

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20200400

基于 HEC-RAS 的梧桐山河流域水质模拟及应用

胡婷婷^{1,2}, 徐刚^{1,3}, 苏东旭⁴, 任艳⁵, 舒远丽¹, 王拓¹, 王琛倪¹

(1.三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2.水利部移民管理咨询中心,湖北 宜昌 443000;
3.水资源安全保障湖北省协同创新中心,湖北 武汉 430072;
4.深圳市深水水务咨询有限公司,广东 深圳 518000; 5.水电水利规划设计总院,北京 100120)

摘要:以深圳市梧桐山河流域为研究区域,基于 HEC-RAS 模型建立梧桐山河流域一维水动力水质模型。水动力模型最大相对误差 2.43%,水质模型最大相对误差 18.12%,模型模拟精度较高。利用该模型对河段水体中的污染物进行模拟,根据上游污染物浓度估算污染物扩散至下游断面的浓度及扩散时间,模拟调控上游水库的下泄流量来加大生态流量,从而达到控制污染物浓度的目的。

关键词:HEC-RAS;参数率定;水动力模拟;水质模拟;水污染事件

中图分类号:TV139.16

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2022)03-0037-06

0 引言

水质模型是一种用来模拟水体成分在循环过程中发生的物理化学或生物等方面变化的工具^[1]。水质模型发展的初期,典型的是美国环保局(USEPA)推出的 QUAL-I、QUAL-II 模型。在迅速发展阶段,出现了多维、多介质和形态等多种模拟类型,较为典型的有 WASP 水质模型^[2]。李云生^[3]等对美国应用较广泛的水质模型 QUAL2E、QUAL2K、WASP6 等进行了研究,以供我国开展容量总量控制借鉴。唐大元^[4]研究了 WASP 水质模型的发展,探讨了国内外 WASP 研究和应用工作的异同及发展趋势。

在各种水质模拟模型中,既能实现河网水动力模拟,又能实现水质模拟的包括 MIKE 11、HEC-RAS 等模型^[5],且 HEC-RAS 模型是开放的公共领域模型,因此广泛应用于水文及水动力学分析^[6-7]。李国华^[8]利用 HEC-RAS 软件模拟河道畅流期污染物浓度纵向沿程分布规律,研究表明可利用该软件对河流水质进行预测。尹海龙^[9]等基于 HEC-RAS 耦合降雨径流模块,建立了潮汐河网地区雨天河道水质控制目标的雨水截流

方案论证数学模型;KHATTAK^[10]等利用 HEC-RAS 结合 ArcGIS 在巴基斯坦喀布尔河段绘制洪泛区地图;王宇骏^[11]等运用 SWAT 和 HEC-RAS 模型,计算流溪河 COD 的天然及背景环境容量。

“一带一路”倡议中的 21 世纪海上丝绸之路枢纽城市——深圳,是我国最具经济活力的城市之一^[12]。本文以深圳市梧桐山河流域为研究区域,从上游横沥口水库至下游深圳水库,应用 HEC-RAS 构建流域水动力水质模型,对河段水体中的污染物进行水质模拟。根据上游污染物浓度估算污染物扩散至下游断面的浓度及扩散时间,以此为据,模拟调控上游水库的下泄流量来加大生态流量,从而达到控制污染物浓度的目的。可为水资源监测和管理提供决策参考,对确保取水安全有实际意义。

1 研究区域概况

梧桐山河发源于梧桐山北麓,东经 114°10'~114°13',北纬 22°34'~22°37',河道长度为 3.87 km,流域面积 12.53 km²,上游为横沥口水库,属小 2 型,下游与深圳水库相连,如图 1。

收稿日期:2020-10-06

网络首发日期:2022-06-01

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1814.p.20220530.1538.015.html>

基金项目:国家自然科学基金委重大研究计划资助项目(91647207)

作者简介:胡婷婷(1995—),女,土家族,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为水文水资源。E-mail:1439057207@qq.com

