

城市排水与
雨洪管理

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2026. 11. 017

基于厂网一体前端感知监测的雨水入流入渗分析

张 硕^{1,2}, 赵振东^{1,2}, 宗 倪^{1,2}, 刘 健^{1,2}, 史国旗^{1,2}, 胡 伟¹,
吕放放¹, 张锦波^{1,2}

(1. 北京城市排水集团有限责任公司, 北京 100024; 2. 北京城市排水集团有限责任公司
坝河流域分公司, 北京 100024)

摘 要: 基于厂网一体化前端感知监测体系,对降雨期间污水系统的收集、转输及处理设施等关键节点进行连续水量监测,通过监测数据量化分析研究区域污水系统的雨水入流入渗量,结合对区域内截流设施、管道病害及雨污混接等情况的现场调查提出相应的控制措施。研究结果表明,降雨期间雨水混入污水管网是导致污水系统溢流的直接原因,据此提出通过推进开展市政截流井改造、小区内部排水设施专业化运维及排水管道病害缺陷治理等应对策略,降低降雨期间污水系统的水量冲击负荷,进而减小汛期溢流污染,保障地表水环境质量。

关键词: 厂网一体; 溢流污染; 入流入渗; 截流倍数; 排水监测体系

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)11-0116-06

Rainfall-derived Infiltration and Inflow Analysis Based on Integrated Plant–Network Front-end Perception and Monitoring System

ZHANG Shuo^{1,2}, ZHAO Zhendong^{1,2}, ZONG Ni^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, SHI Guoqi^{1,2},
HU Wei¹, LÜ Fangfang¹, ZHANG Jinbo^{1,2}

(1. Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100024, China; 2. Bahe River Basin Branch,
Beijing Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: Based on an integrated plant–network front-end perception and monitoring system, this study conducted continuous water quantity monitoring at key nodes of the sewage system, including collection, transfer, and treatment facilities, during rainfall events. Through quantitative analysis of the monitoring data, the volume of rainfall-derived infiltration and inflow into the sewage system within the study area was assessed. In combination with field investigations of interception facilities, pipeline defects, and illicit connections between rainwater and sewage systems within the area, corresponding control measures were proposed. The results indicated that the direct cause of sewage system overflow was the ingress of rainwater into the sewage network. Accordingly, countermeasures such as the retrofitting of municipal interception manholes, specialized operation and maintenance of internal drainage facilities in residential areas, and rehabilitation of pipeline defects and damages were recommended to reduce the hydraulic shock load on the sewage system during rainfall, thereby mitigating wet-weather overflow pollution and safeguarding surface water quality.

通信作者: 赵振东 E-mail: zhaozhendong@bdc.cn

Keywords: integrated plant-network system; combined sewer overflow; infiltration and inflow; interceptor ratio; drainage monitoring system

根据《2023 年城市建设统计年鉴》中的相关统计数据,我国排水管网长度已经达到 95.25×10^4 km,其中雨污合流管道长度为 7.83×10^4 km,仅占排水管道总长度的 8.22%,表明我国城市排水体制已经以分流制为主。在分流制排水系统中,污水系统的输送与处理能力通常由三部分构成:基本污水量(BWF)、地下水入渗量(GWI)以及雨水入流入渗量(RDII)。目前污水处理厂的设计规模缺乏对地下水入渗量(GWI)及雨水入流入渗量(RDII)的合理计算并预留相应冗余。降雨期间由于雨水入流入渗到污水系统,当排水管网收集输送的水量超过末端污水处理厂的冗余处理能力后,便会发生污水溢流入河问题^[1-3]。

基于流量监测开展雨水入流入渗(RDII)量化评估是目前国内外常见的分析方法^[4-5],其中“入流”通常指雨水通过检查井盖、混接接口等物理连接的形式快速进入管网;“入渗”指雨水渗入土层后通过管道裂缝、接口等缓慢渗入管网。杨婷婷等^[6]在我国中部省份开展降雨入流入渗定量评价方法的应用及相应指标准确性的验证工作,为管道病害检测及修复工作提供技术支撑;周水良等^[7]在南方平原河网地区城市开展“泵排式”污水系统入流入渗评估,并引入电导率作为入流入渗的量化评价指标;徐祖信等^[8]研究发现南方某污水处理厂进水量与降雨量呈线性相关,并结合管网节点开展水质监测调查管道病害,形成一套系统的雨水混接诊断方法。但各地区受限于排水系统中管网、泵站、调蓄设施及污水处理设施的多元化管理,难以具备开展系统性监测评估的条件,同时缺乏对区域排水系统特点和现场信息的掌握,难以形成一套系统性、有针对性、具备可操作性的溢流污染控制方案。

