

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.12.006

高密度建成区强排系统初雨放江污染与调蓄策略

席旭军

(上海浦东建筑设计研究院有限公司, 上海 201206)

摘要: 对初期雨水进行调蓄是当前建成区控制雨水泵站放江污染的主要方式。通过对上海浦东金桥区域多个雨水强排系统降雨量及雨水泵站放江水质的监测,综合分析了建成区分流制强排系统初期雨水污染来源及特征。针对高密度建成区特点,综合泵站分布、道路及河道布局、用地规划等因素,对比点状调蓄和线性调蓄后,采用在河道规划绿带下设置线性多系统联合调蓄管道的方案并进行效益分析。以2022年全年降雨情况进行模拟,工程建成后可实现降低泵站全年放江次数约48.62%,全年SS、COD、NH₃-N及TP减排分别约33.18%、32.58%、31.77%、36.27%,具有较好的环境效益。该研究结果可为类似区域统筹控制初期雨水污染,建设集约化、更具韧性的初期雨水污染控制系统提供参考。

关键词: 初期雨水; 强排系统; 线性调蓄

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)12-0041-06

Initial Rainwater Discharge Pollution and Storage Strategies for Strong Drainage Systems in High-density Built-up Areas

XI Xu-jun

(Shanghai Pudong Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: Regulating and storing initial rainwater has become the primary method for controlling pollution from rainwater pumping stations in the current built-up area. By monitoring rainfall across multiple rainwater drainage systems and the water quality of rainwater pumping stations in the Jinqiao area of Pudong, Shanghai, the sources and characteristics of initial rainwater pollution in the strong drainage system of the built-up area were comprehensively analyzed. Considering the characteristics of high-density built-up areas, combined with the distribution of pumping stations, road and river layout, land use planning and other factors, after comparing point shaped storage and linear storage, the scheme of setting up linear multi-system joint storage pipeline under the green belt of river planning is adopted and the benefit analysis is carried out. Based on the simulation of the annual rainfall in 2022, the project can reduce the number of discharges into the river by about 48.62%, and reduce the annual emissions of SS, COD, NH₃-N, and TP by about 33.18%, 32.58%, 31.77%, and 36.27%, respectively, achieving environmental benefits. This approach provides a reference for similar areas to comprehensively control initial rainwater pollution and develop a intensive and more resilient initial rainwater pollution control system.

Key words: initial rainwater; strong drainage system; linear storage

通信作者: 席旭军 E-mail: xixujuns@163.com

近年来,我国对水安全、水环境日益重视,开展了多轮围绕点源、面源、内源污染治理的水环境治理措施,实施了一系列雨污水分流、管道检测与修复、河道整治工程,河道水质得到了较大提升。在点源及内源污染得到较好的控制后,面源污染控制成为进一步提升河道水质的关键。对于建成区,控制面源污染的主要抓手即为初期雨水。上海金桥作为开发较早的建成区,雨天面临较为严重的泵站启动时初期雨水污染河道问题,因此开展了针对初期雨水控污调蓄工程建设方面的探索,以降低区域内雨水泵站的放江污染。

1 金桥区域排水系统现状及泵站放江污染

1.1 区域排水系统现状

金桥地处上海市浦东新区中部,南临张江高科技园区,北依高行镇,西连花木街道,东接曹路镇,是著名的国家级金桥出口加工区主体。区域内除曹家沟沿线有部分地块尚未开发外,其余均已按 20 世纪 90 年代初编制的规划建成,是典型的高密度城市建成区。

金桥区域采用雨污分流的排水体制,由金桥东北块(西)、金桥东北块(东)、金桥一期、金桥二期等 4 个排水系统组成,并分布于河道曹家沟两侧。4 个排水系统均为强排模式,分别建有金桥 1#、3#、4#、5#雨水泵站并运行多年。金桥 1#、3#、4#雨水泵站上游以工业区及少量办公区为主;金桥 5#雨水泵站上游则主要为金桥集镇居住区。金桥区域现状排水系统分布及概况分别见图 1 和表 1。

