

基于水质模型的污水系统提质增效方案效能评估

王宏利, 李文涛

(广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东 广州 510060)

摘要: 为了能有效评估海口市某污水处理厂系统提质增效工程方案的效能, 采用流域排水系统水质模型构建了海口市某污水处理厂污水管网系统水质水量数学模型。建模总面积 46.2 km^2 , 建模对象有污水主干管, 管径范围 $d300\sim d2200$, 总管长约 144 km , 并根据现场实测污染物浓度数据对模型进行了校核。最后, 使用校核后水质模型测算评估, 结果显示, 提质增效工程方案实施后, 污水处理厂进水中的污染物 BOD_5 指标的浓度提升到 73.5 mg/L , 较现状 64.4 mg/L 提升了 14.1% , 达到考核指标要求。

关键词: 城市污水系统; 提质增效; 水质模型; 效能评估

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0304-04

Efficacy Evaluation of Sewage System Quality Improvement and Efficiency Enhancement Scheme Based on Water Quality Model

WANG Hongli, LI Wentao

(Guangzhou Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: To effectively evaluate the efficacy of the system quality improvement and efficiency enhancement project for a wastewater treatment plant (WWTP) in Haikou, a mathematical model for water quality and quantity of the sewage pipe network system of WWTP is established by using the watershed drainage system water quality model. The total modeling area is 46.2 km^2 , with the modeling objects including main sewage pipes. The range of pipe diameters is from $d300$ to $d2200$, and the total length of the pipe is about 144 km . The model is checked according to the on-site measured pollutant concentration data. Subsequently, the calculations and evaluations are performed with the checked water quality model. The results indicate that after the implementation of the quality improvement and efficiency enhancement scheme, the concentration of the BOD_5 pollutant index in the influent of WWTP increases to 73.5 mg/L , representing a 14.1% rise compared to the current level of 64.4 mg/L , and thus meeting the assessment criteria.

Keywords: urban sewage system; quality improvement and efficiency enhancement; water quality model; efficacy evaluation

0 引言

海口市某污水处理厂系统提质增效项目为海口市污水系统提质增效及城区黑臭水体治理的先行试点示范项目。项目通过水质水量监测、污水管网缺陷检测以及现状排水管网混错接摸排, 对管网外水侵入点进行溯源, 编制了工程治理方案。项目通过污水系统挤外水工作, 提升污水处理厂进水 BOD_5 浓度及污水收集率。

由于项目范围大, 现状问题需要进行整体系统分析, 工程目标制定需要定量科学支撑, 同时为了发

挥试点项目的技术示范作用, 引入了排水系统数学模型评估技术^[1], 作为项目实施的保障手段, 确保试点项目顺利推进, 为后续其他项目提供参考。

1 工程概况

本文研究范围为海口某污水处理厂服务范围, 总面积 46.2 km^2 , 建模对象有污水主干管, 管径范围 $d300\sim d2200$, 总管长约 144 km , 污水处理厂服务片区划分为14个子片区。污水处理厂设计规模为 $5\text{万 m}^3/\text{d}$, 2023年全年实际进水量为 $5.57\text{万 m}^3/\text{d}$, 平均进水 BOD_5 浓度为 64.4 mg/L , 进水水质浓度较低, 现状水质未达到考核目标要求。通过外水调查, 发现46处外水点, 其中井管渗漏地下水31处、工地水7处、鱼塘水6处、草坪浇灌水1处、自来水1处。

收稿日期: 2026-01-23

作者简介: 王宏利(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为排水系统模拟与评估、海绵城市、排水防涝。

2 水质水量模型建立

2.1 模型原理方法

水质模型是依据质量守恒原理,采用数学方程来描述水体中各种污染物间随时间和空间的变化而发生的物理、化学以及各种生态变化,是描述水体中内在污染物的迁移转化规律和相互关系的一种数学模型^[2-3]。水质模型可分为水动力模块和水质模块两部分^[4]。水动力模块模拟水动力状况,水质模块模拟水质状况,这两部分为既相互独立又相互联系的子模型^[5]。

水质模型能够定量描述污染物的产生、转输、削减、排放等过程,为预测和评估工程治理方案效能提供了重要的依据,是一种研究城市水环境整治和规划等过程的重要工具^[6-7]。

核心模块管道转输是基于 St. Venant 方程通过解非线性方程组,计算得到各管道内水量、水位、流速等模拟值^[8]。St. Venant 方程组满足能量守恒、动量守恒及水的不可压缩性,使得模型可以准确计算分析树状和环状排水管网中重力流、满管流以及管道中的水力坡度线等水力学特性^[9]。

