

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.13.013

# 基于模型评估的黑臭水体综合治理方案目标可达性分析

赵也<sup>1</sup>, 汤钟<sup>2</sup>, 曾胜<sup>3</sup>

(1. 深圳市创环环保科技有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东 深圳 518000; 3. 中国城市规划设计研究院 深圳分院, 广东 深圳 518000)

**摘要:** 黑臭水体治理是一个综合性的系统工程,包括源头截污、生态修复、补水清淤等多种整治措施并需要结合实际情况施策,但是当前的治理过程中存在方案以经验为主,对方案的量化评估较弱,导致难以评估方案实施效果的问题,因此需要通过科学的评估手段和方法对黑臭水体综合治理方案进行目标可达性分析。以东莞市太平水道为例,通过 MIKE11 和 SWMM 等模型工具,建立不同治理阶段的全过程水动力、水质模型,对现状污染来源进行量化评估,对整治方案的效果进行定量削减分析,最终评估整体方案的达标效果。

**关键词:** 黑臭水体; 模型评估; 初期雨水; 治理方案; MIKE11

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)13-0073-10

## Objective Reachability Analysis of Comprehensive Treatment Scheme of Black and Odorous Water Body Based on Model Evaluation

ZHAO Ye<sup>1</sup>, TANG Zhong<sup>2</sup>, ZENG Sheng<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Chuanghuan Environmental Protection Technology Co. Ltd., Shenzhen 518000, China;  
2. Urban Planning & Design Institute of Shenzhen, Shenzhen 518000, China; 3. Shenzhen Branch, China Academy of Urban Planning & Design, Shenzhen 518000, China)

**Abstract:** The treatment of black and odorous water body is a comprehensive and systematic project, including source pollution interception, ecological restoration, water replenishment and silt removal and other treatment measures, which need to be combined with the actual situation. However, the existing scheme is mainly based on experience during the current remediation process, and the quantitative evaluation of the scheme is weak, which makes it difficult to evaluate the implementation effect of the scheme. Therefore, it is necessary to analyze the target reachability of the comprehensive treatment scheme of black and odorous water body through scientific evaluation means and methods. During the remediation of Taiping Waterway in Dongguan City, the whole process hydrodynamic and water quality models were established in different treatment stages by means of MIKE11 and SWMM. The current pollution sources were quantitatively evaluated, and the effect of remediation program was quantitatively analyzed. Finally, effect of the overall scheme was evaluated.

**Key words:** black and odorous water body; model evaluation; initial rainwater; treatment scheme; MIKE11

目前全国各地的黑臭水体治理正在全面推进,但是多数项目存在治理方案以经验为主,对方案的量化较弱等问题,未对流域的污染来源产生量、工程

措施的削减量进行定量分析,难以保证工程实施后达到水质目标的要求。因此以广东省东莞市太平水道为例,通过构建不同治理阶段的全过程水动力、水

质模型,对现状污染进行评估,对方案进行比选,以期为其他类似地区的黑臭水体治理方案的量化分析提供参考<sup>[1-4]</sup>。

## 1 流域概况及治理方案

### 1.1 流域概况

太平水道位于东莞市,全长约 12.8 km,主要支流有 18 条,水道环绕威远岛,进出口均连通狮子洋,其中西槽威远出口至东引运河出口段约 5.8 km 为沙田、虎门两镇界河;东槽东引运河出口至沙角河口段长约 7 km,位于虎门镇范围内。

目前太平水道总体为劣 V 类水质,属于轻度黑臭水体,部分断面堤防不达标。为维护河湖健康生命,营造河畅、水清、堤固、岸绿、景美的太平水道,将太平水道综合整治工程纳入整治项目,整治流域范围如图 1 所示。

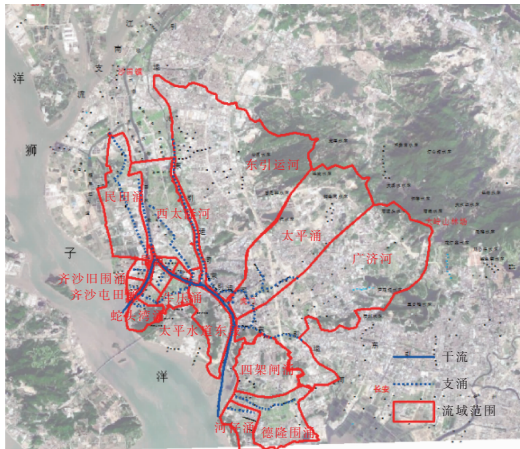


图1 综合整治流域范围

Fig. 1 Area of comprehensive treatment basin

### 1.2 整体治理方案

治理方案主要包括整治目标确定、基础资料调研和收集、污染源现状调查和评价、水体污染成因分析、整体整治项目方案确定和模型模拟验证等 6 个部分。

① 整治目标确定:根据上位规划要求,计划到 2035 年,以东引运河、太平水道交汇处(镇口水闸)为界,旱季太平水道的东段水质达 V 类、西段水质达 IV 类;雨季各支涌的溢流次数不超过 7 次。