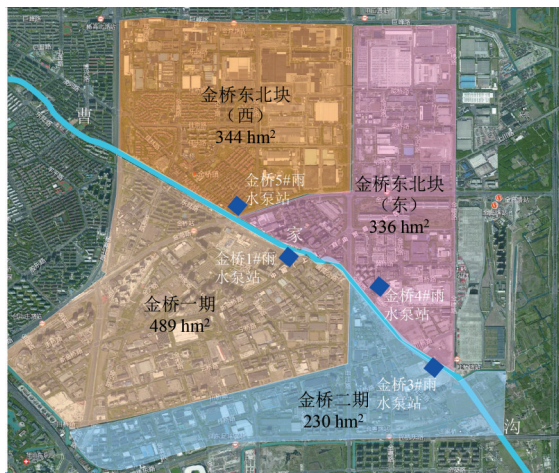


图 1 金桥区域现状排水系统分布

Fig.1 Distribution of the current drainage system in Jinqiao area

表 1 金桥区域现状排水系统概况

Tab.1 Overview of the current drainage system in Jinqiao area

位置	排水系统	服务面积/ hm ²	现状 重现期 P/a	排水 模式	泵站 名称	泵站 规模/ (m ³ ·s ⁻¹)	泵站 出水
曹家沟 以西	金桥一期	489	1	强排	金桥 1#	22.40	曹家沟
	金桥二期	230	1	强排	金桥 3#	15.00	
曹家沟 以东	金桥东北 块(东)	336	1	强排	金桥 4#	14.00	
	金桥东北 块(西)	344	1	强排	金桥 5#	19.20	

1.2 雨水泵站放江污染

经过多年的持续整治,曹家沟金桥区域段旱季河道水质已经稳定于地表水Ⅲ类标准。但雨天 4 座泵站雨水径流放江时大量污染物进入河道,对曹家沟河道水质冲击较大,河道主要水质指标雨后 3~5 d 才可恢复至降雨前水平。

在金桥 1#、3#、4#和 5#雨水泵站进水闸门井内安装在线水质检测仪,对启泵时及启泵后的 10、20、40、60、120、180 min 等 7 个时刻进行水质采样分析,检测指标分别为 SS、COD、NH₃-N 及 TP。2022 年 1 月—2023 年 6 月的 76 组数据分析结果表明,4 座市政雨水泵站的放江雨水径流 SS 为 22.54~33.72 mg/L、COD 为 27.44~46.51 mg/L、NH₃-N 为 1.97~4.27 mg/L、TP 为 0.22~0.54 mg/L。放江雨水径流的 COD、NH₃-N 及 TP 浓度大部分均高于地表 V 类水标准,具体见表 2。

表 2 泵站放江雨水径流污染物平均浓度

Tab.2 Average concentration of pollutants discharged from rainwater pumping stations mg·L⁻¹

项目	SS	COD	NH ₃ -N	TP
金桥 1#泵站	31.34	46.51	4.07	0.36
金桥 3#泵站	33.72	44.43	3.86	0.54
金桥 4#泵站	22.54	27.44	1.97	0.22
金桥 5#泵站	30.76	41.53	4.27	0.48
地表 V 类水标准值		40	2.0	0.4

按 2022 年放江雨水径流总量为 807.80×10⁴ m³ 测算,4 座雨水泵站年放江 SS 总量约为 234.89 t、COD 总量约为 319.40 t、NH₃-N 总量约为 28.17 t、TP 总量约为 3.06 t。

根据谢磊等^[1]的研究结果,我国降雨主要分为前峰型、中峰型、后峰型和均匀型 4 种,上海地区降

雨属于前峰型,降雨峰值出现在降雨前半段,流量峰值与浓度峰值重合。对相关泵站不同时刻放江雨水径流水质检测数据进行分析,结果见图2。可以看出,雨水径流污染物浓度在泵站启动放江时最高,随着泵站的运行不断降低。因此,保持曹家沟河道水质基本稳定的核心是对泵站启动放江时抽排的初期雨水进行控制。

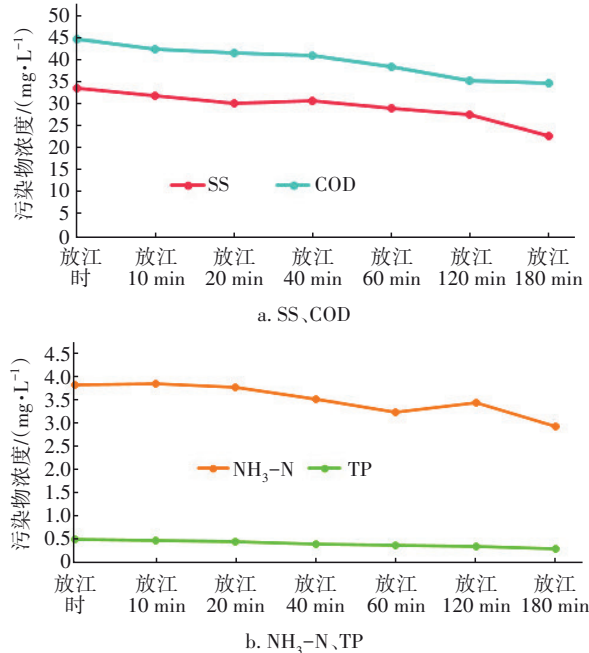


图2 泵站放江雨水径流污染物浓度变化趋势

Fig.2 Trend of pollutant concentration changes in rainwater runoff discharged from pumping stations

