

城市污水系统高水位运行下外水入侵诊断研究

东 阳

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 城市污水系统旱季高水位运行下的外水入侵问题诊断是提升系统运行效能的重要支撑工作。以逐层级问题区域锁定为主要目标, 构建了以供排水联动水量平衡分析和人工水质监测为核心的外水入侵诊断研究总体框架。以南方某城市污水处理厂服务范围为研究区域, 评估了各泵站服务范围的外水入侵量, 针对识别的重点区域分层级开展管网关键节点的人工水质监测。通过现场核查、水质指标特征分析和已有管道缺陷检测数据比对, 锁定点位3、5、7、11、19、20、24因上游污水管道缺陷存在外水入侵, 而研究区域内管道缺陷引起的输水能力降低加剧了污水系统的高水位运行。提出的高效经济污水系统外水入侵问题诊断方法可为类似城市提供参考。

关键词: 城市污水系统; 高水位运行; 外水入侵; 问题诊断

中图分类号: TU992.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)09-0270-06

Research on Diagnosis of External Water Intrusion in Urban Sewage Systems under High Water Level Operation

DONG Yang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: The diagnosis of external water intrusion in urban sewage systems under high water level operation during the dry season is an important supporting task for improving the operational efficiency of the system. By locking down the problem areas layer by layer as the main objective, an overall framework for the research on the diagnosis of external water intrusion is constructed with the analysis of water balance in water supply and drainage linkage and the manual water quality monitoring as the core. Taking the service scope of a municipal wastewater treatment plant (WWTP) in a southern city as the research area, the amount of external water intrusion in the service scope of each pumping station is evaluated. The manual water quality monitoring of key nodes in the pipeline network at different levels for the identified key areas is carried out. Through the on-site verification, analysis of water quality indicators, and comparison with the defect detection data of the existing pipelines, the locked points 3, 5, 7, 11, 19, 20 and 24 have external water intrusion due to defects in the upstream sewage pipeline. The reduced water conveying capacity caused by the pipeline defects in the study area exacerbates the high water level operation of the sewage system. The diagnostic method proposed for the external water intrusion in sewage system is efficient and economical, which can provide a reference for similar cities.

Keywords: urban sewage system; high water level operation; external water intrusion; problem diagnosis

0 引 言

城市污水系统的旱季高水位运行目前已成为我国南方大部分城市排水管网系统运行效能提升的重要制约^[1-2], 排水管网错混接和结构功能缺陷等原因带来的外水入侵是污水管网高水位运行的关键影响因素^[3-6], 因此在高水位运行条件下开展城市污水系统旱季外水入侵评估和问题诊断具有

重要的现实意义。

伴随着快速城市化进程中污水收集率和处理量的提高, 城市污水系统的外水入侵运行问题诊断正逐渐得到重视。陆文林等^[7]通过降低和憋高管网水位的工况实验, 结合现场排查、水质监测等手段, 识别了河水入侵、雨污管道错混接、地下水入渗等导致外水入侵的关键因素和问题节点, 并提出了整治对策。杨浩铭等^[8]基于对深圳市某污水厂进水长历时水量和水质数据的统计分析, 对污水厂服务范围内的外水入侵整体情况进行了评估。丁欣^[9]提出了基于分区诊断技术、固定与便携式流量监测结合的污

收稿日期: 2025-08-17

作者简介: 东阳(1986—), 女, 博士, 高级工程师, 从事城市水系统分析、智慧排水等研究工作。

水系统旱天外水入侵排查模式。曾祥华等^[10]将上海某城镇污水厂划分为 18 个排水分区,通过对各分区一级和二级污水管关键节点进行 COD 在线监测,判断外水入侵的问题区域。顾毅杰^[11]和刘希希^[12]借助同位素示踪剂手段对污水管道外水入侵比例进行了计算。