② 基础资料调研和收集:收集区域自然环境现状(包括气象、水文、流域范围、地形地貌和生态环境);社会环境现状(包括水环境功能区划和社会经济情况)。

③ 污染源现状调查和评价:调查了现状干流

和各支涌的生活污染源、工业污染源、污水厂尾水污染源、农业面源和城市雨水径流面源污染,具体现状参考表 1。

表1 太平水道规划范围内现状年总污染负荷统计

Tab. 1 Statistics of current annual total pollutant loading in

Taiping Waterway

| 分类                      | 污染类型                    | COD                     | NH <sub>3</sub> -N |
|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| 点源污染                    | 工业污染                    | 数量/(t·a <sup>-1</sup> ) | 247.09             |
|                         |                         | 占总负荷比例/%                | 5.01               |
|                         | 生活污染                    | 数量/(t·a <sup>-1</sup> ) | 4 265.31           |
|                         |                         | 占总负荷比例/%                | 86.56              |
|                         | 城镇污水处理厂尾水               | 数量/(t·a <sup>-1</sup> ) | 201.48             |
|                         |                         | 占总负荷比例/%                | 4.09               |
| 面源污染                    | 小计/(t·a <sup>-1</sup> ) |                         | 4 713.88           |
|                         | 农业面源                    | 数量/(t·a <sup>-1</sup> ) | 92.96              |
|                         |                         | 占总负荷比例/%                | 1.89               |
|                         | 城市雨水径流污染                | 数量/(t·a <sup>-1</sup> ) | 120.77             |
|                         |                         | 占总负荷比例/%                | 2.45               |
|                         | 小计/(t·a <sup>-1</sup> ) |                         | 213.73             |
| 合计/(t·a <sup>-1</sup> ) |                         | 4 927.61                | 936.55             |

④ 水体污染成因分析:根据污染源调查结果,分析得出生活污染(直排点源污染)为水体污染的主要成因。

⑤ 根据污染成因分析得到整体治理项目:具体如表 2 所示。

表2 整体整治项目

Tab. 2 Overall treatment projects

| 整治项目     | 主要内容  |
|----------|---|
| 干流截污管网完善 | 排污口 2019 年截污率为 90%,2020 年截污率为 95%,2035 年不考虑直排污水   |
| 支流截污管网完善 | 排污口 2019 年截污率为 90%,2020 年截污率为 95%,2035 年不考虑直排污水   |
| 补水工程     | 近期包括威远岛水系连通、广济河和德隆围涌纳潮引水等纳潮工程,以及民田涌引水工程以及鞋底沙河-稔洲运河连通引水工程;远期考虑以海岛污水处理厂的中水回用补给就近河道  |
| 初雨调蓄池    | 共规划 6 个初雨调蓄池,有效调蓄容积共 2 342 m <sup>3</sup> 。包括:新湾社区南 342 m <sup>3</sup> ,太平广场 453 m <sup>3</sup> ,稔洲村菜市场 242 m <sup>3</sup> ,大泥市场 433 m <sup>3</sup> ,沙田恒福综合市场 413 m <sup>3</sup> ,虎门汽车客运总站 459 m <sup>3</sup> |