排水系统水质模型主要由污染物累积、冲刷、转输等模块构成,能够模拟污染物旱天累积、雨天冲刷及排放的全过程。水质模型基于污染物的质量守恒定律以及混合扩散原理^[10],计算方程如下^[11]:

$$\frac{dM_J}{dt} = \sum_i Q_i c_i + \frac{dM_{sJ}}{dt} - \sum_o Q_o c_o \tag{1}$$

$$M_J = C_J \times V_J \tag{2}$$

式中: M_J 为节点J处的悬浮沉积物和溶解污染物的质量,kg; Q_i 为从连接i流入节点J的流量, m^3/s ; C_i 为从连接i流入节点J的污染物浓度, kg/m^3 ; M_{sJ} 为从外部污染源进入到节点J的污染物质量,kg; Q_o 为从节点J流入连接o的流量, m^3/s ; C_o 为从节点J流入连接o的污染物浓度, kg/m^3 ; C_J 为节点J处的浓度, kg/m^3 ; V_J 为节点J处的水体积, m^3 。

2.2 模型的建立及参数设置

2.2.1 模型建立

本文建模基础数据源于项目测量资料,建模过程中需要对测量异常数据进行修正,并适当概化处理,保留主管、删除支管,根据主要排水方向,修正管道拓扑连接。本次建模范围总面积46.2 km²,建模对象有污水主干管4 558段,总管长约144 km,管径范围d300~d2 200,检查井4 564座,污水提升泵站共2

座。污水主干管模型分布及排水分区划分见图1。

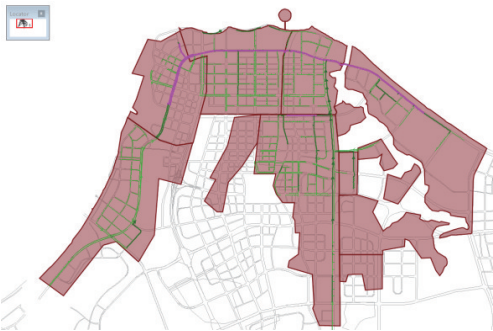


图1 污水主干管模型分布及排水分区划分图

2.2.2 计算参数选取

(1)污水量计算

水力模型中污水量计算的基础输入条件是污水节点平均流量与节点流量变化模式,可以用节点平均流量和节点流量变化模式系数值的乘积来表示各个节点的流量^[12],计算方程如下:

$$Q_{(s,t)} = \overline{Q}_s \times m_{(s,t)} \tag{3}$$

式中: $Q_{(s,t)}$ 为第s节点在t时段的节点流量, m^3/s ; $\overline{Q}_s$ 为第s节点在一段时间内的平均流量, m^3/s ; $m_{(s,t)}$ 为第s节点在t时段排水模式系数值,无量纲。

(2)节点平均流量

利用实际用水量数据及项目监测数据,计算得到各污水片区日平均污水流量。

(3)生活污水浓度(C_1)

根据各片区源头小区水质水量监测数据(见表1),得知片区污染物本底平均浓度BOD₅为80 mg/L。

表1 片区现状污水浓度情况表

片区	BOD ₅ /(mg·L ⁻¹)
2#长秀片区	33.4
3#会展中心片区	127.4
5#金沙湾片区	86.5
6#西海岸片区	113.2
7#西海岸南A片区	41.5
平均值	80

(4)本底生活污水量(Q_1)

根据流域现状供水量31 515 m³/d,按照污水排放系数0.9计算,则生活污水量为31 515×0.9=28 364 m³/d。

(5)外水量(Q_2)

流域现状日平均总污水量为55 700 m³/d,则生活污水以外水量(外水量)为55 700 - 31 515×0.9=27 337 m³/d,占比49%,超出了正常范围10%~15%的水平。

(6)外水污染物浓度(C_2)

按照污染物质量守恒公式,计算方程如下:

$$Q \times C = Q_1 \times C_1 + Q_2 \times C_2 \tag{4}$$

式中: Q 为污水量总量, m^3/d ; Q_1 为本底生活污水量, m^3/d ; Q_2 为外水量, m^3/d ; C 为总污水浓度, mg/L ; C_1 为生活污水浓度, mg/L ; C_2 为生活污水浓度, mg/L 。

