

广州深隧技术专栏

水质模型在东濠涌深层隧道排水系统中的应用

李捷¹, 王宏利¹, 隋军², 王广华¹

(1. 广州市市政工程设计研究总院, 广东 广州 510060; 2. 广东首汇蓝天科技有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 介绍了广州东濠涌深层隧道水质模型的研究背景, 阐述了东濠涌深隧水质模型的构建过程, 并应用模型对东濠涌深层隧道的减排效能进行了多情景模拟及对应的河道水质情况预测, 对深层隧道的运行方案进行了评估和优化。

关键词: 深层隧道排水系统; 水质模型; 模型应用

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)08-0015-05

Application of Water Quality Model in Deep Tunnel Drainage of the Test Section Donghao Creek

LI Jie¹, WANG Hong-li¹, SUI Jun², WANG Guang-hua¹

(1. Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China;
2. Guangzhou Shouhui Lantian Engineering Technology Co. Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: The research background and the construction process of water quality model of Donghao Creek deep tunnel in Guangzhou was introduced. Three kinds application of the water quality model were illustrated. Firstly, a multi-scenario simulation was conducted for the performance of Donghao Creek deep tunnel on drainage reduction with this model. Then, the relative river water quality was predicted by the water quality model. Finally, the program of deep tunnels were evaluated and optimized based on the model.

Key words: deep tunnel drainage; water quality model; model application

东濠涌是广州市老城区一条重要的河涌, 兼具排涝和景观功能。东濠涌流域内城建密度高, 人口密度大, 地面硬化率高, 加之近年来极端暴雨频发, 流域内水浸内涝严重, 甚至出现河涌水位漫顶现象, 造成巨大的经济损失, 并且雨天溢流污染(CSO)严重, 致使河涌水体恶化, 影响河涌景观功能。

为有效解决东濠涌流域城市内涝问题、削减雨

天溢流污染, 自2012年起, 国内外专家对深层隧道排水系统进行了多次研究和论证。在此期间, 模型作为预测和评价的工具, 可以定量描述污染物的产生、转输、削减、排放等过程, 为方案的制定提供良好的数据支撑。以东濠涌深层隧道排水系统为例, 详细论述了排水系统水质模型的构建、参数的率定及其工程效果预评估和方案优化, 以期同类工程提

基金项目: 广州市净水公司污水治理建设项目

通信作者: 王广华 E-mail: 75302423@qq.com

供参考和借鉴。

1 水质模型简介

水质模型是根据物质守恒原理,采用计算机语言来描述水体中各种水质组分随时间和空间的变化而发生的物理、化学、生物以及各种生态变化,是反映水体中内在污染物质的迁移转化规律和相互关系的一种数学模型^[1]。

目前国外已经出现多个成熟的商业建模软件能够进行城市排水系统的水质模拟,其中 DHI 的 MIKE URBAN 软件整合了 ESRI 的 ArcGIS 以及排水管网模拟软件,形成了一套城市排水模拟系统,MIKE URBAN CS 采用了 DHI MOUSE 引擎,拥有强大计算稳定性和高效率,它的污染物传输模块能够模拟水中溶解物及管流中悬浮物的传输、扩散和浓度分布,可以模拟集水区的泥沙负荷和污染物负荷,同时可以模拟管网中的泥沙淤积和冲刷过程^[2]。

美国 Bentley 的 SewerGEMS 软件是一款适用于城市排水设计和排水运行管理的专业水力分析工具,可以输入各种污水荷载,包括用户自定义的水力特性曲线、污水特性曲线和单位排放荷载,能对溢流现象进行量化分析^[3]。英国 Wallingford 的 InfoWorks ICM 软件实现了城市排水管网系统模型与河道模型的整合,其水质模块能够分析溢流排放对河流环境的影响^[4]。此外,还有美国环保局的 QUAL2K、WASP6、BASINS、SWMM 等免费软件。总体来讲,上述软件所需基础数据、水质参数以及对污染物转化规律的描述有一定差异,其主要的应用领域和解决的问题也不尽相同。

