

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.03.003

基于生态的城市河流水量水质联合调度模型

宋刚福^{1,2}, 沈冰¹

(1. 西安理工大学西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710048;

2. 华北水利水电学院环境与市政工程学院, 河南 郑州 450011)

摘要: 针对城市河流河道淤堵、过流能力下降、水质恶化、生态环境破坏等问题, 根据城市河流的基本特点和功能, 从满足城市河流生态需水量出发, 建立了基于生态的城市河流水量水质联合调度模型。模型中水流运动方程和水质模型分别采用圣维南方程和一维对流扩散模型, 并分别采用 Perissmann 四点隐式离散法和有限控制体积显式算法进行求解。将该模型应用于郑州市七里河水系的闸坝生态调度, 分析不引用黄河水和引用黄河水 2 种方案下生态需水量调度效果。计算结果表明, 在引用黄河水量的情况下, 河道生态需水量能基本满足要求, 而在不引黄河水的情况下, 其生态需水量无法满足要求。基于生态的城市河流水量水质联合调度模型可为城市河流水量水质联合调度方案的制订、河流生态修复提供技术支持。

关键词: 城市河流; 生态需水量; 水量水质联合调度模型

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2012)03-0258-06

An ecology-based water quantity and quality combined operation model for urban rivers

SONG Gang-fu^{1,2}, SHEN Bing¹

(1. Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of Ministry of Education, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Institute of Environmental and Municipal Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450011, China)

Abstract: In order to solve problems including the river siltation, the decrease of carrying capacity, the deterioration of water quality, and eco-environmental disruption in urban rivers, an ecology-based water quantity and quality combined operation model, which was expected to meet the ecological water demand of urban rivers, was established based on the characteristics and functions of the rivers. In this model, the Saint-Venant equation and one-dimensional convection-diffusion model were chosen as the water flow equation and water quality model, respectively, and they were solved by the Perissmann implicit four-point discrete method and the finite control volume explicit algorithm. The model was applied to the ecological operation of the dam in the Qilihe river system in Zhengzhou City, and the effects of operation with and without water diversion from the Yellow River were analyzed. The results show that the ecological water demand of the rivers can be basically satisfied when the water was diverted from the Yellow River, while it cannot be satisfied without water diversion from the Yellow River. The proposed model can provide technical support for formulation of the scheme of water quantity and quality combined operation for urban rivers, as well as for ecological rehabilitation of rivers.

Key words: urban river; ecological water demand; water quantity and quality combined operation model

城市河流作为城市的重要资源 and 环境载体, 具有供应水源、防洪排涝、景观娱乐、交通运输、文化教育、维护生物多样性等各项生态功能, 特别是在城市生态化成为城市建设主流的今天, 在其生态建设过程中, 城市

河流显示出不可替代的作用^[1]。然而,随着城市规模的不断扩张和人类活动的不断干预,许多城市河流正面临着河道淤堵、河流过流能力下降、水体污染、水质恶化、生态环境破坏等问题。开展基于生态的城市河流水量水质联合调度研究,具有一定的实践意义。目前,许多水资源研究工作者在水量水质联合调度方面做了大量的工作。夏军等^[2-3]分别针对地表来水、用水状况和功能区划对水资源进行量质评价;左其亭等^[4]提出了“多箱模型方法”(multi-box modeling),建立陆面水量-水质-生态耦合系统模型,并应用于新疆博斯腾湖流域;吴浩云^[5]将水量水质联合调度模型应用到大型平原河网地区进行水量水质联合调度;张永勇等^[6]以淮河流域 SWAT 水文模型和相邻闸坝间的水量水质模型为基础,分析了沙颍河闸坝开启时污染水体下泄对淮河干流下游水质的影响;刘玉年等^[7]针对淮河中游的特点,建立淮河中游水量水质联合调度模型;张松达等^[8]针对水库群河网系统中水量水质的联合调配问题,以水库群联合调度的大系统分解-协调模型为基础,综合考虑河网环境需水量和供水水质的不同要求,建立了水库群-河网水资源联合调配模型。这些研究为合理进行水量水质调度奠定了一定的理论基础,但很少以维持城市河流生态健康为目标开展水量水质联合调度的研究。本文根据城市河流的基本特点和功能,从满足城市河流生态需水量出发,综合考虑水量、水质两方面,建立了城市河流水量水质联合调度模型。通过模型计算分析利用闸坝调控引水,更换或稀释城市河流水体,改善城市河流水环境,使其不断满足城市河流生态健康需要的方法,进而验证模型的合理性。

