

## 其他水系统研究与应用

何巍伟, 王梦华, 武今巾. 我国深隧排水系统典型案例分析[J]. 净水技术, 2023, 42(6): 142-151.

HE W W, WANG M H, WU J J. Typical case analysis of deep tunnel drainage systems at home[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(6): 142-151.

## 我国深隧排水系统典型案例分析

何巍伟<sup>1,\*</sup>, 王梦华<sup>2</sup>, 武今巾<sup>1</sup>

(1. 合肥中科禹智能工程有限公司, 安徽合肥 230088; 2. 泸州市园林绿化服务中心, 四川泸州 646000)

**摘要** 城市排水系统是城市正常运行的重要保障, 频发的城市内涝和水体污染等问题, 严重制约着我国城市安全发展和可持续发展。城市深隧排水系统作为一种有效的解决途径, 近年来日益受到我国科研工作者及城市管理者的关注。通过介绍我国广州、武汉和上海 3 座城市深隧排水系统案例, 重点分析深隧排水系统建设过程中的工程设计研究方法及重点内容, 并从适用性、关键技术、运行调度与管理等方面进行了讨论分析, 以期为我国深隧排水系统的发展和设计研究提供参考。

**关键词** 深隧排水系统 溢流污染 内涝 案例剖析 工程设计

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)06-0142-10

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.06.017

## Typical Case Analysis of Deep Tunnel Drainage Systems at Home

HE Weiwei<sup>1,\*</sup>, WANG Menghua<sup>2</sup>, WU Jinjin<sup>1</sup>

(1. Chinese Academy of Science <Hefei> & Yu Intelligent Engineering Co., Ltd., Hefei 230088, China;

2. Luzhou Landscaping Service Center, Luzhou 646000, China)

**Abstract** Urban drainage system is an important guarantee for the normal operation of the city. Frequent urban waterlogging and water pollution seriously restrict the safe and sustainable development of cities. As an effective solution, urban deep tunnel drainage system has attracted more and more attention of Chinese researchers and urban managers in recent years. This paper introduces the cases of deep tunnel drainage system in Guangzhou, Wuhan and Shanghai. The key contents and engineering design research methods are analyzed and studied in the construction process. The applicability, key technology, operation scheduling and management are discussed and analyzed in order to provide reference for the development and design of deep tunnel drainage systems at home.

**Keywords** deep tunnel drainage system overflow pollution waterlogging case analysis engineering design

随着我国城市化的快速发展, 各种城市排水问题频发, 城市内涝及水体污染事件严重威胁着人民生命财产安全和生态环境可持续发展。深隧排水系统(简称“深隧”)由深层隧道、入流竖井、泵站及其他配套设施(浅层连接、预处理、通风除臭、清淤、消防、监测监控、闸站等设施)构成, 多埋设于地下 30~60 m, 调蓄空间大、排水能力强且不影响地表或

浅层地下空间环境的开发。深隧通过与浅层排水系统有效衔接, 实现城市雨污水的收集、调蓄、输送和排放, 能有效解决城市土地资源矛盾和提升水污染控制能力及城市排水能力。

深隧在国外已有很长的研究历史, 尤其是美国及日本已规划建设多项深隧工程。日本由于其岛国的特殊地理位置, 深隧大多以雨洪排放隧道为主, 用于预防台风、山洪、强降雨等带来的洪涝灾害, 保障城市洪涝安全。以日本东京江户川深隧为例, 隧道长为 6.3 km、内径为 10 m、埋深为 60~100 m, 5 处直径为 30 m、深为 60 m 的竖井, 及 1 处人造地下水

[收稿日期] 2022-05-13

[通信作者] 何巍伟(1990—), 男, 硕士, 研究方向为城市智慧排水建设及物联网监测技术, E-mail: hewwmail@qq.com。

库(长为 177 m、宽为 77 m、高为 20 m),调蓄容量为 67 万 m<sup>3</sup>,最大排洪流量达 200 m<sup>3</sup>/s。在降雨量较小时,雨水就近排入中小型河流,无需开启深隧;当降雨较大超过河道蓄洪能力时,开启中小河流旁的竖井闸门,收集超量雨水并利用隧道输送至东京最大河流江户川旁边的大型地下水库进行存储;当水库雨水储蓄量达到一定程度时,通过排水装置把雨水排入江户川中,平均每年仅运行 4~6 次,显著提高了上游河道的排洪能力,解决了东京的洪水灾害问题。美国则大多为合流调蓄隧道,实现洪涝和水污染双重控制,包括我国在内的其他国家,也均以合流调蓄隧道规划建设为主。以芝加哥隧道和水库工程计划(TARP)为例,工程一期于 1975 年开工,以控制溢流污染为主,建设了 4 条独立排水隧道,总长为 176 km、直径为 3.0~10.6 m、埋深为 45~107 m,可收集储存 960 个排污口排放的合流污水,调蓄容量达到 870 万 m<sup>3</sup>,能够截取 85%的污染物以及 60%的合流污水溢流量。工程二期则以控制洪涝为主,建设 3 个大型水库,新增 0.66 亿 m<sup>3</sup> 的调蓄容积,其巨

