

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.15.023

深隧系统与城市雨洪系统的优化设计与协同运行

李江云, 朱慧子, 张选庆

(武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 随着地下深层空间的开发技术趋于成熟, 深层隧道(简称“深隧”)排水系统作为一种有效的城市洪涝控制工程手段逐渐被人们关注。基于 Python 平台, 通过调用 SWMM-API 库和 Geatpy 工具箱, 实现了一种将深隧排水系统整合至城市浅层雨洪管理系统的优化设计及协同运行算法。算法应用以武汉市东湖高新开发区为例, 在不同暴雨重现期下, 以节点溢流量、浅层雨水管满管时长及深隧调蓄能力为优化目标, 先对深隧入流点位置进行优化; 随后利用优化方案的入流点水位, 制定并优化深隧闸门调控方案, 结果显示, 在满足内涝防治标准的前提下, 通过控制入流点闸门启闭, 可最大限度利用浅层系统雨洪调蓄能力, 降低深隧系统入流量, 并对降低抽排泵站规模及后续运维费用起到关键作用。

关键词: 雨洪管理模型; 深层隧道; 闸门控制; NSGA-II 算法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)15-0163-06

Optimized Design and Coordinated Operation of Deep Tunnel Drainage System and Urban Stormwater Management System

LI Jiang-yun, ZHU Hui-zi, ZHANG Xuan-qing

(School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the advancement of deep underground space technology, the deep tunnel drainage system has increasingly garnered attention as an effective component of urban flood control infrastructure. Based on the Python platform, an optimized design and collaborative operation algorithm for integrating deep tunnel into the urban shallow stormwater management system was developed by utilizing the SWMM-API library and the Geatpy toolbox. This study optimized the location of the deep tunnel inflow point in the East Lake High-tech Development Zone of Wuhan City under different heavy rainfall recurrence periods. The optimization was conducted with respect to three key indicators: node overflow volume, full-pipe duration of shallow rainwater pipelines, and storage capacity of the deep tunnel. Subsequently, a control strategy for the deep tunnel gate was developed and further refined based on the water level data at the optimized inflow point. Under the premise of meeting flood prevention and control standards, the stormwater storage capacity of the shallow system could be maximized, the inflow of rainwater through the deep tunnel was reduced, and it significantly contributed to reducing the scale of the pumping station as well as subsequent operation and maintenance costs.

Key words: stormwater management model; deep tunnel; gate control; NSGA-II algorithm

基金项目: 湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202414)

随着我国社会经济快速发展及深层施工技术逐步成熟,地下深层隧道(简称“深隧”)作为提高超大城市或中心城区排水效率且能够应对极端降雨的终极方案,受到了广泛关注^[1-3]。然而,深隧工程的建设投资、运行及维护费用较高,如何充分发挥其工程价值,在不同降雨情景下,将其与浅层灰绿雨洪管理系统协同配置,通过入流点位置及入流方式的调控,降低后期运维强度及能耗,将成为未来彻底解决城市内涝问题的关键^[4]。目前对深隧定线、入流点设计及运维方面的研究主要集中在不同方案的静态比较上,尚无针对深隧和浅层雨洪管理系统在全周期、全流程下的协同设计及协同优化运行方面的贯穿研究。为此,笔者提出了一种途径和算法,基于现有浅层雨洪管理系统模型,对深隧入流点进行优化;并通过闸门控制深隧入流过程,充分利用低影响开发(LID)设施、浅层排水系统、深隧的源头控制及调蓄能力,实现提升城市内涝防治水平的雨洪管理模式。

