

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.011

基于 QUAL2K 模型的秦淮河水质优化方案

杨 乐¹, 钱 钧², 吴玉柏^{1,3}, 金 秋³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210001;
3. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017)

摘要:根据秦淮河水情水质特点, 结合 QUAL2K 水质综合评价模型, 选取 DO、NH₃-N、COD 作为模拟因子, 在汛期与非汛期, 分别对南河莲花闸及象房村泵站是否开闸引水两种工况进行模拟和参数率定, 构建秦淮河水质优化管理模型。结果表明: 在南河、内秦淮河泵站引水的情况下, 汛期引水量为 40 m³/s 时基本满足 V 类水标准, 非汛期引水量为 60 ~ 70 m³/s 时全段达到 V 类水标准, 其中秦淮新河段达到 IV 类水标准; 在南河、内秦淮河泵站(含闸段)均不引水的情况下, 汛期长江自流流量为 30 m³/s 时能达到 V 类水标准, 非汛期当抽水站抽水流量为 40 ~ 50 m³/s 时达到全段 V 类水标准, 其中秦淮新河段水质达到 IV 水标准。

关键词:QUAL2K 模型; 水质模拟; 参数率定; 优化方案; 秦淮河

中图分类号: X522 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2013)03-0051-05

Water quality optimization scheme for Qinhuai River based on QUAL2K model

YANG Le¹, QIAN Jun², WU Yubai^{1,3}, JIN Qiu³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Qinhuai River Water Conservancy Project Management Office in Jiangsu Province, Nanjing 210001, China;
3. Jiangsu Water Conservancy Research Institute, Nanjing 210017, China)

Abstract: With the aim of constructing a water quality optimization model for the Qinhuai River, based on the characteristics of the water regime and water quality of the river, the QUAL2K water quality evaluation model was used to simulate the operation process of the Lianhua Sluice on the Nanhe River and the pumping station of the Xiangfang Village under conditions of opening and not opening sluices in flood and non-flood seasons. The model's parameters were calibrated, with DO, NH₃-N, and COD used as the simulating factors. The following conclusions can be drawn: With water diversion to the Nanhe River and the internal Qinhuai River, the water quality of the Qinhuai River can reach the grade V standard when the volume of water diversion reaches 40 m³/s in the flood season and 60 to 70 m³/s in the non-flood season, and the water quality of the new reach of the Qinhuai River can even reach the grade IV standard in the non-flood season. Without water diversion to the Nanhe River and the internal Qinhuai River, the water quality of the Qinhuai River can reach the grade V standard in the flood season when the flow rate from the Yangtze River reaches 30 m³/s, and the water quality of the Qinhuai River can also reach the grade V standard in the non-flood season, with the water quality of the new reach of the Qinhuai River reaching the grade IV standard, when the pumping rates at the pumping stations on the Nanhe River and the internal Qinhuai River reach 40 to 50 m³/s.

Key words: QUAL2K model; water quality simulation; parameter calibration; optimization scheme; Qinhuai River

水质模型是模拟污染物在水环境中变化规律及其水质组分之间相互关系的数学模型, 是水环境污
染治理规划研究决策的重要工具之一^[1]。在国外, QUAL2K 模型作为一种综合水质模型在水质模拟方

基金项目: 江苏省水利科技重点项目(2010047)
作者简介: 杨乐(1988—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水资源优化及水环境。E-mail: 303108249@qq.com
通信作者: 吴玉柏, 教授级高级工程师。E-mail: wybai@163.com

面已经得到了广泛的应用^[24],而国内学者在最近几年才有所涉及与应用^[5-9]。

秦淮河全长约 110 km,有 2 000 多年历史,是条历史名河。秦淮河有南北二源,南源出自溧水县东庐山北,北源出自句容市宝华山西南,两源在江宁区的西北村附近交汇形成秦淮河干流。近十几年来,随着南京市经济社会的不断发展,处于城区的外秦淮河受污染日趋严重。为改善外秦淮河水质,2005 年南京市政府启动了外秦淮河引江调水工程。调水工程以长江为调水水源,通过秦淮新河水利枢纽工程将清洁的长江水调入秦淮新河,再经武定门闸调控引入外秦淮河,最终水流从三汊河闸入长江。现行调水方案由于部分河段水质资料缺乏,计算单元步长过大,尤其未考虑模拟南河莲花闸及内秦淮河象房村泵站的补水情况,与实际调水工况不符,导致现状调水方案的精度有待提高。笔者应用 QUAL2K 模型,依据权威部门提供、自身实测采集的资料在多工况下模拟秦淮河水质,并提出相应的调水方案。