大的调蓄空间也可进一步减少溢流污染的产生。

## 1 广州东濠涌深隧系统

### 1.1 工程概况

为解决广州市雨季合流污水溢流和城市内涝问题,规划建设“一主七副”深隧(总长为 86.42 km、埋深为 40 m)和一座综合污水处理厂(图 1),并于 2012 年开始建设东濠涌深隧试验段。广州东濠涌流域为合流制排水体制,管网排水能力低(0.5~1.0 年),溢流污染严重(年均约发生 60 次溢流污染),城市内涝风险较大。综合考虑土地开发、地质条件等因素,为提升和补充现有浅层排水系统,广州市提出建设东濠涌深隧工程,收集和调蓄流域内的初雨及合流污水,并合理调配至污水厂集中处理,消除溢流污染现象。同时深隧在大暴雨时可作为排涝通道,提高流域排水能力,防止城区内涝发生。工程建设内容主要包括:一条主隧道长为 1.77 km、直径为 6 m、埋深为 28.5~31.6 m,沿线 4 座入流竖井,终点设置大型综合泵站,以及其他相关配套附属设施建设。



图 1 广州深层隧道排水系统

Fig. 1 Deep Tunnel Drainage System in Guangzhou

### 1.2 运行调度模式

深隧运行调度模式大体分为 3 种。在旱季或小雨降雨量不超过浅层排水系统排水能力时,主要依托浅层排水系统将合流污水输送至猎德污水厂,深隧仅在持续降雨时对溢流污水进行调蓄,随后泵送至猎德污水厂或初雨处理厂处理。在中、大雨降雨量超过浅层排水能力时,深隧首先对溢流污水进行调蓄,随后输送至猎德污水厂或初雨处理厂处理;若深隧调蓄空间不足,则开启闸门向东濠涌排放水质

达标的雨水;若雨水水质不达标,为保护东濠涌水质,会先行将部分水质不达标雨水泵送至珠江进行排放分流,随后再开启东濠涌闸门排放水质达标雨水。在大暴雨有水浸风险时,深隧在调蓄控制溢流污染的同时,泵站排洪泵组自动启动快速排洪,防止城市内涝的发生。

### 1.3 工程设计研究

深隧系统建设是一项涉及多专业、多方面的复杂工程,广州东濠涌深隧作为我国首条深隧工程,相

关参考依据如建设标准、技术参数等都是空白。为此,广州开展了多个课题研究,用于解决深隧系统工程设计及施工过程中所涉及的相关技术问题。东濠涌深隧沿东濠涌南段进行布置,并于新河涌南侧设置一条管径为 3 m 的截污管,截留废水通过深隧尾段沿江路竖井进入深层隧道。深隧沿线有东风路、中山三路、玉带濠和沿江路 4 座入流竖井及相应的浅层连接设施。通过竖井和深隧连接起东濠涌中北段截污管及主要的合流溢流口,并在深隧末端设置大型综合泵站用于排空、排洪和景观补水。整个深隧系统调蓄容量达到 6.3 万  $\text{m}^3$ 。

在深隧设计过程中,排水模型的过程仿真及效果评估功能被广泛应用<sup>[1-3]</sup>。其中包括:利用河道水力模型评估合流调蓄及污染削减标准,用于支撑深隧控制标准的设计;通过构建“河道-浅层排水系统-深隧系统”综合水力模型,用于不同降雨下城市排水系统溢流污染、水质变化、深隧沉积物转移等情况的模拟预测;通过构建水质模型评估深隧水污染减排效果,用于优化深隧的运行调度方式。研究<sup>[3]</sup>表明,为满足水体功能目标(V类地表水),广州市 I 类建成区河涌、II 类半建成区河涌、III 类非建成区河涌截流调蓄量标准分别为 8、6、4 mm,溢流污染削减率标准分别为 70%、60%、50%。深隧建设后流域内合流制溢流(CSO)次数减少率 $\geq 80\%$ ,合流污水截取率提升 19.2%,污染物削减率提高 20%,排水管网标准由 1 年提升至 5 年,东濠涌防洪标准由 15 年提升至 50 年,显著提升了流域防洪排涝能力和改

善了雨天河道水质污染的情况。

其他方面,针对流域降雨分布不均问题,李文涛等<sup>[4]</sup>对降雨点面关系进行了研究。首先根据深隧服务面积利用泰森多边形法对范围内 7 个雨量站点进行划分,并结合雨量站点历史数据分析验证了区域内降雨点面折减系数,获得了适合深隧工程设计需要的降雨点面关系函数曲线,为深隧工程不同片区降雨量校正、排水规模设计等工作提供了基础支撑。周午阳等<sup>[5]</sup>构建了一套地表易涝点管网液位监测系统。通过结合易涝点的实时液位数据,联动深隧闸泵的启停运行,研究科学的调度策略,一方面有利于实现深隧智能化控制调度,另一方面可避免频繁开启深隧,节约运行成本。另外陈小芳<sup>[6]</sup>、刁志刚等<sup>[7]</sup>分别对深隧供电设计方案及深隧竖井基坑开挖和盾构吊出井等技术也开展了相关研究。

## 2 武汉大东湖深隧系统

### 2.1 工程概况

由于中心城区土地资源紧张,污水厂扩厂提标困难,加上国家和上级政府日益严格的环保政策,武汉提出建设大东湖污水深隧系统(图 2)。工程通过对中心城区 3 座污水厂(沙湖、二郎庙、落步咀)进行改造,并利用深隧将其收集的污水转运至新建的北湖污水厂进行集中处理,以解决所面临的土地矛盾及水环境问题。工程建设内容主要包括:二郎庙至北湖污水厂主隧,长为 17.6 km,埋深为 30~42 m,管径为 D3000~D3400;落步咀至三环线支隧,长为 1.7 km,埋深为 20~21 m,管径为 D1500。另有