1 研究区域及方法

1.1 研究区域概况

以武汉市东湖高新区内南湖和汤逊湖汇水区为例,该区域总面积为64 km²,现状管渠设计重现期(P)为1年,有部分海绵设施但不完善,2024年积水点分布如图1所示。

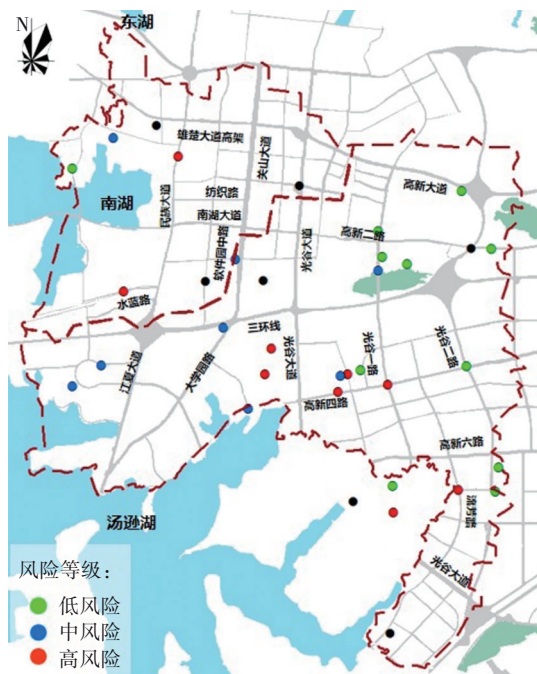


图1 2024年积水点分布

Fig.1 Distribution of waterlogging points in 2024

利用 GIS 对研究区域的土地利用数据进行解析,将下垫面分为 3 类,即不透水下垫面、透水下垫面和水面,占比分别为 55%、44%、1%。研究区域采用雨、污分流排水体制,利用雨洪管理模型(SWMM)软件对其雨水系统进行建模,共有 1 246 个子汇水区、1 215 个检查井节点、1 231 根雨水管道、44 个排放口、1 个蓄水池、1 组水泵。

1.2 研究区域内涝评估及深隧方案的提出

以研究区域排水管网中溢流点数及溢流总量为评估指标,设置不同重现期3 h降雨事件,溢流情况见表1。当 $P=3$ a时,已有超过1/3的节点出现溢流。为此采用布置LID设施的方式进行源头控制,LID优化方案基于 $P=3$ a进行,LID布置方案见图2。

表1 不同重现期降雨条件下的溢流情况

Tab.1 Overflow under rainfall with different recurrence periods

项目	重现期/a					
	1	3	5	10	20	50
溢流总量/ 10^4 m^3	4.52	14.07	23.36	45.52	75.68	93.47
溢流点数/个	221	478	589	677	794	840
溢流点占比/%	18.2	39.3	48.5	55.7	65.3	69.1

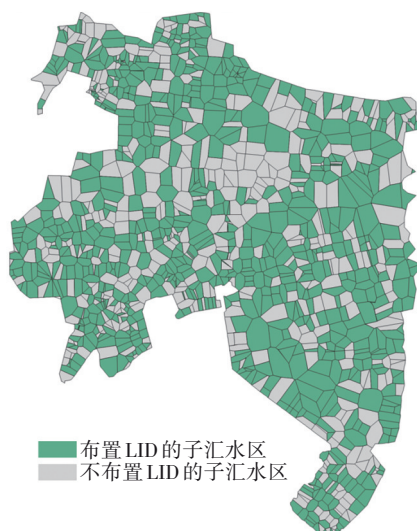


图2 研究区域的LID布置方案

Fig.2 LID layout scheme of study area

LID方案的调控效果见表2。可见,虽然LID措施的加入已经显著削减了节点溢流总量,径流控制率提升至60%左右,但仍未满足该地区80%径流控制率的要求。因此,鉴于LID设施对较大规模降雨的控制效果有限,为进一步提升城市防洪排涝能力,拟采用深隧排水系统作为最终解决方案。

表2 不同条件下的节点溢流总量
Tab.2 Total overflow of nodes under different conditions

项目	无 LID, $P=3\text{ a}$	有 LID, $P=3\text{ a}$	有 LID, $P=5\text{ a}$	有 LID, $P=10\text{ a}$
径流控制率/%	44.0	64.2	60.8	57.0
节点溢流总量/ 10^4 m^3	140.7	21.9	50.3	119.6

1.3 研究方法

首先,利用SWMM进行二次开发的SWMM-API库获取模拟数据,该库支持利用Python编程调用SWMM快速建模并完成模拟运算,通过读取SWMM报告和二进制文件,将结果转化为Python数据集,记录模型模拟性能。然后,采用Geatpy工具箱中的NSGA-II算法,根据优化目标确定决策变量。基于Python平台,通过调用SWMM-API库和Geatpy工具箱,可将深隧排水系统整合至城市浅层雨洪管理系统的优化设计及协同运行中去,算法的具体流程如图3所示。

