

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.23.012

泵排式污水系统入流入渗的综合评估方法研究

周水良¹, 刘东东², 汤磊², 程晓¹, 魏佳峰³, 韩富亘³,
周永潮², 张仪萍²

(1. 平湖市水务投资<集团>有限公司, 浙江 嘉兴 314299; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310030; 3. 浙江润意水务科技有限责任公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘要: 降雨导致的入流入渗现象是影响污水管网运行的主要问题,对入流入渗进行评估是提升污水管网管理水平的重要内容。泵排式污水系统的排放流量受泵站控制,而在大雨工况下由于污水处理厂负荷的制约,泵站往往处于关闭状态,因此以排放流量作为主要评估依据的传统方法无法适用。为此,笔者以PH市独山1#排水系统为案例,以开泵事件为研究对象,在三类运行工况下,综合分析液位、流量和水质的变化规律,从而进行入流入渗评估。结果表明,该排水系统既存在降雨时的直接入流,也存在降雨导致的入渗现象,但总体以直接入流为主,入渗量相对较少。通过水质分析可知,电导率对晴雨天变化具有较好的响应,且电导率数据相对较易监测,因此可把电导率作为入流入渗的评估指标。

关键词: 泵排式污水系统; 入流入渗; 降雨; 评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)23-0074-06

Comprehensive Evaluation of Inflow and Infiltration in Pump Drainage Sewage System

ZHOU Shui-liang¹, LIU Dong-dong², TANG Lei², CHENG Xiao¹, WEI Jia-feng³,
HAN Fu-gen³, ZHOU Yong-chao², ZHANG Yi-ping²

(1. Pinghu City Water Investment <Group> Co. Ltd., Jiaxing 314299, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310030, China; 3. Zhejiang Runyi Water Technology Co. Ltd., Jiaxing 314000, China)

Abstract: Rainfall-derived inflow and infiltration is the main problem affecting the operation of sewage networks. The evaluation of inflow and infiltration is an important task to improve the management level of sewage networks. The discharge flow of pump drainage sewage systems is controlled by their pump stations. However, the pump station is often stopped due to the restriction of the load of the sewage treatment plant under heavy rain conditions. Therefore, traditional methods based on discharge flow as the main evaluation basis are not applicable. This paper comprehensively analyzed the change rules of water level, flow and water quality in pump opening events of Dushan 1# sewer system in PH city under three types of operating conditions, so as to evaluate the impact of inflow and infiltration. In the drainage system, there was both direct inflow during rainfall and infiltration caused by rainfall. However, it was

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878597)

通信作者: 周永潮 E-mail: zhoutang@zju.edu.cn

mainly direct inflow, with relatively small infiltration. The water quality analysis showed that conductivity had a good response to the change of sunny and rainy days. In addition, conductivity was relatively easy to detect, so it could be used as the evaluation index of inflow and infiltration.

Key words: pump drainage sewage system; inflow and infiltration; rainfall; evaluation

排水管道系统是城市基础设施的重要组成部分,被称为城市的“静脉”,在城市中担负着及时排除污水、雨水,保障城市安全、卫生的责任,但是降雨导致的入流入渗现象十分突出。李兰娟等^[1]在上海对雨污管道进行检查时,发现在 1.9×10^4 km的分流制雨污管道内,混接点高达20 290处。大量管道处于带病运行的状态,导致外来水体十分容易进入污水管道系统,因此入流入渗问题普遍存在。尤其是在地下水位高且气候湿润多雨的南方地区,入流入渗的问题更为严重。

为研究排水系统中入流入渗的情况,国内外学者提出了各种评估方法^[2-6],其中,通过晴雨天的流量对比是最为简便、直接的方法。薛梅等^[7]采用晴雨天污水管道流量分析法,计算日本关东区某下水道中的不明水量,研究发现雨水入流量与降雨量之间存在良好的相关性,表明该系统存在较为严重的入流入渗问题;徐祖信等^[8-9]在研究我国某大型污水处理厂2011年—2018年晴雨天的进水量时发现,污水处理厂的雨天进水量平均值超过晴天的14%~23%,最大值可达到同期晴天进水量的1.7~2.3倍;Wilén等^[10]发现在降雨条件下,随着降雨量的增加,污水处理厂进水的组成和性质均发生改变,进而影响到工艺的处理效率和出水水质。