图 2 武汉深层隧道排水系统

Fig. 2 Deep Tunnel Drainage System in Wuhan

3 座预处理站、沙湖提升泵站及相关配套设施。

## 2.2 运行调度模式

武汉深隧运行调度主要是针对污水日常输送及特殊场景下的应急调度,以保证深隧系统水量的稳定运行。调度模式主要包括常规调度、淤积冲刷调度、应急调度等。常规调度模式应用于日常调度,通过控制深隧系统不同接入点的进水量,来保证深隧的平稳运行,避免对下游竖井及污水厂带来影响。淤积冲刷调度模式主要通过淤积管段提高污水流速实现淤积冲刷,避免深隧淤堵。应急调度模式主要应用于某些特殊场景,例如当下游污水厂部分停水检修,上游预处理站进水相应调小;上游部分区域夜间水量过小时,会关闭该区域预处理站进水保持该站水位稳定,并通过调整其他预处理站水量来弥补该区水量的缺失,保障下游污水厂进水稳定;当上游区域降雨,部分合流制进水量激增存在溢流风险时,增大该区预处理站进水量,并相应减小其他区域预处理站进水量,以保持深隧系统的水量稳定。

## 2.3 工程设计研究

深隧的建设需要考虑各方面因素,如工程量、地质条件、用地情况、协调难度、对现有环境影响、安全性、经济性等。武汉深隧的主隧道起自二郎庙预处理站,沿沙湖大道、欢乐大道绿化带、三环线、汉鄂高速、严西湖和北湖公园绿化带敷设,终至北湖污水厂。污水支隧起自落步咀预处理站,沿三环线敷设,于青化立交处接入主隧道。李尔等<sup>[8]</sup>在传输方式方面通过利用排水模型对重力流、压力流两种传输方式在相同工况条件下进行水力模拟分析,重力流方式对各入流点流量变化适应性较强,水泵扬程较低,变幅较大。但考虑深隧系统的经济性、安全性、管理维护(通风除臭、沉积物管理、防腐维护)等方面,压力流则更具优势,因此,武汉深隧选择压力流方式进行污水输送。徐剑乔<sup>[9]</sup>利用 ANSYS 软件建模,分析对比了涡流式和折板式两种入流竖井的消能和排气效果。在正常工况下涡流式竖井效果相对更好,折板式竖井在大流量时井壁会受到冲击从而影响其结构安全性;而超载工况情况下,两者排气、消能效果均会失效。另外,泵站是连接深隧上下游的重点枢纽,是深隧成功运行的重要保障。陈宝玉等<sup>[10]</sup>采用多种分析方法对泵站设计进行了优化,其中包括:采用流体动力学数字模拟分析(CFD 分析)对泵站的进、出水水力流态进行仿真分析和设计优

化,以减轻避免进、出水水力流态旋涡和水力剥离现象的发生;在 CFD 分析基础上,通过构建物理模型进一步模拟泵站内水位液面、旋涡、分流及不同水位下气泡的产生情况,实现泵站设计和 CFD 分析结果的验证和优化;通过构建水锤分析模型,对泵站水泵正常开停机及异常断电事故情况下水力过渡过程进行模拟分析,获得管路异常情况下压力、倒流流量、负压、倒转转速等关键参数,为水泵的优化选型和安全防护措施制定提供支撑;利用 ANSYS 软件对泵站管道、楼层结构等进行了模态分析,评估其主要受力点及抗震情况,指导结构设计优化采取进行配筋加固、板层加厚等措施,改善泵站整体受力情况提高其抗振动性能。

为满足深隧的日常运行管理、监测预警和应急调度等需求,武汉开展了多项深隧信息化系统的设计研究。杨杏勃等<sup>[11]</sup>针对深隧运营期内上下游合理调度及淤积风险管控问题,利用物联网监测设备获取隧道运行流量、淤泥、SS、压力等参数,结合暴雨管理模型(SWMM)进行水力、水质、淤积过程状态的模拟仿真计算,设计出常规调度、应急调度、淤积冲刷调度 3 种方案并进行模拟验证,通过联合调控 4 座预处理站及末端污水厂的进出水量来保障不同场景下深隧系统水量的平稳运行和淤积风险的管控。学者们<sup>[12-13]</sup>为了及时掌握和预防深隧结构病害的发生,研究并设计开发了一套深隧健康监测系统。系统主要通过对隧道结构受力、渗透、腐蚀、环境信息等方面进行实时监测,实现隧道健康状态的分析评估和提前预警等功能,有效保障深隧系统运行安全。史诗乐等<sup>[14]</sup>设计的套智慧深隧系统,包括深隧设施三维仿真展示、设备管理、监测预警、生产数据统计分析、防淤积管理、智能巡检等功能,实现了深隧精细化管理和节本增效的目标。

其他方面,研究者们<sup>[15-16]</sup>对工程区域地质特征进行了研究,探讨了武汉岩溶地区深隧工程的勘察方法以及相关地质灾害问题的处理措施。谢小龙等<sup>[17]</sup>对深隧施工方法进行了比选研究。首先由于深隧埋深较大且处于市政道路下方,排除明挖法;矿山法由于辅助工法较多,机械化程度低,速度慢,工程进度无法与北湖污水厂及配套工程有效衔接,予以排除;顶管法速度快、费用低,效果好,但需要较大曲线半径。武汉深隧曲线段较多,转弯半径最小为 300 m,因此,选择在条件较好的落步咀至三环线支

隧采用顶管法施工,而主隧则采用盾构法施工。学者们<sup>[18-20]</sup>也分别对武汉深隧下穿既有铁路盾构施工技术、支隧长距离双孔曲线顶管施工技术和建筑信息模型(BIM)技术在有限空间作业中安全管控等方面进行了技术探讨,有效保障了武汉深隧工程的顺利实施。