一方面,现有外水入侵问题诊断方法大多依赖流量或水质在线监测,但精细化监测设备安装和维护成本较高且见效慢,往往限制了方法的推广应用。另一方面,外水入侵问题管段的识别需要与管网缺陷检测等工作结合,高水位运行条件下往往需要提前降低管网运行水位,较难针对大范围区域开展管网缺陷检测。因此,本研究以逐层级问题区域锁定为核心,构建了基于供排水联动水量平衡分析和人工水质监测的城市污水系统外水入侵问题诊断方法,并以南方某城市高水位运行的污水处理厂服务范围为案例开展了实践探索,研究方法高效经济,成果可为类似城市的污水系统运行问题诊断提供参考。

1 研究区域概况

研究区域选择南方某城市高水位运行问题突出的某污水厂服务范围,总面积约 18 km²。该区域位于浅层地下水区域,为分流制排水体制。如图 1 所示,依据区域内 10 个污水泵站服务范围,将污水系统划分为 11 个片区,其中 ZL-SA 为 10 个泵站服务范围以外污水厂前的下游服务范围。

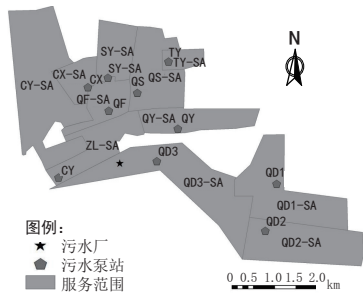


图 1 研究区域范围

污水系统由 5 条污水支线组成,分别对应 CY、QY、QF、QS 和 QD3 等 5 个一级污水泵站,泵站、污水处理厂的空间拓扑关系如图 2 所示。

研究区域内污水处理厂 2020—2022 年进厂水量运行负荷率均超过 96%,表 1 所示区域内 20 个污水管网液位监测点的平均液面标高数据也表明 95% 的点位在旱季处于高水位运行状态。研究区域内的泵站输送污水旱天存在浓度偏低的情况,如图 3 所示,

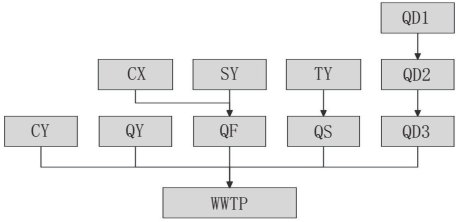


图 2 研究区域污水泵站空间拓扑关系

表 1 研究区域 2022 年 10 月至 2023 年 3 月液位点平均液位

序号	液面标高/m	管底标高/m	充满度/%	管径/mm
1	1.84	1.68	53.3	300
2	2.97	1.87	100	450
3	2.16	1.2	100	450
4	2.71	1.74	100	450
5	1.53	0	100	800
6	2.77	1.89	100	300
7	3.07	-0.53	100	400
8	4	0	100	600
9	2.86	1.77	100	300
10	1.83	0	100	800
11	2.5	1.37	100	300
12	2.26	1.66	100	300
13	3.33	2.72	100	300
14	2.64	1.91	100	450
15	1.96	0	100	300
16	1.65	-0.63	100	400
17	2.7	0.69	100	300
18	2.29	1.42	100	450
19	2.74	0.42	100	300
20	2.64	1.45	100	400

QF 泵站在全年 165 个旱天(降雨当天和雨后 2 d 算雨天)中有 64 d 出水 COD 浓度低于 150 mg/L。因此亟需针对此研究区域开展外水入侵诊断研究。

2 研究方法

基于实用性、简易性和经济性原则,本研究以逐层级锁定问题区域为核心目标,构建了城市污水系统高水位运行下的外水入侵问题诊断方法,如图 4 所示。

该方法通过水量平衡分析识别污水系统外水入侵的重点区域,结合管网空间拓扑分析、重点区域水质特征识别、管道缺陷检测和雨污混接排查,诊断高水位运行下污水系统外水入侵的关键问题区域和成因。