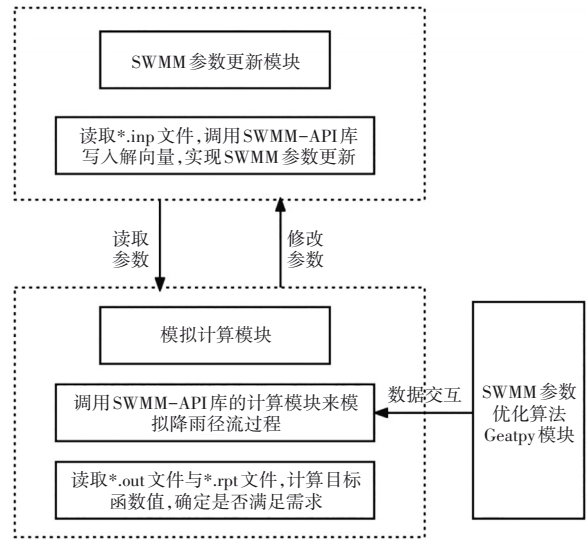


图3 SWMM-API与Geatpy的耦合

Fig.3 Coupling of SWMM-API and Geatpy

2 深隧系统优化设计

2.1 深隧入流点位置选择

从浅层雨水管网的1215个检查井节点中筛选出符合条件的入流点,深隧入流点需要满足以下条件^[5-6]:入流点处节点流量足够大,检查井经常出现溢流;入流点周围管道容易长时间处于满管状态;入流点处于浅层雨水管网的干管上,并且干管直径足够大(>1 m);考虑到深隧的施工要求,所选地点应远离建筑密集区域和交通要道附近。

结合模型运行中的管网节点流量数据和实际卫星影像图等,最终筛选出9个必选入流点和59个可选入流点,其分布如图4所示。

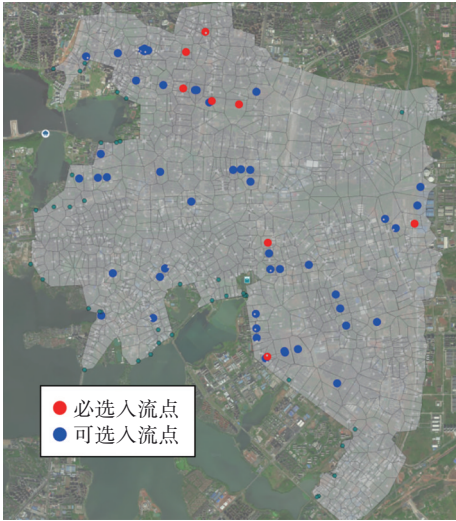


图4 可选入流点分布

Fig.4 Distribution of optional flow points

2.2 深隧入流点优化

基于深隧入流特点,将深隧系统中的管道等效为带闸门的调蓄池,如图5所示,即由带闸门的调蓄池与深隧入流点相连接。

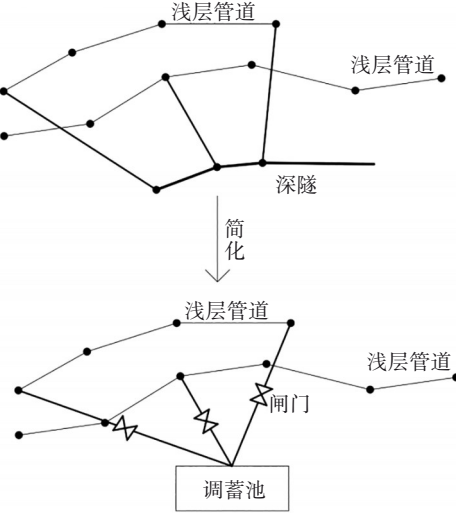


图5 深隧等效模型

Fig.5 Deep tunnel equivalent model

入流点优化NSGA-II算法如下:

① 决策变量

经由NSGA-II优化,从图4中选取20个深隧入流点,包括9个主要入流点和11个次要入流点,由此将20个入流点的位置作为决策变量。

② 目标函数

a. 节点溢流总量

$$Y = \sum_i q_i \quad (1)$$

式中: Y 为节点溢流总量, m^3 ; q_i 为第 i 个节点的溢流量, m^3 。作为综合反映系统内涝程度的指标, Y 值越小说明内涝防治效果越好。

b. 深隧调蓄作用

图5等效模型中的调蓄池容积[见式(2)]反映了浅层雨水管网向深隧系统的输送能力,其值越大说明深隧系统起到的调蓄作用越大,入流点位置对排水越有利。

$$V = S \cdot h \quad (2)$$

式中: V 为调蓄池容积, m^3 ; S 为假设的调蓄池底面积,为保证足够大的容积,定为 $100\,000\text{ m}^2$; h 为模型运行最后时刻的调蓄池水位, m 。