计算出外水中污染物的浓度 BOD_5 为 $48.3\text{ mg}/\text{L}$ 。

(7)片区现状污水量

根据上述水质水量数据,通过面积比流量法,计算出各片区的污水量组成(见表2)。经计算,外水总量较多的为2#、5#、6#、8# 4个片区。

表2 片区污水量组成情况表

序号	面积/ hm^2	本底污水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	外水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	外水占 比/%
1#	200.0	1 209.6	1 209.6	50
2#	683.1	4 233.6	4 060.8	49
3#	348.0	2 160.0	2 073.6	49
4#	475.5	2 937.6	2 851.2	49
5#	706.4	4 320.0	4 147.2	49
6#	564.1	3 456.0	3 369.6	49
7#	167.6	1 036.8	950.4	48
8#	848.8	5 184.0	5 011.2	49
9#	49.8	345.6	259.2	43
10#	61.1	345.6	345.6	50
11#	321.0	1 987.2	1 900.8	49
12#	54.4	345.6	345.6	50
13#	46.9	259.2	259.2	50
14#	90.3	518.4	518.4	50
合计	4 617.0	28 339.2	27 302.4	49

3 模型校核

水质模型计算结果是对管网真实水力状态的估计和预测,其准确性取决于输入数据的准确性和合

理性。模型校核是模型能有效应用的前提,是一个通过调整模型参数、反复计算、不断修正模型的过程^[13],直到模型计算值与实际监测值的误差在允许的范围之内。模型校核的成功与否不仅决定了模拟结果的准确程度,同时也直接关系到模型生命周期内的可信性与合理性。

参考借鉴相关规程^[14],结合本项目实际情况,设定水质模型校核应满足:流量数值偏差在 $\pm 15\%$ 以内,污染物浓度偏差均值在 $\pm 15\%$ 以内。偏差计算公式如下^[15]:

$$\bar{R}_i = \frac{M_i - Q_i}{Q_i} \times 100\% \tag{5}$$

式中: R_i 为第 i 个模拟和实测偏差,无量纲; M_i 为第 i 个模拟值, m^3/d 或 mg/L ; Q_i 为第 i 个实测值, m^3/d 或 mg/L 。

(1)关键点位校核

根据水质水量监测情况,选取了8个管网关键点位(见图2)进行校核,模型模拟结果满足各监测点流量数值偏差在 15% 以内,浓度偏差均值在 15% 以内(见表3)。



图2 校核点位分布图

表3 检核点位偏差情况表

校核点	实测流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	模拟流量/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	水量偏差/%	实测浓度 BOD_5 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	模拟浓度 BOD_5 / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	污染物浓度偏差/%
1	16 237	15 136	-6.8	9.2	10.5	14.1%
2	1 649	1 520	-7.8	58.4	66.1	13.2%
3	2 341	2 101	-10.3	23.4	26.0	11.1%
4	805	758	-5.8	89.8	81.0	-9.8%
5	3 198	2 950	-7.8	22.7	21.3	-6.2%
6	6 794	6 020	-11.4	100.1	95.0	-5.1%
7	2 803	2 402	-14.3	39.7	42.0	5.8%
8	7 347	6 952	-5.4	36.4	32.0	-12.1%

(2)模型系统整体性验证

水质模型经过校核后,旱季污水处理厂进厂总管水质、水量模拟结果基本与实际运行数据相符,污水处理厂进厂总管模拟水量为 $50\,086\text{ m}^3/\text{d}$,现状平

均污水量为 $55\,700\text{ m}^3/\text{d}$,模拟偏差 -10% (见图3)。污水处理厂进厂总管模拟水质 BOD_5 为 $63.1\text{ mg}/\text{L}$,现状平均进水 BOD_5 为 $64.4\text{ mg}/\text{L}$,模拟偏差 -2% (见图4)。

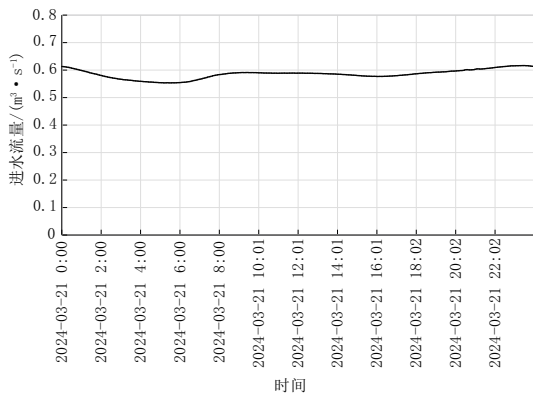


图3 污水处理厂进厂水量模拟结果

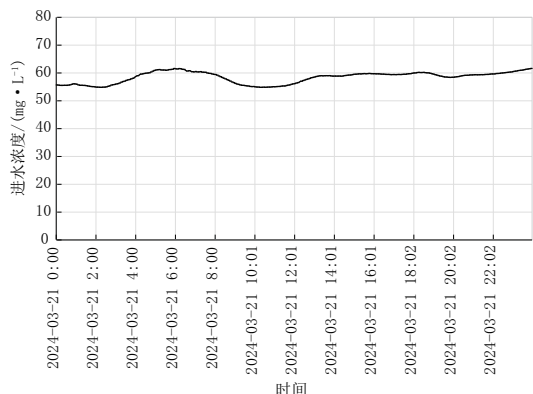


图4 污水处理厂进厂水质 BOD₅ 模拟结果

4 方案效能评估

4.1 项目措施方案

流域提质增效项目进水 BOD₅ 浓度提升主要通过“挤外水”实现,工程措施如下:

(1)雨水算子或雨水管接入污水系统。该类改造拟纳入工程“错接点改造工程”子项。

(2)低浓度外水,例如景观排水、游泳池排水等。该类改造拟纳入“错接点改造工程”子项。

(3)施工降排水。该类改造拟纳入“错接点改造工程”子项。

(4)地下水,主要通过重大破裂、渗漏、脱节、错口等缺陷进入污水管道。该类改造拟纳入“污水管道修复工程”子项。

(5)河水,主要通过倒虹管破裂、渗漏进入污水管道。该类改造拟纳入“污水管道修复工程”子项。

工程方案拟局部修复 980 处、整体修复 3 088.6 m、现状管网开挖修复 5 045.8 m;新建污水管网 3 121 m、新建一体化泵站 1 座、新建雨水管网 194.4 m。

4.2 项目实施后进厂浓度提升效果

经分析,项目主要针对 2#、3#、5#、6#、7#、8# 片区实施“挤外水”工程措施,实施后各片区污水量情况

见表 4,片区总外水量为 0.97 万 m³/d。通过水质模型分析评价工程实施效果:旱季污水处理厂进水中污染物 BOD₅ 指标的浓度提升到 73.5 mg/L,较现状 64.4 mg/L 提升了 14.1%(见图 5、图 6),达到考核目标要求。

表 4 工程实施后长流污水厂各分区污水量信息表

序号	面积/hm ²	本底污水量/(m ³ ·d ⁻¹)	外水量/(m ³ ·d ⁻¹)	外水占比/%
1#	200.0	1 209.6	1 209.6	50
2#	683.1	4 233.6	432.0	9
3#	348.0	2 160.0	172.8	7
4#	475.5	2 937.6	2 851.2	49
5#	706.4	4 320.0	432.0	9
6#	564.1	3 456.0	345.6	9
7#	167.6	1 036.8	86.4	8
8#	848.8	5 184.0	518.4	9
9#	49.8	345.6	259.2	43
10#	61.1	345.6	345.6	50
11#	321.0	1 987.2	1 900.8	49
12#	54.4	345.6	345.6	50
13#	46.9	259.2	259.2	50
14#	90.3	518.4	518.4	50
合计	4 617.0	28 339.2	9 676.8	25

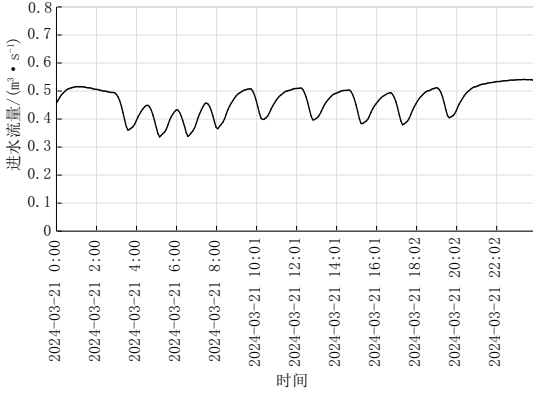


图5 工程后污水处理厂进厂水量模拟结果

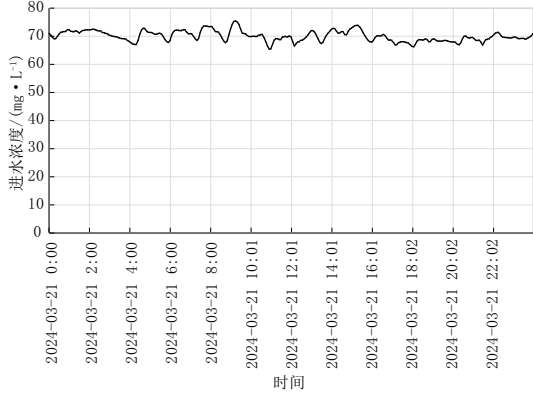


图6 工程后污水处理厂进厂水质 BOD₅ 模拟结果

5 结 语

本文论述了海口某污水处理厂流域水质水量数

(下转第 328 页)