⑥ 模型模拟验证:在此重点探讨。

## 2 模型评估方法及模型构建

### 2.1 整体评估思路

构建了整体的模型评估技术路线,具体如图 2 所示。

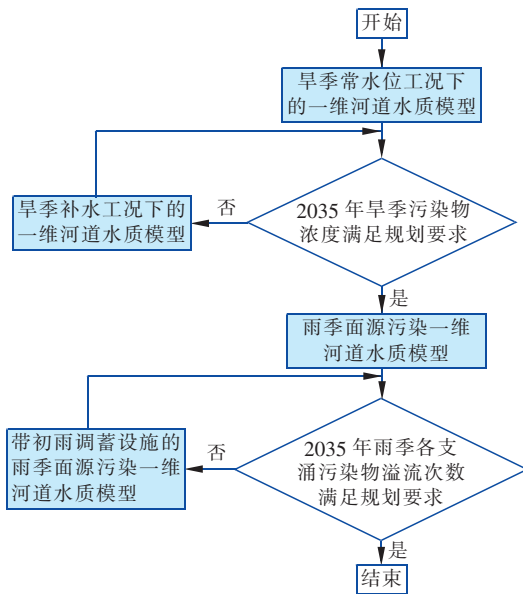


图2 技术路线

Fig. 2 Technology roadmap

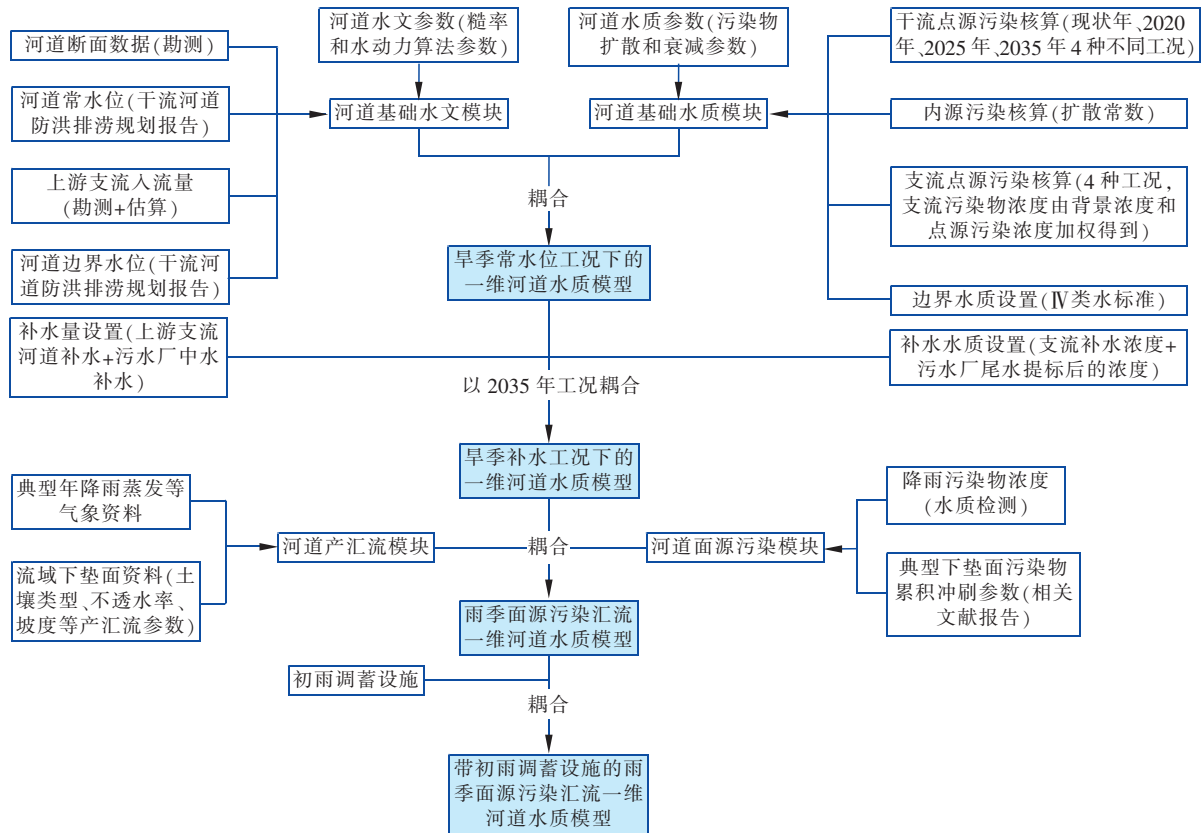


图3 模型构建流程

Fig. 3 Model building flow chart

旱季常水位工况下的一维河道水质模型是其他几个模型的基础,主要由基础水文模块和基础水质

本次一共构建了4个一维河道水质模型,具体如下:

- ① 旱季常水位一维河道水质模型;
- ② 旱季补水工况一维河道水质模型;
- ③ 雨季面源污染一维河道水质模型;
- ④ 带初雨调蓄池的雨季面源污染一维河道水质模型。

首先需要构建常水位的一维河道水质模型,判断截污工程完成之后水质是否能够达标,如果不能达标,则需要继续构建补水工况下的一维河道水质模型。

在旱季水质达标的基础上,再进一步核算雨季各支流断面的水质是否能够达标,如果不能达标则进一步构建带有初雨调蓄池工况下的一维河道水质模型。

## 2.2 模型构建流程

具体的模型构建流程如图3所示。

模块构成;在旱季常水位工况的基础上加上补水的工况即可耦合得到补水工况下的一维河道水质



模型。

雨季面源污染汇流一维河道水质模型由旱季补水工况下的一维河道水质模型与 SWMM 的产汇流模块和污染物冲刷累积模块耦合构建得到。

最后,在 SWMM 的产汇流模块中设置初雨调蓄池,并与上述的雨季面源污染汇流一维河道水质模型耦合,即可以得到带初雨调蓄池的雨季面源污染汇流一维河道水质模型。

### 2.3 模型文件构建

MIKE11 模型框架构建主要包括 MIKE11. nwk 河网文件的制作以及 MIKE11. xns 河道断面文件的制作。

#### ① 河网文件

河网文件的构建主要是指将 GIS 的矢量数据河道中心线转换成 MIKE11 模型能够直接识别的数据类型。

与此同时,在河网文件内需要进一步指定河道名称、河道长度、河道的上下游关系以及河道桩号的编码顺序等。

河网文件内容如图 4 所示。

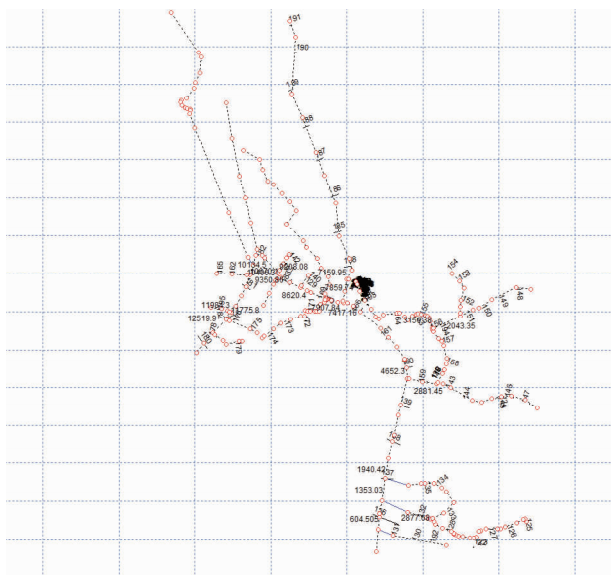


图 4 太平水道河网文件

Fig. 4 Network file of Taiping Waterway

#### ② 断面文件

河道断面文件构建主要是指将河道断面数据转换成 MIKE11 模型系统能够直接识别的数据类型,并在此基础上指出断面的左岸、右岸、中心线所在位置以及相应断面处的曼宁系数。

河道断面文件见图 5。

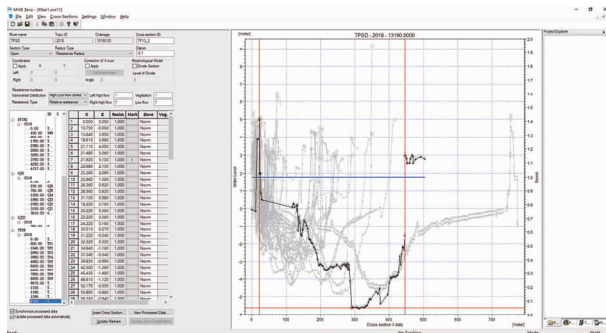


图 5 断面文件

Fig. 5 Cross section file of Taiping Waterway

### 2.4 模型边界数据

河道水质模型的边界条件包括水文边界和水质边界,水文边界包括上下游的边界水位、主干的入流量、支干河涌的入流量;水质边界包括边界水质、主干水质和支干河涌的水质情况。

#### 2.4.1 水位边界

太平水道上下游都汇入狮子洋,根据附近的酒盛围水文站历年最大 24 h 暴雨相应外海潮位资料,选取高潮位接近多年平均年最高潮位的潮型,分别选取多年潮位潮型进行比较,选取低潮位较高的 1981 年型按设计频率潮位进行放大,作为太平水道外海多年平均年最高潮设计潮位过程线,具体潮位过程线如图 6 所示。在 2020 年、2025 年和 2035 年均采用相同边界水位线。