1 基于生态的城市河流水量水质联合调度模型

1.1 城市河流生态需水量

城市河流不同于自然河流,它具有明显的人工干扰特点,主要表现在:(a)城市河流是城市生产和生活的就近水源;(b)城市河流由于人工控制设施众多,大部分靠人工引水满足生态环境需水量要求;(c)城市河流被人为地渠化,使水泥护堤隔断了原有的河道与河岸系统;(d)城市河流堤岸中基本上是人工种植的植物,其水生生物和岸边植被的物种数也有所下降;(e)城市河流污染,水质恶化,河流生态环境遭到破坏;(f)城市河流的污染物种类基本相同,都是居民的生活污水和工业废水,污染因子基本上都是氨氮、COD 和 BOD。

城市河流生态需水量是在城市水量水动力欠佳、水质较差的情况下,以确保河道功能区划目标得以实现为前提,为保护河流的生物多样性,维持基本环境功能所需要的流量。其特点是河流的稀释和自净需水量相当大,河网中大多数河流流量过程由人工调控。城市河流生态需水量主要包括:维持水生生物生存需水量、河流稀释自净需水量、维持岸边植物生长需水量、河流蒸发及渗漏需水量、景观效应需水量等^[9-10]。为了便于理解和操作,常将河流生态需水量划分为最小生态需水量、适宜生态需水量和最佳生态需水量,其计算方法包括:Tennant 法、月(年)保证率法、河道湿周法、R2CROSS 法、理论和经验公式法等。

1.2 河流水量模型

1.2.1 基本方程

描述河道水流运动的基本方程是圣维南方程组,它由连续方程和动量方程组成^[11]。

连续方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial Z}{\partial t} = q \tag{1}$$

动量方程:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\alpha Qu) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = qv_x \tag{2}$$

式中: x ——距离, m ; t ——时间, s ; A ——主槽过水断面面积, m^2 ; B ——调蓄宽度, m ; Q ——断面流量, m^3/s ; u ——断面流速, m/s ; Z ——断面水位, m ; α ——动量修正系数; g ——重力加速度; K ——流量模数, m^3/s ; q ——旁侧入流量,入流为正,出流为负, m^3/s ; v_x ——入流沿水流方向的速度,若旁侧入流垂直于主流,则 $v_x = 0$, m/s 。

1.2.2 数值求解

基于圣维南方程组的一维非恒定流模拟,本文采用 Perissmann 四点隐式离散方法对基本方程进行离散,这是因为该算法数值稳定、守恒性好,且可显式无迭代求解计算效率高。离散后,对公式简化可得任何一段河道水流连续方程和动量方程(式中 $v_x = 0$)^[11]:

$$Q_{i+1} - Q_i + C_i Z_{i+1} + C_i Z_i = D_i \tag{3}$$

$$E_i Q_i + G_i Q_{i+1} + F_i Z_{i+1} - F_i Z_i = \Phi_i \tag{4}$$

式中系数均可根据前一时段已知值及选定的时间和空间步长计算,所以方程组为常系数线性方程组.对于该方程组,根据不同的边界条件,可设不同的递推关系,用追赶法直接求解.对于城市环形河网数值求解,本文采用河道—节点—河道的三级解法,具体算法见文献[12].

1.2.3 节点连结条件

河网节点分为两类:(a)节点处有较大的蓄水面积,节点水位变化产生的蓄水量的变化不可忽略,为调蓄节点;(b)节点处的水量调蓄面积较小,水位变化产生的节点蓄水量变化可忽略,为无调蓄节点.

对于调蓄节点:

$$\sum_{j=1}^m Q_{ij} = A_i \frac{dZ_i}{dt} \quad (5)$$

对于无调蓄节点:

$$\sum_{j=1}^m Q_{ij} = 0 \quad (6)$$

式中: Q_{ij} ——河道 j 汇入节点 i 的流量 m^3/s ; A_i ——节点 i 的蓄水面积 m^2 ; Z_i ——节点 i 的水位 m ; m ——汇入节点 i 的河道数.