2 金桥区域初期雨水污染原因及治理方式

2.1 强排系统初期雨水污染原因

对于高密度城市建成区的雨水强排系统而言,初期雨水的污染程度与服务范围内面源污染、排水系统中雨污混接程度及管道疏通等养护情况密切相关。

面源污染是初期雨水污染的主要影响因素。金桥区域已城市化,面源污染与乡村等非开发区域有本质上的不同。区域内建筑物、道路桥梁、硬化场地等不透水表面较多,径流系数较大。降雨裹挟空气粉尘后再冲刷建筑物、道路桥梁等不透水表面后汇集至雨水口,从而形成初期雨水径流污染。降雨强度越大,雨前晴天数越多,初期雨水所产生的污染就越严重^[2]。

雨污混接是初期雨水污染的关键因素。金桥区域的排水系统虽按分流制建设,但系统中存在一

定的错接混接、小散乱排污等现象。根据前期系统雨污混接普查成果,片区内存在餐饮、洗车、街边临时摊位等将污水排入雨水口,以及居民小区阳台洗衣废水私自接入雨水立管等现象,导致旱天污水积存于雨水管道中,降雨时被推流至系统末端的雨水泵站。

管道疏通频率是初期雨水污染的重要因素。强排系统旱天不放江,管道内存水基本不流动,杂质不断沉淀淤积。研究^[3]表明,降雨期间,管道沉积物冲刷对出流水污染物有重要贡献。因此,管道疏通频率对改善初期雨水污染十分重要,频率高的地块,管道内沉积物较少。

自排系统中雨水管道“短接快排”,分段就近排入河道,入河排放口较分散,不易对系统中某一河段造成集中污染。而强排系统范围内所有雨水径流均经过支管-干管-总管汇集雨水泵站,降雨时仅有雨水泵站后的总排放口,泵站放江时将所在河段水体造成集中污染冲击。

2.2 治理方式

受制于用地、责任主体、管位、资金等,高密度建成区初期雨水污染控制只能随着城市更新逐步采取源头削减及过程控制方面的措施,短期内难以形成规模效应。末端治理是当前建成区强排系统控制初期雨水污染的主要手段,分为在线治理及控污调蓄两种方式。

在线治理常见措施有人工湿地和混凝沉淀两种。人工湿地通过发挥湿生动植物、土壤基质截留过滤、吸附沉淀、微生物降解能力来实现对水量、水质的控制,选用时须考虑初期雨水污染的随机性、广泛性、复杂性及时空性,因此,处理系统应具备抗冲击和间歇运行能力。人工湿地一般用于公园、绿地等开发强度较低、分散自排区域,但金桥区域无法提供相应的用地及环境容量。混凝沉淀主要通过投加聚合氯化铝(PAC)等达到去除初期雨水部分污染物的目的,常用于应急治理。

控污调蓄主要是在排水系统末端设置调蓄设施,将初期雨水暂时储存于调蓄设施内,待降雨结束后再排放至市政污水管道。根据实际情况,金桥区域的初期雨水治理拟采用末端控污调蓄方式,将初期雨水通过申江路污水支线-上海市污水治理二期总管纳入白龙港污水处理厂,处理后的出水达标排放。

3 金桥区域调蓄范围、规模与方案

3.1 服务范围

根据上海市的最新排水系统规划,至2035年金桥区排水系统需达到5年一遇的暴雨重现期标准。规划基于现有排水设施能力按5年一遇标准对排水系统布局进行优化调整,针对超过原总管及泵站服务能力的地块则新建金沪、金桥汽车排水系统。经过调整后,金桥一期系统服务面积由489 hm²调整为238 hm²、金桥二期系统服务面积由230 hm²调整为170 hm²、金桥东北块(东)系统服务面积由336 hm²调整为168 hm²、金桥东北块(西)系统服务面积由344 hm²调整为212 hm²(见图3)。