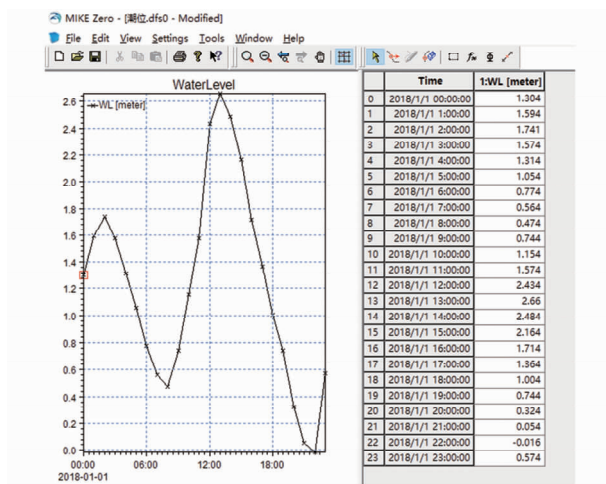


图 6 太平水道潮位过程线模型文件

Fig. 6 Tide level time series file of Taiping Waterway

#### 2.4.2 流量边界

##### ① 排污口污水点源排放量

点源污染以点状形式排放污染物而使水体受到

污染。根据对太平水道西段的排污口调查统计,现状年太平水道干流共 49 个排污口,其中工业废水排污口 7 个,太平水道干流排污口位置如图 7 所示。各排污口以点源的形式汇入干流。根据《虎门镇 2018—2020 批次截污管网》和《沙田镇 2018—2020 批次截污管网》,虎门镇及沙田镇排污口 2019 年截污率为 90%,2020 年截污率为 95%,2035 年不考虑直排污水。因此,在数值模拟计算中,太平水道干流的排放口的污废水排放流量以现状实测值为基础,2020 年的排放流量按现状各排放口流量的 10% 为各排放口的排污流量,2025 年按现状流量的 5% 为排污流量;在 2035 年的模拟计算中,所有的排污口均不再考虑污废水排放。



图 7 太平水道入河排污口位置

Fig. 7 Sewage outlet location in Taiping Waterway

② 支流(支涌)流量

太平水道各支涌汇入也会对太平水道水质产生影响,因此在预测计算中需要考虑各支流汇入的影响,在模型计算中,各支涌处理为点源汇入,汇入流

量为各支涌的来流流量加上支涌中污废水的排放量。现状年、2020 年、2025 年、2035 年流量计算取值同排污口污水点源。

2.4.3 水质边界

太平水道河水来源于干流污水排放口、支流(支涌)汇水及污水处理厂尾水,不考虑上游来水,因此水质边界也仅需考虑干流污水排放口的点源污染、支流(支涌)汇入污染以及污水厂尾水污染。

① 干流污水排放口

计算区域内干流共 49 个排污口,各排污口以点源形式汇入干流,各排放口的污废水浓度采用监测数据。

② 支流(支涌)汇入污染源

各支流(支涌)处理为点源汇入干流,部分支流(支涌)汇入水质情况如表 3 所示。支流(支涌)污染源主要包括支流来流污染和支流中排污口的排放废水。

从最不利条件出发,计算各年度各支流(支涌)汇入水质情况,根据以下原则确定:

- a. 现状年各支流(支涌)采用现状检测值;
- b. 对于蛇头湾涌等没有基流的支流(支涌),2020 年及 2025 年截污后水质不变;
- c. 对于西太隆河等有基流的支流(支涌),根据对排污口的统计情况,以及各年度的污水截污率,计算得到汇入干流的水质浓度;
- d. 2035 年由于各项规划的实施,计算区域内水质整体得到改善,计算时考虑各支流均以 V 类水质汇入;如 2020 年时水质优于 V 类水质,则以 2020 年时水质汇入。

表 3 部分支流(支涌)汇入水质

Tab. 3 Inflow water quality of some tributaries

mg · L<sup>-1</sup>

| 汇入支流 | 现状年  |                     | 2020 年 |                     | 2025 年 |                     | 2035 年 |                     |
|------|------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|--------|---------------------|
|      | COD  | NH <sub>3</sub> - N | COD    | NH <sub>3</sub> - N | COD    | NH <sub>3</sub> - N | COD    | NH <sub>3</sub> - N |
| 太平涌  | 88.5 | 13.56               | 67.9   | 9.52                | 52.2   | 7.42                | 40.4   | 2.00                |
| 广济河  | 55.8 | 12.87               | 34.5   | 7.96                | 32.7   | 7.49                | 32.5   | 2.00                |
| 四架闸涌 | 35.6 | 10.48               | 25.1   | 7.50                | 24.6   | 7.34                | 24.8   | 2.00                |
| 德隆围涌 | 76.1 | 15.54               | 54.2   | 12.48               | 52.5   | 12.01               | 40.2   | 2.00                |
| 河仔涌  | 78.1 | 18.13               | 67.2   | 14.54               | 64.8   | 14.08               | 40.1   | 2.00                |

③ 面源污染边界

采用 SWMM 模型评估区域的面源污染,以排水分区为边界构建模型。污染物的产生过程可分为累积(build-up)及冲刷(wash-off)两部分。本模型中模

型参数,通过借鉴国内外已有的相关研究成果,结合《东莞市雨水径流污染现状、迁移机理及控制对策研究》《城市更新区低冲击开发面源污染控制技术

利用规划图所确定的居住用地、公共服务用地等不同的用地下垫面类型,进行模拟评估。

本研究区域内 SWMM 面源污染模型界面如图 8 所示。



图 8 SWMM 面源污染模型界面

Fig. 8 Non-point source pollution model interface in SWMM

#### ④ 内源污染边界

内源污染指进入水体中的营养物质逐渐沉降至

水体底质表层。积累在底泥表层的氮、磷营养物质,本次内源污染核算参考了相关研究文献<sup>[5]</sup>,采用单位面积污染物释放通量法估算内源污染量,计算得到的污染量如表 4 所示。

