

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.260166

深层调蓄隧道与浅层排水系统协同提标 控污影响因素研究

沈振中

[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: 深层排水调蓄隧道与浅层排水系统协同提标、控污目标的实现,受到外部因素与内部因素的共同影响。其中,外部因素主要为雨型、降雨强度;内部因素包括系统本身的排水设施能力(泵排模数)、降雨前管网的初始水位、入流堰的调度,以及市政雨水泵站的运行。以某特大城市中心城区深层排水调蓄隧道工程为例,重点研究浅层排水系统设施能力对深层排水调蓄隧道提标、控污 2 大目标实现的影响。研究发现,深层排水调蓄隧道提标、控污 2 大功能的发挥,与各分区系统本身的泵排模数,即系统本底的“先天条件”具有显著的相关性。对于研究区域内的系统,当系统本身的泵排模数相对较大时,即大于 $12 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,在不同设计降雨重现期条件下,控污与提标 2 大目标可同时实现;当系统本身的泵排模数相对较小时,即小于 $12 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$,在 5 年一遇暴雨条件下,可考虑采取统筹优化调蓄空间的时空分配,或挖掘二、三级管道潜力等辅助手段来实现双重目标。

关键词: 提标;控污;浅层系统;排水能力;深层隧道

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)08-0011-05

Study on Influencing Factors of Synergistic Upgrading and Pollution Control of Deep Storage Tunnels and Shallow Drainage Systems

SHEN Zhenzhong

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

Abstract: The achievement of synergistic upgrading and pollution control goals of deep drainage storage tunnel and shallow drainage system is influenced by external factors and internal factors, in which the external factors are mainly the type and intensity of rainfall, and the internal factors include the drainage facility capacity of the system itself (pump discharge modulus), the initial water level of the pipe network before rainfall, the scheduling of the inflow weir, and the operation of the municipal rainwater pumping station. Taking the deep drainage and storage tunnel project in the central urban area of a megacity as an example, the key research focuses on the impact of the capacity of shallow drainage system facilities on the realization of the two major goals of upgrading and pollution control of deep drainage storage tunnels. The results indicate that the performance of the two major functions of deep drainage and storage tunnels, namely upgrading and pollution control, is significantly correlated with the pump discharge modulus of each zone system itself, that is, the “inherent conditions” of the system background. For the systems within the study area, when the pump discharge modulus of the system itself is relatively large, that is, greater than $12 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, under the different design rainfall recurrence periods, the two major goals of pollution control and upgrading can be achieved simultaneously. When the pump discharge modulus of the system itself is relatively small, that is, less than $12 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{km}^2)$, under the condition of a once-in-five-year rainstorm, it is advisable to consider optimizing the spatio-temporal allocation of the storage space in a coordinated manner, or by tapping the potential of secondary and tertiary pipelines and other auxiliary means, the dual goals are achieved.

Keywords: upgrading; pollution control; shallow system; drainage capacity; deep tunnel

收稿日期: 2026-02-13

基金项目: 上海市政总院科研项目(S2025J003 K2025J003-2A)
——雨污水管网智能检(监)测和快速修复关键技术、智能管理平台与核心装备研究

作者简介: 沈振中(1982—),男,高级工程师,从事排水系统数值仿真模拟、污水处理厂、管网、流域整治、海绵城市等给排水设计工作。

0 引言

在排水领域,深层排水调蓄隧道(简称“深隧”)是指埋设在地下空间(一般指地面以下深度超过 20 m),用于调蓄或输送雨水、合流污水,通常具有较大调蓄容量的隧道。深隧提标,本质上是在原有雨