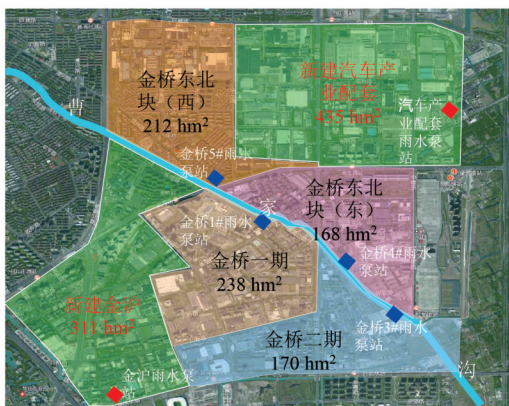


图3 金桥区域排水系统服务范围调整示意

Fig.3 Schematic diagram for adjusting the service scope of drainage system in Jinqiao area

3.2 调蓄规模

用于控制污染的调蓄池其调蓄规模一般采用容积法计算,具体算式如下:

$$V=10DF\Psi\beta \quad (1)$$

式中: V 为设计调蓄容积,m³; D 为单位汇水面积调蓄雨量,上海市规划要求分流制排水系统 $D\geq 5$ mm,该工程取5 mm; F 为汇水面积,hm²; Ψ 为综合径流系数,对排水系统现状下垫面按不同用地类型进行解析,金桥一期、金桥二期、金桥东北块(东)、金桥东北块(西)4个排水系统的综合径流系数分别为0.65、0.66、0.68、0.65; β 为安全系数,一般为1.1~1.5,金桥区域取1.2。

经计算,金桥一期、金桥二期、金桥东北块(东)、金桥东北块(西)4个排水系统调蓄规模分别为9 710、6 630、6 552、8 395 m³。

3.3 调蓄方案

调蓄设施一般分为点状调蓄和线性调蓄两种。点状调蓄一般为调蓄池,按其是否与雨水泵站的结合情况又分为同位调蓄和异位调蓄。将调蓄池设置于泵站下方并与泵站同步建设的称为同位调蓄,利于管理并节省用地,但沟槽深、施工难度高。在泵站周边选址新建调蓄池的称为异位调蓄,初期雨水通过管道转输至调蓄池。该种调蓄池建设期间不影响原排水系统运行,但需完善选址及征地手续,投资成本及管理要求高。

线性调蓄为调蓄管道或调蓄箱涵,通过利用与原泵站进水闸门井相连的管道或箱涵自身空间进行调蓄,一般用于无专门调蓄设施用地或调蓄要求相对集中的区域,可结合道路或河道下方设置。埋深较小时可采用调蓄箱涵,埋深较大时可采用管道或隧道,布置灵活、选线手续简单、施工工艺成熟,但对后期管理要求较高。

按照区域初期雨水污染调蓄规模要求,结合区域内城市开发现状、路网及河网布局等因素,提出点状调蓄和线性调蓄两种方案。

① 点状调蓄

现有4座雨水泵站规划保留利用,采用异位调蓄型式(见图4)。为确保排水系统内初期雨水顺利纳入调蓄池,分别在现有金桥1#、3#、4#、5#泵站旁新建4座初期雨水调蓄池,具体布置见图5。

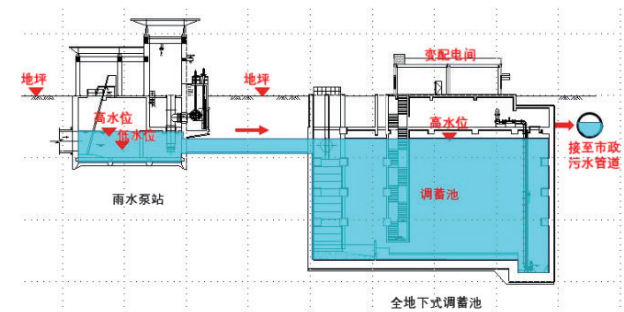


图4 点状异位调蓄方案

Fig.4 Point shaped ectopic regulation and storage scheme

自各泵站进水闸门井起新建 $\varnothing 1\ 800\sim 2\ 000$ mm调蓄池进水管至新建调蓄池,并自调蓄池起新建 $\varnothing 300$ mm压力管道接入邻近的市政污水管道。

4座调蓄池占地面积分别约为2 000、1 500、1 500、1 800 m²,金桥区域已按照20世纪90年代初期编制的用地规划基本建成,原用地规划并未预留新建调蓄池用地,方案拟建的调蓄池均需编制相应