1 秦淮河水质优化管理模型

1.1 模型基本方程

QUAL2K 模型的基本方程^[10]是一维平流-扩散物质迁移方程,该方程考虑了平流扩散、稀释、水质组分自身反应、水质组分间的相互作用以及组分的外部源和汇对组分浓度的影响。对于任意一种水质组分,可得:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial x} = E_x \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{d\rho}{dt} + \frac{S}{V} \quad (1)$$

式中: ρ 为水质组分质量浓度,mg/L; x 为计算单元的步长,m; t 为时间,s; u 为流速,m/s; E_x 为河流纵向弥散系数,m²/s; S 为组分外部的输入和输出的物质质量浓度,mg/L; V 为计算单元的体积,m³。

由于 $d\rho/dt$ 为水质指标 ρ 的质量浓度函数,不妨设 $d\rho/dt = k\rho$,并采用有限差分法求其数值解^[11]。其有限差分方程分解如下:

令 $x_i = i\Delta x, t_j = j\Delta t, k_i = k\Delta t, \rho(x_i, t_j) = \rho_{j,i}$,其中 $i = 0, 1, 2, \dots, n$ (n 为河段概化后计算单元数), $j = 1, 2, \dots, m$ (j 为抽水时间,d)。

$$\text{则有} \quad \frac{\partial \rho_i}{\partial t} = \frac{\rho_{j+1,i} - \rho_{j,i}}{\Delta t} \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial x} = \frac{\rho_{j,i} - \rho_{j,i-1}}{\Delta x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 \rho_i}{\partial x^2} = \frac{\rho_{j,i} - 2\rho_{j,i-1} + \rho_{j,i-2}}{\Delta x^2} \quad (4)$$

将式(2)、(3)、(4)代入式(1),可得

$$\frac{\rho_{j+1,i} - \rho_{j,i}}{\Delta t} = E_{xi} \frac{\rho_{j,i} - 2\rho_{j,i-1} + \rho_{j,i-2}}{\Delta x^2} -$$

$$u_i \frac{\rho_{j,i} - \rho_{j,i-1}}{\Delta x} + k_i \rho_{j,i} + \frac{S}{V} \quad (5)$$

式(5)变换后得到

$$\rho_{j+1,i} = \rho_{j,i-2} \Delta t \frac{E_{xi}}{\Delta x^2} + \rho_{j,i-1} \Delta t \left(\frac{u_i}{\Delta x} - 2 \frac{E_{xi}}{\Delta x^2} \right) + \rho_{j,i} \Delta t \left(1 + k_i + \frac{E_{xi}}{\Delta x^2} - \frac{u_i}{\Delta x} \right) + \Delta t \frac{S}{V} \quad (6)$$

当 $i=1$ 时,令 $\rho_{j,-1} = \rho_{j,0}, \rho_{0,i} = 0$ ($\rho_{j,0}$ 是边界初始条件),此时式(6)中的 $E_{xi}, u_i, k_i, S, A, V$ 均为已知初始条件和边界条件,即可求出在不同时段以及不同距离点处污染物的浓度变化情况。

1.2 河网的概化

利用 QUAL2K 模型,首先将模拟河道划分为一系列恒定非均匀流河段,再将每个河段划分为若干等长的计算单元。同一河段具有相同的水力、水质特性和参数,不同河段的水力、水质特性则各不相同。