能量守恒条件:由于汇集于同一节点各河道断面水位相差不大,不存在水位突变,且水位变化缓慢,因此节点能量守恒条件——伯努里方程,可近似概化为

$$Z_i = Z_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

1.2.4 边界条件

河道的边界条件一般有3种:水位边界条件,即在边界河道上已知水位与时间的关系 $Z = Z(t)$;流量边界条件, $Q = Q(t)$;水位流量关系条件,当边界河道上有水工建筑物(如水闸、堤坝、堰)时,通常给定水位流量关系 $Q = Q(z)$.边界条件由实测边界断面水位资料求得.

1.2.5 闸坝控制计算模式

闸坝控制计算模式由调度规则和河段控制方程组成,具体构成如下:首先将闸上和闸下分别设置上下2个节点,则节点之间成为闸坝调度计算河段;再将闸坝泄流方程改写成河网河段控制方程形式,这样就能将闸坝控制河段的计算模式与河网的计算模式隐式联解.根据闸上和闸下过流量相等,即 $Q_1 = Q_n$,采用伯努里能量方程计算闸坝控制的河段方程,则有

$$\alpha_n = \frac{Q - \beta Z_1}{Z_n} \frac{|Q_1|}{2gA_1^2} \quad \alpha_1 = \frac{Q - \eta Z_n}{Z_1} \frac{|Q_n|}{2gA_n^2} \quad (8)$$

其中

$$\beta = - \frac{2gA_1^2}{|Q_1|} \quad \eta = - \frac{2gA_n^2}{|Q_n|}$$

式中: Z_1 ——闸上水位 m ; Z_n ——闸下水位 m ; Q_1 ——闸上过流量 m^3/s ; Q_n ——闸下过流量 m^3/s ; A_1 ——闸上过水断面面积 m^2 ; A_n ——闸下过水断面面积 m^2 .

1.3 河流水质模型

城市河流水质呈非稳态不均匀变化,受水质观测资料的限制,本文采用一维河流水质模型.

1.3.1 基本方程

一维对流扩散模型的基本偏微分方程式:

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} = \bar{D} \frac{\partial^2 \bar{c}}{\partial x^2} + \sum S_{\text{ext}} + \sum S_{\text{int}} \quad (9)$$

式中: $\bar{c}$ ——断面平均污染物质量浓度 mg/L ; $\bar{u}$ ——断面平均纵向流速 m/s ; $\bar{D}$ ——纵向离散系数 m^2/s ; S_{ext} ——外部源汇项; S_{int} ——内部源汇项,即降解项,一般假定降解符合一级动力反应,则

$$\sum S_{\text{int}} = -kc$$

式中 k 为综合一级动力学反应速度 $1/\text{d}$.

1.3.2 污染物河流节点平衡方程

根据质量守恒原理,节点水量及污染物质量为

$$W = \sum_i Q_i \tag{10}$$

$$M = \sum_i Q_i C_i = C_i A_i \frac{dZ}{dt} \tag{11}$$

式中： W ——河道汇入节点水量， m^3 ； M ——节点污染物质量， mg ； C_i ——节点污染物质量浓度， mg/L ； Ω ——节点水面面积， m^2 。对于无调蓄作用的节点，对节点浓度有贡献的是进入节点的水量和物质浓度，与流出的水量和物质浓度无关。在节点经过充分混合后，节点质量浓度为 $C_n = M/W$ ，也是流出节点进入河段的水质浓度。

1.3.3 离散方程

河流污染物质对流离散方程采用有限控制体积显式算法，进行逐微段污染物质质量平衡计算和节点污染物质质量平衡计算。离散方程如下：

$$\frac{(AC)_i^{n+1} - (AC)_i^n}{\Delta t} \Delta X_i = (QC)_{i+1/2}^{n+1} - (QC)_{i+1/2}^n + \left(AD \frac{\partial C}{\partial x}\right)_{i+1/2}^n - KC_i^n \Delta X_i \tag{12}$$

$$\sum_{i=1}^{NL} (QC)_{i,j} = (C\Omega)_j \left(\frac{dZ}{dt}\right)_j \tag{13}$$

式中 NL 为流入节点的河段编号。

1.4 水量、水质模型的耦合技术

将描述河流水体物理特征的水量模型与反映河流生态环境要素变化的水质模型耦合，可以对河流生态系统要素进行模拟和预测。在水量、水质模型的耦合中，水量模型提供水质计算所需的流速、流量、断面过水面积、槽蓄量等水力参数。水量模型与水质模型在耦合时，计算单元和时间步长必须是相匹配的，即模型单元要一致。对于一维河网，水质模型中微河段由水量模型中相邻微断面组成，每个水质模型单元体积的交界面与水量模型中的断面对应。水质模型在每一个单元体积中计算水质浓度，在连接单元的交界面上计算水质输运率。