2.1 外水入侵重点区域识别

2.1.1 原生污水量

本研究中原生污水量指根据用水量和城镇排水系数折算的污水产生量。

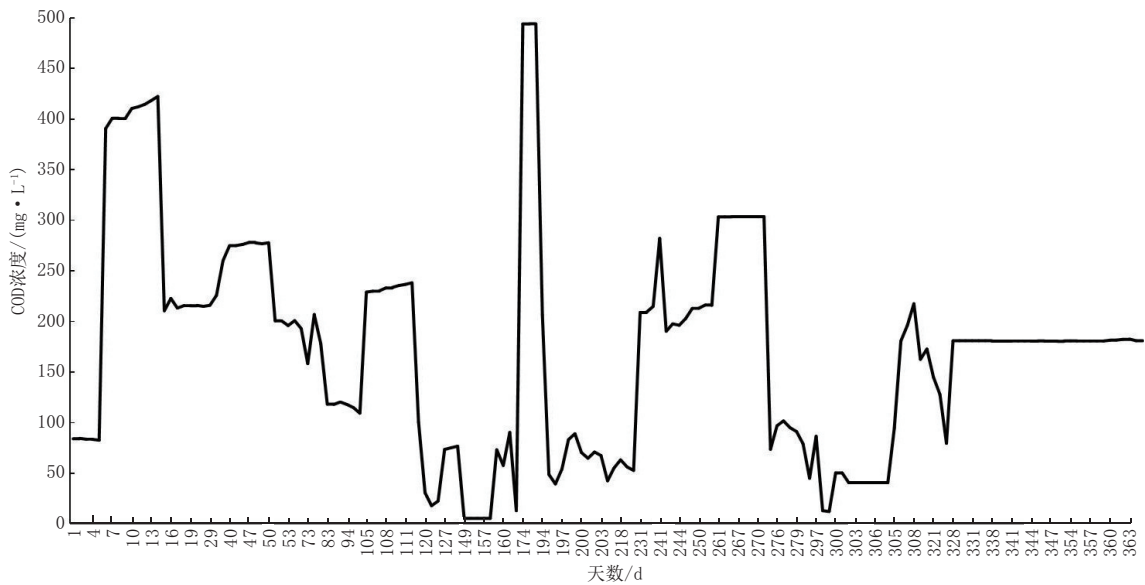


图3 2021年QF泵站旱天出水COD浓度

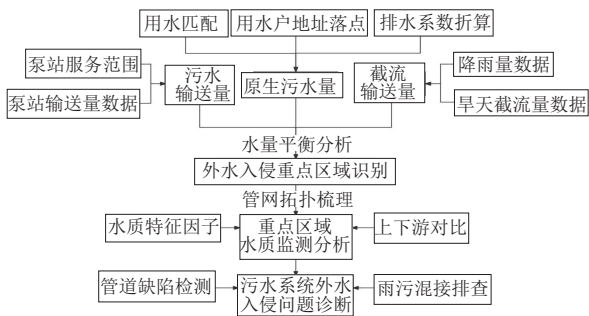


图4 污水系统外水入侵问题诊断技术路线

基于研究区域内2022年的用水户水表账单数据,通过对用水地址进行空间落点并与用水量信息匹配,得到各泵站服务范围内以用水户为最小单元的用水量空间分布。采用系数折算法进行不同用水性质的原生污水量计算,其中工业用水的排水系数取0.75,居民和其他性质用水的排水系数取0.9。通过对各类性质的原生污水量进行加和,得到各泵站服务范围内的原生污水量。

2.1.2 污水输送量

基于获取的各泵站2022年旱天运行监测SCADA系统历史数据,计算泵站服务范围内的污水输送量。

2.1.3 截流输送量

对于泵站服务范围内的污水系统存在截流输入的,需要获取截流泵的运行监测SCADA系统历史数据,计算旱天进污水系统的截流输送量。

2.1.4 外水入侵量

本研究中外水入侵量指由于管网破损、脱节、密封失效等原因,造成地下水、河水等外来水进入污水系统的水量。基于水量平衡分析,对各泵站服务范围的外水入侵量分别进行计算,如式(1)所示。

外水入侵量=污水输送量-原生污水量-截流输送量(1)