c. 满管时长

定义管道充满度超过0.9的持续时间为满管时长,计算各管段在模拟过程中的满管时长,通过求和获得整个雨洪系统的满管时长,以此反映浅层雨水管网的承担负荷,其值越低说明入流点位置对降低浅层管网负荷越有利。

$$T = \sum_c T_c \quad (3)$$

式中: T 为研究区域所有管道的满管时长之和, h ; T_c 为第 c 个管道的满管时长, h 。

③ 优化结果

暴雨重现期越大,对深隧入流点位置的要求就越高。为此,根据研究区域内涝防治标准,选择 $P=50\text{ a}$ 、 3 h 模拟降雨事件,在LID优化方案的前提下,通过NSGA-II算法优化,得到最佳入流点位置分布,具体见图6。在 $P=50\text{ a}$ 的 3 h 降雨条件下,无深隧方案的节点溢流总量、满管时长、溢流节点数分别为 $55.75 \times 10^4\text{ m}^3$ 、 432.4 h 、 500 个,而深隧方案分别为 $24.62 \times 10^4\text{ m}^3$ 、 291.5 h 、 428 个,削减率分别为 56% 、 33% 、 14% 。可知,深隧极大降低了研究区域的溢流量,对洪涝控制效果显著,同时较大幅度减轻了浅层雨水管网的排水压力,提高了研究区域对抗极端降雨天气的能力。根据研究区域排水及入流点走向,按图7所示分三级布置深隧管道,各级管径分别为 10 、 6 、 4 m ,埋深按 20 m ,坡度为 $1\% \sim 3\%$,总长为 23.65 km ,调蓄容积设定为 $82 \times 10^4\text{ m}^3$ 。

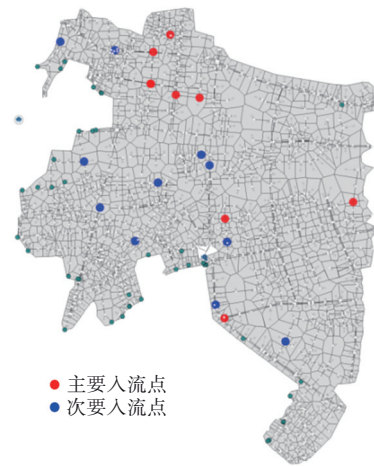


图6 深隧入流点最终布置方案

Fig.6 Final layout of deep tunnel inflow points



图7 深隧管道布置

Fig.7 Layout diagram of deep tunnel pipelines

不同降雨重现期下,节点溢流总量、溢流点个数、浅层雨水管网满管时长等指标如图8所示。

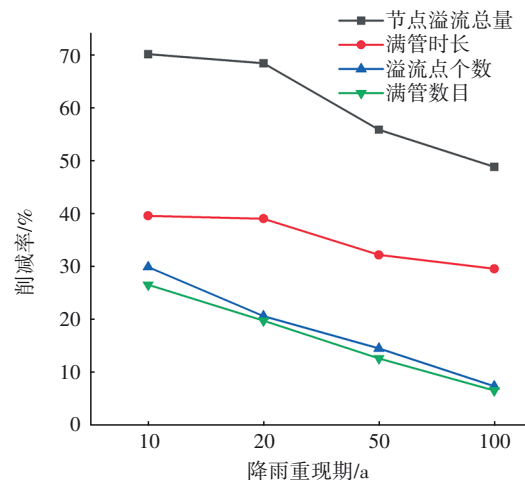


图8 深隧系统评价指标

Fig.8 Evaluation criteria for deep tunnel drainage system

由图 8 可知,在大重现期(如 $P=100\text{ a}$)暴雨条件下,深隧对节点溢流总量的削减效果最明显(约 50%),同时也显著缩短了满管时长(约 30%)。即在较大降雨量情景下,深隧的内涝控制效果显著。但另一方面,随着降雨量的增大,深隧并未大幅减少溢流节点数量,这是因为深隧入流点接收径流量的多少还同其与内涝节点的距离有关,因此,优化深隧入流点位置对提升深隧的调控能力至关重要。

