域时空维上有效分配水资源的量和质。但在历史上的水资源管理决策中,往往只考虑了水量的分配而忽视了水质要求,违背了水量和水质不可分离的特性,因此决策方案不能满足当代流域用水户的需求^[1],需要通过有效的模型方法来集成水量和水质变量。

一些研究者已经认识到有效的水资源规划管理必须集成考虑水量和水质要素^[2,3]。从 20 世纪 80 年代以来,出现了集成水量水质模型的规划管理研究。从建模方法分类有静态和动态的、确定和随机的、单

目标和多目标的、经济和工程管理的优化、模拟模型和决策支持系统,包含流域水资源开发、水资源系统调度、水资源规划管理方面的内容。随着计算机技术的发展,特别是面向对象的、视窗界面的、灵活易用的水量水质软件的出现和发展(如:水量模型系统 MODSIM 和 MIKE,一般系统动力学软件 STELLA,水质模型 QUAL 和 WASP),使得大范围的时空尺度、多水源水质的高维、多变量的战略性水资源规划成为可能。通过对水量水质模型进行适当改造和连接,可实现水量水质优化结果的可视化和自动化^[4,6]。

本文按模型的分类总结了目前国内外流域水量水质集成模型研究的相关进展,并分析了水量水质耦合变量的解耦技术,展望了水量水质集成模型在流域水资源管理中的应用前景。

1 流域水资源水量水质集成管理模型简介

流域水资源水量水质集成管理模型按模型分类

可以分为优化模型、模拟模型、优化和模拟相结合模型以及决策支持系统四大类。

优化模型的研究中,在供水方面,Liang等^[7]研究了不同水质的水井供水的联合调度问题;Mehrez等^[8]发展了一种考虑水量和水质的非线性规划模型,研究多水质、多水源的区域水资源供给系统,包括水库和地下井、输水管网和闸门调度规则。在水库优化调度方面,Hayes等^[9]为了满足水库下游水质目标,集成了水量水质和发电的优化调度模型,探讨了Cumberland流域中水库日调度规则;张玉新等^[10]应用多目标规划方法,建立了水库水沙联合调度的多目标动态规划模型,并提出了三阶段逐次迭代求解非劣解集的算法,为协调水库排沙与兴利之间的矛盾提供了可行的途径。在流域水资源规划方面,Avogadro等^[11]建立了考虑水质约束的水资源规划决策程序过程,第一阶段先不考虑水质因素,建立水量多目标规划模型来分配水量,第二阶段将水量结果输入水质模型中考察分配结果是否满足流域时空水质目标,采取从提高污染物的去除水平到增加约束条件的方法来重新求解水量模型;Cai等^[12]研究了以灌溉为主的流域中,水量的分配和灌溉引起盐碱化的环境问题,集成了流域水文、水质、农业和经济模型,并通过大系统的分解协调技术求解,分析了多方案情景下,研究区的经济和环境的响应情况;李大勇等^[13]利用感潮河网水量和水质数学模型,对调水方案实施后主要监测断面的水质进行预测,分析了各个监测断面调水后的水质变化趋势,提出综合整治张家港地区水环境的最佳方案;尹明万等^[14]研究了多水源、多工程、多传输系统的复杂水资源系统的生活、生产和生态需水配置模型,在约束条件中考虑了河道水质和生态需水水质要求。

模拟模型研究中,李考真等^[15]以徒骇河聊城段为例,建立水量平衡方程和混合单元水质模型,比较了引黄河水的水质水量联合调度最佳方式。Willey等^[5]描述了HEC-5Q模型的发展历史和数学模型,考虑在洪水控制、水电、河道内流量和水质控制目标下,水库下泄水对下游的水质影响。Campbell等^[16]利用水量模型MODSIM和水质模型HEC-5Q,设定各种情景方案,根据MODSIM的水量优化结果,代入水质模型,研究满足鱼类生长繁殖的水量水质需求。Azevedo等^[17]利用了网络流优化模拟模型MODSIM与水质模型QUAL2E,考虑了模型参数的时空变量不确定性和资料的缺乏,建立水量水质集成评价指标,采用多准则评价法来获得流域水资源配置的满意方案。