基于计算得到的各泵站服务范围内旱天污水系统的外水入侵量,识别研究区域内外水入侵的重点区域。

2.2 重点区域水质监测分析

针对识别出的外水入侵重点区域,综合考虑指标的代表性、可溯源性和经济性,本研究选择生化需氧量(BOD₅)、氨氮(NH₃-N)和电导率等3个作为水质监测的特征指标,用于支撑污水系统外水入侵问题区域和成因的进一步诊断。

基于重点区域开展污水管网空间拓扑关系梳理,遵循逐层级往下锁定问题区域的原则,在污水主干节点、污水支线的关键汇入节点布设水质监测点位,并开展水质特征指标监测。

2.3 污水系统高水位运行下外水入侵问题诊断

通过水质特征指标的空间分布特征分析,结合管道缺陷检测、雨污混接排查、现场核查等手段,进一步识别疑似导致污水系统高水位运行的外水入侵、沉积等关键问题管段,并提出污水管网检测修复、提标改造等对策建议。

3 高水位运行下外水入侵问题诊断

3.1 重点区域识别

研究区域2022年各泵站服务范围的外水入侵量如表2所示。QD3泵站的旱天日均污水输送量小于上游QD2泵站,两泵站之间的服务范围QD3-SA的污水输送量计算值为负值,因此在本研究中不参与外水入侵量的计算。

表2 2022年泵站服务范围外水入侵量分析

服务范围	污水输送量/(万 m ³ ·d ⁻¹)	原生污水量/(万 m ³ ·d ⁻¹)	截流输送量/(万 m ³ ·d ⁻¹)	外水入侵量/(万 m ³ ·d ⁻¹)	外水入侵率/%
CY-SA	0.67	0.88	0	-0.22	-32.60
QD1-SA	0.49	0.17	0	0.33	66.50
QD2-SA	2.93	0.27	0	2.66	90.71
QY-SA	0.12	0.37	0	-0.24	-198.20
QF-SA	0.07	0.25	0.22	-0.40	-538.23
SY-SA	0.58	0.14	0.005	0.44	75.29
TY-SA	0.70	0.21	0	0.49	69.74
QS-SA	0.001	0.26	0.23	-0.49	-38 057.56
CX-SA	0.24	0.05	0	0.20	81.21

计算结果显示,不同污水泵站服务范围的外水入侵量呈现较大的空间差异,基于2022年外水入侵率大小排序,识别出QD2-SA、CX-SA、SY-SA、TY-SA、QD1-SA为存在污水系统外水入侵的重点区域,需要开展更为精细化的外水入侵问题诊断。

需要注意的是,QD3泵站污水输送量与上游QD2泵站相比的显著倒挂,以及CY-SA、QY-SA、QF-SA和QS-SA范围内外水入侵率的负值表明,以上区域管道输送污水从系统中流失的可能性较大,需要进一步开展核查。

3.2 水质监测分析

基于水量平衡分析识别出的外水入侵重点区域,综合考虑输送污水流失的核查需求,选择CX-SA、SY-SA、QD1-SA、QD2-SA所在的QF支线和QD3支线作为水质监测的区域。TY-SA范围内因污水管网本底数据缺失,在本研究中未纳入。

本研究基于污水管网空间拓扑关系,在QF和QD3泵站一级支线上的主干节点、二级支线汇入一级支线的关键末端节点共布置了24个水质监测点位。监测点位空间分布如图5所示,QF支线的17个点位中,点位1-4位于CX泵站服务范围,点位5-9位于SY泵站服务范围。QD3支线的7个点位中,点位20位于QD1泵站服务范围,点位21-24位于QD1与QD2泵站之间的服务范围。

3.2.1 QF 支线

图6所示的CX-SA范围内水质监测结果表明,与上游点位1和2相比,点位3处电导率和NH₃-N监测浓度均显著降低,NH₃-N降至29.40 mg/L,而BOD₅浓度则显著增加。对照管道检测数据,发现点位3上游管段存在井室管道渗漏4级、管道变形3级等结构性缺陷,以及坝头、油块堵塞等功能性缺陷;点位1和2的上游管段存在变形等共计4处结构性缺陷。根据水质监测分析结果,初步判断点位3上游区域