2 模型算例

2.1 河流概况

郑州市七里河位于郑州市区东部，属贾鲁河水系，发源于新郑小桥乡楚家脑村东，向北经穆庄汇入东风渠，是典型的城市河流。全长 44.1 km，流域面积 741.0 km^2 ，其上游称为十七里河、十八里河，流域内河道坡降上陡下缓，上段为 1/500，下段为 1/1 500。十七里河上建有橡胶坝 4 座，十八里河上建有后胡水库和刘湾水库，并有橡胶坝 5 座。供水水源为邙山提灌站的引黄水量，为 1 577 万 m^3/a 。近几年，随着郑州市城市化进程的不断加快，七里河水系生态用水缺乏，导致河流水体污染严重、生态功能退化等水源性和水质性缺水问题日益凸显。

2.2 模型建立

2.2.1 节点概化

七里河水系概化节点如图 1 所示。

2.2.2 河流生态需水量

根据《郑州市生态水系规划》的要求，结合郑州市水系基本资料，本文分别采用 Tennant 法、理论公式法和经验公式法计算七里河河流生态需水量（各方法的计算原理和步骤见文献 [10]），生态需水量计算结果如表 1 所示。

2.2.3 模型验证

七里河流量和氨氮质量浓度的模拟值和实测值如图 2 所示。从图 2 可知，流量和氨氮的实测值和模拟值变化趋势比较接近。其中流量实测值和模拟值，除了 4 月和 8 月相对误差分别为 28.9% 和 40.9% 外，其他时段相对误差均在 25% 以内；氨氮的实测值和模拟值，除了 4 月、8 月和 10 月相对误差分别为 - 28.9% ，

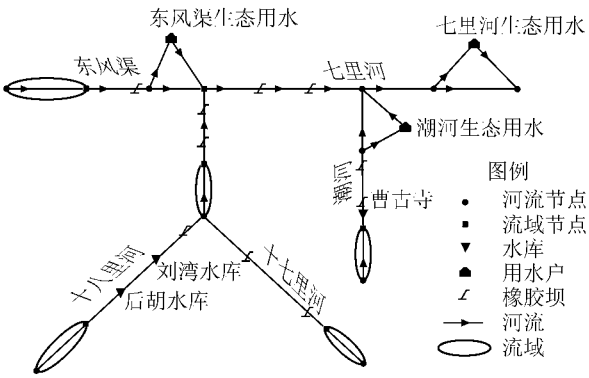


图 1 七里河水系概化节点

Fig. 1 Nodes of Qilihe river system in general graph

表 1 七里河水系河流生态流量推荐值

Table 1 Recommended ecological quantity of Qilihe river systemr system

河流名称	枯水期生态流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)			丰水期生态流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)		
	最佳	适宜	最小	最佳	适宜	最小
七里河	3.16 ~ 5.07	1.73	0.78	3.16 ~ 5.07	2.68	1.73
东风渠	0.58 ~ 0.92	0.33	0.16	0.58 ~ 0.92	0.50	0.33
潮河	0.73 ~ 1.16	0.40	0.19	0.73 ~ 1.16	0.62	0.40

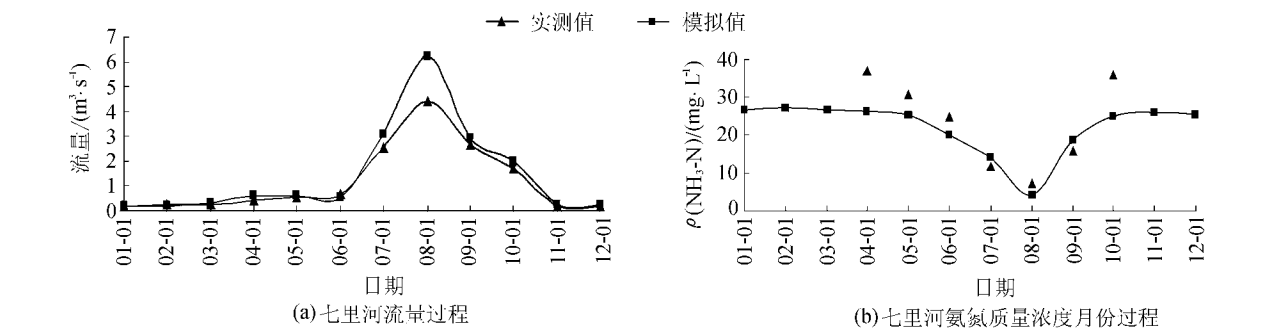


图 2 模型验证结果

Fig. 2 Model validation results

- 43.1% 和 - 30.6% 外 ,其他时段相对误差均在 25% 以内. 模拟结果表明模型可靠.