综合以上各种软件的特点,并结合现有实际情况,本项目采用 InfoWorks ICM 软件构建了城市排水系统水质模型。

2 东濠涌深隧水质模型构建

2.1 东濠涌深层隧道排水区域概述

东濠涌深层排水隧道主要收集广州老城区的合流污水,该流域总人口为 93.34 万人,其服务范围总汇水面积为 1 247 hm²,地势总体上为由北向南倾斜。

流域排水体制为合流制排水系统,沿河涌两岸铺设截流式排水干渠。东濠涌深层隧道工程起点设置在绿化带内,沿市政道路下铺设外径为 6.0 m、长为 1.77 km 的隧道,终点建有深隧提升泵站,隧道起点标高为 -28.5 m,终点标高为 -31.6 m。工程

功能定位是对浅层排水系统和河涌系统进行补充和提升,缓解流域内涝,减少溢流污染量,提高系统的排水标准。

2.2 水质模型的构建

水质模型分为水动力模型部分和水质模型部分。水动力模型部分模拟水动力状况,水质模型部分模拟水质状况,这两部分是相互独立而又相互联系的子模型。

水质模型构建的基础是已建立的、精度达到应用水平的水力模型。在构建水质模型之前,东濠涌流域水力模型已使用实测的多场降雨量和管渠水量数据进行校核和验证,所构建的水力模型已满足以下要求:①积水模拟计算结果与现场历史水浸情况基本相符;②CSO 溢流模拟计算结果与溢流次数基本相符;③计算结果与现场实测流量、水位监测数据的变化趋势基本相符。

深层隧道在模型中以大口径圆管作为体现,与浅层排水系统通过闸门连接,在模型中通过设定闸门实时控制 RTC(Real Time Control)规则定义东濠涌深层隧道排水系统的边界条件,控制深层隧道的竖井的进水过程。

在模型构建过程中,按照排水管线走向及其收水范围,将研究片区划分为 10 个集水区,由于不同集水区的地块属性、产污特性不同,因此各集水区独立设置污染源的输入,模型中同时包含了生活污水污染源输入、地表径流污染源输入、点源污染源输入。

① 生活污水采用污水模式曲线来定义集水区人口所产生的污水流量、污染物的浓度和时间变化系数,其数值根据各监测点水质水量监测数据确定。

② 不同下垫面类型对应的地表沉积物累积速率典型值,道路、建筑屋面、水域、绿地、综合铺装依次为 20、10、0.5、12 kg/(hm²·d)。集水区沉积物综合增长因子见表 1。

表 1 集水区沉积物综合增长因子

Tab. 1 Integrated sediment growth factor in water shed

kg·hm⁻²·d⁻¹

集水区编号	D1	D2	D3	D4	D5
综合增长因子 P_s	10.34	11.19	12.17	7.65	12.54
集水区编号	D6	D7	D8	D9	D10
综合增长因子 P_s	11.79	11.41	12.27	12.59	7.87

在地表径流污染源模拟降雨过程中,集水区表面积累的沉积物上,被地表径流侵蚀并汇入到管道中,其他污染物附着于沉积物。根据 InfoWorks ICM 软件推荐值以及国内外相关文献,采用面积加权平均法计算出各集水区的综合地表沉积物增长因子 $Ps[\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})]$,设置研究区域内地表沉积物累积速率。

根据 InfoWorks ICM 软件推荐值设置降雨对地表沉积物侵蚀过程[见式(1)]以及污染物附着冲刷过程[见式(2)]的初始值,再根据水质模型雨天的校核验证予以修正。

$$K_{a(t)} = c_1 \times i(t)^{c_2} - c_3 \times i(t) \quad (1)$$

式中 $K_{a(t)}$ ——降雨侵蚀系数

c_1, c_2, c_3 ——侵蚀方程系数

$i(t)$ ——有效降雨, m/s

$$K_{\text{pn}} = C_1 \times (\text{IMKP} - C_2)^{C_3} + C_4 \quad (2)$$

式中 K_{pn} ——效力因子

IMKP——降雨强度, mm/h

C_1, C_2, C_3, C_4 ——附着方程系数

③ 点源污染源定义同点源的入流,以 24 h 循环为基础,包含每一种潜在的污染物类型,其数值根据点源实际排放工况确定。

排水系统关键节点的流量、水位、污染物浓度数据对确定水质模型的边界条件和校核验证模型至关重要^[2]。在建模过程中,详细分析流域排水系统结构,结合现场实地勘察,考虑到监测点的代表性、可行性、安全性,分别在管渠、河道布置了 16 个水质模型监测点,并进行水质水量持续性的同步监测;监测方案按旱季、雨季、雨天、非雨天制定,水质检测指标主要为水温、DO、pH、ORP、COD、TN、TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、SS。