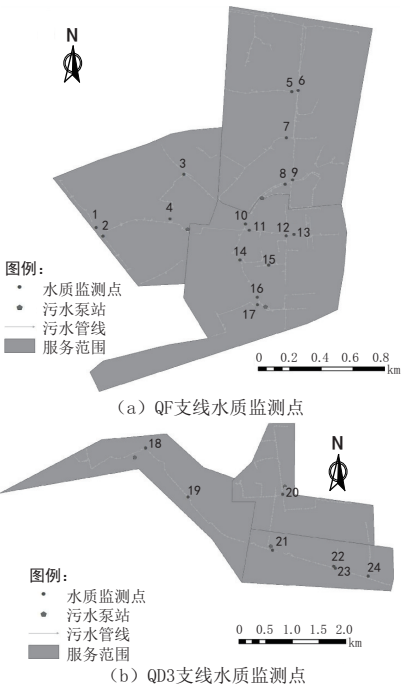


图5 QF支线和QD3支线水质监测点位分布图

存在管道缺陷导致的外水入侵。

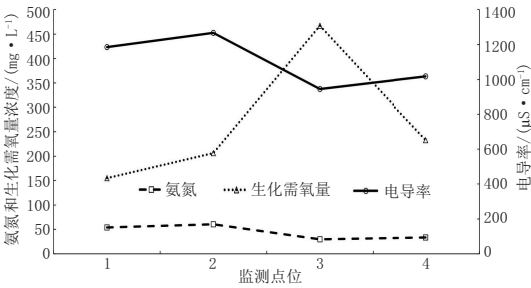


图6 CX-SA范围内水质监测结果

SY-SA和QF-SA范围内污水主干管上监测点按照上游至下游的顺序依次为点位6、9、8、10、14和16。如图7所示,通过对上下游相邻的点位的水质指标浓度进行比较,发现下游点位9和上游点位6相比,BOD₅有显著下降,对应的NH₃-N和电导率也有一定程度的下降;点位14与点位10相比,BOD₅也有显著下降。

因此接下来重点对点位6和9之间、点位10和

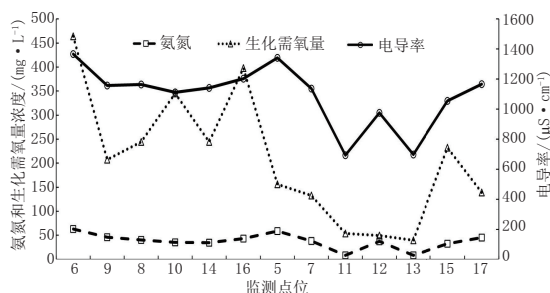


图7 SY-SA和QF-SA范围内水质监测结果

14之间汇入主干管的支线进行溯源分析。

点位5和点位7为点位6和9之间2条汇入支线的末端节点,水质监测结果对比分析显示,点位5和7的 BOD_5 浓度显著低于点位6,点位7的 NH_3-N 浓度较点位6下降了40%。对照已有CCTV管道检测数据发现,点位5所在的支线管段存在1处1级渗漏的结构性缺陷,以及2处沉积功能性缺陷;点位7所在支线管段已有的CCTV检测结果并未显示问题,但检测覆盖并未全面。因此,判断点位5和点位7所在污水支线管段存在外水入侵,建议在点位5和7所在的支线开展全面的CCTV检测,以支撑进一步的问题管段识别。

点位11、12、13和15为点位10和14之间2条汇入支线的节点。点位11-13的 BOD_5 浓度显著低于QF支线范围内的其他点位,最大为53.90 mg/L,最小仅为39.20 mg/L;点位11和13电导率、 NH_3-N 浓度也显著低于其他点位,其中 NH_3-N 低于10 mg/L,电导率低于700 $\mu S/cm$,表明点位11上游管段存在较大的外水入侵可能。对照已有的CCTV管道检测数据发现,点位11至点位13之间的污水管道存在1处4级变形开裂结构性缺陷和1处4级障碍物功能性缺陷;点位13上游污水管道已有的CCTV检测结果并未显示问题,但检测覆盖并不全面。因此推断点位11上游存在管道结构缺陷带来的外水入侵,同时建议在点位13上游开展全面的CCTV检测。