通信作者:徐刚(1974—),男,四川成都人,教授,主要研究方向为城市水务。E-mail:xugang@ctgu.edu.cn



图1 梧桐山河流域示意图

Fig.1 The Wutongshan River basin

河道防洪标准 50 年一遇,水质标准为 II 类。独特的地理位置与自然条件使其成为深圳市的重要水源保护区和生态保护区,保证了珠三角地区尤其是深圳地区的生态可持续发展。同时,下游深圳水库承担着供水功能,保障上游梧桐山河的水质安全就显得尤为关键。

2 HEC-RAS 水质模型

2.1 模型介绍

HEC-RAS 模型^[9-13]主要包括以下四个模块:水力分析模块、图形界面、图像和报告工具、数据存储和管理模块,该模型被广泛应用于流域水文水力计算、水面线计算、洪水调度、泥沙输移模拟以及水质分析等方面^[14-19]。

2.2 模型理论基础

2.2.1 水动力分析模型

HEC-RAS 河道水动力分析模块可计算恒定流和非恒定流两种情况,基本原理分别为:一维恒定流的分析采用能量方程式,其计算方法使用标准步推法;一维非恒定流的分析采用能量方程式和动量方程式相结合的方式,其离散方法采用有限差分法,计算方法采用 Newton-Raphson 迭代法^[7]。本文河道水动力分析模拟所采用的是一维非恒定流分析控制方程^[20]。

2.2.2 水质模型

水质分析模块包含 3 个功能:水质数据的输入和参数校准、水质分析以及水质结果的查询。该模块可以模拟水温、溶解有机磷、溶解的铵态氮和 COD 等水质因子的输移,也可以模拟任意自定义的成分。

水质模拟,需要收集流域完整的气象数据资料,该模型支持多个气象数据集,每个数据集都必须包含大气压、气温、湿度、太阳辐射、风速等天气信息^[9]。水质模型根据质量守恒原理建立河流一维水质迁移转化基本方程,其主要形式如下:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \sum S_i \quad (1)$$

式中: C (mg/L)为河段中某种污染物的浓度; t (d)为时间; x (km)为河水的流动距离; u (km/d)为河段水流的平均流速; E (km²/d)为河段水流的纵向离散系数;

$\sum S_i$ (mg/(L·d))为河段水体污染物的源汇项。

2.3 模型参数率定

对水动力模型和水质模型中的主要参数进行率定。由现场调查和用户手册中的推荐值来选择水动力模型糙率 n ,然后根据结果进行微调,确定河道糙率的率定结果为 0.035。离散系数 D 用于表示河流的纵向混合,受诸如河道断面形状、水文条件和河流条件等因素的影响。目前,离散系数主要采用经验估算,并根据用户手册中提供的费舍尔等式进行计算^[9],如下:

$$D = 0.011m \frac{u^2 w^2}{yu^*} \quad (2)$$

其中: $u^* = \sqrt{gds}$, $S = \left(\frac{un}{1.49R^{0.66}} \right)^2$

式中: m 为用户自定义乘数,一般取值为 1; y (m)为河道平均深度; u^* (m/s)为剪切流速; u (m/s)为河道断面平均流速; w (m)为河道平均宽度; d (m)为河道平均深度; S 为摩擦坡降; n 为糙率; R (m)为水力半径。

利用经验公式(2)估算,离散系数取值为 0.35。

2.4 模型定界条件

水动力模型和水质模型的定界条件,包括初始条件和边界条件。

根据河流长度,梧桐山河每间隔 100 m 划分一个断面,在弯道处增加断面,沿程共划分了 57 个计算断面。模型使用流量数据作为控制条件,河流的上边界使用断面号为 3800 的断面(即横沥口水库断面)作为上游入流断面,下边界使用断面号为 80 的断面(即深圳水库入库断面)作为下游出流断面(如图 2)。以流量过程线为上游边界条件,以 Normal Depth(正常水深)控制下游断面边界条件。初始条件采用静水启动,即初始流量设定为零。