### 3 上海苏州河深隧系统

#### 3.1 工程概况

上海中心城区苏州河沿岸土地开发密度大、人

口密集,雨天溢流污染及内涝严重,近年来已造成巨大经济损失,城市安全受到严重威胁。为解决上述问题,上海开展了苏州河深隧工程建设(图3),提高沿线区域雨天排涝能力,调蓄合流污水消除溢流污染。工程建设内容主要包括:一级主隧长为15.3 km,直径为8~10 m,埋深为40~60 m;二级支隧长为3 km,直径为4~6 m,埋深为20~30 m;三级支隧长为32 km,直径为3~4 m,埋深为15~20 m。设置提升泵站和初雨处理厂各1座,8座入流综合设施。



图3 上海深层隧道排水系统

Fig. 3 Deep Tunnel Drainage System in Shanghai

#### 3.2 运行调度模式

上海苏州河深隧系统运行调度模式主要分为雨天运行模式和旱天出流调度模式。雨天运行模式:小雨时(降雨量 $\leq 5$  mm),依托现有浅层排水系统进行截流和排放,不启动深隧调蓄;中雨时( $5$  mm $<$ 降雨量 $\leq 22.5$  mm),若降雨量超过合流管负荷,开启深隧调蓄存储超量合流污水;大雨时(降雨量 $> 22.5$  mm),首先开启深隧调蓄超量雨水,当隧道充满后,在启动市政雨水或合流泵站将多余雨水抽送入河,直至雨停;大暴雨时则同时启动深隧调蓄和开启雨水泵站进行排洪。旱天出流调度模式:若未来48 h无降雨,则在凌晨利用污水厂空余能力进行合流污水处理;若未来48 h有降雨且隧道内的调蓄合流水不能及时排空,则提前启动污水厂对隧道内的合流水进行处理排放。

#### 3.3 工程设计研究

上海苏州河深隧结构设计由收集调蓄、提升输

送、处理排放三大系统组成。(1)收集调蓄系统。包括一级调蓄管道沿苏州河敷设,用于调蓄和输送雨水;二级输送管道,用于优化一级调蓄管道竖井布局并连接三级收集管道,输送三级收集管道的雨水进入一级调蓄管道;三级收集管道,在利用原有排水设施的基础上,进行局部地区进行升级改造,提高管网排水标准,充分发挥雨水收集的作用。沿线设置8座综合设施(苗圃、云岭西、长风、万航渡、叶家宅、梦清园、昌平、福建北)实现通风、检修维护、预处理、放空等目标。(2)提升输送系统。深隧提升泵站与梦清园综合设施合并建设,并接入现状合流一期总管。晴天时可充分利用合流一期总管的空余能力,收集深隧内的调蓄水并输送竹园污水厂进行处理。(3)处理排放系统。包括1座初雨处理厂,位于竹园厂内西北角,原合流污水一期进水总管的北侧;竹园第一污水处理厂,位于浦东新区高东镇;竹园第二污水处理厂,位于浦东新区外环线航津路东

北,毗邻长江。另外,针对用地紧缺问题,上海采用了深隧设施集约化布局和布置方案<sup>[21-22]</sup>,将主隧综合设施的间距放大至2~3 km,综合设施布置采用竖向开发,进行地理式建设,以达到综合利用土地空间的目标。

在深隧建设效果评估方面,王磊等<sup>[23-24]</sup>利用排水模型评估了区域排水能力。在5年一遇降雨时近22%路段积水,平均积水深度为25 cm;在百年一遇降雨时近60%路段积水,最深积水超过70 cm;同时苏州河初雨及溢流污染现象严重。在此基础上还优选了“集中深层调蓄”(深隧方案)、“就地分散调蓄”和“就地全面改造”3种工程措施方案,最终选择“集中深层调蓄”并进行模型评估分析。深隧的建设可将区域排水标准提高至5年一遇且能有效应对百年一遇降雨,同时溢流污染物可减少近90%,基本消除苏州河初期雨水污染。

其他方面,蔡璇等<sup>[25]</sup>对苏州河深隧的运行维护展开了讨论。讨论内容包括深隧的联合调度、入流量控制、极端工况冲击和影响、节能减排等问题,并就深隧清淤、除臭、防爆、防腐、管理制度、人才队伍等方面提出了运行维护建议。基于上海水文地质条件,刘树佳等<sup>[26]</sup>经研究实践形成了超深地下连续墙施工、承压水控制、超深竖井开挖等一系列新型施工技术和措施;官林星等<sup>[27]</sup>利用模型论证分析了盾构隧道衬砌结构受力安全以及与螺栓配置的可行性;吴小琴<sup>[28]</sup>对比优选了地下连续墙材料,以验证其深层施工的可行性和满足抗渗性等性能指标。

## 4 讨论分析

### 4.1 适用性分析

深隧的规划建设涉及各个方面,不同城市面临的排水突出问题不尽相同,各城市自身排水系统现状、水文地质条件、发展规模、经济条件、人口密度也存在很大差异。因此,城市是否适合建设深隧,建设单一功能还是复合功能深隧,如何与现有城市规划及排水系统做好衔接,其经济效益和社会效益是否达标等问题,都需要根据各地实际情况进行充分论证和研讨。

随着城市化的发展,尤其是一些大型城市道路下的浅层排水系统已经错综复杂,加上其他地下管线及相关设施的干扰,以及在征地、各部门协

调等方面,较难通过改造现有浅层排水系统快速解决城市排水能力不足及水污染问题。而深隧在土地资源空间开发、对地表建(构)筑物及设施影响、提升排水能力及污染控制等方面具有巨大优势。针对不同的控制目标,通过科学合理的设计,建设不同功能或复合功能的深隧,能够快速、有效地控制洪涝灾害及溢流污染等问题。当然深隧也存在一定的局限性,并不是所有城市都适合建设深隧。深隧施工周期长、工程量大、初始投资大、运行维护及管理复杂,也不能指望依靠深隧彻底解决城市排水问题。