模拟模型与优化模型相结合的研究中,Campbell

等^[18]用模拟模型和线性优化模型研究三角洲地区地表水和地下水的分配系统,在控制海水入侵和农业面源污水的盐分浓度目标下,探讨了地下、地表引水混合稀释方法对源水水质的净化作用规律。Loftis等^[19]使用水资源模拟模型和优化模型方法研究了综合考虑水量水质目标下的湖泊水资源调度方法。Dai等^[20]发展了网络流优化模拟模型MODSIM(QMODSIM网络流模拟模型与水质模型QUAL2E的集成),其中水质变量作为约束条件,从而构成了高度非线性优化模型。其求解过程先松弛水质变量,并采用Frank-Wolfe非线性求解方法求解水量全局最优点,然后输入水质模型中,重复迭代直到水质变量不再改变为止。

水量水质联合调度决策支持系统方面,Pingry等^[21]研究了科罗拉多流域上游主干河流,在水量配置和污染物处理水平都是变量的情况下,如何在水资源配置规划和水污染处理规划方面取得平衡的问题,通过建立水量平衡模型和水盐模型的决策支持系统探讨水资源供给费用和水污染处理费用之间的利益权衡问题。

2 流域水资源水量水质集成管理模型的求解方法

优化模型的目标函数可以有以下几种:①满足所有用水户需水目标;②最小的费用;③最佳的生态经济净效益。约束条件主要分为5类:①水文约束条件,主要有河流水量平衡约束、水库水量平衡约束、节点水量上下限约束;②物理约束条件,有储水、抽水和配水能力等物理工程条件限制;③水资源管理制度约束条件,有用水权约束和生态、生活、生产用水优先性约束;④水质约束条件,其中的水质模型可以是一、二、三维的恒定或非恒定流模型;⑤生态环境需水约束条件,包括生态功能、环境功能、生物功能对水资源的需求等。

面对以上多变量、高维、非线性的优化或模拟模型的求解,其难点就是存在水量水质的非线性耦合项,它们可能出现在目标函数或约束条件中。下面以水量水质耦合项出现在目标函数中的情况为例说明。目标函数为最大化经济净效益:

$$\max Z_j = \sum_{i=0}^i (B_{ij}Q_{ij} - C_{ij}Q_{ij} - C_{pj}W_{dj}) \quad (1)$$

式中: Z_j 为 j 节点断面用水净效益,元; B_{ij} 为 j 节点第 i 种用水效益系数; Q_{ij} 为 j 节点第 i 种用水量, 10^4 m^3 ; C_{ij} 为 j 节点第 i 种用水取水费用,元; C_{pj} 为 j 节点单位污染物处理费用,元; W_{dj} 为考虑上游断面输入污染物的背景浓度和满足断面水质控制目标的水环境容量后, j 节点断面进入河流之前污染物所

需的削减总量 kg_0

假定在单一河段中水量是沿程不变的, W_{dj} 由河流一维稳态地表水水质模型求解:

$$W_{dj} = C_{0i}Q_0\exp(-K_iX/u) + w_j\exp(-K_ix/u) - C_{si}Q_s \quad (2)$$

其中

$$u = \alpha Q_s^\beta \quad (3)$$

式中: i 为污染物种类; C_{si} 为控制断面水质目标, mg/L ; Q_s 为控制断面流量, m^3/s ; C_{0i} 为上断面污染物浓度, mg/L ; Q_0 为上断面流量, m^3/s ; K_i 为污染物降解系数, $1/d$; X 为河段长度, km ; u 为设计流速, m/s ; w_j 为 j 节点的污染物排放量, kg ; x 为排污口到下断面的距离, km ; α, β 为经验数据; 其他符号意义同前。从公式(2)和公式(3)可看出, 存在非线性的水量水质耦合项。