2.3 水质模型的校核

模型校核是一个调整参数、反复计算、不断完善模型,直到计算值与监测值的误差在允许的范围之内的过程。在初步构建的水质模型基础上,按照“旱天校核→旱天验证→雨天校核→雨天验证”的路线来校核验证水质模型,校核后模拟曲线过程和实测过程在形状和数值上都应相互拟合。

利用 2014 年—2016 年期间的旱天和雨天关键点同步水质水量的监测数据对水质模型进行了校核验证,总体上校核结果良好,旱天水质模型模拟值与监测值之间的偏差均值 $< \pm 15\%$,峰值偏差和波谷

值偏差 $< \pm 15\%$,峰值和波谷值时间偏差 $< 1 \text{ h}$ 。雨天水质模型污染物浓度及水量模拟值与监测值之间的偏差均值基本在 $\pm 15\%$ 以内。因此,认为经过校核验证后模型精度达到应用要求。

图 1 为 2015 年 6 月 11 日研究排水区域内一监测点校核后水量模拟结果和水量监测数据的实时对比。

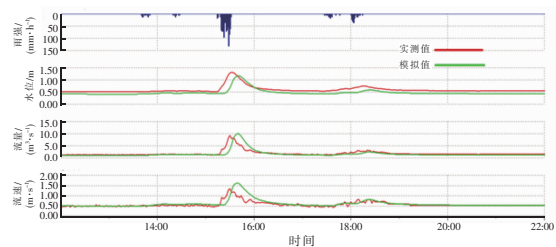


图 1 监测点水量、水位、水流速模拟值与实测值对比

Fig. 1 Comparison between the simulated values of water quantity, water level and water flow and the measured values

图 2 为 2015 年 6 月 11 日 TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度值的模型模拟结果和实测数据的对比曲线。

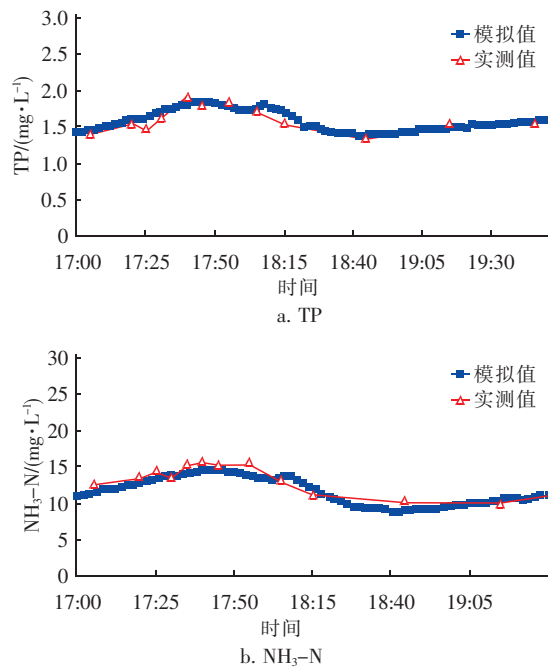


图 2 TP、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 浓度模拟值与监测值对比

Fig. 2 Comparison between the simulated values of TP, $\text{NH}_3 - \text{N}$ concentration and the measured values

3 水质模型的应用

3.1 污染物削减量的计算

水质模型经过校核后达到应用精度,将表征区域降雨特征的 12 种特征设计降雨^[3]输入模型运行

计算,统计出排水系统全年溢流至河涌的水量以及 COD、TN、TP、SS、NH₃-N 五种污染物的总质量。同时统计出系统出水边界排入污水厂处理的水量以及 5 种污染物总量。