表 4 内源污染部分计算结果

Tab. 4 Calculation results of endogenous pollution

| 项 目  | COD       | NH <sub>3</sub> - N |
|--|-----------|---------------------|
| 释放通量/(mg · m <sup>-2</sup> · d <sup>-1</sup> ) | 300       | 100                 |
| 河段总面积/m <sup>2</sup>                           | 3 593 853 |                     |
| 总释放量/(t · a <sup>-1</sup> )                    | 390.84    | 130.28              |

#### 2.4.4 污水处理厂尾水水质边界

研究区域内共有 4 座污水处理厂,现状处理规模以及出水水质标准如表 5 所示。根据片区的相关规划,各个污水处理厂的尾水水质在 2020 年都应该满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 的排放标准;2025 年和 2035 年的尾水排放标准达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅳ类水质标准。在模拟计算中,从不利角度出发,污水处理厂的尾水水质采用满足的标准限值进行计算。

表 5 污水处理厂现状规模及出水水质标准

Tab. 5 Current scale and effluent quality standards of sewage treatment plants

| 污水厂名称       | 处理规模/(10 <sup>4</sup> m <sup>3</sup> · d <sup>-1</sup> ) | 出水水质标准                                   | COD/(mg · L <sup>-1</sup> ) | NH <sub>3</sub> - N/(mg · L <sup>-1</sup> ) |
|-------------|--|--|-----------------------------|---|
| 印染专业基地污水处理厂 | 2  | 《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准 | 50                          | 5   |
| 电镀基地污水处理厂   | 0.5  |  |                             |   |
| 宁洲污水处理厂     | 10   | 《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅳ类标准            | 30                          | 1.5   |
| 海岛污水处理厂     | 1  |  |                             |   |

#### 2.5 模型参数选取

##### ① 污染物综合衰减系数

污染物综合衰减系数与河流的水文条件、污染物特征等因素有关,河道中的污染物综合衰减系数取值见表 6<sup>[6]</sup>。

表 6 各水质要素综合衰减系数取值

Tab. 6 Comprehensive attenuation coefficient of water

quality factors d<sup>-1</sup>

| 水质因子 | COD  | NH <sub>3</sub> - N |
|------|------|---------------------|
| 天然河道 | 0.10 | 0.07                |

##### ② 污染物综合扩散系数

污染物综合扩散系数包括扩散常数  $a$ 、扩散常数  $b$ 、最小扩散系数和最大扩散系数。

河道水质的污染物综合扩散系数具体取值如表 7 所示。

表 7 污染物综合扩散系数

Tab. 7 Comprehensive diffusion coefficient of pollutants

| 水质因子     | COD | NH <sub>3</sub> - N |
|----------|-----|---------------------|
| 扩散常数 $a$ | 15  | 10                  |
| 扩散常数 $b$ | 0.8 | 0.5                 |
| 最小扩散系数   | 10  | 15                  |
| 最大扩散系数   | 100 | 80                  |

##### ③ 糙率

根据《天然河道、滩地糙率参考表》以及流域历史洪水水面线率定的糙率成果,天然河道糙率取值范围为 0.025 ~ 0.030。而太平水道流域为城市河流,因此计算区域内天然河道糙率取值为 0.025<sup>[7]</sup>。

#### 3 模型评估结果及验证

##### 3.1 旱季常水位一维河道水质模型结果

根据太平水道干流流量及污染源等边界条件,



采用纵向一维水质模型计算太平水道干流沿程水质 浓度,部分断面在不同计算年度的浓度预测见表 8。

表 8 太平水道部分控制断面水质预测情况

Tab. 8 Water quality prediction of some control sections of Taiping Waterway mg · L<sup>-1</sup>

| 控制断面 | COD  |        |        |        | NH <sub>3</sub> - N |        |        |        |
|------|------|--------|--------|--------|---------------------|--------|--------|--------|
|      | 现状年  | 2020 年 | 2025 年 | 2035 年 | 现状年                 | 2020 年 | 2025 年 | 2035 年 |
| 太平涌  | 64.4 | 37.3   | 32.3   | 25.1   | 4.35                | 2.40   | 1.82   | 1.53   |
| 广济河  | 56.6 | 36.2   | 31.0   | 23.3   | 3.74                | 2.13   | 1.78   | 1.44   |
| 四架闸涌 | 46.6 | 31.0   | 28.2   | 24.2   | 2.97                | 1.68   | 1.57   | 1.39   |
| 德隆围涌 | 45.1 | 30.3   | 28.8   | 27.3   | 2.65                | 1.57   | 1.53   | 1.46   |
| 河仔涌  | 44.5 | 30.1   | 29.6   | 29.2   | 2.54                | 1.52   | 1.51   | 1.49   |

从计算结果看,现状年太平水道干流受沿程支流汇入的影响较大,水质呈现沿程上升的趋势,特别是西太隆河、东引运河等现状污废水排口流量较大的支流(支涌)汇入后,引起干流水质明显恶化。靠近海口口的河段水质有所好转,这是因为入海口河道断面较宽,潮汐作用对河水水质影响较大。在干流的控制断面中,COD 和 NH<sub>3</sub> - N 浓度与规划目标有较大差距。随着太平水道流域的水环境综合治理,截污工程的完成使得各种未经处理直接排放的污水量大为减少,从太平水道干流的水质预测结果可以看到,与现状年相比,干流沿程各控制断面水质均有较大程度的降低。