水质边界条件包括 TP、NH₃-N 在横沥口水库的入流边界值。初始条件与水动力模型相同,初始时刻水质因子的浓度会对模拟的初始阶段产生一定的影响,但由于研究区域中水质因子的初始浓度数据资料不足,所以无法实现平衡处理。因此,本次模拟会考虑水质因子的特性,并将初始浓度值设置为零,即从静态开始^[9]。

2.5 模型建立

2.5.1 水动力模型的建立

通过模型对实测水位数据进行验证。输入河道地形几何资料、划分断面(如图 2、3)、输入边界条件及流量过程,模拟时间步长设置为 1d,模拟时段为 2019 年 7 月 31 日—2019 年 8 月 15 日。

选取 2019 年 8 月 1 日的水文实测值和模拟值进行对比验证,根据 7 月 31 日 17 时气象预报和雨量数据所做预报过程线如图 4 所示。同时根据 7 月 31 日 17 时预报的最大下泄流量调用水力学计算模型推求了梧桐山河河道断面沿程水位过程,如图 5 所示,与实测数据进行对比分析,模型模拟精度较高。其中最大相对误差位于梧桐山河彩虹桥下游断面(编号 1800),2019 年 8 月 1 日 10 时该断面实测水位 44.282 m,相应水力学模型推算河道水位 45.32 m,相对误差 2.43%。

误差分析表明,应用 HEC-RAS 软件对梧桐山流



图 2 梧桐山河断面图

Fig.2 Cross Section of Wutongshan River

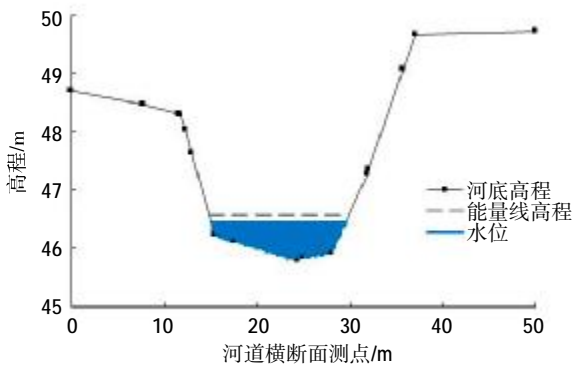


图 3 横断面示意图(编号 1800)

Fig.3 Sketch map at cross section 1800

域进行水动力模拟,模拟精度较高,可利用该模型对流域进行水质模拟。

2.5.2 水质模型的建立

在检验水动力模型模拟精度的基础上输入水质数据边界条件、气象资料,对梧桐山河水体中的主要水质因子 TP、NH₃-N 进行模拟,模拟时间步长设置为 1d。编号 3800 断面的 TP 与 NH₃-N 模拟结果分别如图 6~7 所示;模拟误差如表 1-2 所示。可知,相对误差最大为 18.12%,均值误差为 11.24%,模拟结果较好,水质模拟结果可靠。通过水动力学和水质模拟结果的误差分析可知,HEC-RAS 对水质模拟的精度高。

3 模型应用

突发性水污染事件会导致水质恶化,影响水资源的有效利用,对经济和社会正常活动产生严重影响,水生态环境受到严重危害。HEC-RAS 模型可以通过设置初始条件来模拟突发性水污染事件。本文利用构建的梧桐山河流域 HEC-RAS 水质模型进行突发水污染事件的计算,计算出上游污染物扩散至下游断面的时间及浓度,当河道发生污染物事件时,可通过模型计算结果调控上游横沥口水库的下泄量,以达到降低污染物浓度的目的。