笔者以秦淮河流域水系、江苏省水文局对流域历年监测资料以及调查所得工业、生活污染点源排放情况等资料作为主要划分依据。主要根据支流汇入对流域控制单元进行划分,将研究区水系分为 5 个河段,第 1 河段为秦淮新河闸至河定桥,分为 10 段,每段长 1.5 km,标号为(1~10),总长为 15 km;第 2 河段为河定桥至友谊河支流汇入口,分为 6 段,每段长 1.4 km,标号为(12~16, 21),总长为 8.4 km;第 3 河段为友谊河汇入口至武定门节制闸,分为 3 段,标号为(22,23,26),每段长 1 km,总长为 3 km;第 4 河段为武定门节制闸至南河凤台桥汇入口段,分为 3 段,每段长 1.2 km,标号为(27,28,35),总长为 3.6 km;第 5 河段为南河凤台桥汇入口至三汊河河口,分为 5 段,每段长 1.5 km,标号为(36,41~44),总长为 7.5 km。单元划分见图 1。

1.3 参数率定

1.3.1 水质参数

1.3.1.1 复氧系数 K_a 的确定

复氧系数 K_a 主要根据河流深度、温度及风速确定,依据江苏省秦淮河水利工程管理处与南京市水文局提供的水文资料,选取 O' Connor-Dobbins 公式进行计算^[12]:

$$K_{a(20)} = K_{ah(20)} + \frac{K_{LW(20)}}{H} \quad (7)$$

$$K_{ah(20)} = 3.93 \frac{u^{0.5}}{H^{1.5}} \quad (8)$$

式中: $K_{ah(20)}$ 为河流在其水力特性下 20 ℃ 时的复氧系数; $K_{LW(20)}$ 为基于风速的复氧传质系数; H 为河流平均深度,m。

各河段 K_a 计算结果如表 1 所示。

宽度)主要用于计算河流污染物在水体中的传输。QUAL2K 模型中,为便于模拟流量变化下的河流水文资料,采用流量系数法:

$$U = aQ^b \tag{16}$$

$$H = \alpha Q^\beta \tag{17}$$

$$A = \frac{Q}{U} \tag{18}$$

式中: U 为平均流速, m/s ; A 为截面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s ; α, β, a, b 为经验系数, 根据东山水文站多年实测水文特征月均值资料, 可求得 $a = 0.138, b = 0.183, \alpha = 0.269, \beta = 0.260$ 。

2 模拟结果分析及验证

以汛期长江和石臼湖自流引水量 $20 m^3/s$, 长江水源水质 II 类水、石臼湖水源水质 III 类水为条件, 根据历年水文、水质监测资料, 选取 DO 、 NH_3-N 、 COD 作为模拟因子对秦淮河水体水质进行模拟, 结果如图 2 所示。模拟结果表明, DO 质量浓度沿河段呈上升趋势, NH_3-N 、 COD 浓度沿河段呈下降趋势, 模拟值与实测值相比较相关性较强, 绝大部分河段模拟精度较高, 达到相对误差小于或等于 20% 的精度要求。

笔者采用的江苏省秦淮河水利工程管理处及南京市水文局的实测污染物排放资料, 涵盖了秦淮河的主要污染源。但从误差结果来看, 各模拟值均低于实测值, 而未出现偏高的现象。这可能是部分污染源资料不全所致。通过沿河调查发现, 在秦淮新河段上海梅山集团(南京)矿业有限公司附近、外秦淮河段中华门及草场门附近, 存在多处位于水面线以下的小型排污点。由于规模较小, 缺少排水量和污染物浓度资料, 模型中无法考虑, 导致模拟数值偏小。若能对之加以调查收集, 应可获得更好的模拟精度。

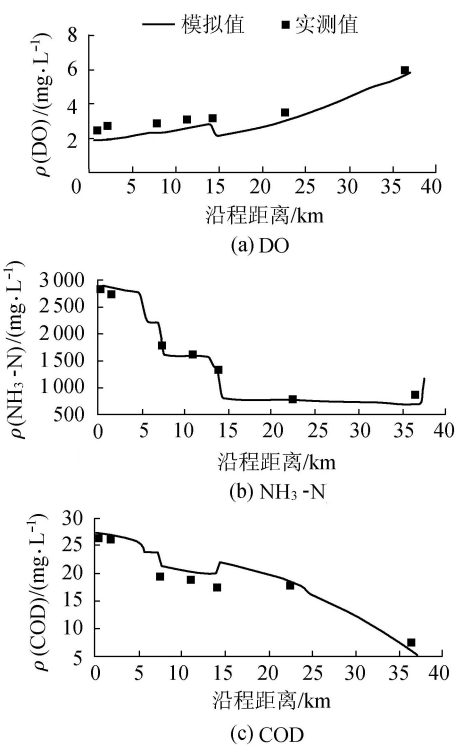


图 2 水质组分模拟值和实测值沿河段的变化
(注:横坐标 0 km 处为三汉河口闸,37.5 km 处为秦淮新河闸)