2020 年由于实施了大量截污工程,支流(支涌)汇入水质大幅改善,因此与现状年相比,太平水道干流水质有明显改善,各控制断面平均 COD 浓度由 50.9 mg/L 下降到 36.7 mg/L,降幅达 27.9%,平均 NH<sub>3</sub> - N 浓度由 3.71 mg/L 下降到了 2.29 mg/L,降幅达 38.3%。东段入海口断面 COD 浓度为 30.0 mg/L,NH<sub>3</sub> - N 浓度为 1.50 mg/L,满足地表Ⅳ类水质标准。但由于西太隆河、东引运河等支流(支涌)截污还不完善,汇入干流后导致干流水质明显变差,应继续进一步实施截污工程。

2025 年随着截污工程的继续实施,太平水道干流水质较 2020 年进一步改善,沿程最高 COD 浓度由 43.2 mg/L 下降到 36.7 mg/L,最高 NH<sub>3</sub> - N 浓度由 2.86 mg/L 下降到了 2.00 mg/L,干流河道整体满足地表Ⅴ类水质标准。东段入海口断面 COD 浓度为 30.1 mg/L,NH<sub>3</sub> - N 浓度为 1.50 mg/L,基本满足地表Ⅳ类水质标准。

2035 年由于各项规划的实施,各支流汇入水质较好,汇入干流后对水质影响不大,东段(东引运河—东段入海口)沿程水质均满足地表Ⅴ类水质标准,西段(东引运河—西段入海口)沿程水质满足地

表Ⅴ类水质标准,略微超过地表Ⅳ类水质标准,需进一步采取措施进行治理。

3.2 旱季补水工况一维河道水质模型结果

由上述模拟可知整个太平水道干流及支流水质在仅采取污水截流措施后,仍然无法满足规划要求(太平水道西段为Ⅳ类水质标准,东段为Ⅴ类水质标准),因此需采取更多措施确保太平水道干流水质满足要求,拟采用补水冲污的措施改善水质。

建议补水方案:近期主要采用现已具备条件的纳潮引水以及河道补水方案,详细补水方案见图 9,即威远岛水系连通、广济河和德隆围涌纳潮引水等纳潮工程,民田涌引水工程以及鞋底沙河—稔洲运河连通引水工程。另外,考虑到远期尾水提标已达到河道所需水质标准,因此在尾水提标实施后考虑以海岛污水厂的中水回用补给就近河道方案。



图 9 近期规划补水方案

Fig. 9 Short term plan for water supply

计算补水水质为太平水道流量与补水的混合浓度,各支流(支涌)计算流量见表 9。其中补水水质

按地表Ⅳ类水质标准计算,其余汇水水质采用与3.1节相同的水质。

表 9 补水各支流(支涌)计算流量

Tab.9 Calculation flow of each make-up branch

| 控制断面  | 现状核算<br>流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 设计补水<br>流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 补水水质/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) |                          |
|-------|---|---|--|--------------------------|
|       |   |   | COD                                      | $\text{NH}_3 - \text{N}$ |
| 蛇头湾涌  | 1.592 7   | 1.0   | 25                                       | 1.25                     |
| 八围涌   | 0.759 8   | 1.0   | 25                                       | 1.25                     |
| 齐沙屯田涌 | 1.419 5   | 1.0   | 25                                       | 1.25                     |
| 齐沙旧围涌 | 0.291 7   | 0.667   | 25                                       | 1.25                     |

补水实施后太平水道部分控制断面水质预测情况见表 10。由表 10 可看出,补水方案实施后,水质整体有比较明显改观,特别是  $\text{NH}_3 - \text{N}$  指标有明显降低,均达到地表Ⅳ类水质标准。

表 10 补水实施后太平水道部分控制断面水质预测

Tab.10 Water quality prediction of some control sections of Taiping Waterway after the implementation of make-up water  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

| 控制断面  | COD  |      | $\text{NH}_3 - \text{N}$ |      |
|-------|------|------|--------------------------|------|
|       | 补水前  | 补水后  | 补水前                      | 补水后  |
| 蛇头湾涌  | 29.5 | 27.8 | 1.58                     | 1.47 |
| 八围涌   | 30.6 | 27.0 | 1.71                     | 1.46 |
| 齐沙屯田涌 | 31.5 | 26.7 | 1.78                     | 1.46 |
| 齐沙旧围涌 | 34.8 | 26.1 | 2.00                     | 1.47 |

### 3.3 雨季面源污染一维河道水质模型结果

先利用 SWMM 面源污染和产汇流模块计算出各个河涌的年径流时间序列和相应的污染物浓度时间序列,其中太平水道控制断面年 COD 浓度时间序列如图 10 所示。

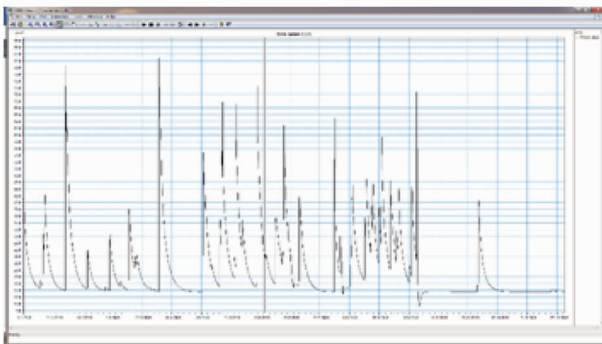


图 10 太平水道控制断面年 COD 浓度时间序列

Fig.10 Time series of annual COD concentration of Taiping Waterway control section

作为 MIKE11 河道水质模型的边界,再启动 MIKE11 河道水质模拟模块,评估各个河涌水系的

年溢流次数以及对应的水质情况(如表 11 所示)。可见,部分控制断面的污染物超标溢流次数都没有达到规划要求,所以需要结合初雨调蓄池的规划布置进一步构建带调蓄池的雨季面源污染一维河道水质模型。