3.1 水质预警

利用模型,在横沥口水库突发水质污染事件时,设置模型的初始条件进行模拟。水质模型的初始条件

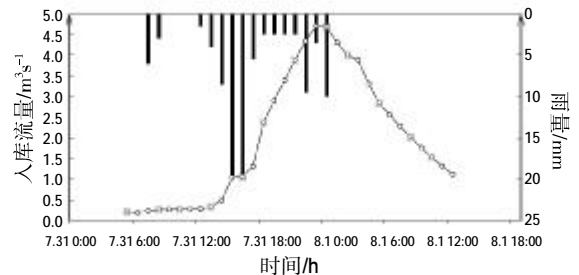


图 4 入库流量过程

Fig.4 The inflow process

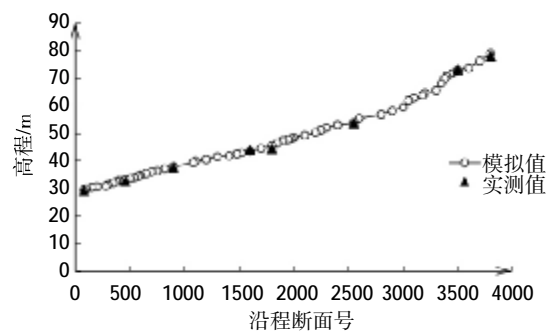


图 5 沿程水位过程线

Fig.5 Water level process along the way

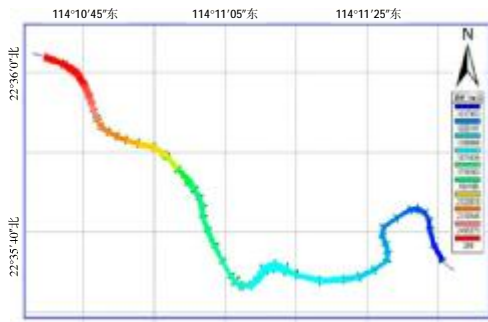


图 6 TP 水质空间模拟结果

Fig.6 Total phosphorus simulation results



图 7 NH₃-N 水质空间模拟结果

Fig.7 Simulation results of ammonia nitrogen

表1 NO.3800断面TP浓度对比结果

Table1 Comparative analysis of total phosphorus concentration at section 3800

时间	实测值/(mg/L)	模拟值/(mg/L)	相对误差
2019.8.2	0.24	0.217	9.58%
2019.8.5	0.04	0.033	17.50%
2019.8.10	0.16	0.158	0.64%
2019.8.12	0.34	0.330	2.94%

表2 NO.3800断面NH₃-N浓度对比结果

Table2 Comparative analysis of ammonia nitrogen concentration at section 3800

时间	实测值/(mg/L)	模拟值/(mg/L)	相对误差
2019.8.2	0.27	0.224	17.04%
2019.8.5	0.13	0.149	14.62%
2019.8.10	0.57	0.470	18.12%
2019.8.12	0.19	0.172	9.47%

为:2019年8月5日,3800断面污染物TP的浓度值设置为0.4 mg/L、NH₃-N的浓度值为2 mg/L。梧桐山河汛期正常流量为4.2 m³/s,因此水动力模型的初始条件:河道流量为4.2 m³/s,时间步长减小为15 s。经模型计算1800断面TP、NH₃-N浓度值随时间的预测结果如图8~9所示。

由图8~9可知,在上游横沥口水库发生污染后,1800断面TP、NH₃-N起始浓度分别为0.1 mg/L、0.5 mg/L,随着污染物逐渐向下游扩散,1800断面的浓度逐渐增大,至20分钟时达到峰值,TP、NH₃-N峰值浓度分别为0.35 mg/L、1.98 mg/L。伴随着模拟时间的延长,污染物浓度逐渐趋至初始值,1800断面TP、NH₃-N浓度分别降至0.1 mg/L、0.8 mg/L。计算结果表明,污染物扩散至下游约1小时。

3.2 水质调控

当上游发生浓度较高的水质污染事件时,由于河道长度不长,污染物扩散至下游后,污染物浓度依然较高。基于此种情况,可以通过设置水动力学模型的初始条件,模拟加大河道流量以达到稀释污染物浓度的目的。根据计算结果指导上游横沥口水库进行调控来加大生态流量,以稀释河道污染物浓度至出口断面时达到水质标准。