水系统中增加入流点,改变原有系统的水力线,削减部分由超过系统设计标准暴雨带来的水量,实现原有雨水系统的提标升级(见图1)。

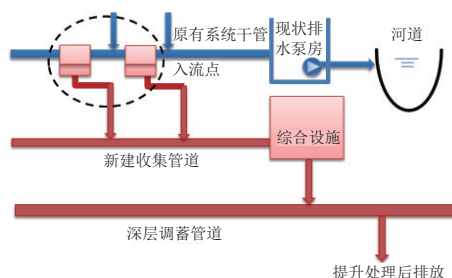


图1 深隧系统架构示意图

自2016年以来,广州、上海、武汉、深圳、重庆、成都、杭州等城市的学者,对深隧技术在国内的应用前景和工程实践开展了大量研究。在国内的应用前景方面,王广华等^[1]总结了我国香港、美国、日本的深隧建设情况,并依据深隧功能,将其分为雨洪排放隧道、污水调蓄输送隧道、合流调蓄和输送隧道,以及复合功能隧道;谭琼等^[2]分析了英国泰晤士河深隧工程的建设思路,指出上海市中心城高密度区域的雨水系统提标方式,可借鉴英国泰晤士河深隧工程的经验;熊科^[3]结合重庆市中心城区排水系统的实际情况,提出开展深隧排水系统规划建设工作的设想;刘遂庆^[4]认为深隧工程投资大,建设和运行管理技术复杂,应采取审慎的态度。

在工程实践方面,汤舒^[5]、苟德菲^[6]针对广州深隧提标升级和溢流控制效果,分别采用BP神经网络和Info Works ICM进行数值仿真模拟研究;夏霖^[7]利用SWMM模型,分析成都市Y字形深隧排水系统对溢流污染的控制作用;谢松等^[8]总结了杭州市南排深隧工程对特大城市防洪排涝情势的影响规律;李江云等^[9-10]利用NSGA-II算法编程,调用SWMM模型,对深隧方案进行优化;李鹏程等^[11-14]利用Info Works ICM,对上海市深隧与浅层排水系统的接入点设置原则、接入竖井处可能产生的瞬变流灾害、接入点可调堰的机器学习控制方式等展开研究。还有一些学者对深隧工程的沉积物淤积特性^[15]、通风除臭方法^[16]、水力过渡过程^[17]、入流竖井设计^[18-19]、出口泵站设计^[20]等进行了有益探索。这些成果回答了“该不该建深隧”“如何评估深隧的建设效果”“如何优化深隧的运行方案”等工程实践问题。

建设深隧工程一般有2大目标:一是防汛目标,主要是提高排水系统的安全性,实现系统提标和内涝防治;二是控污目标,主要是降低初期雨水污染及

减少CSO排放量。然而,当前学界针对“提标”与“控污”2大目标是否存在本质矛盾、存在哪些协同影响因素、如何定量评价影响程度的相关研究还相对匮乏。

“提标”和“控污”2大目标的关系,总结起来就是既统一又矛盾。“统一性”在于这2大工程目标需在同一工程中实现,两者须统筹兼顾;“矛盾性”则在于2大工程目标实现的前提条件和运行模式并不完全匹配,在某些情况下,2大工程目标之间存在一定冲突。例如,在一定条件下,为实现初期雨水和溢流污染有效管控的工程目标(如控制22.5 mm初期降雨),要求初期降雨产生的径流进入深隧系统后,再启动市政雨水泵站。而为实现内涝防治目标,深隧系统被当作削峰调蓄设施使用,即初始时刻雨水暂不进入深隧,等雨峰到来时,启用深隧系统进行削峰调蓄。从本质上看,2大功能均依托深隧的调蓄空间来实现,而调蓄空间的有限性,是导致“矛盾性”的根本原因。深层隧道与浅层排水系统协同提标控污技术,通过重点分析2大系统的协同影响因素,开展科学的协同衔接调度,尽可能保证提标、控污2大目标的平衡^[12]。

由于深隧功能的特殊性(兼顾提标与控污目标,服务范围均为强排系统,浅层管网带水运行),以及深隧调蓄空间的有限性,决定了深层隧道与浅层排水系统协同提标控污目标的实现会受到一些因素的影响,包括外部因素与内部因素。外部因素主要为雨型、降雨强度。内部因素包括浅层排水系统与深隧系统2部分。浅层排水系统对目标可达性的影响主要为浅层管网的初始水位、市政雨水泵站的运行;深隧系统对目标可达性的影响主要为入流堰的调度。