表 11 主要断面水质超标溢流次数

Tab.11 Overflow times of main section water quality exceeding standard

| 控制断面  | COD 超标<br>溢流次数 | $\text{NH}_3 - \text{N}$ 超标<br>溢流次数 | 是否达标 |
|-------|----------------|-------------------------------------|------|
| 太平涌   | 12             | 13                                  | 否    |
| 西太隆河  | 11             | 10                                  | 否    |
| 齐沙屯田涌 | 6              | 4                                   | 是    |
| 齐沙旧围涌 | 3              | 5                                   | 是    |

### 3.4 带调蓄池的雨季面源污染一维河道水质模型

根据不达标的断面并兼顾周边的地理位置,设置初雨调蓄池分布(见表 12)。

表 12 调蓄池位置、分布及调蓄容积

Tab.12 Location, distribution and storage capacity of storage tank

| 地理位置     | 所在位置  | 调蓄容积/ $\text{m}^3$ |
|----------|-------|--------------------|
| 新湾社区南    | 四架闸涌  | 342                |
| 太平广场     | 太平涌   | 453                |
| 稔洲村菜市场   | 稔洲旧围涌 | 242                |
| 大泥市场     | 西太隆河  | 433                |
| 沙田恒福综合市场 | 西太隆河  | 413                |
| 虎门汽车客运总站 | 东引运河  | 459                |

在 SWMM 产汇流模块中设置相应的调蓄设施,其余步骤同 3.3 节,可得到带初雨调蓄池的雨季面源污染一维河道水质模型模拟结果(见图 11),具体如表 13 所示。

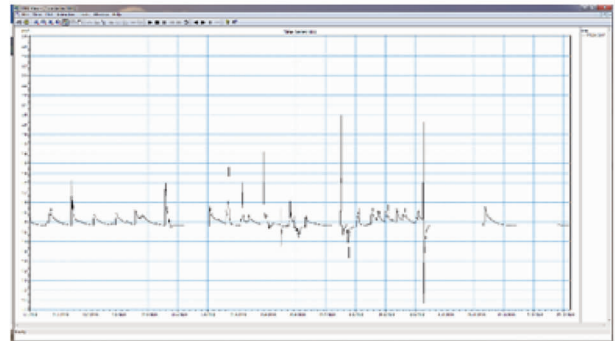


图 11 太平水道调蓄改造后年  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度时间序列

Fig.11 Time series of annual  $\text{NH}_3 - \text{N}$  concentration after storage reconstruction of Taiping Waterway



表 13 调蓄改造后断面水质超标溢流次数对比

Tab. 13 Comparison of overflow times of section water quality exceeding the standard after storage reconstruction

| 断面    | 改造前        |                           |      | 改造后        |                           |      |
|-------|------------|---------------------------|------|------------|---------------------------|------|
|       | COD 超标溢流次数 | NH <sub>3</sub> -N 超标溢流次数 | 是否达标 | COD 超标溢流次数 | NH <sub>3</sub> -N 超标溢流次数 | 是否达标 |
| 四架闸涌  | 8          | 8                         | 否    | 5          | 6                         | 是    |
| 太平涌   | 12         | 13                        | 否    | 4          | 2                         | 是    |
| 稔洲旧围涌 | 14         | 12                        | 否    | 3          | 5                         | 是    |
| 西太隆河  | 11         | 10                        | 否    | 2          | 2                         | 是    |
| 东引运河  | 10         | 9                         | 否    | 4          | 3                         | 是    |

3.5 现状模型验证

采用纳什效率系数 (Nash-Sutcliffe efficiency coefficient) 对现状水质模型结果进行验证, 具体公式如下:

$$E = 1 - \frac{\sum_{n=1}^N (C_o^n - C_m^n)^2}{\sum_{n=1}^N (C_o^n - \bar{C_o})^2} \quad (1)$$

式中:  $E$  为纳什效率系数;  $n$  为检测点编号;  $N$  为总检测点数量;  $C_o^n$  为编号为  $n$  的检测点检测污染物浓度;  $C_m^n$  为编号为  $n$  的检测点模型模拟污染物浓度;  $\bar{C_o}$  为检测点平均污染物浓度。

分别采用纳氏试剂分光光度法 (HJ 535—2009) 和重铬酸盐法 (HJ 828—2017) 检测采样点的氨氮和化学需氧量, 每个采样点早中晚各取一次样, 得到平均污染物浓度。

检测点具体位置如图 12 所示, 检测结果如表 14 所示。



图 12 检测点位置

Fig. 12 Location of inspection points

表 14 模型验证数据

Tab. 14 Model validation data

| 控制断面                         | COD  |      | NH <sub>3</sub> -N |      |
|------------------------------|------|------|--------------------|------|
|                              | 现状   | 检测   | 现状                 | 检测   |
| 太平涌/(mg · L <sup>-1</sup> )  | 64.4 | 77.2 | 4.35               | 5.24 |
| 广济河/(mg · L <sup>-1</sup> )  | 56.6 | 53.4 | 3.74               | 4.12 |
| 四架闸涌/(mg · L <sup>-1</sup> ) | 46.6 | 55.1 | 2.97               | 2.60 |
| 德隆围涌/(mg · L <sup>-1</sup> ) | 45.1 | 44.9 | 2.65               | 2.40 |
| 河仔涌/(mg · L <sup>-1</sup> )  | 44.5 | 38.4 | 2.54               | 2.80 |
| 纳什效率系数                       | 0.71 |      | 0.65               |      |