2.1 直接求解法

对于有约束的非线性规划问题, 已经开发出许多有效算法, 如罚函数方法、广义简约梯度法 (GRG)、序列二次规划法 (SQP) 等。特别是序列二次规划法在工程领域的大规模优化问题求解中获得了许多成功的应用。但是, 上述方法都是基于梯度寻优的思想, 要求目标函数和约束条件连续、可微, 且往往只能得到局部极值; 当需要求解的问题较为复杂, 决策变量和状态变量较大时, 易发生所谓的“维数灾”问题。

近年来出现的人工智能算法如人工神经网络、遗传算法、模拟退火算法等^[22], 这些方法从随机开始搜索, 覆盖面大, 利于全局择优。

2.2 大系统分解协调算法

对水量水质耦合变量进行解耦, 通过关联预估法或关联平衡法来迭代求解^[23]。将原模型分为只包含水量变量的水量子系统和只包含水质变量的水质子系统, 计算水量优化配置结果, 在协调级模块中比较净效益的大小, 迭代求水量水质的最优协调解。具体计算流程如图1所示。图中 Z 为研究区断面水资源利用净效益; Z_1 为水量子系统效益; Z_2 为水质子系统效益; λ_1 为水量影子价格; Q 为水量变量; λ_2 为水质影子价格; q 为水质变量。

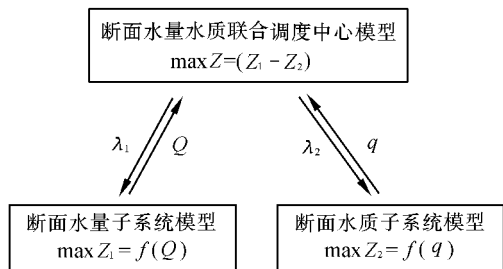


图1 水量水质集成模型的二级递阶结构

2.3 逐步优化法

求解技术是通过建立水量水质变量的优化模型并对它逐步求解来实现的, 通过确定目标或约束条件与水量水质变量之间的函数关系, 水量水质耦合变量可能出现在目标函数或约束条件中。由水量变量 Q 和水质变量 q 构成的水量水质优化模型为

$$\begin{cases} \max f(Q, q) \\ \text{s.t.} & g_1(Q) \leq 0 \\ & g_2(q) \leq 0 \\ & g_3(Q, q) \leq 0 \\ & Q_l \leq Q \leq Q_u \\ & q_l \leq q \leq q_u \end{cases} \quad (4)$$

式中: Q, q 为水量、水质决策向量; g_1, g_2, g_3 为线性约束条件; Q_u, Q_l, q_u, q_l 为向量的上下限。

根据公式(4), 可以从两个方面来求解: ①先固定水质, 求水量; ②先固定水量, 求水质。定义 Q_0 为 Q 的已知初始值, Q_n^* 为 Q 的第 n 次优化求解值; q_0 为 q 的已知初始值, q_n^* 为 q 的第 n 次优化求解值。

第一步: 根据经验先假设水质的初始值, 则模型可以化繁为简, 在固定水质变量 q_0 的前提下, 首先求水量决策向量 Q 的第一次最优解, 即求解:

$$\begin{cases} \max Z = f(Q, q_0) \\ \text{s.t.} & g_1(Q) \leq 0 \\ & g_3(Q, q_0) \leq 0 \\ & Q_l \leq Q \leq Q_u \end{cases} \quad (5)$$

其最优解为 Q_1^* , 并得到目标函数值 $Z_{(1)}$ 。

第二步: 在公式(5)求解的基础上, 固定水量向量 Q_1^* , 求水质决策向量 q 的最优解, 即求解公式(6)得到水质的第一次最优解 q_1^* , 并同时得到目标函数值 $Z_{(2)}$ 。

$$\begin{cases} \max Z = f(Q_1^*, q) \\ \text{s.t.} & g_2(q) \leq 0 \\ & g_3(Q_1^*, q) \leq 0 \\ & q_l \leq q \leq q_u \end{cases} \quad (6)$$