梧桐山河暴雨期间河道流量可达10 m³/s,模拟调控水库加大河道生态流量时,可将水动力模型的初始条件设置为:河道流量10 m³/s,其他边界及初始条件不变。经模型模拟计算,1800断面TP、NH₃-N浓度值随时间的预测结果如图10~11所示。

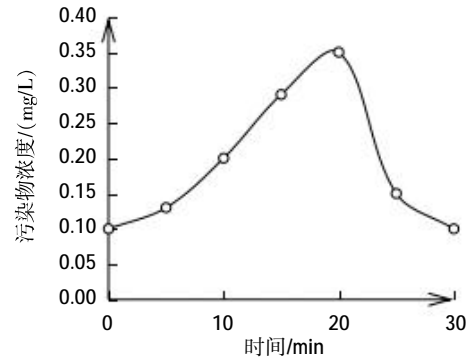


图8 NO.1800断面TP浓度

Fig.8 Total phosphorus concentration at section 1800

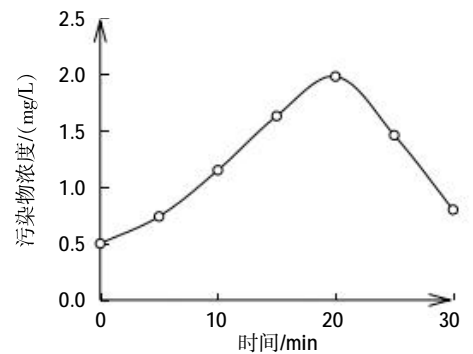


图9 NO.1800断面NH₃-N浓度

Fig.9 Ammonia nitrogen concentration at section 1800

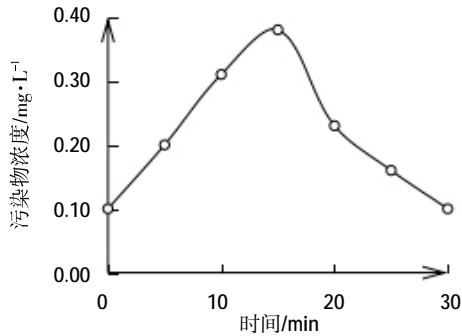


图 10 NO.1800 断面 TP 浓度

Fig.10 Total phosphorus concentration at section 1800

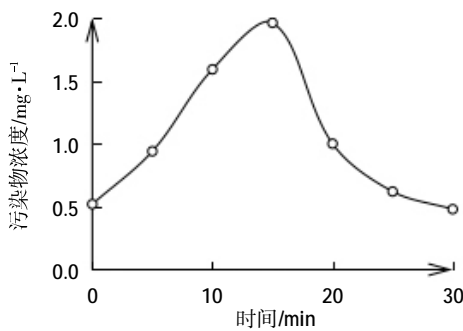


图 11 NO.1800 断面 NH₃-N 浓度

Fig.11 Ammonia nitrogen concentration at section 1800

由图 9~10 可知,调节河道生态流量后,1800 断面 TP、NH₃-N 起始浓度分别为 0.1 mg/L、0.5 mg/L,随着污染物逐渐向下游扩散,1800 断面的浓度逐渐增大,至 15 分钟时达到峰值,TP、NH₃-N 峰值浓度分别为 0.38 mg/L、1.96 mg/L。伴随着模拟时间的延长,污染物浓度逐渐趋至初始值,1800 断面 TP、NH₃-N 浓度分别降至 0.09 mg/L、0.48 mg/L。

由于流量的增加,污染物扩散速度加快(见表 3),污染物扩散至下游约 40 分钟。由此可知通过水库调控增大生态流量,可以稀释污染物浓度的同时也能加速污染物的扩散时间,对于梧桐山河可以缩短约 20 分钟。

表3 NO.1800断面调控前后污染物浓度情况

Table3 Pollutant concentration before and after the regulation at section 1800

时刻/min	NH ₃ -N/mg·L ⁻¹		TP/mg·L ⁻¹	
	正常流量	加大流量	正常流量	加大流量
0	0.5	0.52	0.1	0.1
5	0.74	0.94	0.13	0.2
10	1.15	1.59	0.2	0.31
15	1.63	1.96	0.29	0.38
20	1.98	1.0	0.35	0.23
25	1.46	0.62	0.15	0.16
30	0.8	0.48	0.1	0.09