从城市发展来说,深隧更适合在土地资源紧张、人口密度大、洪涝灾害严重、环保要求严格的大型城市进行建设。我国目前除广州、武汉、上海、深圳外,北京、成都等城市也在开展深隧的规划研究(表1)。参考国外诸多案例,深隧造价在0.5亿~7.3亿元/km(平均造价为2.7亿元/km)<sup>[29]</sup>。不难看出,深隧的建设与城市发展规模、经济条件和人口密度高度相关,而巨大的投资费用很难适合中小型城市,即使是经济发达的大型城市,一般也是针对问题突出的区域,在有限范围内(如老城区、中心城区)作为现有排水系统的补充完善而进行建设,这也是城市发展一定阶段所出现的基础设施建设需求。

从区域降雨特点来说,降雨量大且集中的暴雨多发、峰值显著的地区更适合深隧的建设,依托深隧可以迅速将超出浅层排水系统能力的雨水或合流水进行储存、调蓄和排放河道,有效应对极端降雨天气引发的洪涝灾害。从地质、水文条件来说,应避免在滑坡、崩塌、岩堆等不良地质和富水地区修建深隧,宜在地质构造单一、岩体完整稳定、水文条件良好的地区修建。一方面可提高施工可行性,未施工创造便利条件;另一方面可保障隧道结构安全,防止因地质运动对隧道造成破坏<sup>[30]</sup>。

武汉大东湖深隧为污水输送隧道,侧重于中心城区污水的收集转送与集中处理,解决城区污水处理能力不足及水环境污染的问题;广州、上海深隧为合流调蓄隧道,侧重于排涝调蓄与污染控制,以解决城市内涝、初雨及溢流污染问题。广州、武汉、上海深隧工程案例既存在相同点,也存在差异化。深隧不同功能定位的典型性为我国后续深隧的建设发展及相关研究提供了宝贵的实践指导经验。

表 1 我国深隧排水系统  
Tab. 1 Deep Tunnel Drainage Systems at Home

深隧	工程规模	建设投资	2021 年 GDP/ 亿元(排名)	2020 年第七次 全国普查人口/ 万人(排名)
广州深隧(已完工试验段)	规划“一主七副”8条深层隧道,总长为86.42 km,埋深为40 m 东濠涌试验段长为1.77 km,直径为6 m,埋深为28.5~31.6 m	规划:250亿元(约2.89亿元/km) 试验段:7亿元(约3.95亿元/km)	28 231.97(4)	1 867.66(5)
上海苏州河深隧(试验段实施中)	一级主隧长为15.3 km(试验段为1.67 km),直径为8~10m,埋深为40~60 m;二级支隧长为3 km,三级支隧长为32 km。	试验段:21.86亿元(约13亿元/km)	43 214.85(1)	2 487.09(2)
武汉大东湖深隧(已完工)	主隧长为17.6 km,埋深为30~42 m,直径为3~3.4 m;支隧长为1.7 km,埋深为20~21 m,直径为1.5 m	30.29亿元(约1.57亿元/km)	17 716.96(9)	1 232.65(11)
深圳南山前海深隧(实施中)	隧道长为4.1 km,直径为6.2 m	24.1亿元(约5.88亿元/km)	30 664.85(3)	1 756.01(6)
北京深隧(规划中)	规划建设城东(调蓄)和城西(分流削峰)两条深隧,总长为100 km	-	40 269.60(2)	2 189.31(3)
成都深隧(规划中)	规划中心城区建设“两环四射”深隧系统	-	19 916.98(7)	2 093.78(4)

在建设原因方面,3座城市发展规模较大,人均密度及城市开发密度较高,土地资源稀缺,城市排水问题突出。新建或改造浅层排水系统有以下不足:一是土地资源及其经济性不足;二是无法适应城市未来发展需求;三是不能有效解决当下城市排水能力不足及水污染严重等问题。因此,广州、武汉、上海参考国外成熟案例,选择了在城市排水问题突出区域,进行深隧建设实践,探索满足于未来需求的城市排水新方法。

在建设条件方面,广州、武汉、上海经济条件较好,都具备深隧巨大建设投资的能力。其中武汉深隧相对广州、上海深隧来说功能单一,因此,投资费用(每千米均价)更低。上海深隧为了最大化节约地表空间,其综合设施采取地下集约化布置,因此,投资费用偏高。

#### 4.2 关键技术分析

从技术方面看,随着我国各城市陆续开展深隧工程的建设,相关技术研究也逐渐丰富,一些研究方法也具有典型的指导性。当然不同地区的不同建设条件,都可能影响到深隧的设计、施工和运行维护,还存在着诸多问题需要研究。

在规划设计方面,利用各类专业模型软件,进行模拟仿真分析已经成为深隧规划设计中不可或缺的技术手段。广泛使用的专业排水模型软件如

SWMM、Mike Urban、Infowork ICM的准确性也在不断提高<sup>[31]</sup>,与实际排水系统的吻合度也能达到80%以上<sup>[32]</sup>。从上述案例中不难发现,不管是深隧的建设规模、建设效果的评估,泵站、竖井等设施的局部结构优化设计,还是深隧的运行调度方案或自动控制方案,通过利用相关专业模型进行过程仿真分析预测和效果评价,定量描述深隧系统及相关设施运行参数,可以更好地优化工程设计、运行调度模式,更好地进行设备选型、施工技术比选。模型技术的应用为深隧的建设提供了科学有效的支撑,相信模型技术在未来深隧建设中将得到更广泛的研究和应用。