2.3 调度效果分析

针对郑州市水资源特点和七里河河道基本状况 根据本文建立的水量水质联合调度模型 ,以河道的综合缺水量最小、河道水质改善程度最大、研究区防洪安全影响最小为目标函数进行水量水质联合调度. 没有引用黄河水和引用黄河水情况下的调度结果见图 3 ~ 5.

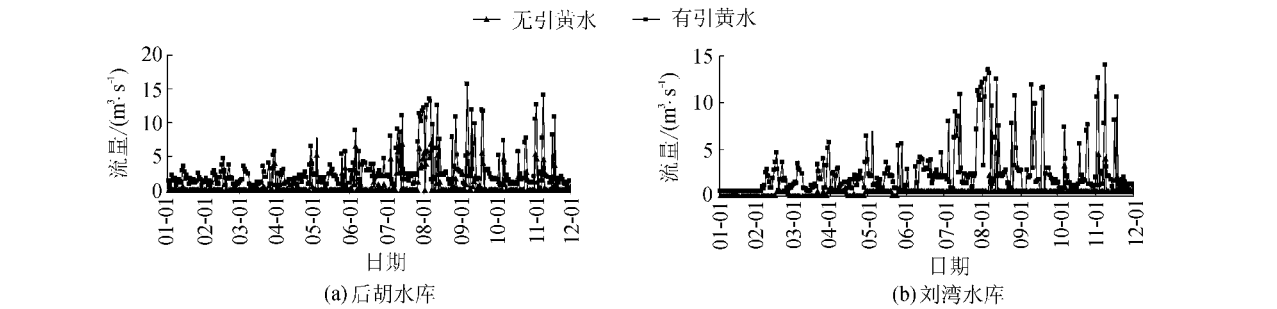


图 3 各水库入库流量过程

Fig. 3 Inflow of reservoirs

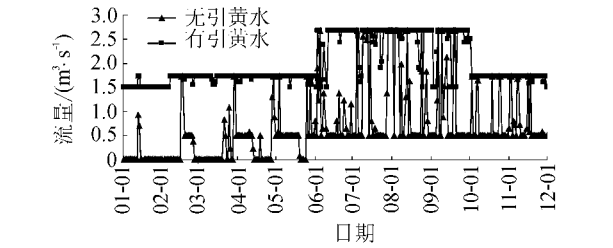


图 4 七里河生态供水过程

Fig. 4 Ecological water supply process in Qilihe River

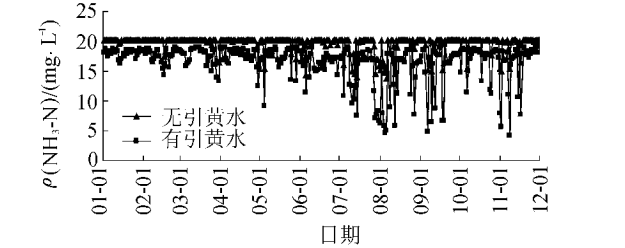


图 5 七里河 NH₃-N 质量浓度变化过程

Fig. 5 Change of NH₃-N concentration in Qilihe River

由计算结果可见 ,完全依靠降雨的入河水量难以保证七里河生态需水量. 七里河上游是十七里河和十八里河 ,十七里河没有水库 ,十八里河上有后胡和刘湾 2 个水库. 通过 2 个水库的调节 ,尤其是后胡水库的调节 ,在汛期过后七里河最小河道基本流量能够得到保证. 按照河道适宜性生态需水量考虑 ,在没有引黄水量的情况下 ,河道生态供水保证率为 10.1% ;在有引黄供水的情况下 ,河道生态供水保证率为 72.4% ,七里河

生态需水量基本能够得到满足.然而通过计算发现,在非汛期没有引黄水量时,可能出现无水可供的情况,进而不能满足其生态基本流量需求,可见在非汛期要解决河道生态需水量问题,必须寻找适宜水源为河道调水.