为了有效解析降雨期间雨水进入污水系统的主要途径,量化不同降雨条件下污水系统中的雨水入流入渗比例,本研究针对北京市某再生水厂及其上游排水管网、干线溢流排放口和末端污水提升泵站开展系统性水量监测,并结合研究区域范围内的实际降雨情况,选取不同降水量等级的典型降雨开展汛期污水系统雨水入流入渗量分析及评估,以期

为该区域排水设施的升级改造及一体化运行管理提供参考。

1 研究区域概况与监测方法

1.1 研究区域概况

研究区域为北京市某再生水厂(J厂)污水收集处理范围,区域面积约为 52.34 km^2 ,污水管网长度为 285.6 km ,合流管网长度为 1.8 km ,市政截流设施有 21 座,服务范围以商业办公区和居民生活区为主,再生水厂位置及主要污水干线拓扑关系如图 1 所示,可根据一级干线服务范围划分为 3 个独立的污水分区(I~III区)。J厂设计处理规模为 $20 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,抽升量约为 $31 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,具备向邻近污水处理厂调度的水量能力。

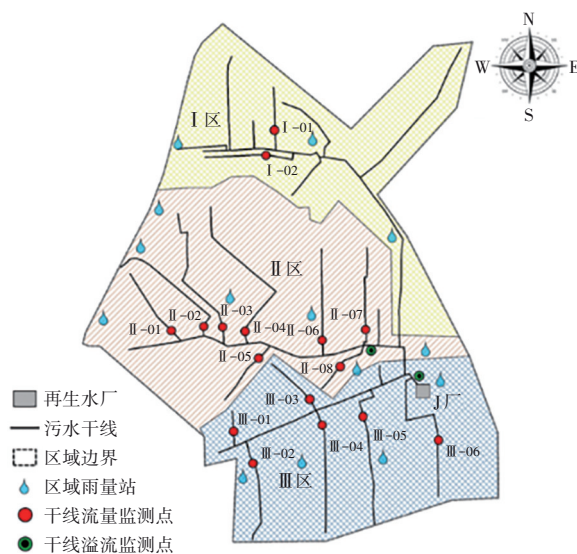


图1 再生水厂位置及主要污水干线拓扑关系

Fig.1 Location of reclaimed water plant and topological relationship of main sewage trunk lines

1.2 监测点位分布

为掌握J厂上游主要污水管网来水情况以及未收集处理的溢流量,在J厂上游主要污水干线、溢流口及典型的小区污水出口对流量和液位开展连续监测。其中,污水二级干线监测点 16 处、厂前污水干线溢流口 2 处、雨量监测点 14 处,监测点分布情况如图 1 所示。各污水二级干线监测点上游服务区域面积、旱季日均流量以及市政管线排水形式详见表 1。

表1 各污水干线监测点位信息

Tab.1 Monitoring points information for each sewage trunk line

点位编号	服务面积/km ²	旱季流量/(10 ⁴ m ³ /d)	排水形式	点位编号	服务面积/km ²	旱季流量/(10 ⁴ m ³ /d)	排水形式
I-01	1.84	0.70	混流式	II-07	2.45	0.30	混流式
I-02	0.87	0.45	混流式	II-08	0.90	1.20	混流式
II-01	0.96	0.75	分流式	III-01	0.20	0.10	分流式
II-02	0.78	0.75	分流式	III-02	1.63	1.50	分流式
II-03	2.04	0.50	分流式	III-03	0.51	0.50	分流式
II-04	5.30	4.00	混流式	III-04	2.49	0.70	分流式
II-05	0.88	1.00	混流式	III-05	3.02	1.40	分流式
II-06	1.47	0.70	混流式	III-06	2.79	2.00	分流式