虽然影响深层隧道与浅层排水系统协同提标控污目标实现的因素有许多,考虑到篇幅限制,本文重点分析不同系统(排水设施能力不同),在不同降雨强度(分别以5年、3年、1年重现期表示)下,对深隧2大目标(提高排水系统安全性、减少CSO排放量)的影响。其中,“提高排水系统安全性”指5年一遇不积水;“减少CSO排放量”暂定为是否能够控制22.5 mm初期降雨产生的径流进入深隧。

1 典型排水系统概况

鉴于篇幅限制,本文仅选取某特大城市中心城区深隧服务范围内的A排水系统作为典型对象展开

详细分析(见图 2), B、C、D 排水系统的分析方法与 A 系统相同, 因此仅给出结论, 分析过程不再赘述。



图 2 A 系统现状及二、三级管道示意图

A 排水系统为已建分流制系统, 总服务面积为 2.93 km²。系统设计暴雨重现期 $P=1$ 年, 综合径流系数 $\psi=0.6$ 。系统主干管管径为 DN1800~DN2700, 雨水经管道输送至系统末端的雨水泵站, 经泵站提升后排入河道。系统末端雨水泵站的排水能力为 16.32 m³/s。

2 数学模型及关键边界条件

2.1 数学模型的建立

本文选择 Info Works ICM 开展排水管网建模和优化研究, 产流模型选取 Horton 模型, 汇流模型选取 SWMM 模型, 鉴于篇幅限制, 具体建模及模型率定、验证过程参考《多目标复杂排水系统机器学习辅助运行控制研究》^[14]。

2.2 模拟的关键边界条件

暴雨强度: 采用上海市暴雨强度公式计算。

$$q = \frac{1\,600(1 + 0.864\lg P)}{(t + 7)^{0.656}}$$

式中: q 为设计降雨强度, L/(s·hm²); P 为设计重现期, 年; t 为降雨历时, min。

雨型选择: 设计短历时降雨应采用芝加哥设计雨型。参考相关研究成果, 芝加哥雨型的峰值系数为 0.405。结合暴雨强度公式, 计算得到 120 min 设计雨型, 即为本文采用的短历时设计雨型。

管网初始水位: 为最大程度地突出重现期对提标、控污目标实现的影响, 本工况下现状排水管道系统初始水位按照管顶以上 1 m 设置, 即初始时刻, 浅层管网初始存水率为 70%。

接入点入流控制: 采用可调堰, 堰的开关速度为

1 m/min, 即 0.017 m/s, 堰宽 5 m。

积水点定义: 根据工程目标, 深隧工程建成后需实现 5 年一遇暴雨条件下系统不积水。《城镇内涝防治技术规范》(GB 51222—2017) 对道路积水事件的定义: 暴雨导致靠近路拱处的车道上最深积水深度 ≥ 15 cm。本文从工程安全性的角度考虑, 将积水点定义为任意时刻水位高于地面高程的点。

3 模拟成果及分析

3.1 重现期 1 年一遇

通过模拟分析, A 系统在 1 年一遇设计降雨条件下能够实现排水安全与控污的双重目标, 即 22.5 mm 初期降雨产生的径流进入深隧后, 关闭可调堰, 再开启市政泵站, 保障系统不积水。此时, 系统的雨水流量分配过程如图 3 所示。可以看出, 深隧与浅层管网调蓄设施均对径流峰值起到削峰作用, 市政泵站对径流中后期的水量进行排除, 保证系统不积水。