第三步: 比较 $Z_{(2)}$ 和 $Z_{(1)}$ 的大小, 其值若小于 ϵ , 则迭代停止, 获得最优解; 否则重复步骤一和步骤二, 直至公式(7)成立, 则原优化问题的最优解被解出。

$$Z_{(n)} - Z_{(n-1)} \leq \epsilon \quad (7)$$

式中 ϵ 为事前设定的任意小的数。

同样, 在第一步中先假设水量的初始值 Q_0 , 求水质的优化值, 然后, 根据水质优化值, 再求解水量优化值的原理同上。

2.4 情景优选法

情景优选法利用水量水质模拟模型与多目标决策分析相结合来寻求满意解,在建立了面向对象、可视化的水量模拟和水质模拟模型的基础上,通过情景分析设定相关方案集,通过方案集的模型输入,求得水量水质时空分布结果,在此基础上,利用多人多准则决策理论和水量水质集成评价指标体系来评价各种方案集的优劣,从中获得各方满意的方案。具体过程如图2所示。

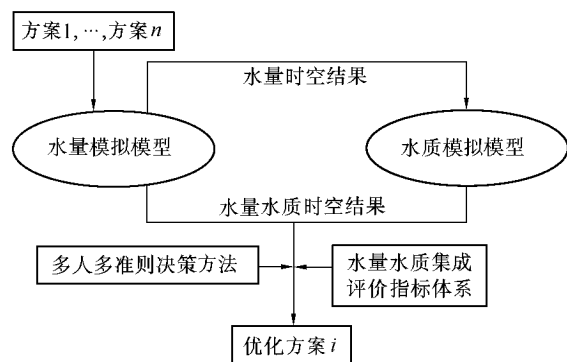


图2 情景优选法解耦水量水质集成模型

3 流域水资源水量水质集成管理模型的应用展望

3.1 流域水资源优化配置研究

过去在水量较为充足的条件下,水质问题未引起人们的重视,以流域水循环为基础的配置模式主要考虑水量在流域的时间、空间变异规律,以及满足生产、生活用水对水量的需求。随着人类活动对水资源系统的压力不断增加,非常规水的利用和生态需水的出现,水质问题已成为流域水资源配置中不可忽视的重要因素,因此研究不同水量水质的供水源在生产、生活、生态需水等多用户的水量水质需求之间的协调平衡,成为当代水资源管理规划的主要特征。目前急需开展相应的实例研究,并比较传统的将水量与水质分开考虑的调度方法与考虑水量水质联合调度前后的经济、社会和环境效益差别。

3.2 流域生态需水计算研究

在生态需水研究中,为维护水生态环境质量不至于进一步恶化或者有所改进,需要具有一定水量和水质特征的生态环境需水量,生态环境需水量计算方法有水量平衡法、换水周期法、最小水位法和功能法^[24]。从水量角度出发计算生态需水量,强调的是量的概念,未考虑水量和水质之间存在一定程度的可替代性,即当水量较少时,对污染物排放要求就高些,当水量较多时,稀释自净能力增加,对污染物排放的要求就低些。因此笔者认为在计算生态需水量时可以考虑水量水质集成模型的解耦,分为两种方式:①先固定水质,求水量,即先根据研究区污染

物排放和处理水平,确定最终进入水体的污染物质,根据不同的污染物处理水平来确定所需的不同等级的生态环境需水量;②先固定水量,求水质,即首先假定水质满足水体使用用途的前提下,保证水体具有一定流速和流量,并满足不同等级生物栖息地要求的需水量,然后将水量作为外部变量输入水质模型中,求得为满足水质控制目标所必需的污染物总量控制,保证水体水质满足其生态功能需求。通过以上两种方法寻求最优的水量水质协调解。