3 优化方案

基于各调水工况模拟及实测情况, 分析结果表明: 在南河、内秦淮河泵站引水的情况下, 汛期引水量 $40 m^3/s$ 时秦淮河水基本达到 V 类水标准, 非汛期引水量达到 $60 \sim 70 m^3/s$ 时全河段达到 V 类水标准, 其中秦淮新河段达到 IV 类水标准; 在南河、内秦淮河泵站(含闸段)均不引水的情况下, 汛期长江自流流量 $30 m^3/s$ 时秦淮河水达到 V 类水标准, 非汛期当抽水站抽水流量 $40 \sim 50 m^3/s$ 时全河段达到 V 类水标准, 其中秦淮新河段达到 IV 水标准。模拟结果如表 2 所示。

2012 年一季度长江水面与秦淮新河闸水位差均

表 2 不同工况下的水质组分情况

汛期(长江、石臼湖自流量均为 $20 m^3/s$)				非汛期(长江、石臼湖均无自流水)			
调水工况	水质组分	水质状况		调水工况	水质组分	水质状况	
		南河、内秦淮河引水	南河、内秦淮河不引水			南河、内秦淮河引水	南河、内秦淮河不引水
$Q = 30 m^3/s$	DO	满足 V 类水	满足 V 类水	$Q = 30 m^3/s$	DO	基本满足 V 类水	全段满足 V 类水
	NH_3-N	部分达标, 部分劣 V 类	基本满足 V 类水		NH_3-N	尾段劣 V 类水	满足 V 类水
	COD	部分达标, 部分劣 V 类	基本满足 V 类水		COD	尾段劣 V 类水	部分达标, 部分劣 V 类
$Q = 40 m^3/s$	DO	满足 V 类水	满足 V 类水	$Q = 50 m^3/s$	DO	满足 V 类水, 部分达到 IV 类	全段满足 V 类水
	NH_3-N	基本满足 V 类水	基本满足 V 类水		NH_3-N	部分达标, 尾段劣 V 类水	全段满足 V 类水
	COD	基本满足 V 类水	基本满足 V 类水		COD	部分达标, 尾段劣 V 类水	全段满足 V 类水
$Q = 50 m^3/s$	DO	满足 V 类水	满足 V 类水	$Q = 70 m^3/s$	DO	满足 V 类水, 部分达到 IV 类水	满足 V 类水, 部分达到 IV 类水
	NH_3-N	满足 V 类水, 部分达到 IV 类	满足 V 类水		NH_3-N	全段满足 V 类水	全段满足 V 类水
	COD	基本满足 V 类水	基本满足 V 类水		COD	基本满足 V 类水	全段满足 V 类水

大于 2.5 m,抽水费用为 0.11 元/m³;二、三季度水位差均小于 2.5 m,抽水费用为 0.095 元/m³;四季度水位差略大于 2.5 m,抽水费用为 0.098 元/m³。经计算,实际抽水成本为 2362.483 万元。在参照南河与内秦淮河实际开闸引水的情况下,非汛期引水量暂定为 50 m³/s,而汛期引水量为 35 m³/s,此时抽水成本为 2222.64 万元,比实际调水成本降低 5.92%。

4 结 语

研究运用 QUAL2K 模型实现对秦淮河水体的水质模拟,结果表明,模型模拟值与实测值之间的相关性较强,绝大部分河段模拟精度较高,达到相对误差小于或等于 20% 的精度要求,表明模型适用于秦淮河水质优化管理;经过方案比选,最优方案比实际运行方案减少了 5.92% 的费用。

参考文献:

[1] 洪继华. QUAL2E 模型在中小河流研究中的应用[J]. 环境科学与技术, 1998 (2): 5-7. (HONG Jihua. QUAL2E model in research on the application of medium and small rivers [J]. Environmental Science and Technology, 1998 (2): 5-7. (in Chinese))

[2] THOMPSON J R, SORENSON H R, GAVIN H, et al. Application of the coupled MIKE SHE and MIKE 11 modelling system to a lowland wet grassland in southeast England[J]. Journal of Hydrology, 2004, 293 (1/2/3/4): 151-179.