PH市属于平原河网地区城市,由于地下水水位较高,且降雨频繁,PH市独山片区的污水排放系统中也存在降雨导致的入流入渗现象。但是由于该系统通过泵站排放污水,而在大雨工况下污水厂已处于超负荷状态,因此独山泵站往往采取停泵运行的方式,使得以排放流量为主要依据的传统入流入渗分析方法难以适用。为此,笔者提出了一种综合分析方法,旨在分析评估独山片区排水系统由降雨导致的入流入渗情况。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

选择典型泵排式污水排放系统为研究对象,该系统位于浙江省PH市独山港镇,由独山1#泵站调

控,服务面积约为4.5 km²,附近有自西向东南方向的HGT河以及自北向南的WG河。研究区域内多为工业和村镇用地,污水管道干管总长约6.3 km,管径范围为DN300~500。

研究区域见图1,根据排水管道拓扑结构的東西位置将排水系统分成两个片区,分别命名为E区和W区。另外,选择排水系统干管、有较大子汇水区接入的检查井作为数据监测点,共设置①~④号以及独山1#泵站5个测点。

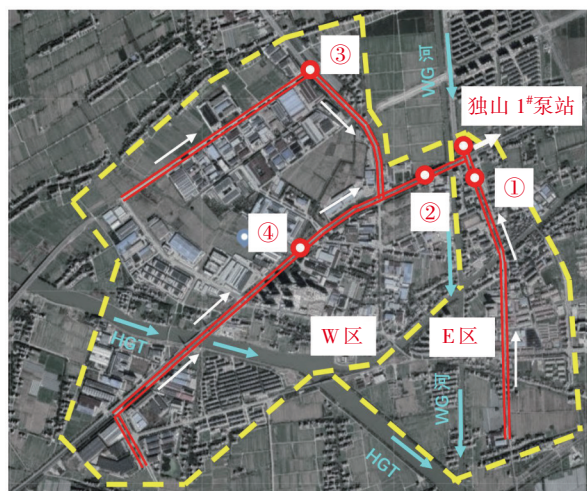


图1 研究区域及数据监测点

Fig.1 Study area and data monitoring points

研究使用的数据监测设备共有三类,包括流量计、液位计和雨量计。流量计采用美国Teledyne Isco公司的面积速度流量计,流量计探头的安装方向一般与水流方向相同以确保读数为正,出现负值时表示管内发生逆向流动;液位计选用Oneset公司的压力式液位计,使用时用尼龙绳悬挂于井壁吊环处,保证浸没于水位以下即可;雨量计为翻斗式雨量计,可测最大降水强度为4 mm/min。为保证数据的可靠性,本研究放置2台同步计数的雨量计于独山1#泵站内,其余两类仪器则根据管道情况分布在各个测点,设备安装的具体情况见表1。其中,流量计共安装4台,用L表示;液位计共安装5台,用Y表示;雨量计共安装2台,用R表示。流量计、液位计

与雨量计于2021年4月8日—9日安装完毕。所有仪器的数据均设定为每5 min采集一次,试验定期开展数据读取与设备维护管理工作。另外,定期开展水样采集和水质监测工作,选择E、W两个主汇水区管网末端的①、②两点为采样点,用D表示,其中电导率采用HACH公司的HQ-40d便携式电导率仪测定,检测精度为0.01 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。

表1 监测点位与设备安装情况

Tab.1 Monitoring points and equipment installation

| 测点 | 设备安装情况 |
|--------|------------|
| ① | L1, Y1, D1 |
| ② | L2, Y2, D2 |
| ③ | L3, Y3 |
| ④ | L4, Y4 |
| 独山1#泵站 | Y0, R1, R2 |

1.2 工况划分

降雨导致的入流入渗主要包括降雨时的直接入流和降雨导致的入渗,即降雨过程中雨水入渗地下后从管道破裂处渗入地下管道。直接入流往往发生在降雨过程中及雨后汇流时间内,而间接入渗则可在雨后持续一段时间。因此,本研究将工况分成三类进行数据分析:连续晴天工况(工况Ⅰ)、开泵事件前3 d内有降雨的工况(工况Ⅱ)和雨天工况(工况Ⅲ)。