由表 14 可看出, 现状模型模拟结果与检测值的纳什效率系数均大于 0.5, 表明模拟结果与实际检测结果匹配度较好, 模型模拟结果的可信度较高。

4 评估结果分析

模型评估结果分析见表 15。

表 15 模型评估结果分析

Tab. 15 Analysis of model evaluation results

| 整治项目     | 主要削减污染部分  | 评估结果   |
|----------|-----------|--|
| 干流截污管网完善 | 点源污染、面源污染 | 旱季:<br>①2020 年, 消除黑臭, 基本达到地表 V 类水质标准。<br>②2025 年, 水质进一步改善。                 |
| 支流截污管网完善 | 点源污染、面源污染 | ③2035 年, 基本达到地表 IV 类水质标准。  |
| 补水工程     | —         | ④补水方案实施后, 全部达到规划设计要求。  |
| 初雨调蓄池    | 面源污染      | 雨季:<br>①在 2035 年的基础上, 有 5 个控制断面的污染物溢流次数超标。<br>②通过修建初雨调蓄设施, 控制断面的溢流次数满足规划要求 |

通过本项目的模拟评估得出以下建议:

① 在近期截污管网建设、污水处理厂提标改造 (尾水水质达到 IV 类标准) 完成, 提高污水收集处理率后, 水质达标仍然难度较大。

② 针对雨源型河道, 选择合适的补水方案是水质稳定达标的关健, 本项目采用补水方案后, 规划 2035 年旱季太平水道西段水质可满足 IV 类水质标准, 东段水质可满足 V 类水质标准。

③ 在旱季水质达标的基础上, 雨季部分支涌的污染物超标溢流次数超过规划标准, 通过设置初雨调蓄设施可以降低污染物超标溢流次数至规划允许范围。

为实现综合考虑点源和面源污染负荷的削减目标, 需要环境保护行政主管部门加强对污染源的监管, 水利、市政部门加快太平水道流域截污干管建

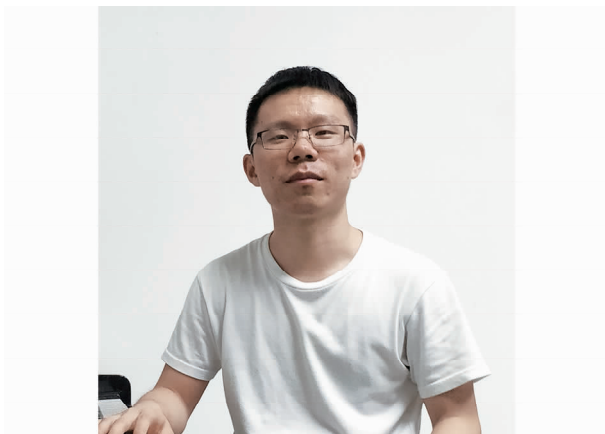
设、污水处理厂提标改造、太平水道流域环境综合整治工程的建设等。

## 5 结语

以东莞市太平水道为例,初步探索了对黑臭水体进行综合治理的模型评估技术路线和思路,使用SWMM和MIKE11模型对点源、面源、内源污染物的过程和控制进行了模拟分析,并对补水前后的水质进行了模型对比。下一步还将获取方案实施后的实际监测数据,在模型率定、修正等方面做进一步的探索。

## 参考文献:

- [1] 李晓,宋桂杰,邓佑锋,等. 深圳市典型黑臭水体治理效果分析[J]. 中国给水排水,2018,34(14):101-104.  
Li Xiao, Song Guijie, Deng Youfeng, *et al.* Analysis of typical black-odorous river governance effect in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(14):101-104(in Chinese).
- [2] 唐建国,王家卓,马洪涛. 完善城市排水系统,巩固和提升黑臭水体整治成效[J]. 给水排水,2018,44(1):1-7.  
Tang Jianguo, Wang Jiazhao, Ma Hongtao. Complete the urban drainage system, consolidate and improve the effect of black smelly water [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(1):1-7(in Chinese).
- [3] 王旭,王永刚,孙长虹,等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报,2016,27(4):1331-1340.  
Wang Xu, Wang Yonggang, Sun Changhong, *et al.* Formation mechanism and assessment method for urban black and odorous water body: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(4):1331-1340(in Chinese).
- [4] 赵广英,李晨,刘淑娟. 城市内涝问题的规划改善途径研究——以湖南省为例[J]. 现代城市研究,2016(12):51-61.  
Zhao Guangying, Li Chen, Liu Shujuan. A study on the ways to improve the planning of urban waterlogging: A case study of Hunan Province [J]. Modern Urban Research, 2016(12):51-61(in Chinese).
- [5] 赵越,姚瑞华,徐敏,等. 我国城市黑臭水体治理实践及思路探讨[J]. 环境保护,2015,43(13):27-29.  
Zhao Yue, Yao Ruihua, Xu Min, *et al.* Study on the practice and route of combating urban black-and-malodorous water body [J]. Environmental Protection, 2015, 43(13):27-29(in Chinese).
- [6] 余光伟,雷恒毅,刘康胜,等. 治理感潮河道黑臭的底泥原位修复技术研究[J]. 中国给水排水,2007,23(9):5-9,14.  
Yu Guangwei, Lei Hengyi, Liu Kangsheng, *et al.* In-situ sediment remediation technology for control of black and odorous water in tidal river [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(9):5-9,14(in Chinese).
- [7] 宋芳,秦华鹏,陈斯典,等. 深圳河湾流域水污染源解析研究[J]. 北京大学学报:自然科学版,2019,55(2):317-328.  
Song Fang, Qin Huapeng, Chen Sidian, *et al.* Water source apportionment of pollutions in Shenzhen bay basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2019, 55(2):317-328(in Chinese).



作者简介:赵也(1992-),男,湖北黄冈人,本科,工程师,主要从事水务大数据信息化建设、水文水质模型构建,以及市政基础设施规划与设计研究。

E-mail:253165290@qq.com

收稿日期:2019-03-28