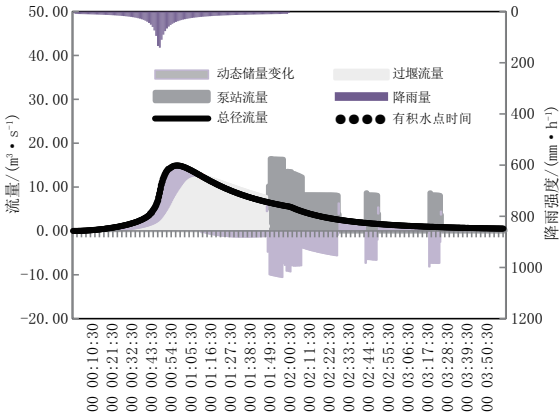


图 3 1 年一遇设计降雨条件下, A 系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量

3.2 重现期 3 年一遇

通过模拟分析, A 系统在 3 年一遇设计降雨条件下, 如果仍保持 22.5 mm 初期降雨产生的径流进入深隧后, 关闭可调堰, 再开启市政泵站, 会导致提标目标无法实现, 系统存在积水, 积水时长约为 0.5 h。此时, 系统的雨水流量分配如图 4 所示。积水发生在深隧未充满前, 积水原因主要为堰上水头不足, 过堰流量无法匹配径流峰值, 导致 A 系统在 50 min 左右发生积水(图 4 中垂线处)。但由于深隧系统在关闭时的径流量小于市政泵站流量, 积水在市政泵站启动后不久(85 min 左右)消退。在该工况下, 系统积水的原因主要是入流堰的过流能力不足, 可尝试在径流峰值产生前, 调节入流堰的高度, 增大堰上水头, 提高过堰流量, 保证深隧提标目标的实现。

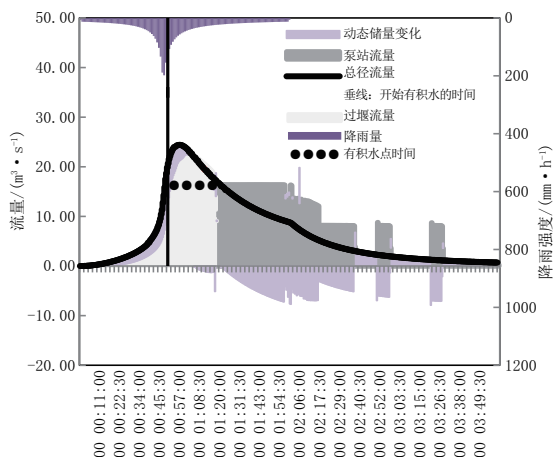


图4 3年一遇设计降雨条件下,A系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量(不降堰)

根据积水产生时间,本文采用模型进行试算,在49 min时将入流堰降低至管底,A系统在3年一遇设计降雨条件下没有积水,雨水流量分配如图5所示。与不降堰工况相比,此时最大过堰流量增加33%,最大过堰流量比峰值流量高5 m³/s。深隧自身承担径流峰值,保证了系统提标目标的实现。

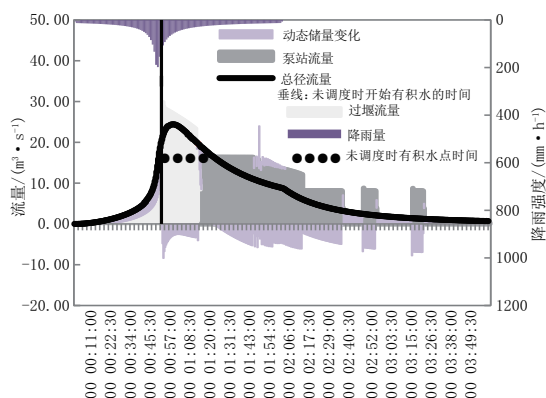


图5 3年一遇设计降雨条件下,A系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量(降堰)

根据模拟分析,A系统在3年一遇设计降雨条件下,通过提前降堰,可以实现提标与控污的双重目标。

3.3 重现期5年一遇

通过模拟分析,A系统在5年一遇设计降雨条件下,如仍保持22.5 mm初期雨水产生的径流进入深隧后,关闭可调堰,再开启市政泵站,会导致提标目标无法实现,系统存在积水且积水超过1 h。此时,系统的雨水流量分配如图6所示。积水发生在深隧未充满前,积水原因主要为堰上水头不足,过堰流量无法匹配径流峰值。