点位17处的 BOD_5 监测浓度低于140 mg/L,在QF泵站服务范围内处于较低水平。经已有CCTV检测数据核查后发现点位17上游管段存在1处2级障碍物、2处泥沙沉积等功能性缺陷,因此建议在点位17所在支线上开展全面的CCTV检测。

3.2.2 QD3支线

QD3支线范围内污水主干管上监测点按照上游至下游顺序排列,依次为点位23、21、19和18。

QD3支线的污水主干监测点的水质对比分析表明,点位19相较上游点位21,电导率、 BOD_5 和 NH_3-N

浓度均显著降低。如图8所示,点位19的电导率低于250 $\mu S/cm$, BOD_5 浓度低于60 mg/L, NH_3-N 监测浓度低于1.5 mg/L,判断点位19至点位21的管段有大量的外水入侵。对照已有的CCTV管道检测数据,发现点位19至点位21的污水管段存在破裂、变形、渗漏等共计3处结构性缺陷,以及2处沉积功能性缺陷。在水质监测现场发现,点位19的采样样品气味与河道水十分相似。结合水质浓度的检测结果,推断点位19与点位21之间的管道存在结构缺陷导致的河道水入侵。

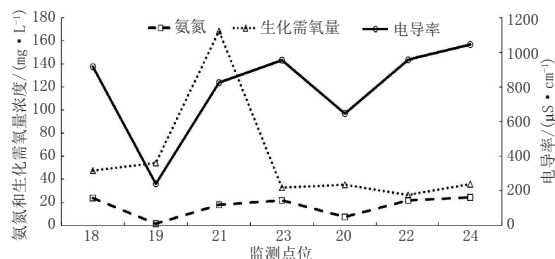


图8 QD3支线范围内水质监测结果

QD3支线内所有点位的监测数据表明,除点位21的 BOD_5 浓度大于100 mg/L,其余点位 BOD_5 浓度均低于60 mg/L; NH_3-N 浓度均低于25 mg/L,点位19和20的 NH_3-N 低于8 mg/L;电导率均低于1 100 $\mu S/cm$,点位20的电导率低于650 $\mu S/cm$ 。该支线范围内的水质浓度整体处于较低水平,对照支线服务范围内已有CCTV管道检测数据,发现除了点位19上游干线存在的管道缺陷问题以外,支线上的管段还存在破裂、坍塌、错位、异物入侵等共计7处结构性缺陷,以及障碍物、洼水等共计7处功能性缺陷。因此推断QD3支线范围内除点位19和21之间以外,点位20上游支线、点位24上游支线存在大量外水入侵。

3.3 外水入侵问题诊断

基于水质监测分析、管道缺陷检测和现场核查,推断3、5、7、11、19、20、24等7个点位存在污水管道缺陷导致的外水入侵,导致管道污水浓度大幅降低并抬高了管网运行水位。以上点位所在上游支线已发现的缺陷管段为亟需重点整治的问题管段。为进一步核实推断结果、继续深入锁定问题管段和外水来源,点位5、7、13和17所在上游支线建议开展全面的CCTV检测。

同时,诊断发现的点位5上游支线、点位11至点位13之间管段、点位17上游支线、QD3支线范围存在的障碍物、沉积、洼水、异物入侵等缺陷对管道输水能力的降低也是研究区域污水系统高水位运行的重要原因。

QD3 支线的水量平衡和水质监测分析结果表明,该区域同时存在污水系统外水入侵和输送污水流失的问题,亟需在已识别问题管段修复改造的基础上,进行新一轮的水质加密监测和问题诊断,并针对重点区域开展雨污混接排查和排水管网缺陷补充检测工作。