4 结论

(1) 利用 HEC-RAS 软件对梧桐山河进行水动力分析,模拟河道水位、流量与实测数据吻合度较高,模型模拟结果较好。对梧桐山水体中的 TP、NH₃-N 进行水质模拟,模拟值和实测浓度值相差不大,模型模拟精度较高。

(2) 当上游发生污染物事件时,可利用 HEC-RAS 模型预判水质等级、推算出污染物扩散至下游时间及扩散至下游时的浓度,相关部门可根据根据计算结果进行水质等级的确定及预警,通过对横沥口水库进行调度,加大生态流量来稀释污染物浓度,使其在出口断面浓度达到规定标准。水动力与水质模型的耦合,为水资源监控和管理提供决策参考。

参考文献:

[1] DRAKE J, BRADFORD A, JOY D. Application of HEC-RAS 4.0 temperature model to estimate groundwater contributions to Swan Creek, Ontario, Canada [J]. Journal of Hydrology, 2010,389(3): 390-398.

[2] FAN C, KO C H, WANG W S. An innovative modeling approach using Qual2K and HEC-RAS integration to assess the impact of tidal effect on River Water quality simulation [J]. Journal of environmental management, 2009,90(5):1824-1832.

[3] 邹丽芬. 滨海平原河网水量水质联合调度研究[D]. 福州:福州大学, 2017. (ZHOU Lifen. Study on water quantity and quality integrated regulation of coastal plain river network [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017. (in Chinese))

[4] FU B H, MERRITT W S, CROKE B F W. A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects [J]. Environmental Modelling and Software, 2019,114:75-97.

[5] 李云生,刘伟江,吴悦颖,等. 美国水质模型研究进展综述[J]. 水利水电技术, 2006(2):68-73. (LI Yunsheng, LIU Weijiang, WU Yueying, et al. A review of progress in research on water quality models in America [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006(2):68-73. (in Chinese))

[6] 唐大元.WASP 水质模型国内外应用研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011,39(34):21265-21267. (TANG Dayuan. Research progress of the application of WASP water quality model in domestic and abroad [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011,39(34): 21265-21267. (in Chinese))

[7] 冯诗韵,王飞儿,俞洁. 基于 Matlab 软件自动化求取参数的 HEC-RAS 模型构建[J]. 环境科学学报, 2020,40(2):623-630. (FENG Shiyun, WANG Feier, YU Jie. A HEC-RAS model building with parameters automatically calibrated in Matlab [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020,40(2):423-630. (in Chinese))

[8] 李国华. 黄河托克托段水质现状评价及一维水质模拟[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018. (LI Guohua. Water quality assessment