2 结果与讨论

2.1 管网总体运行状态分析

为保证数据分析的有效性,监测过程和数据校验工作参照文献[11]开展。图2为各监测点在旱季9月—10月的流量、液位数据。其中,测点①、②、④的排水周期较为规律,泵站在每日早上08:00左右开始排水,各测点出现的液位和流量响应均及时、明显。而测点③对泵站的启闭几乎无响应,液位波动仅0.2 m,且无法测得流量数据,因此推测测点③与管网末端之间的水力联系较弱,在后续的数据分析中不再对测点③进行具体分析。

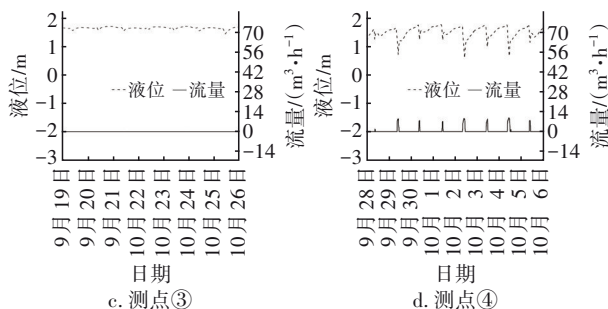
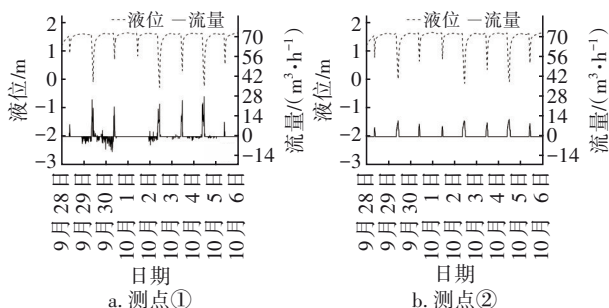


图2 各测点在旱天的流量、液位曲线

Fig.2 Flow and level curves of each monitoring point in dry days

另外,根据管网拓扑结构可知,对于某一次开泵事件,泵站排水量 $Q_{\text{泵}}$ 与E、W两区汇流至①、②两测点的流量 Q_{E} 、 Q_{W} 应满足流量平衡,即:

$$Q_{\text{泵}} = Q_{\text{E}} + Q_{\text{W}} \quad (1)$$

在数据监测初期,统计了40余次有效开泵事件进行流量校核,结果显示系统在每一次开泵事件中流量均基本保持平衡,其准确率在 $(100 \pm 20)\%$ 范围内,满足流量调查的精度要求。因此,可认为流量监测数据准确,可以进行进一步分析。

2.2 流量分析

三种工况下,一次开泵事件在排水系统中产生的流量如图3所示,通过三类开泵事件中的流量分析,可评估独山1#排水系统的入流入渗情况。

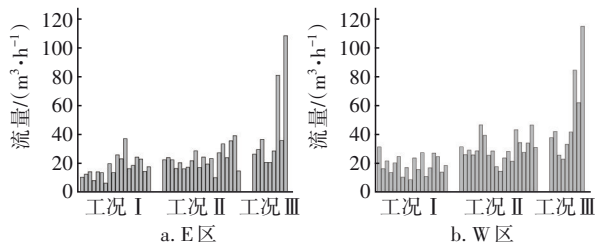


图3 三种工况下一次开泵事件产生的流量

Fig.3 Flow caused by one pumping event under three conditions

由图3可知,在工况Ⅰ时,E区、W区产生的流量平均值 T_{E} 、 T_{W} 分别为17.3和18.8 m^3/h ,流量基本接近,W片区内流量略大于E片区。在工况Ⅱ时,两片区产生的流量平均值分别为22.8和29.9 m^3/h ,相比工况Ⅰ均有上升,这意味着在独山1#排水系统中,存在降雨导致的入渗流量,但该部分流量相对较小。同时,比较工况Ⅲ产生的流量可知,降雨条件下系统的排水量在两个片区都有明显抬升,最大排水量分别达到108.4和114.4 m^3/h ,远大于前两种工况,这意味着当降雨发生时系统出现了雨水的直接

入流,导致流量明显增加。因此,由流量分析可知,独山1#泵站服务范围内的排水系统存在雨水入流入渗现象,以雨水直接入流为主。

2.3 液位分析

图4为工况Ⅲ条件下泵站未开时降雨强度与液位的响应关系。可知尽管E、W两区的子排水系统已处于高液位运行状态,但在降雨作用下,液位仍持续上升,而且随着降雨峰值的来临,液位均迅速出现抬升响应。降雨量越大,液位抬升越高,液位抬升的响应程度与雨强的变化几乎同步