4 结 语

本研究聚焦问题区域的锁定,构建了以供排水联动水量平衡分析和人工水质监测为核心的城市污水系统高水位运行条件下的外水入侵问题诊断研究框架。以南方某城市污水处理厂服务范围为案例研究,评估了以泵站服务范围为单元的外水入侵量,针对识别的重点区域开展了管网逐层级关键节点的人工水质监测。基于水质指标空间特征分析,推断疑似存在外水入侵的关键区域,通过现场核查、与管道已有的 CCTV 检测数据进行比对,进一步锁定了问题管段。

诊断分析结果表明,点位 3、5、7、11、19、20、24 因污水管道缺陷存在外水入侵,且研究区域内管道缺陷导致的输水能力降低进一步加剧了污水系统的高水位运行状态。

城市污水系统的高水位运行问题成因复杂,在浅层地下水区域除了受到地下水渗入、河水倒灌等外水入侵等因素的影响,还与污水管网自身设计排

水能力紧密相关。建议下一步应结合对管网设计能力的评估、实际工况试验、水质加密监测、排水管网缺陷补充检测等多种手段,分析各项因素对污水系统高水位运行的贡献,从而对研究区域的运行状态进行更为系统和精细化的问题诊断。

参考文献:

- [1] 周文磊,戚心怡.某市河西片区污水管网高水位运行成因分析及对策探讨[J].市政技术,2024,42(4):254-260.
- [2] 颜莹莹,陈凤梅,李强,等.基于水力模型的污水管网高水位运行问题对策研究[J].给水排水,2024,50(1):121-128.
- [3] 汪天祥,闫超,陈德业,等.城镇污水管网高水位运行影响与诊断研究[J].东北水利水电,2022,40(1):25-28.
- [4] 梁毅,袁忆博,李威,等.深圳市污水管网建设绩效考核评价体系构建[J].中国给水排水,2017,33(12):46-49.
- [5] 余凯华,陈昱霖.管网高水位运行城市污水处理设施补短板策略研究[J].给水排水,2021,47(10):115-118.
- [6] 胡和平,王绍彪,廖瑜.污水管网高水位运行原因及对策措施研究[J].给水排水,2021,47(2):128-132.
- [7] 陆文林,钱铎怀,黄浩辉,等.东莞市水乡片区污水管网外水入侵排查及整治对策研究[J].给水排水,2023,49(增刊1):433-438.
- [8] 杨浩铭,唐颖栋,魏俊,等.基于长历时监测的外水入侵诊断分析研究[J].给水排水,2021,47(增刊1):218-221.
- [9] 丁欣.污水系统旱天外水入侵排查应用研究[J].城市道桥与防洪,2025(6):230-233;258.
- [10] 曾祥华,聂世勇.基于分区分级诊断方法的上海某城镇污水厂外水入侵状况评估[J].净水技术,2025,44(7):93-100.
- [11] 顾毅杰.基于硫稳定同位素的污水管道外水入侵比例测算研究[D].天津:天津大学,2021.
- [12] 刘希希.基于氢氧同位素的污水管道双源外水入侵比例算法研究[D].天津:天津大学,2021.

(上接第 269 页)

before and after rehabilitation using HEC-RAS[J].Clarivate Analytics Web of Science, 2024, 14(1):23077.

- [10] 张岩,崔喜艳.水库建设对河道行洪及河势的影响研究[J].黑龙江水利科技,2025,53(3):89-92.
- [11] 吴科军.水库建设运行对水阳江水文条件变化影响分析[J].陕西水利,2020(9):56-58.
- [12] 栾巍.桥梁建设对河道水流影响的数值模拟分析[J].水利科技与经济,2022,28(10):63-67.

- [13] 杨德轩.桥梁壅水的计算[D].北京:北京交通大学,2007.
- [14] 张瑞凯,向洪勇,董亚辰.跨河桥梁阻水比影响及控制指标研究[J].中国农村水利水电,2025(7):25-30;37.
- [15] 许伟,胡晓张,邹华志,等.涉河建设项目阻水比计算方法研究[J].中国农村水利水电,2025(3):90-94.
- [16] 王金华,高正荣,章卫胜,等.洋流影响区域桥梁工程设计流速推算——以中马友谊大桥为例[C]//第二十一届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(下).南京:中国海洋学会海洋工程分会,2024.