在施工技术方面,得益于我国隧道(地铁)施工技术的快速发展,为深隧的设计施工及运行维护提供了诸多参考。在深隧施工过程中,超深竖井及基坑开挖、超深地下连续墙施工、超深隧道盾构及承压水控制等施工技术也实现应用。但是不同地质和水文情况,对具体施工材料、施工方法、施工顺序和安全防护措施等都存在一定的影响,尤其是隧道防水、防腐、结构承压等方面,对施工工艺及材料特性都具有严格要求。

另外,从武汉深隧案例中可知,随着城市排水行业信息化的快速发展,深隧的信息化建设也逐渐得到重视。智慧化管理平台可以更好地辅助工作人员

进行深隧的日常运行管理,利用相关数据动态评估深隧的健康状态及安全风险。结合地理信息、自动控制、物联网监测、模型分析等系统应用,是实现深隧精细化、智慧化管理的重要手段。随着5G、物联网、智能控制、模型应用等新一代信息技术及新材料、新工艺的发展,深隧的建设及运行管理将更加精细化、智慧化,也能更好地服务于社会,满足城市的健康发展。

#### 4.3 运行调度与管理分析

深隧是一个复杂的系统工程,深隧运行效果的良好发挥离不开科学合理的运行调度与管理方法,其规模越大、功能越多,对运行调度与管理的要求也越高。结合上述案例可知,深隧的运行调度与管理主要包括两个方面:一是深隧与浅层排水系统的联合调度,二是深隧与气象降雨的联动调度。例如,如何在充分利用浅层排水系统的情况下,减少深隧的运行次数,进行节本增效;如何在水量异常波动情况下,合理调度分配深隧各区段水量以保障深隧系统平稳运行,避免对设施带来超负荷或低负荷的冲击;如何根据气象降雨信息,提前进行深隧调蓄、抽空等联动措施,以更好地应对极端天气的冲击。这些都需要根据各地实际情况,从宏观到局部、从整体到细节进行持续深入的研究。

武汉深隧作为专门连续运行的污水输送隧道,在运行调度方面更加侧重于污水的有效收集、平稳运输和深隧相关设施在特殊场景下(如检修、清淤)的水量调配,以保障上下游之间的水量平衡、污水厂进水足额稳定以及各设施的稳定运行。晴天时污水隧道正常运行,其水质、水量一般不受外界因素干扰,与生活污水排放规律相关。但是在强降雨或持续降雨的情况下,地表雨水会难以避免地进入深隧系统,冲击和稀释隧道内的水体,使下游污水厂进水水质浓度急剧变化,对污水厂的正常运行产生风险,因此,在深隧日常运行调度管理时,需要建立完善的预防体系和应急措施。

广州、上海深隧作为合流调蓄隧道,则更加关注与降雨之间的联动及与浅层排水系统的联合调度。晴天时深隧一般不开启,无合流水进入隧道,依托现有浅层排水设施处理污水;降雨时,则通过合理的调控策略,利用深隧对超量的合流雨污水进行调蓄运输,以防止城市内涝和初雨及溢流污染的发生。在降雨初期随着深隧的开启,冲刷地表的初期雨水与

合流制污水进入隧道,其水质污染浓度一般较高。但随着持续大量的雨水进入,往往又会稀释隧道内合流污水的水质浓度。因此,在综合考虑降雨时间、降雨量、深隧调蓄容积、合流制污水本底浓度等因素的情况下,如何通过合理的运行调度方式,满足溢流污染的削减和调蓄水的达标排放的要求,是实现深隧功能目标的重点研究内容。

在设计之初,就需要利用模型工具针对不同工况进行深隧运行仿真模拟,对各种极端情况进行预演,为深隧的运行调度与管理提供支撑。在深隧实际运行过程中,更是需要结合实时监测数据、自动控制设备、更加符合现状和成熟的模型算法,以及不断积累的运行调度经验,来保障深隧的安全高效运行和充分发挥深隧工程效益。

#### 5 结论与展望

通过对我国广州、武汉、上海深隧案例进行介绍,重点分析深隧排水系统建设过程中的工程设计研究方法及重点内容,并对其适用性、关键技术、运行调度与管理进行了讨论和分析。可以看出,深隧作为一种能有效解决城市排水问题的新途径,具有很大的应用想象空间。但同时也要深刻认识到深隧并非适用所有城市,也无法彻底解决城市排水问题,其作为整个城市排水系统中的一部分,无法替代现有传统排水设施,应更加注重与现有排水设施的融合与协同。作为一种特殊的新型灰色设施,深隧的规划设计也应纳入我国海绵城市的建设框架内进行统筹考虑,根据城市发展现状及特点,充分探索绿色雨洪设施与深隧的有机结合或方案优选,践行社会经济和生态环境的绿色可持续发展理念。

#### 参考文献

- [1] 王广华,李文涛,陈贻龙,等.广州市东濠涌深层排水隧道工程前期研究[J].中国给水排水,2016,32(22):7-13.  
WANG G H, LI W T, CHEN Y L, et al. Preliminary study on deep tunnel drainage engineering at Donghao creek in Guangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(22): 7-13.
- [2] 李捷,王宏利,隋军,等.水质模型在东濠涌深层隧道排水系统中的应用[J].中国给水排水,2017,33(8):15-19.  
LI J, WANG H L, SUI J, et al. Application of water quality model in deep tunnel drainage of the test section Donghao creek [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(8): 15-19.
- [3] 李文涛,王广华,周建华,等.深层隧道排水系统规划设计中溢流污染控制标准研究[J].中国给水排水,2016,32