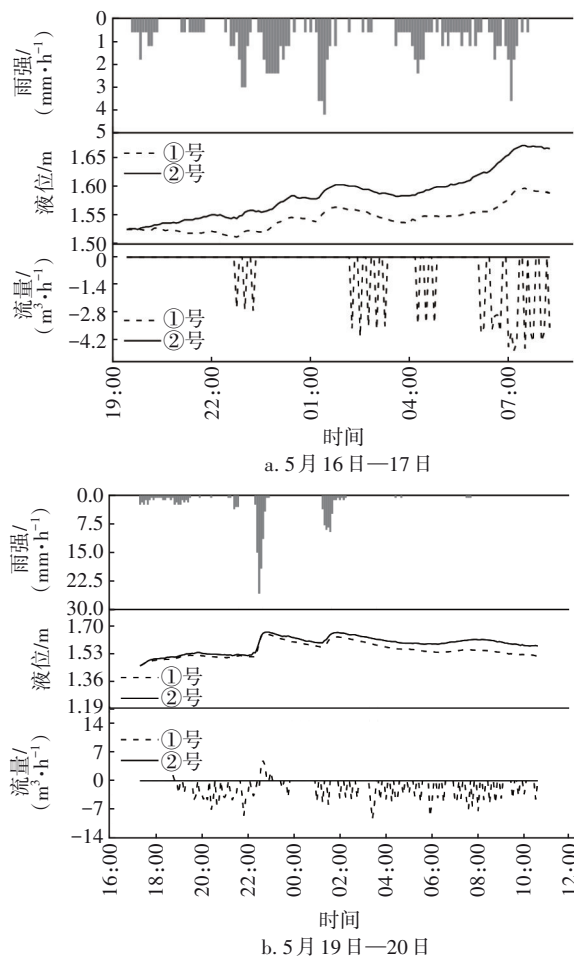


图4 工况Ⅲ下泵站未开时降雨与液位的响应关系

Fig.4 Response relationship between rainfall and water level when the pumping station is off under condition III

①号测点在降雨期间出现流量为负的情况,根据流量计的探头安装方向和测数规则可知,此时①号位置的管内污水发生逆向流动。而②号点在降雨期间液位明显上升,但流量保持为零,则推测W区的直接入流主要发生在管网的上游部分,在②号点附近无明显入流,且这部分由降雨导致的上游入

流汇至②号点后向E区发生倒灌,导致管径较小(DN350)、对流量波动相对敏感的①号点流量出现负值,而②号点则因管径较大(DN500),尚无流量数据产生。这一结果进一步证明,独山1#排水系统存在明显的雨水直接入流现象。