3 结 语

面对城市河流过流能力下降、水体污染、水质恶化、生态环境受到破坏的状况,借鉴已有的有关水量水质联合调度研究,结合城市河流的基本特点和功能,在对城市河流生态需水量进行计算的基础上,以满足城市河流生态需水量作为水量水质调度的具体目标,建立水量水质联合调度模型,并应用到郑州市典型城市河流——七里河进行验证.结果表明,利用该模型进行闸坝调控引水,其计算结果合理,可为城市河流水量水质联合调度方案的制订、修复河流生态现状提供技术支持.

参考文献:

- [1] 阎水玉,王祥荣.城市河流在城市生态建设中的意义和应用方法[J].城市环境与城市生态,1999,12(6):36-38.(YAN Shui-yu, WANG Xiang-rong. Significance and approaches of urban rivers in urban ecological construction[J]. Urban Environment and Ecology, 1999, 12(6): 36-38. (in Chinese))
- [2] 夏军,王渺林,王中根,等.针对水功能区划水质目标的可用水资源量联合评估方法[J].自然资源学报,2005,20(5):752-760.(XIA Jun, WANG Miao-lin, WANG Zhong-gen, et al. An integrated assessment method of water quality and quantity applied to evaluation of available water resource[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 752-760. (in Chinese))
- [3] 夏军,王中根,严冬,等.针对地表来用水状况的水量水质联合评价方法[J].自然资源学报,2006,21(1):146-153.(XIA Jun, WANG Zhong-gen, YAN Dong, et al. An integrated assessment method of water quality and quantity applied to evaluation of available water resource[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 146-153. (in Chinese))
- [4] 左其亭,夏军,陆面水量-水质-生态耦合系统模型研究[J].水利学报,2002(2):61-65.(ZUO Qi-ting, XIA Jun. Study on the modeling method of water quantity-water quality-ecology coupling system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(2): 61-65. (in Chinese))
- [5] 吴浩云.大型平原河网地区水量水质耦合模拟及联合调度研究[D].南京:河海大学,2006.
- [6] 张永勇,夏军,王纲胜,等.淮河流域闸坝联合调度对河流水质影响分析[J].武汉大学学报:工学版,2007,40(4):31-35.(ZHANG Yong-yong, XIA Jun, WANG Gang-sheng, et al. Research on influence of dams' union dispatch on water quality in Huaihe River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 31-35. (in Chinese))
- [7] 刘玉年,施勇,程绪水,等.淮河中游水量水质联合调度模型研究[J].水科学进展,2009,20(2):177-183.(LIU Yu-nian, SHI Yong, CHENG Xu-shui, et al. Union dispatch model for water quality and quantity in the middle reaches in Huaihe River[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 177-183. (in Chinese))
- [8] 张松达,苏飞,夏梦河.考虑水质的水资源调配模型及其解法[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(6):620-624.(ZHANG Song-da, SU Fei, XIA Meng-he. Water resources allocation and operation model considering water quality demand and its solution[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(6): 620-624. (in Chinese))
- [9] 田英,杨志峰,刘静玲,等.城市生态环境需水量研究[J].环境科学报,2003,23(1):100-106.(TIAN Ying, YANG Zhi-feng, LIU Jing-ling, et al. Preliminary study on urban eco-environmental water requirements[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2003, 23(1): 100-106. (in Chinese))
- [10] 赵长森,刘昌明,夏军,等.闸坝河流河道内生态需水研究——以淮河为例[J].自然资源学报,2008,23(3):400-411.(ZHAO Chang-sen, LIU Chang-ming, XIA Jun, et al. Instream ecological flow of dammed river-a case study of Huaihe River[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(3): 400-411. (in Chinese))
- [11] 汪德.计算水力学理论与应用[M].南京:河海大学出版社,1989:4-115.
- [12] 张二骏,张东生,李挺.河网非恒定流三级联合解法[J].华东水利学院学报,1982(1):1-13.(ZHANG Er-jun, ZHANG Dong-sheng, LI Ting. Three-level combined solution to unstable flow issue of river networks[J]. Journal of East China Technical University of Water Resources Engineering, 1982(1): 1-13. (in Chinese))