- (24): 1-6.  
LI W T, WANG G H, ZHOU J H, et al. Study on standard of overflow pollution control in planning and design of deep tunnel drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (24): 1-6.
- [ 4 ] 李文涛, 王广华, 周建华, 等. 深层隧道排水系统规划设计中降雨点面关系研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(2): 1-4.  
LI W T, WANG G H, ZHOU J H, et al. Study on relationship between point rainfall and areal rainfall in planning and design of deep tunnel drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(2): 1-4.
- [ 5 ] 周午阳, 孙志民, 汤舒. 深层隧道排水区域液位在线监测系统研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(1): 1-6.  
ZHOU W Y, SUN Z M, TANG S. Research on liquid level on-line monitoring system of deep tunnel drainage basin [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(1): 1-6.
- [ 6 ] 陈小芳. 广州市深层隧道排水系统东濠涌试验段工程供电方案研究[J]. 电气应用, 2014, 33(16): 113-116.  
CHEN X F. The power supply scheme study on Donghaochong test section of Guangzhou deep tunnel drainage system [J]. Electrotechnical Application, 2014, 33(16): 113-116.
- [ 7 ] 刁志刚, 陈钦东, 王智勇. “坑中坑”盾构吊出井施工技术——以广州市深层隧道排水系统东濠涌试验段为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(s2): 335-344.  
DIAO Z G, CHEN Q D, WANG Z Y. Construction technology of shield hoisting shaft of foundation pit in pit: A case study on Donghaochong test section of Guangzhou deep tunnel drainage system [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(s2): 335-344.
- [ 8 ] 李尔, 曾祥英, 邹惠君, 等. 武汉大东湖污水深隧工程平面竖向及传输方式研究[J]. 给水排水, 2021, 47(1): 139-143.  
LI E, ZENG X Y, ZOU H J, et al. Research on the plane routing, vertical layout and sewage transmission mode of the Dadonghu waste-water deep tunnel transmission project in Wuhan [J]. Water & Wastewater Engineering, 2021, 47(1): 139-143.
- [ 9 ] 徐剑乔. 基于 FLUENT 的排水深隧入流竖井三维湍流仿真[J]. 中国给水排水, 2019, 35(21): 125-131.  
XU J Q. Three-dimensional turbulent simulation of inflow shaft in deep tunnel based on FLUENT [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(21): 125-131.
- [ 10 ] 陈宝玉, 王正雄, 杨涛, 等. 深层隧道排水系统中深隧泵站的设计与优化[J]. 中国给水排水, 2021, 37(4): 62-66.  
CHEN B Y, WANG Z X, YANG T, et al. Design and optimization of the deep tunnel pumping station in deep tunnel drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(4): 62-66.
- [ 11 ] 杨杏勃, 李胡爽, 江涛, 等. 大东湖核心区污水深隧智慧调度与管理系统设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(14): 151-156.  
YANG X B, LI H S, JIANG T, et al. Design of smart dispatch and management system for sewage deep tunnel in core district of Great East Lake [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(14): 151-156.
- [ 12 ] 杨怀, 阮超, 张延军, 等. 结构健康监测技术在城市排水深隧工程中的研究与探索[J]. 安徽建筑, 2020, 27(10): 92-94.  
YANG H, RUAN C, ZHANG Y J, et al. Research and exploration of structural health monitoring technology in urban drainage deep tunnel engineering [J]. Anhui Architecture, 2020, 27(10): 92-94.
- [ 13 ] 阮超, 张延军, 李胡爽, 等. 武汉大东湖城市污水深隧结构健康监测系统设计研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(20): 126-132.  
RUAN C, ZHANG Y J, LI H S, et al. Research on structure health monitoring system of Dadonghu urban sewage deep tunnel in Wuhan [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(20): 126-132.
- [ 14 ] 史诗乐, 赵皇, 秦雄, 等. 大东湖深隧智慧运营系统功能设计及架构规划[J]. 绿色科技, 2020(22): 190-195.  
SHI S L, ZHAO H, QIN X, et al. Functional design and architecture planning of the intelligent operation system of the Dadonghu deep tunnel [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(22): 190-195.
- [ 15 ] 龙治国, 彭华中, 胡帅. 武汉岩溶地区深隧工程岩土工程勘察方法[J]. 土工基础, 2020, 34(4): 511-514.  
LONG Z G, PENG H Z, HU S. Geotechnical investigations for a deeply embedded tunnel in the karst area in Wuhan City [J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(4): 511-514.
- [ 16 ] 彭华中, 龙治国, 胡帅. 武汉东湖深隧工程岩溶地质特征与灾害问题分析[J]. 土工基础, 2020, 34(5): 550-553.  
PENG H Z, LONG Z G, HU S. Characteristics and geohazards of karst geology in Wuhan deeply embedded tunnel project [J]. Soil Engineering and Foundation, 2020, 34(5): 550-553.
- [ 17 ] 谢小龙, 杨涛, 胡晓彬, 等. 深层隧道排水系统在武汉污水传输工程中的应用[J]. 给水排水, 2022, 58(1): 132-136.  
XIE X L, YANG T, HU X B, et al. Application of deep tunnel drainage system in the wastewater transmission engineering of Wuhan [J]. Water & Wastewater, 2022, 58(1): 132-136.
- [ 18 ] 江涛, 曾利华, 肖权, 等. 污水盾构隧道下穿既有地铁施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(3): 75-77.  
JIANG T, ZENG L H, XIAO Q, et al. Research on construction technology of sewage shield tunnel under existing subway [J]. Engineering and Technology Research, 2021, 6(3): 75-77.
- [ 19 ] 周学锋, 李永峰, 刘凡, 等. 武汉大东湖排水深隧长距离双孔曲线顶管施工[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 51-57.