同时发现,雨峰过后,系统液位呈逐渐下降的趋势,然而泵站并未开泵,出口管道也未显示流量存在,说明此时污水系统存在外渗(外排)的途径。

2.4 水质分析

图5是工况Ⅲ条件下的水质变化情况。

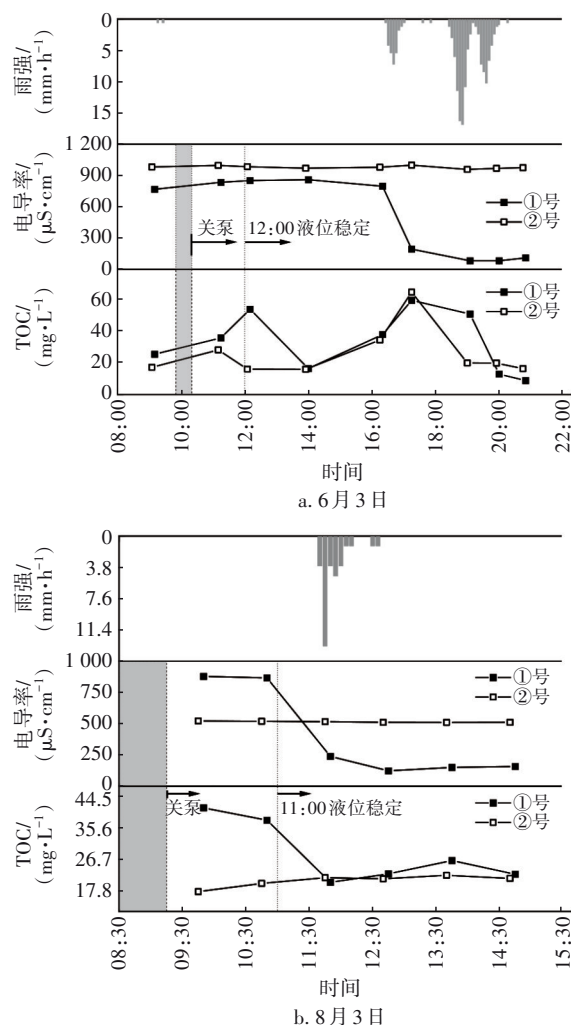


图5 工况Ⅲ下的水质变化情况

Fig.5 Change of water quality under condition III

由图5可知,在6月3日的降雨过程中,随着雨水入流,①号测点的电导率从750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 迅速下降至200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右,而②号测点的电导率则一直稳定在900 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右。同样,在8月3日的降雨事件中,①号测点的电导率也从800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 左右下降至

200 $\mu\text{S}/\text{cm}$,并逐渐趋于稳定。晴天时管道内电导率在500~1 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 的范围内波动,而根据降雨期间对路面积水和雨水的采样分析,发现雨水电导率约为130 $\mu\text{S}/\text{cm}$,与管内污水存在明显差异。当降雨期间雨水的直接入流情况发生时,低电导率的雨水稀释污水,导致管内污水的电导率显著降低。因此,两次降雨事件都说明①号点在降雨期间存在明显的雨水入流,而②号点附近则无降雨导致的入流。而在两次降雨事件中,①号和②号测点总有有机碳(TOC)随降雨的变化规律不显著,没有明显的指示特征。

由此可见,TOC对判别污水系统入流的指示性作用不大,而电导率对降雨具有明显的响应,且响应迅速、数值变化幅度明显。因此,电导率可作为降雨导致的直接入流现象的判别指标。同时也进一步证实,独山1#排水系统存在雨水直接入流的情况。

2.5 定量分析

为了进一步确定入流量,本研究统计并分析了不同降雨条件下一次开泵事件流量的变化情况,结果如图6所示。

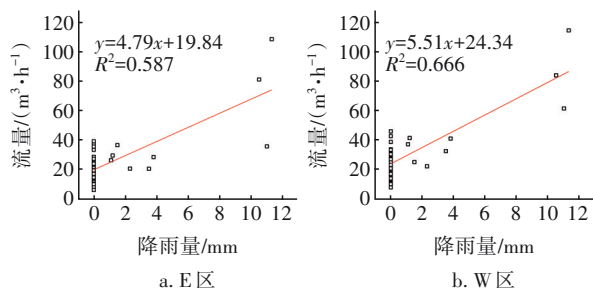


图6 一次开泵事件流量与降雨量的关系

Fig.6 Relationship between flow caused by one pumping event and rainfall

由图6可知,E、W两区的雨水直接入流量随着降雨量的增大而增大,根据拟合公式,E区、W区的雨水直接入流系数分别为4.79和5.51 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{mm})$,即每1 mm降雨量中,分别约有4.79和5.51 m^3/h 的流量进入系统。

值得注意的是,独山1#系统是泵排系统,流量由开泵事件决定。在本次调查评估中,当有较大降雨事件发生时,独山1#泵站并未开泵,而在未开泵的条件下,系统一直维持较高水位,就限制了雨水的直接入流。因此,定量评估仅是在开泵事件下对雨水直接入流量的估算。

3 结论

① 排水系统E区和W区在雨天工况下的开泵事件中,排放的流量明显高于晴天工况下的开泵流量,说明该污水排放系统存在降雨导致的入流入渗现象。

② 通过对比晴天工况下的流量和开泵前3 d内出现降雨工况下的流量,两者区别不明显,说明在一次开泵事件中由降雨导致的地下水入渗量较少。

③ 通过晴雨天的液位分析可知,在未开泵的高液位状态下,降雨雨峰出现后,污水系统出现了液位升高的即时响应,也证实污水排放系统存在雨水直接入流现象。

④ 通过水质分析可知,TOC对判别污水系统入流的指示性作用不大,电导率则对晴雨天变化具有较好的响应,而且电导率可实现在线监测,数据相对较易获得,因此,可把电导率作为入流入渗的评估指标。