1.3 监测设备及监测方法

1.3.1 监测设备

雨量监测设备采用翻斗式雨量计,数据采集频率为1次/min,数据精度为0.1 mm;管网流量监测设备采用国产某品牌排水雷达流量计,监测参数包括流速、液位、流量等,数据采集频率为1次/5 min,流速测量精度为0.01 m/s,液位测量精度为1 mm。

1.3.2 计算方法

由于研究区域内以城市生活污水为主,旱季污水量呈周期性变化且水量相对稳定^[9],通过降雨期间混合污水流量(RWF)与旱季同一时段的旱季污水流量(DWF)之差可估算得到污水管道中的雨水混入量,即:RDII = RWF - DWF。

同时,为便于表述降雨期间污水管道内混入的雨水量,定义入流倍数 n_0 为雨水混入污水比例的表征参数,计算方法如下: $n_0 = \text{RDII}/\text{DWF}$ 。

1.3.3 数据处理原则与质量控制

降雨数据:依据中国气象行业标准《降水量等级》(GB/T 28592—2012),分别选取24 h降雨量为小雨(0.1~9.9 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)及暴雨(≥ 50.0 mm)的降雨场次各

1~2场。降雨数据完整性 $\geq 95\%$,降雨峰值数据无缺失,相邻数据异常跳变或缺失采用插值法补全。

流量数据:以“场次降雨”为单位,选取降雨日、降雨日前3 d和降雨日后3 d的流量监测数据;旱季数据采用降雨前3 d数据且未发生明显降雨时段的流量数据;降雨数据选取降雨时段内以及降雨后期水量较早季同时段仍有较大影响的时段;流速、液位数据完整性均不低于95%,相邻数据异常跳变或缺失采用插值法补全;满管时段不得超过30 min,并采用邻近非满管时段的最大流量进行校核。

2 监测结果与分析

2.1 降雨期间污水系统整体水量变化情况

根据J厂上游管网拓扑关系及生产调度情况,计算服务区域总来水量,方法如下:

$$Q_r = Q_p + Q_y - Q_l \quad (1)$$

式中: Q_r 为服务区域总来水量; Q_p 为末端污水厂总抽升量; Q_y 为污水干线厂前溢流总量; Q_l 为其他污水厂调入水量。

通过统计分析2023年6场不同降水量等级的典型降雨场次下J厂服务区域总来水量,本研究核算的雨水量占比及入流倍数如表2所示。

表2 不同降雨条件下J厂服务区域水量变化情况

Tab.2 Variation of sewage volume in service area of reclaimed water plant J under different rainfall conditions

降雨时间	降雨等级	降雨量/mm	平均雨强/(mm/h)	降雨历时/h	重现期/年	降雨来水量/10 ⁴ m ³	旱季来水量/10 ⁴ m ³	雨水入流量/10 ⁴ m ³	入流倍数 n_0	雨水占比/%
2023-07-21	小雨	6.8	1.58	4.3	1	28.62	27.53	1.1	0.04	3.9
2023-07-26	小雨	7.3	2.92	2.5	1	24.20	22.70	1.5	0.07	6.2
2023-08-16	中雨	10.3	7.92	1.3	1	27.92	23.58	4.3	0.18	15.5
2023-08-12	中雨	10.7	1.32	8.1	1	28.00	21.10	6.6	0.31	23.6
2023-08-20	大雨	41.5	2.24	18.5	2	66.89	52.64	14.3	0.27	21.3
2023-07-22	暴雨	59.7	5.85	10.2	3	36.05	21.05	15.0	0.71	41.6

监测数据显示,J厂服务区域总来水量随降雨量的增大而增加,雨水占比同步增大。当区域平均

降雨量达到 10.3 mm 时,雨水入流入渗量可达 $4.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,占下游污水厂处理总量的 15.5%。随着降雨量的进一步增加,总来水量持续增加并超过污水厂最大处理能力,导致污水干线出现溢流现象。

2.2 各二级污水干线雨水入流风险评估

为掌握雨水入流区域分布情况,对 J 厂上游主要二级污水干线在不同降雨量条件下的雨水入流入渗量和入流倍数进行统计,在 10 mm 降雨条件下,分析各区域入流倍数,并绘制 J 厂服务区域雨水入流分布图,具体如图 2 所示。