参照3年重现期的方案,本文尝试提前降堰,以增大过堰流量,实现系统提标的目标。根据积水产生时间,通过模型试算,在51 min时将入流堰降低至

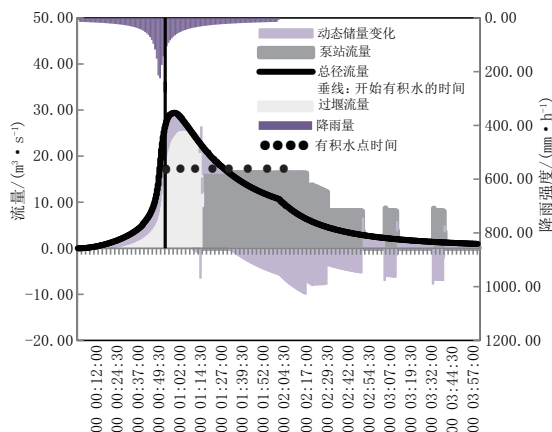
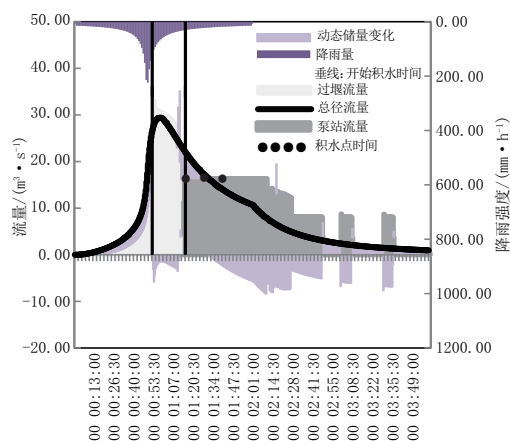


图6 5年一遇设计降雨条件下,A系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量(不降堰)

管底,此时系统的雨水流量分配如图7所示。



注:第一条垂线为不降堰工况下开始积水时间;
第二条垂线为降堰工况下开始积水时间。

图7 5年一遇设计降雨条件下,A系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量(降堰)

可以看出,相较于不降堰工况,降堰后,过堰流量增大30%,大于径流的峰值流量,深隧独自承担了5年一遇的峰值(见图7)。但由于深隧调蓄空间的有限,在达到调蓄水量后,深隧很快关闭,此时,市政泵站与浅层管道的调蓄能力总体小于径流量,导致系统积水。

综上所述,从流量的角度看,深隧虽然具有削峰的功能,但由于其调蓄空间的有限性,在5年一遇工况下,无法实现22.5 mm初期降雨产生的径流进入深隧后再开启市政泵站,即控污目标的实现需要考虑其他辅助手段,如利用二、三级管道的调蓄能力,或利用降雨空间分布的不均匀性,开展不同子系统调蓄空间的统筹优化分配。

在此基础上,通过模型试算,确认在51 min降堰后,应在58 min提前开启市政泵站,通过两者的共同作用,延长过堰时间,保证深隧关闭后,市政泵站与浅层管道的调蓄能力总体上大于径流量,实现系统

提标的目标(见图8)。

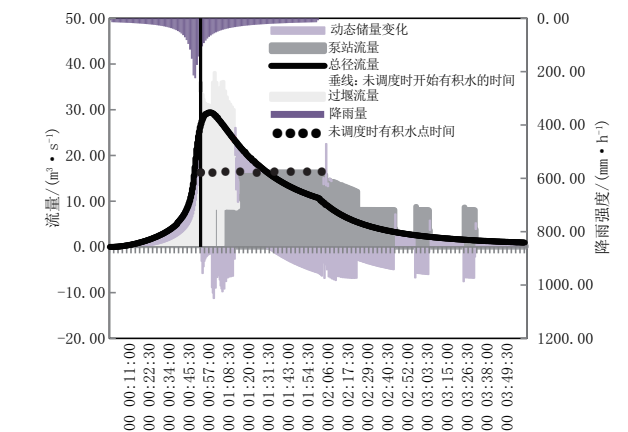


图8 5年一遇设计降雨条件下,A系统地表径流进入浅层管网、深隧系统及市政泵站的流量(降堰、提前开泵)