3 深隧与浅层雨洪管理系统协同运行

在雨洪系统优化设计的前提下,通过控制深隧入流点的闸门启闭,可缩短浅层雨洪管理系统的满管时长,以此实现两套系统的协同运行。即利用浅层雨水管网的调蓄容量降低深隧入流量,节省抽排费用。模型操作可通过监测深隧入流点水位和流量,在满足防洪排涝设计标准的前提下,通过控制闸门启闭实现上述目标。

① 决策变量

当深隧入流点闸门处的液位达到一定高度时,闸门开启,当液位降低到某个阈值时,闸门关闭。通过监测闸门处的液位来确定闸门的启闭时间,因此决策变量为深隧闸门的启闭水位。具体做法如下:将深隧入流点 J_i 处的水位值作为深隧闸门 K_i 的开闸液位 K_{i0} 、关闸液位 K_{ic} ,以开关闸液位作为调度深隧的决策变量,利用 SWMM-API 编写控制规则,将其导入模型中。以闸门 K_i 为例,控制规则 R1:当入流点 J_i 处的水位小于开闸水位 K_{i0} 时闸门处于关闭状态,高于开闸水位时即开启闸门;控制规则 R2:开闸状态下,当入流点 J_i 处水位低于关闸水位 K_{ic} 时,闸门关闭。

② 目标函数

该阶段目标函数可包括:节点溢流总量、深隧调蓄量、浅层雨水管网满管时长。与深隧系统优化设计不同的是,协同优化运行对入流点闸门启闭实施控制,在溢流量不增的前提下,如果满管时长越大,说明系统发挥浅层雨水管网调蓄空间的能力越大,削减深隧调蓄池入流,从而降低抽排及后续的运维费用。

③ 优化结果分析

为验证深隧入流点闸门调控效果,比较了调控前后的节点溢流总量、满管时长、深隧调蓄量,结果见表 3。可见,实施调控后,节点溢流总量变化不

大,说明闸门调控没有影响上游的排涝;但满管时长显著增加,证明调控的确有助于提升浅层雨水系统的利用率。进一步分析不同重现期下的调控效果,可形成一套完整的全周期降雨条件下的城市内涝防治操作方式,即在降雨量较小的情景下($P=10\text{ a}$),闸门调控效果十分显著,在不影响节点溢流总量的前提下,削减了约一半的深隧入流量;随着降雨重现期的增加,浅层雨水系统逐渐达到饱和(满管),此时启用深隧系统以接纳超出浅层管网收集能力的雨水。

表 3 闸门调控优化结果

Tab.3 Optimization results of gate regulation

项目	节点溢流总量/ 10^4 m^3		满管时长/h		深隧调蓄量/ 10^4 m^3	
	无调控	有调控	无调控	有调控	无调控	有调控
$P=10\text{ a}$	3.58	3.51	114.43	135.93	13.01	6.34
$P=20\text{ a}$	8.28	9.17	178.50	203.49	18.37	13.13
$P=50\text{ a}$	24.62	25.53	293.70	329.76	20.03	17.61
$P=100\text{ a}$	42.64	44.17	370.32	391.99	23.60	20.53

④ 深隧终点入流过程分析

为优化深隧抽排泵站规模,分析了深隧终点入流过程。以 $P=20\text{ a}$ 的 3 h 降雨事件为例,提升泵站进水池闸门在调控前后的入流过程曲线见图 9。

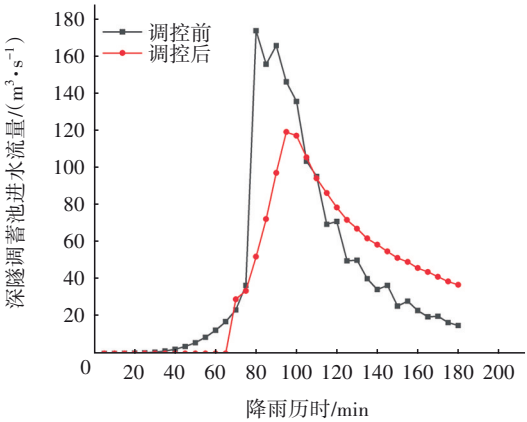


图 9 调控前后深隧调蓄池的进水流量对比

Fig.9 Inflow comparison of storage tank of deep tunnel before and after regulation

各深隧入流点无调控时,深隧末端降雨径流量快起快落,峰值高(80 min 时达到 $180\text{ m}^3/\text{s}$)。如果对闸门实施调控,根据调控水位,降雨初期闸门关闭,先由浅层排水管网吸纳或收集雨水径流;随着降雨时间的增加,入流点水位上升至启门水位,开闸启用深隧接收涝水,同时深隧末端启泵开始抽排。调