⑤ 根据降雨量与一次开泵事件下产生流量的关系,估算研究区域E、W两区在开泵事件中雨水的直接入流系数分别为4.79和5.51 $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{mm})$ 。

参考文献:

- [1] 李兰娟,钱言,陈天放,等.我国南方地区城镇污水处理厂进水低浓度原因分析及对策建议[C]//环境工程编辑部.中国环境科学学会2021年科学技术年会——环境工程技术创新与应用分会场论文集(一).北京:工业建筑杂志社,2021:228-233,239.
LI Lanjuan, QIAN Yan, CHEN Tianfang, et al. Cause analysis and suggestions to low influent concentration of urban sewage treatment plants in South China [C]// Environmental Engineering Editorial Office. 2021 Annual Conference of Science and Technology of Chinese Society for Environmental Sciences—Symposium on Innovation and Application of Environmental Engineering Technology (I). Beijing: Industrial Construction, 2021: 228-233, 239 (in Chinese).
- [2] 杨婷婷,李志一,李萌,等.污水管网入流入渗的不同指标的定量化分析[J].水电能源科学,2022,40(6):127-129,57.
YANG Tingting, LI Zhiyi, LI Meng, et al. Quantitative analysis of different indexes of inflow and infiltration of

- sewage pipe network [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(6): 127-129, 57 (in Chinese).
- [3] 郭效琛, 李萌, 杜鹏飞, 等. 降雨入流入渗定量评价方法及指标的对比[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(11): 133-138.
- GUO Xiaochen, LI Meng, DU Pengfei, *et al.* Comparison on quantitative evaluation methods and indexes of rainfall inflow and infiltration [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(11): 133-138 (in Chinese).
- [4] 黄林, 胡茂锋, 吴志炎, 等. 基于水量水质监测进行分区分析的城市排水管网入流入渗问题[J]. *净水技术*, 2022, 41(4): 108-114.
- HUANG Lin, HU Maofeng, WU Zhiyan, *et al.* Inflow and infiltration problems of urban drainage network based on zoning analysis of water quantity and quality monitoring [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(4): 108-114 (in Chinese).
- [5] 盛政, 刘旭军, 王浩正, 等. 城市污水管道入流入渗监测技术研究与应用进展[J]. *环境工程*, 2013, 31(2): 17-21.
- SHENG Zheng, LIU Xujun, WANG Haozheng, *et al.* Study on field monitoring technology for urban drainage network system management [J]. *Environmental Engineering*, 2013, 31(2): 17-21 (in Chinese).
- [6] 李志丽, 姜明洁, 潘冉, 等. 北京市延庆区排水管网监测及运行状态分析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(20): 99-106.
- LI Zhili, JIANG Mingjie, PAN Ran, *et al.* Monitoring and operating condition analysis of urban sewer network in Yanqing District, Beijing [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(20): 99-106 (in Chinese).
- [7] 薛梅, 周柯锦, 郭一令, 等. 下水道中不明水的调查及防治对策[J]. *中国给水排水*, 2006, 22(17): 53-56.
- XUE Mei, ZHOU Kejin, GUO Yiling, *et al.* Survey of unknown-water in sewers and corresponding countermeasure [J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(17): 53-56 (in Chinese).
- [8] 徐祖信, 徐晋, 金伟, 等. 我国城市黑臭水体治理面临的挑战与机遇[J]. *给水排水*, 2019, 45(3): 1-5, 77.
- XU Zuxin, XU Jin, JIN Wei, *et al.* Challenges and opportunities of black and odorous water body in the cities of China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(3): 1-5, 77 (in Chinese).
- [9] 徐祖信, 王诗婧, 尹海龙, 等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2017, 45(3): 384-390.
- XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2017, 45(3): 384-390 (in Chinese).
- [10] WILÉN B M, LUMLEY D, MATTSSON A, *et al.* Rain events and their effect on effluent quality studied at a full scale activated sludge treatment plant [J]. *Water Science & Technology*, 2006, 54(10): 201-208.
- [11] CENTRE W. Guide to Short Term Flow Surveys of Sewer Systems [M]. Swindon: Water Research Centre, 1987.

作者简介:周水良(1979-),男,浙江平湖人,大专,工程师,二级建造师,主要研究方向为市政给排水、管道非开挖修复等。

E-mail:240381293@qq.com

收稿日期:2022-07-06

修回日期:2022-08-24

(编辑:沈靖怡)