根据下式计算现状以及深层隧道方案排水系统合流污水截取率以及污染物削减率。

$$\eta = \frac{M_c}{M_y + M_c} \times 100\% \quad (3)$$

式中 η ——截取率/削减率(合流污水量、COD、TN、TP、SS、NH₃-N)

M_c ——排入污水处理厂的污染物质量,kg

M_y ——系统溢流至河涌的污染物质量,kg

经计算,深隧实施后,全年合流污水量截取率为 86.66%,全年污染物削减率:COD 为 89.13%、SS 为 87.98%、TN 为 89.51%、TP 为 87.00%、NH₃-N 为 89.12%。与现状排水系统相比,可提高合流污水量截取率 19.2%,污染物的削减率也得到相应提高:COD 为 24.1%、SS 为 18.7%、TN 为 21.7%、TP 为 28.7%、NH₃-N 为 22.2%。

3.2 河涌水质状况预测

应用模型统计出现状排水系统、深隧方案排水系统在 12 种特征设计降雨情境下雨峰、雨后时刻的水质达标河段的长度以及河道水质超标时间;另外,模拟过程中还利用模型对同一情景下,深隧实施前后对河道水质的影响对比,估算深隧对河道水质改善的贡献率;此外,利用模型还可以统计出深隧实施后,河道全年水质达标总时间,对河道水质超标提出预警。

其中 9#降雨现状系统和深隧实施后河道水质(COD)模拟结果分别见图 3、4。

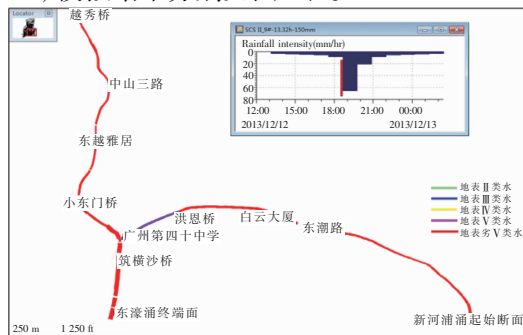


图 3 9#降雨现状系统河道水质(COD)模拟结果(雨峰)

Fig. 3 River water quality simulation results of 9# rainfall current system (rain peak)

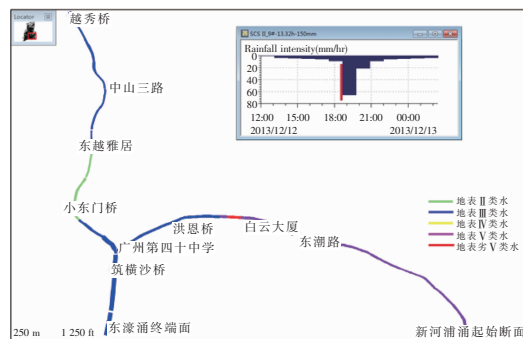


图 4 9#降雨深隧实施后河道水质(COD)模拟结果(雨峰)

Fig. 4 River water quality simulation results of 9# rainfall current system after deep tunnel drainage system conducted (rain peak)

经计算,东濠涌深层隧道实施后,在相同降雨条件下河道水质有明显改善,同一情景下水质达标河段长度比率较未实施时有较大的提高。雨峰时河道水质(COD、TN、TP 指标)长度达标率提高均值分别为 41.7%、28.7%、36.8%,雨后河道水质(COD、TN、TP 指标)长度达标率提高均值分别为 33.2%、26.0%、33.2%。同时,全年河道水质超标总时间也有大幅度削减,COD、TN、TP 三种指标的全年超标总时间分别减少 84.7%、38.1%、84.1%。