控后,入流曲线变得平缓,最高峰值为 $120 \text{ m}^3/\text{s}$,削减了 32%,峰现时间滞后 20 min。可见,增加调控不仅使深隧入流减少、节省抽排费用,而且由于径流峰值降低,还可显著降低泵站设计规模,为进一步实现抽排泵站的优化调度提供技术保障。

4 结论

① 基于 Python 平台,通过调用 SWMM-API 库和 Geatpy 工具箱,提出了一种将深隧系统整合至城市浅层雨洪管理系统的优化设计及协同运行算法,通过闸门调控达到了利用浅层调蓄能力降低深隧入流量的目的,从而将深隧功能嵌入城市雨洪管理系统,实现了协同运行。

② 以武汉市东湖高新区内某区域为例对算法进行了验证。首先,利用研究区域的现状 SWMM 雨洪模型,对现有浅层排水系统在不同重现期下的防涝能力进行了评估,在现有排水系统难以应对较大规模降雨的前提下,研究区域可采用深隧方案解决内涝问题。在优化设计阶段,通过筛选符合深隧施工条件的入流点,利用 NSGA-II 算法求解最佳入流点位置,进而布置了三级深隧管道及具体参数。在协同运行阶段,采用调控入流口闸门启闭,以入流口闸门启停水位作为决策变量,利用 NSGA-II 算法优化闸门调控的最佳水位,以保证在相近溢流总量的前提下,通过提升浅层雨水管网的利用率,降低深隧入流量,达到降低深隧抽排费用的目的。最后,对深隧终点入流过程的进一步分析表明,通过闸门调控还可降低泵站规模,为后续下游设施的进一步优化调度提供技术支持。

③ 针对深隧的优化运行,下一步可联合考虑末端调蓄池的泵站抽排能力,以及综合考虑雨水径流的水质、水量,对前期初雨采用污水厂处理再排放的方式,形成完整的深隧运维体系。

参考文献:

- [1] 唐磊,车伍,赵杨. 对我国城市建设雨洪控制隧道的思考[J]. 中国给水排水, 2015, 31(7): 119-125.
TANG Lei, CHE Wu, ZHAO Yang. Thinking about construction of stormwater control tunnels in China[J].

China Water & Wastewater, 2015, 31(7): 119-125 (in Chinese).

- [2] 刘遂庆. 关于深层调蓄管道在排水系统中应用的若干思考[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 1-3.
LIU Suiqing. Thinking about the application of deep storage pipes in drainage systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3): 1-3 (in Chinese).
[3] 何巍伟,王梦华,武今巾. 我国深隧排水系统典型案例分折[J]. 净水技术, 2023, 42(6): 142-151.
HE Weiwei, WANG Menghua, WU Jinjin. Typical case analysis of deep tunnel drainage systems at home [J]. Water Purification Technology, 2023, 42(6): 142-151 (in Chinese).
[4] 李江云,张选庆,胡子欣. 城市雨水深隧系统多目标优化设计及运行[J]. 中国给水排水, 2024, 40(9): 129-136.
LI Jiangyun, ZHANG Xuanqing, HU Zixin. Multi-objective optimization design and operation of urban stormwater deep tunnel system [J]. China Water & Wastewater, 2024, 40(9): 129-136 (in Chinese).
[5] 李鹏程. 接入点设置对深层调蓄管道系统提标功能实现的影响因素初探[J]. 城市道桥与防洪, 2017(9): 98-100.
LI Pengcheng. Elementary discussion on influence of access point on realization of upgrading function of deep storage pipeline system [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2017(9): 98-100 (in Chinese).
[6] 王碧波,李怀正,沈庞勇,等. 应用 InfoWorks 模型对深隧入流点设置方案的优化[J]. 净水技术, 2018, 37(7): 97-102.
WANG Bibo, LI Huaizheng, SHEN Pangyong, et al. Optimization of inflow points of deep tunnel intercepting wells by using InfoWorks model [J]. Water Purification Technology, 2018, 37(7): 97-102 (in Chinese).

作者简介:李江云(1967-),女,湖北武汉人,博士,教授,主要研究方向为市政工程给排水管网、泵及泵站过渡过程和水锤防护等。

E-mail:lijy@whu.edu.cn

收稿日期:2024-09-08

修回日期:2024-12-12

(编辑:刘贵春)