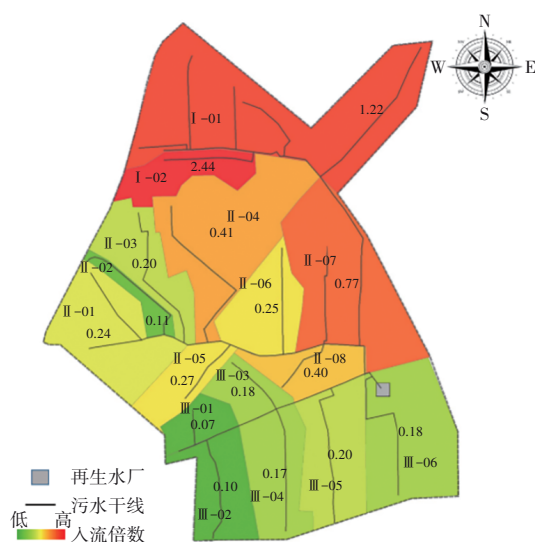


图 2 J 厂服务区域的雨水入流分布情况

Fig.2 Distribution of rainwater inflow in service area of reclaimed water plant J

监测结果显示,在 10 mm 降雨条件下,上游二级干线 I-01、I-02 的雨水入流倍数高于 1,说明该区域有大量雨水进入污水系统,排水管网雨污分流程度相对较差;II-02、III-01、III-02、III-03、III-04 及 III-06 等服务区域的雨水入流倍数低于 0.20,说明该区域进入污水系统的雨水量相对较少,排水管网雨污分流程度相对较好。结合表 1 中所示各监测点位区域排水形式可知,降雨期间各二级污水干线中均有一定量雨水入流入渗,导致污水系统的水量增加,且合流制区域的水量增加相较于分流制区域更为明显。

2.3 典型地块污水支线降雨期间水量变化

选取研究区域范围内 3 处典型居民小区污水支线进行连续水量监测,其基本信息如下:

小区 1:建设于 1985 年,采用合流制排水形式,

地块面积为 $190\,000 \text{ m}^2$,绿化率为 30%,容积率为 3.0,户线管径为 $D400$,平均水量为 $503.7 \text{ m}^3/\text{d}$,平均入流倍数为 0.69。

小区 2:建设于 2004 年,采用分流制排水形式,地块面积为 $64\,314 \text{ m}^2$,绿化率为 35%,容积率为 2.8,户线管径为 $D400$,平均水量为 $92.4 \text{ m}^3/\text{d}$,平均入流倍数为 0.18。

小区 3:建设于 2012 年,采用分流制排水形式,地块面积为 $41\,400 \text{ m}^2$,绿化率为 35%,容积率为 2.8,户线管径为 $D400$,平均水量为 $100.9 \text{ m}^3/\text{d}$,平均入流倍数为 0.12。

监测结果显示,3 处监测点在出现明显降雨期间的水量均有所增加,其中建设相对久远、物业管理条件相对一般的小区 1 污水管道水量增加较为明显,具体如图 3 所示。区域内部雨水入流情况与小区内部排水设施结构病害、排水系统之间的衔接关系以及绿化覆盖率等因素有直接关系。

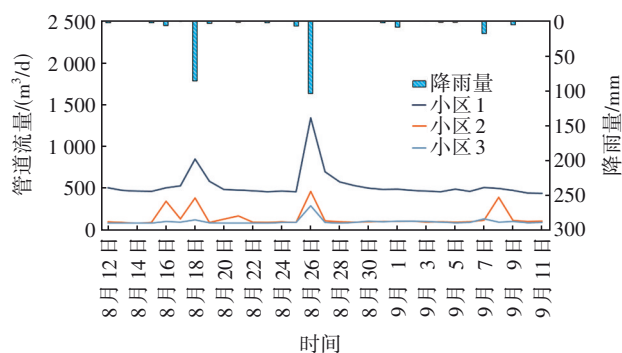


图 3 各监测点位日均流量变化曲线

Fig.3 Daily average flow variation curve of each monitoring point

相关研究结果表明,外部市政管道已实现雨污分流的区域内仍有 52% 的老旧小区存在雨污合流,高于非老旧小区的 14%;同时,老旧小区内部排水设施存在结构缺陷的管道占比达 40%,远高于非老旧小区的 7%^[10]。根据连续监测数据核算各小区污水管线雨水入流倍数,结果显示,老旧小区内部雨污混接及管道结构缺陷问题导致的雨水入流倍数相对更大。