3.3 运行方案评估与优化

东濠涌水体功能区目标为地表 V 类水,为改善其水环境质量、恢复水体功能,东濠涌水环境整治除加强沿线污水的收集之外,还有两处循环补水工程:其一为源头补水工程(规模为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),将珠江水抽调至东濠涌净水厂经混合絮凝、气浮过滤、紫外线光催化氧化处理达到地表 III 类水水质后,排放至越秀桥角出水口回流入河涌;其二是循环调水工程(规模为 $2.68 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$),将东湖水抽调至新河涌,当珠江水位低潮时,开启新河涌与东濠涌之间的闸门和东濠涌与珠江之间的闸门,形成“东湖水-新河涌-东濠涌-珠江水系”循环。依据水质模型,分别统计出三种情景下排水系统全年溢流至河道的合流污水量以及污染物(COD、TP、NH₃-N)的总量,预测河道水质,计算出综合污染指数^[4],综合评价河道水质状况,这三种情景分别为:情景 A(现状排水系统+现状规模补调水量)、情景 B(现状排水系统+1.5 倍现状规模补调水量)、情景 C(深隧方案排水系统+现状规模补调水量)。表 2 为河道水质评估计算结果。

表 2 河道水质评估计算结果

Tab.2 Evaluation and calculation of river water quality

项 目		COD	NH ₃ - N	TP
情景 A (溢流污水量为 8 375 064 m ³ /a)	溢流量(全年)/(kg·a ⁻¹)	929 435	53 973	9 889
	预测水质/(mg·L ⁻¹)	30.91	1.75	0.33
	水质类别	V类水	V类水	V类水
	综合污染指数	0.82(中度污染水体)		
情景 B (溢流污水量为 8 375 064 m ³ /a)	溢流量(全年)/(kg·a ⁻¹)	929 435	53 973	9 889
	预测水质/(mg·L ⁻¹)	27.3	1.8	0.28
	水质类别	Ⅳ类水	Ⅳ类水	Ⅳ类水
	综合污染指数	0.71(中度污染水体)		
情景 C (溢流污水量为 3 431 788 m ³ /a)	溢流量(全年)/(kg·a ⁻¹)	285 087	17 154	2 964
	预测水质/(mg·L ⁻¹)	21.02	1.18	0.22
	水质类别	Ⅳ类水	Ⅳ类水	Ⅳ类水
	综合污染指数	0.56(轻度污染水体)		

① 情景 A:现状排水系统 + 现状规模补调水量,根据单因子评价法,预测水质为地表 V 类水;综合污染指数 0.82,为中度污染水体。

② 情景 B:现状排水系统 + 1.5 倍现状规模补调水量,根据单因子评价法,预测水质为地表Ⅳ类水,综合污染指数 0.71,为中度污染水体。

③ 情景 C:深隧方案排水系统 + 现状规模补调水量,根据单因子评价法,预测水质为地表Ⅳ类水,综合污染指数 0.56,为轻度污染水体。

4 结语

以东濠涌深层隧道排水系统为例,重点阐述了东濠涌深隧水质模型的构建过程,并使用旱天、雨天实测水质水量数据校核了模型,模型精度达到应用要求,最后应用模型对东濠涌深层隧道的减排效能进行了多情景模拟及对应的河道水质情况预测。

计算结果表明,深层隧道排水系统实施后与现状排水系统相比,合流污水量截取率可提高19.2%、污染物削减率提高 20% 左右。东濠涌深层隧道实施后,在相同降雨条件下河道水质明显改善,同一情景下水质达标河段长度比率较未实施时有较大的提高。全年河道水质超标总时间也有大幅削减,COD、TN、TP 三种指标的全年超标总时间分别减少 84.7%、38.1%、84.1%,根据综合污染指数评价法预测,深隧实施后东濠涌河道水质为轻度污染。

参考文献:

[1] 严军,许琳娟,陈仁,等. 水质模型在西流松花江干流水环境质量模拟中的应用[J]. 水电能源科学,2013,(7):36-40.

[2] 隋军,王宏利,李捷. 城市排水系统水质模型的构建及应用[J]. 中国给水排水,2016,32(7):130-134.

[3] 王宏利,李捷,隋军. 城市排水系统水质模型研究与应用[J]. 中国给水排水,2016,32(23):147-154.

[4] 王肖肖,张妙仙,徐兵兵. 模糊标识指数与对应分析法在水质评价中的联合应用[J]. 环境科学学报,2012,(5):1227-1235.



作者简介:李捷(1972 -), 女, 安徽淮北人, 工学博士, 高级工程师, 研究方向为污水处理、排水系统水质模型等。

E-mail:65638713@qq.com

收稿日期:2017-03-01