- ZHOU X F, LI Y F, LIU F, et al. Construction of long distance double-hole curved pipe jacking in Wuhan Dadong Lake deep drainage tunnel [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(20): 51-57.
- [20] 陈伟, 刘开扬, 罗义生. BIM 技术在深隧工程有限空间安全管控中的应用[J]. *建筑施工*, 2020, 42(10): 1989-1991.
- CHEN W, LIU K Y, LUO Y S. Application of BIM technology to limited space safety management and control in deep tunnel engineering[J]. *Digital Construction*, 2020, 42(10): 1989-1991.
- [21] 王晓鹏. 苏州河深隧调蓄工程综合设施的集约化布置方案[J]. *净水技术*, 2019, 38(12): 41-45.
- WANG X P. Solutions of integrated layout for comprehensive facilities in deep tunnel storage project under Suzhou creek[J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(12): 41-45.
- [22] 王晓鹏. 深层排水调蓄隧道系统集约化布置关键技术研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(9): 88-91, 97.
- WANG X P. Research on key intensive layout technology of deep drainage storage tunnel [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2020(9): 88-91, 97.
- [23] 王磊, 张建频, 廖青桃, 等. 苏州河深层排水调蓄管道系统工程规划研究[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(15): 139-142.
- WANG L, ZHANG J P, LIAO Q T, et al. Research on deep drainage tunnel project planning of Suzhou river [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(15): 139-142.
- [24] 王磊, 张建频, 廖青桃, 等. 上海市苏州河地区排水防涝面临形势及对策措施探讨[J]. *上海水务*, 2016(3): 49-52.
- WANG L, ZHANG J P, LIAO Q T, et al. The situation and countermeasures of Shanghai Suzhou River drainage waterlogging [J]. *Shanghai Water*, 2016(3): 49-52.
- [25] 蔡璇, 汉京超, 周娟娟. 浅议苏州河段深层排水调蓄管道系统工程的运行维护[J]. *城市道桥与防洪*, 2019(3): 108-110, 133.
- CAI X, HAN J C, ZHOU J J. Elementary discussion on operation and maintenance of Suzhou creek deep drainage and storage pipeline system project [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2019(3): 108-110, 133.
- [26] 刘树佳, 季军, 白占伟, 等. 上海苏州河深隧工程建设中超常规技术管理方法[J]. *隧道与轨道交通*, 2021(s1): 84-87.
- LIU S J, JI J, BAI Z W, et al. Unconventional technical management method in the deep drainage tunnel project of Suzhou River in Shanghai [J]. *Tunnel and Rail Transit*, 2021(s1): 84-87.
- [27] 官林星, 孙巍, 方涛. 深埋排水调蓄盾构法隧道衬砌内力分析[J]. *现代隧道技术*, 2018, 55(s2): 89-95.
- GUAN L X, SUN W, FANG T. Mechanical analysis of segments and bolts for the deep-buried shield tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2018, 55(s2): 89-95.
- [28] 吴小琴. 上海苏州河段深层隧道项目盾构可切削地下连续墙材料研究[J]. *隧道与轨道交通*, 2019(1): 10-12, 54.
- WU X Q. Study on cuttable diaphragm wall for deep shield tunnel project at Suzhou River Reach in Shanghai [J]. *Tunnel and Rail Transit*, 2019(1): 10-12, 54.
- [29] 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 L, CHE W, ZHAO Y. Thinking about construction of stormwater control tunnels in China [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(7): 119-125.
- [30] 张盛楠, 李成江, 宗绍利, 等. 应用深层隧道储存和输送城市雨污水的思考与案例分析[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(2): 13-19.
- ZHANG S N, LI C J, ZONG S L, et al. Applicability analysis of deep tunnels for storing and transporting urban rainwater and sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(2): 13-19.
- [31] 陶贤成. 排水模型在排水系统提标改造中的应用[J]. *净水技术*, 2019, 38(s1): 364-367.
- TAO X C. Application of drainage model on improvement and reconstruction of drainage systems [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(s1): 364-367.
- [32] 苟德菲, 杨辉, 周午阳, 等. 基于 InfoWorks ICM 的广州市 H 区流域排水系统模型验证[J]. *净水技术*, 2020, 39(4): 67-73.
- GOU D F, YANG H, ZHOU W Y, et al. Validation of watershed drainage system based on InfoWorks ICM model for H zone of Guangzhou City [J]. *Water Purification Technology*, 2020, 39(4): 67-73.

(上接第 141 页)

- [32] WANG M, YOU M, GUO P, et al. Hydrothermal synthesis of Sm-doped Bi<sub>2</sub>MoO<sub>6</sub> and its high photocatalytic performance for the degradation of Rhodamine B [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 728: 739-746. DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.09.066.
- [33] XIA S, ZHANG G, MENG Y, et al. Kinetic and mechanistic analysis for the photodegradation of gaseous formaldehyde by core-shell CeO<sub>2</sub>@ LDHs [J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2020, 278: 119266. DOI: 10.1016/j.apcatb.2020.119266.
- [34] ZOU C, LIANG M, YANG Z, et al. Flower-like Bi<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>/Bi<sub>4</sub>MoO<sub>9</sub> heterostructures for enhanced photocatalytic degradation of ciprofloxacin [J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(34): 345604. DOI: 10.1088/1361-6528/ab912f.