3 雨水入流途径分析及对策

3.1 各二级污水干线雨水入流风险评估

对现状 21 座截流设施的旱季水量进行监测调查,结果显示 J 厂上游市政管网中约 1/3 的截流设施截流倍数高于设计值(2~5 倍)。出现高截流倍数截

流设施的主要原因有:①随着排水管网雨污混接排查治理工作的推进,截流设施的旱季水量较原设计值显著减少;②依据相关设计标准,截流管径一般为300~600 mm,在混接水量较小的区域采用最小截流管径仍然有较大的截流倍数^[11]。

针对截流设施截流倍数过大导致大量雨水进入污水系统的问题,可以通过截流设施改造及智能截流设施等措施将截流倍数控制在合理范围内,对于重力截流管,管径最小可降至150 mm^[12]。此外,随着雨污混接治理工作的推进,可以逐渐封堵原有截流管,实现完全雨污分流。

3.2 源头地块内部排水系统雨污混接问题

地块内部专用排水设施和市政排水设施之间的衔接关系按照排水形式区分,基本可以划分为以下4类情况^[13]:①内部合流,外部合流;②内部分流,外部合流;③内部合流,外部分流;④内部分流,外部分流。对于地块类型①、②和③,由于地块内部或市政道路存在合流制管线,均会使雨水进入污水系统;对于地块类型④,在完全雨污分流的情况下,也有可能因局部错、混接导致雨水通过截流设施或直接接入等形式进入污水系统,具体见图4。

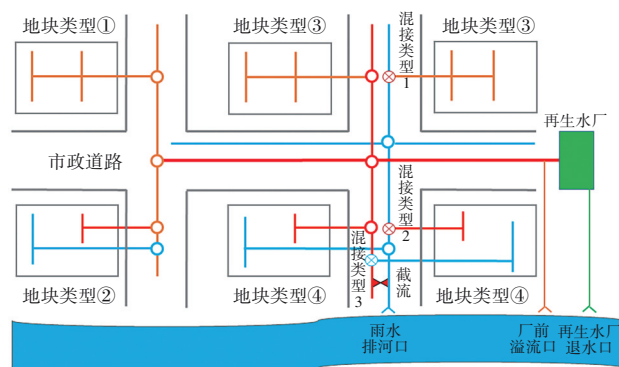


图4 典型地块与市政排水设施衔接示意

Fig.4 Schematic diagram of drainage connection between typical plot and municipal facilities

经调查,研究区域范围内共有54处地块内部雨水直接接入污水系统,其中居民小区共36处、占比67%,企事业单位共18处、占比33%。国外相关研究也表明,老旧排水系统相对于新建的排水系统存在更高的入流入渗风险^[14],因此针对老旧小区、企事业单位等开展合流制分流改造及专业化排水设施运维十分必要。

3.3 设施病害缺陷导致雨水入流入渗

针对研究区域内污水管线结构缺陷病害进行全面排查评估,统计结果显示,破裂68处、渗漏21处、脱节38处。除此之外,检查井及井盖破裂、渗漏等病害也会导致降雨期间一定量的雨水入流进入污水系统。

4 结论

① 研究区域内污水管线普遍存在降雨期间水量增加的情况,降雨期间超量雨水进入污水系统是导致污水干线溢流的直接因素。

② 截流设施是雨水进入污水系统的关键节点,大量雨水通过截流设施进入到污水系统。建议对现状截流设施进行智能化改造,以实现根据本底污水量变化、降雨情况以及下游污水厂水量负荷等情况动态调整截流倍数,增加排水系统关键节点的调整能力。

③ 雨水入流污水系统涉及地块内部、公共道路及河道沟渠等多区域、多节点,需要源-网-厂-河统筹推进全面排查、系统治理。

④ 本研究通过厂网一体化系统性流量监测,分析降雨期间污水系统从末端到源头的流量变化情况,可为识别区域范围内合流制溢流污染控制面临的主要问题提供一定的理论支持和思路借鉴。

参考文献:

- [1] 赵振东,刘健,崔华峰,等. 厂网一体运行视角下汛期入河污染物监测分析及控制策略研究[J]. 给水排水, 2023, 49(8): 44-51.
ZHAO Z D, LIU J, CUI H F, et al. Monitoring analysis and control strategies of pollutants discharged into rivers during rainfall from the perspective of integrated operation of drainage system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2023, 49(8): 44-51 (in Chinese).
- [2] 王文亮,张昱,蔡然,等. 美国金县合流制溢流控制案例之技术与标准[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 99-107.
WANG W L, ZHANG Y, CAI R, et al. Introduction to the combined sewer overflow control technologies and standards in King County, USA [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 99-107 (in Chinese).
- [3] 杨正,车伍,赵杨. 城市“合改分”与合流制溢流控制的总体策略与科学决策[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 46-55.