的用地选址规划并征地后方可实施。

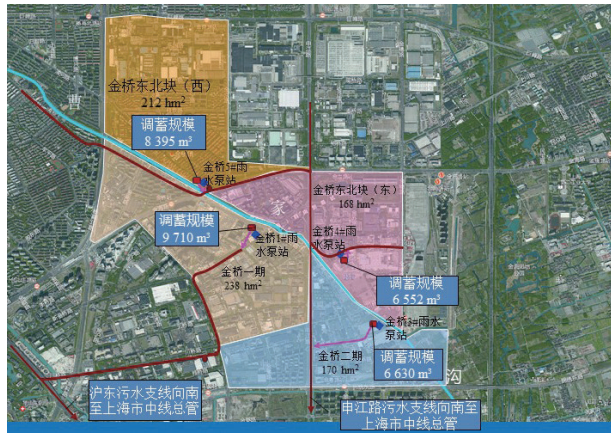


图5 金桥区域点状调蓄方案布置

Fig.5 Layout of point shaped storage scheme in Jinqiao area

② 线性调蓄

曹家沟金桥区域段未按规划建成,其中永建路至新金桥路段护岸为浆砌块石硬质驳岸,新金桥路至桂桥路段以自然土坡或简易护岸为主。该河道规划口宽40 m、底宽20 m、河底高程-1.0 m、两岸陆域控制带各宽20 m。曹家沟北岸有已建成社区、养老院以及在建的华为研发大楼等,南岸紧邻在建的唐陆公路,河道与唐陆公路之间为规划道路及河道公用绿带,现状建筑已拆除。曹家沟两侧场地现状及用地规划均为建设线性调蓄设施提供了良好条件。现有金桥1#、3#、4#、5#调蓄池彼此距离仅约600 m,联合调蓄基础较好。因此,采用线性联合调蓄型式(见图6),可充分利用曹家沟规划绿带及河道下部空间。

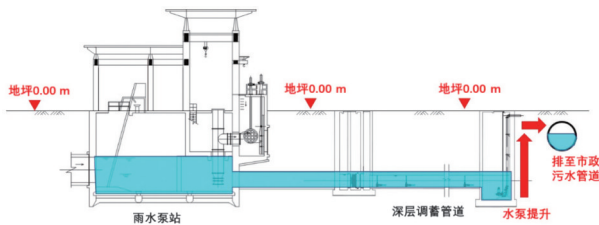


图6 线性调蓄方案示意

Fig.6 Schematic diagram of linear storage scheme

为便于各系统初期雨水重力流纳入调蓄设施、避让沿途管线设施并尽量降低施工带来的影响,需充分利用曹家沟河道下空间。自金桥5#和3#雨水泵站起由北向南、由南向北新建 $\varnothing 3\ 500\sim 4\ 000$ mm雨水调蓄管道,长约2 693 m,管道实际调蓄容量约 $3.18\times 10^4\text{ m}^3$ 。调蓄管道结合曹家沟走向于河道两岸

迂回布置(见图7、8),穿越沿线桥梁、地铁、电力涵涵、高压燃气管、原水箱涵、污水干管等设施。调蓄管道底高程-8.25~-3.20 m,采用顶管施工,沿线共设置21座顶管工作井(后期检查井)。配套设置入流消能、通风除臭、接力冲洗、放空泵站等设施,满足建成后的运行需要。

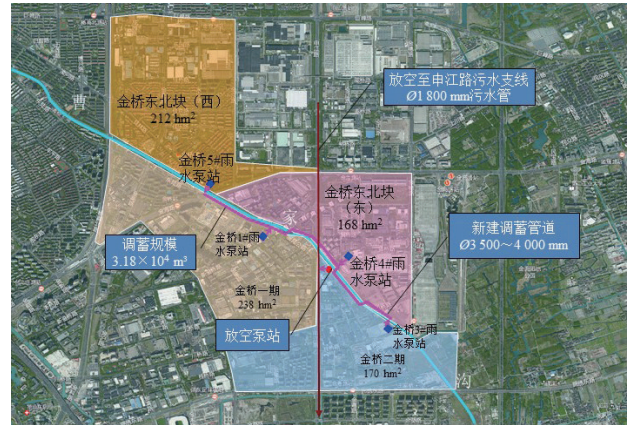


图7 金桥区域线性联合调蓄方案布置

Fig.7 Layout of linear joint storage scheme in Jinqiao area



图8 线性联合调蓄充分利用河道绿带方案示意

Fig.8 Schematic diagram of linear joint storage utilizing river green belt scheme