3.3 流域水资源冲突协调应用研究

世界淡水资源与政治边界的不相匹配,同时水资源在空间和时间上的不均匀分布是引起水资源冲突的两个重要因素。水资源中的水量和水质的统一性,决定了水资源冲突中的水量和水质冲突以及它们之间的协同作用,但是目前的水资源冲突研究主要从水量短缺的冲突出发,对水量进行了优化配置而未考虑水污染因素的影响。而水污染物的总量控制,是在假定不同频率设计流量的基础上进行污染物最大允许排放量和削减量的计算,其模型不能对水量进行优化调度。跨界水量短缺和水质污染并存的水资源冲突,需要集成以上两种模型来解决水量短缺和水污染的冲突^[25]。因此水量水质的联合调度技术在水资源冲突协调方法研究中可以得到充分的应用。

参考文献:

- [1] WHIPPLE W, Jr. Integration of water resources planning and environmental regulation[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(3): 189-196.
- [2] WHIPPLE W, Jr. Policy issues concerning water quality/quantity[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1980, 106(1): 71-79.
- [3] 王同生, 朱威. 流域分质水资源量的供需平衡[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(4): 1-3.
- [4] JHA M K, GUPTA A D. Application of mike basin for water management strategies in a watershed[J]. Water International, 2003, 28(1): 27-35.
- [5] WILLEY R G, SMITH D J, DUKE J H. Modeling water-resource systems for water-quality management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1996, 122(3): 171-179.
- [6] LABADIE J W. Optimal operation of multi-reservoir systems: state-of-the-art review[J]. Journal of Water Resource Planning and Management, 2004, 130(2): 93-111.
- [7] LIANG Tinhua, NNAJI S. Managing water quality by mixing water from different sources[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1983, 109(1): 48-57.
- [8] MEHREZ A, PERCIA C, ORON G. Optimal operation of a multi-source and multi-quality regional water system[J]. Water Resource Research, 1992, 28(5): 1199-1206.

(下转第86页)

Engineering :Vol.1. Stockholm [s.n.] ,1981 41-46.

[22] BOLTON M D ,ENGLISH R ,HIRD C C ,et al. Ground displacements in centrifugal models[C]//ISSMFE. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering :Vol.1. Moscow [s.n.] ,1973 65-70.

[23] TSAI J S. Stability of weak sublayers in a slurry supported trench[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1997 ,34(2) :189-196.

[24] TSAI J S ,CHANG C C ,JOU L D. Lateral extrusion analysis of sandwiched weak soil in slurry trench[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ,1998 ,124(11) :1082-1090.

[25] HOSOI T. Increase in pore water pressure during excavation [G]//BALASUBRAMANISA A S ,BERGADO D T. Proceedings of Geotech-Year 2000 ,Developments in Geotechnical Engineering :Vol.1. Bangkok ,Thailand [s.n.] 2000 243-252.

[26] WASHBOURNE J. The stability of vertical shaft excavations [J]. Ground Engineering ,the Magazine of the British Geotechnical Association ,1985 ,18(5) :16 ,18-19.

[27] TAMANO T ,NGUYEN H Q ,KANAOKA M ,et al. Deformation and failure of slurry trench in reclaimed soft clay :numerical analysis[C]//LEUNG C F ,PHOON K K ,CHOW Y K ,et al. Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering :Vol. 1. Singapore : World Scientific Publishing 2003 825-828.

[28] 姜朋明 ,胡中雄 ,刘建航. 地下连续墙槽壁稳定性的时空效应分析[J]. 岩土工程学报 ,1999 21(3) 338-342.

[29] WASHBOURNE J. The three-dimensional stability analysis of diaphragm wall excavations[J]. Ground Engineering ,the Magazine of the British Geotechnical Association ,1984 ,17(4) 24-26 28-29.