- YANG Z, CHE W, ZHAO Y. General strategy and scientific decision-making of urban “combined sewer separation” and CSO control [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(14): 46–55 (in Chinese).
- [4] 刘东东, 林永钢, 余铭铨, 等. 高液位污水系统入流入渗评估方法与诊断研究[J]. *给水排水*, 2023, 49(9): 130–136.
- LIU D D, LIN Y G, YU M Q, et al. Study on assessment method and diagnosis of high level sewage system [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 49(9): 130–136 (in Chinese).
- [5] 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 X C, LI M, DU P F, 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).
- [6] 杨婷婷, 李志一, 朱婉宁, 等. 基于在线监测的污水管道旱天入流入渗分析[J]. *给水排水*, 2021, 47(9): 132–138.
- YANG T T, LI Z Y, ZHU W N, et al. Analysis of sewage pipeline inflow and infiltration based on online monitoring [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2021, 47(9): 132–138 (in Chinese).
- [7] 周水良, 刘东东, 汤磊, 等. 泵排式污水系统入流入渗的综合评估方法研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(23): 74–79.
- ZHOU S L, LIU D D, TANG L, et al. Comprehensive evaluation of inflow and infiltration in pump drainage sewage system [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(23): 74–79 (in Chinese).
- [8] 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 Z X, WANG S J, YIN H L, et al. Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(3): 384–390 (in Chinese).
- [9] 程珣, 张明凯, 刘艳臣, 等. 污水管网典型混流制区域水量水质波动特征解析[J]. *环境科学*, 2016, 37(5): 1845–1851.
- CHENG X, ZHANG M K, LIU Y C, et al. Wastewater quantity and quality fluctuation characteristics of typical area of hybrid sewage system [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5): 1845–1851 (in Chinese).
- [10] 王鹏, 郭宰宏, 严瞿飞, 等. 北方某城市老旧小区专用排水设施研究及治理措施[J]. *给水排水*, 2025, 51(5): 109–114.
- WANG P, GUO Z H, YAN Q F, et al. Analysis and treatment on special drainage facilities in old residential areas of a city in north China [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2025, 51(5): 109–114 (in Chinese).
- [11] 刘智晓, 刘龙志, 王浩正, 等. 流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(8): 20–29.
- LIU Z X, LIU L Z, WANG H Z, et al. Watershed management and control strategies for urban combined sewer overflows during peak wet weather flow conditions [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(8): 20–29 (in Chinese).
- [12] 曹秀芹, 禹然, 洪国渊, 等. 基于雨水截流率的合流制改造措施研究[J]. *环境污染与防治*, 2024, 46(8): 1213–1219.
- CAO X Q, YU R, HONG G Y, et al. Study on combined flow system retrofitting measures based on stormwater interception rate [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2024, 46(8): 1213–1219 (in Chinese).
- [13] 唐磊, 刘广奇, 程小文, 等. 海绵城市背景下合流制改造及溢流污染控制路径研究[J]. *给水排水*, 2024, 50(4): 54–61.
- TANG L, LIU G Q, CHENG X W, et al. Study on the path of combined sewer renovation and overflow control under the background of sponge city construction [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2024, 50(4): 54–61 (in Chinese).
- [14] DIEM J E, PANGLE L A, MILLIGAN R A, et al. How much water is stolen by sewers? Estimating watershed-level inflow and infiltration throughout a metropolitan area [J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 614: 128629.
-
- 作者简介:**张硕(1987—),男,北京人,大学本科,工程师,主要从事排水设施项目规划、工程建设及一体化运行维护工作。
- E-mail:**ymhd711@sina.cn
- 收稿日期:**2025-09-02
- 修回日期:**2025-12-04

(编辑:刘贵春)