不同重现期对提标、控污目标的实现及调度要求不同。A系统在不同重现期条件下,对提标、控污目标实现的影响程度如表1所示。

通过典型系统分析,可以看出,不同系统(排水

表 1 提标、控污目标实现的调度策略			
降雨强度	排水安全	控污	所需调度
5年一遇	●	○	提前开泵
3年一遇	●	●	降堰
2年一遇	●	●	降堰
1年一遇	●	●	无

注:●表示目标可达;○表示目标在限制条件下可达。限制条件为利用二、三级管道的调蓄能力等。

设施能力不同),对提标、控污目标实现及调度运行方式的影响不同。本文旨在探寻系统本身特征造成上述影响差异的原因,对系统的泵排模数与浅层调蓄模数进行计算(见表2)。

泵排模数=
$$\frac{\text{泵站流量}}{\text{强排面积} \times \text{规划径流系数}}$$

浅层调蓄模数=
$$\frac{\text{浅层管道调蓄量}}{\text{强排面积} \times \text{规划径流系数}}$$

表 2 部分系统泵排模数及浅层调蓄模数表						
系统名称	强排面积/km ²	规划径流系数	泵站流量/(m ³ ·s ⁻¹)	排水模数/(m ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²)	浅层调蓄模数/(万 m ³ ·km ⁻²)	控污量/mm
D	3.28	0.55	22.3	12.4	0.03	22.5
C	1.3	0.55	8.6	12.2	0.08	22.5
B	3.5	0.55	21.6	11.3	0.03	18.1
A	2.93	0.55	16.3	10.2	0.04	11.2

通过分析系统本身特征及不同重现期对提标、控污目标可达性的影响可知,系统的泵排模数与目标可达性具有显著相关性。由于本文以区域排水系统初始存水量较大为分析前提,浅层调蓄模数对目标可达性的影响较小。

对于本研究区域系统,当系统本身的泵排模数相对较大时,即大于12 m³/(s·km²),在不同设计降雨重现期条件下,控污与提标2大目标可同时实现;当系统本身的泵排模数相对较小时,即小于12 m³/(s·km²),在5年一遇暴雨条件下,可考虑采取统筹优化调蓄空间的时空分配,或挖掘二、三级管道潜力等辅助手段来实现双重目标。

4 结 语

深层隧道与浅层排水系统协同提标、控污目标的实现,受外部因素与内部因素的共同影响。外部因素主要为雨型、降雨强度;内部因素包括系统本身的排水设施能力(泵排模数)、降雨前管网的初始水位、入流堰调度及市政雨水泵站的运行。其中,深隧提标、控污功能的发挥,与各分区系统本身的泵排模数,即系统本底的“先天条件”相关。当系统本身的

泵排模数相对较大时,在设计降雨重现期(5年一遇)条件下,提标、控污目标可以实现。当系统本身的泵排模数相对较小时,需考虑采取统筹优化调蓄空间的时空分配,或挖掘二、三级管道潜力的辅助手段来实现双重目标。

参考文献:

[1] 王广华,陈彦,周建华,等.深层排水隧道技术的应用与发展趋势研究[J].中国给水排水,2016,32(22):1-6;13.

[2] 谭琼,张建频,时珍宝.英国泰晤士河深隧工程建设思路与启示[J].上海水务,2018,34(4):58-61.

[3] 熊科.重庆市中心城区深隧排水系统规划的探讨与借鉴[J].低碳世界,2024,14(8):81-83.

[4] 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,2018,54(3):1-3.

[5] 汤舒.东濠涌深隧排水系统内涝监测与控制优化研究[D].广州:广州大学,2017.

[6] 苟德菲.广州市S区深层隧道排水系统优化调度运行策略模拟研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2020.

[7] 夏霖.城市深隧排水系统防涝控污效果模拟[D].北京:中国水利水电科学研究院,2019.

[8] 谢松,王磊之,覃光华,等.深隧排涝工程对特大城市防洪排涝情势的影响[J].水资源保护,2025,41(3):111-118.

[9] 李江云,朱慧子,张选庆.深隧系统与城市雨洪系统的优化设计与协同运行[J].中国给水排水,2025,41(15):163-168.

(下转第26页)