[30] OBLOZINSKY P ,UGAI K ,KATAGIRI M ,et al. 3D FE analysis on slurry trench stability and active earth pressure[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema 2001 :1527-1530.

[31] ISHII T ,KATAGIRI M ,SAITOH K ,et al. Modeling of sandy ground for the stability analysis of slurry trench[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema 2001 :1579-1582.

[32] TSAI J S ,CHANG J C. Three-dimensional stability analysis for slurry-filled trench wall in cohesionless soil[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1996 ,33(5) 798-808.

[33] LYAMIN A V ,SLOAN S W. Stability analysis of circular and square excavations[G]//IACMAG. Computer Methods and Advances in Geomechanics. Rotterdam :Balkema ,2001 :1583-1587.

[34] BRITTO A M ,KUSAKABE O. On the stability of supported excavations[J]. Canadian Geotechnical Journal ,1984 ,21(2) :338-348.

(收稿日期 2004-10-08 编辑 熊水斌)

(上接第 76 页)

[9] HAYES D F ,LABADIE J W ,SANDERS T G. Enhancing water quality in hydropower system operations[J]. Water Resources Research ,1998 ,34(3) 471-483.

[10] 张玉新 ,冯尚友. 水库水沙联调的多目标规划模型及其应用研究[J]. 水利学报 ,1988(9) :19-26.

[11] AVOGADRO E ,MINCIARDI R ,PAOLUCCI M. A decisional procedure for water resources planning taking into account water quality constraints[J]. European Journal of Operational Research ,1997 ,102 320-334.

[12] CAI Ximing ,MCKINNEY D C ,LASDON L S. Integrated hydrologic-agronomic-economic model for river basin management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management 2003 ,129(1) 4-17.

[13] 李大勇 ,刘凌 ,董增川 ,等. 改善张家港地区水环境引水方案的对比研究[J]. 水利水电科技进展 ,2004 ,24(6) :17-20.

[14] 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[J]. 水利水电科技进展 ,2004 ,24(2) 5-8.

[15] 李考真 ,任淑梅. 地表水水量水质联合调度研究 :以徒骇河聊城段为例[J]. 聊城师院学报 ,1999 ,18(2) 72-76.

[16] CAMPBELL S G ,HANNA R B ,SCOTT J F. Modeling Klamath river system operations for quantity and quality[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2001 ,127(5) :284-294.

[17] AZEVEDO L G T ,FONTANE D G ,LABADIE J W. Integration of water resource quantity and quality in strategic river basin planning[J]. Journal of Water Resources Planning and Management 2000 ,126(2) 85-97.

[18] CAMPBELL J E ,BRIGGS D A ,DETON R A. Water quality operation with a blending reservoir and variable sources[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2002 ,128(4) 288-302.

[19] LOFTIS B ,LABADIE J W ,FONTANE D G. Optimal operation of a system of lakes for quality and quantity[G]//TORNO H C. Computer Applications in Water Resources. New York : ASCE ,1989 693-702.

[20] DAI Twei ,LABADIE J W. River basin network model for integrated water quantity/quality management[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,2001 ,127(5) :295-305.

[21] PINGRY D E ,SHAFTEL T L ,BOLES K E. Role for decision-support systems in water-delivery design[J]. Journal of Water Resources Planning and Management ,1990 ,116(6) 629-644.

[22] 施光燕 ,董加礼. 最优化方法[M]. 北京 :高等教育出版社 2003.

[23] HAIMES Y Y. 水资源系统分析[M]. 陈益秋 ,译. 北京 :中国环境问题研究会 ,1981.

[24] 杨志峰 ,崔保山 ,刘静玲 ,等. 生态环境需水量理论、方法与实践[M]. 北京 :科学出版社 2003.

[25] 杨志峰 ,曾勇. 跨边界区域水资源冲突与协调模型与应用(I) 模型体系[J]. 环境科学学报 2004 ,24(1) 71-76.

(收稿日期 2005-01-13 编辑 熊水斌)