- and I -D water quality model of Tuoketuo section of the Yellow River [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [9] 尹海龙,林夷媛,徐祖信,等. 潮汐河网地区雨天黑臭治理数学模型研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2020,35(1):113-121. (YIN Hailong, LIN Yiyuan, XU Zuxin, et al. Mathematical model for wet-weather black-odorous water bodies treatment in tidal river network [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2020,35(1):113-121. (in Chinese))
- [10] KHATTAK M S, ANWAR F, SAEED T U. Floodplain mapping using HEC-RAS and ArcGIS: A case study of Kabul River [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2016,4(41):1375-4390.
- [11] 王宇骏,蒋婧媛,董天明,等. 基于水环境数学模型的流溪河环境容量计算[J]. 环境监测管理与技术, 2015,27(6):17-21+47. (WANG Yujun, JIANG Jingyuan, DONG Tianming, et al. Calculation of water environmental capacity for Liuxi River based on environmental mathematical modeling [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2015,27(6):17-21+47. (in Chinese))
- [12] 申小艾,宁天竹,奚晓伟. 深圳市坪山河流域智慧水务建设方案研究[J]. 中国水利, 2018(5):50-54. (SHEN Xiaoi, NING Tianzhu, XI Xiaowei. Research on the construction scheme of smart water affairs in Pingshan River Basin of Shenzhen [J]. China Water Resources, 2018(5):50-54. (in Chinese))
- [13] 张昭,倪立萍,张晓鹏. HEC-RAS 在柳川河二期工程水力计算中的应用[J]. 水科学与工程技术, 2013(1):38-40. (ZHANG Zhao, NI Liping, ZHANG Xiaopeng. Application of Hec-Ras in Liuchuan River project phase II hydraulic computation [J]. Water Sciences and Engineering Technology, 2013(1):38-40. (in Chinese))
- [14] 陈建峰,王颖,李洋. HEC-RAS 模型在洪水模拟中的应用[J]. 东北水利水电, 2006(11):12-13. (CHEN Jianfeng, WANG Ying, LI Yang. Application of HEC-RAS model in simulation of flood [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2006(11):12-13. (in Chinese))
- [15] BRUNNER G W, WARNER J C, WOLFE B C, et al. HEC-RAS, River Analysis System. Applications Guide [Z]. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA, 2016.
- [16] 高亮. 基于 HEC-RAS 模型的惠济河开封段防洪除涝研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2013. (GAO Liang. Research on the flood control and waterlogged elimination of Huiji River in Kaifeng city based on HEC-RAS [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2013. (in Chinese))
- [17] 方圆皓,张行南,夏达忠. HEC-RAS 系列模型在洪水演进模拟中的应用研究[J]. 三峡大学学报, 2011,33(4):12-15. (FANG Yuanhao, ZHANG Xingnan, XIA Dazhong. Research on application of series of HEC-RAS model to flood routing simulation [J]. Journal of China Three Gorges University. (Natural Sciences), 2011,33(4):12-15. (in Chinese))
- [18] 董飞,刘晓波,彭文启,等. 水功能区水质响应系数计算研究[J]. 南水北调与水利科技, 2016,14(1):10-17. (DONG Fei, LIU Xiaobo, PENG Wenqi, et al. Calculating the water quality response coefficient of water functional zone [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016,14(1):10-17. (in Chinese))
- [19] 侯艳,王龙. HEC-RAS 在溢洪道水面线计算中的应用[J]. 云南水力发电, 2012,28(4):33-35,146. (HOU Yan, WANG Long. Application of HEC-RAS to calculation of water surface profile of a spillway [J]. Yunnan Water Power, 2012,28(4):33-35,146. (in Chinese))
- [20] Hydrologic Engineering Center. HEC-RAS user's Manual version 3.1 [Z]. US Army Corps of Engineers, Davis, CA, 2002.

Water Quality Simulation and Application of Wutongshan River Basin Based on HEC-RAS

HU Tingting^{1,2}, XU Gang^{1,3}, SU Dongxu⁴, REN Yan⁵, SHU Yuanli¹, WANG Tuo¹, WANG Chenni¹

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Immigration Management Consulting Center of the Ministry of Water Resources, Yichang 443000, China;

3. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;

4. Shenzhen Shenshui water Resources Consulting Co., Ltd, Shenzhen 518000, China;

5. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China)

Abstract: Taking the Wutongshan River basin in Shenzhen as the study area, a one-dimensional hydrodynamic water quality model of the Wutongshan River basin was established based on the HEC-RAS model. The maximum relative error of the hydrodynamic model is 2.43%, and the maximum relative error of the water quality model is 18.12%, of which the simulation results are good and reliable. Then the model was used to simulate the pollutants in the river. The concentration and diffusion time of pollutants to the downstream section were estimated according to the upstream pollutant concentration, which could regulate the discharge of the upstream reservoir to increase the ecological flow, so as to control the concentration of pollutants.

Keywords: HEC-RAS; parameter calibration; hydrodynamic simulation; water quality simulation; water pollution incident