[3] BANWELL T O, BROWN L C, WHITEMORE R C. Importance of field data in stream water quality modeling using QUAL2E-UNCAS [J]. Journal of Environmental Engineering-ASCE, 2004, 130 (6): 643-647.

[4] WHITEHEAD P G, WILLIAMS R J, LEWIS D R. Quality simulation along river systems (QUASAR): model theory and development [J]. The Science of the Total Environment, 1997, 194: 447-456.

[5] 周华,王浩. 河流综合水质模型 QUAL2K 研究综述[J]. 水电能源科学, 2010, 28 (6): 22-24. (ZHOU Hua, WANG Hao. Review on the comprehensive stream water quality model QUAL2K [J]. Water Resources and Power, 2010, 28 (6): 22-24. (in Chinese))

[6] 方晓波,张建英. 陈伟,等. 基于 QUAL2K 模型的钱塘江流域安全纳污能力研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27 (8): 1402-1407. (FANG Xiaobo, ZHANG Jianying, CHEN Wei, et al, Assimilative capacity of the Qiantang River watershed based on a QUAL2K model [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27 (8): 1402-1407. (in Chinese))

[7] 郭永彬,王焰新. 汉江中下游水质模拟与预测: QUAL2K 模型的应用[J]. 安全与环境工程, 2003, 10 (1) 4-7.

(GUO Yongbin, WANG Yanxin. Hydrochemical modeling and prediction of the middle and lower reaches of Hanjiang River: application of QUAL2K model [J]. Safety and Environmental Engineering, 2003, 10 (1) 4-7. (in Chinese))

[8] 陈月,席北斗,何连生,等. QUAL2K 模型在西苕溪干流梅溪段水质模拟中的应用[J]. 环境工程学报, 2008, 2 (7): 1000-1004. (CHEN Yue, XI Beidou, HE Liansheng, et al. Application of QUAL2K model for prediction of water quality in West Shaoxi [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2 (7): 1000-1004. (in Chinese))

[9] 杨海林,杨顺生. 河流综合水质模型 QUAL2E 在河流水质模拟中的应用[J]. 云南环境科学, 2003, 22 (2): 22-25. (YANG Hailin, YANG Shunsheng. The Application of the QUAL2E model in the stream water quality simulation [J]. Yunnan Environmental Science, 2003, 22 (2): 22-25. (in Chinese))

[10] 方晓波. 钱塘江流域水环境承载能力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.

[11] 黄学平. 乐安河水环境容量与总量控制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2005

[12] 戴凌全,李华,陈小燕. QUAL2K 模型及其主要参数确定[J]. 灾害与防治工程, 2009 (2): 69-73. (DAI Lingquan, LI Hua, CHEN Xiaoyan. QUAL2K Model and its main parameters determine [J]. Disaster and Control Engineering, 2009 (2): 69-73. (in Chinese))

[13] CHAPRA S, PELLETIER G, TAO Hua. QUAL2K: a modeling framework for simulation river and stream water quality [R]. Medford: Civil and Environmental Engineering Department, Tufts Univ, 2008.

[14] 张婷婷. 岷江流域乐山市中区段水质模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.

[15] 童朝锋,岳亮亮,郝嘉凌,等. 南京市外秦淮河水质模拟及引调水效果[J]. 水资源保护, 2012, 28 (6): 49-54 (TONG Chaofeng, YUE Liangliang, HAO Jialing, et al. Water quality simulation and water diversion effect analysis of external Qinhuai River in Nanjing [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (6): 49-54 (in Chinese))

(收稿日期: 2013 - 03 - 25 编辑: 高渭文)