③ 方案比选

点状调蓄和线性调蓄两种方案均可满足初期雨水调蓄需求,从工程可行性、合理性、经济性、后期管理需求及对社会环境影响等方面综合比较,线性联合调蓄管道方案具有用地、投资等方面的优势,也有利于相关系统统筹管理,提高区域内排水系统初期雨水的韧性。因此,该工程最终确定选用线性联合调蓄管道方案。两种调蓄方案综合对比如表3所示。

表3 点状及线性调蓄方案综合对比

Tab.3 Comprehensive comparison of point and linear storage schemes

类型	项目	方案一:点状异位调蓄池	方案二:线性联合调蓄管道
可行性	用地需求	征地面积6 800 m ²	利用绿带及河道下部空间
	征地选址	选址规划、征地	选线规划、无征地
	技术难度	一般	较高
	施工方式	深基坑	顶管
	施工影响	较高	一般
	施工周期	较长	一般
合理性	系统韧性	独立运行、缺乏韧性	区域联合、韧性强
	建设期对系统的影响	不影响现有系统运行	不影响现有系统运行
经济性	建安投资/万元	37 544	35 000
	征地费用/万元	62 747	0
	总投资/万元	100 291	52 500
管理需求	管理技术	简单	需统筹联动、管理难度较高
	管理人员	现有泵站人员监管	现有泵站人员兼管
社会影响	施工影响	较高	一般
	使用期环境影响	一般	一般

4 工程效益

按2022年降雨情况进行模拟。2022年金桥地区共计降雨109次,全年累计降雨1 225.5 mm。其中单日累计降雨5 mm及以下53次,降雨次数占比约48.62%,该部分初期雨水将全部纳入调蓄池,累计调蓄降雨量102 mm,合计调蓄量约53.19×10⁴ m³,降低雨水径流放江次数48.62%左右。单日累计降雨量5 mm以上56次,降雨次数占比约51.38%;降雨时初期雨水将按设计规模注满调蓄管道,合计调蓄量约178.08×10⁴ m³。全年总计调蓄量约231.27×10⁴ m³,按现有4座泵站起始放江时监测浓度计算,SS、COD、NH₃-N、TP全年减排量分别约77.94、104.09、8.95、1.11 t,占比分别约33.18%、32.58%、31.77%、36.27%,具有较好的环境效益。

5 结论

① 点状调蓄便于分期设施,较为灵活,但在高密度建成区用地困难、手续繁琐,需求较难满足。线性调蓄有利于解决点状调蓄池用地选址方面的困境,充分利用市政道路、河道等设施地下空间。在排水系统较为集中的区域,有利于统筹解决片区内初期雨水污染问题,便于集中控制管理、增强系统韧性。

② 长距离线性调蓄面临设施内部水气压力平衡、通风除臭、管道冲洗与清淤、多系统控制等问题,实践中需进一步探索精细化、集成化与智能化的措施。

参考文献:

- [1] 谢磊,解铭,薛江儒. 调蓄池在排水系统中的应用及发展方向探讨[J]. 中国给水排水,2023,39(12):37-43.
XIE Lei, XIE Ming, XUE Jiangru. Discussion on application and development direction of storage tank in drainage system[J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(12):37-43(in Chinese).
- [2] 操李璵,胡真虎. 初期雨水污染特征及截流量分析[J]. 工业用水与废水,2023,54(3):47-53.
CAO Lijin, HU Zhenhu. Analysis on initial rainwater pollution characteristics and cut-off volume [J]. Industrial Water & Wastewater, 2023, 54(3): 47-53 (in Chinese).
- [3] 韩剑霜,石焯,张建锋,等. 污水管道沉积物分层冲刷的起动力规律及其污染贡献特性[J]. 中国环境科学,2023,43(10):5208-5213.
HAN Jianshuang, SHI Xuan, ZHANG Jianfeng, et al. Starting law and pollution contribution characteristics of stratified sediment scouring in sewage pipes [J]. China Environmental Science, 2023, 43(10): 5208-5213 (in Chinese).

作者简介:席旭军(1982-),男,江苏泰兴人,硕士,高级工程师,研究方向为市政雨污水管网规划与设计、初期雨水治理、城乡污水治理等。

E-mail:xixujuns@163.com

收稿日期:2024-05-04

修回日期:2024-05-20

(编辑:丁彩娟)