

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.08.013

# 镇江市沿金山湖排水深隧系统工程设计

方 帅<sup>1,2</sup>, 刘绪为<sup>3</sup>, 汪明辉<sup>4</sup>, 王万琼<sup>1,2</sup>, 彭寿海<sup>1,2</sup>, 白永强<sup>5</sup>,  
袁胜楠<sup>3</sup>, 王艳芳<sup>3</sup>, 刘 远<sup>3</sup>

(1. 中国长江三峡集团有限公司 长江生态环境工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 2. 长江经济带生态环境国家工程研究中心, 湖北 武汉 430014; 3. 中国市政工程华北设计研究院有限公司, 天津 300381; 4. 光大海绵城市发展<镇江>有限公司, 江苏 镇江 212001; 5. 中国天辰工程有限公司, 天津 300400)

**摘 要:** 为保护镇江金山湖水环境质量并提升老城区排水防涝能力,开展了沿金山湖排水深隧系统工程建设,提出了深隧转输调蓄和末端湿地生态处理的系统性治理方案,并进行了相应工程设计。介绍了深隧系统的主隧、入流竖井、多功能雨水泵站、雨水处理站及生态湿地等设施的设计参数及工艺特点,并总结了工程设计的重点和难点。工程建设完成后成为高密度老城区首个集雨水转输调蓄、径流污染生态净化以及排水防涝于一体的多功能深隧,可为类似项目提供借鉴。

**关键词:** 排水深隧系统; 排水防涝; 入流竖井; 生态湿地

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)08-0075-05

## Design of Deep Tunnel Drainage System along Jinshan Lake in Zhenjiang

FANG Shuai<sup>1,2</sup>, LIU Xu-wei<sup>3</sup>, WANG Ming-hui<sup>4</sup>, WANG Wan-qiong<sup>1,2</sup>,  
PENG Shou-hai<sup>1,2</sup>, BAI Yong-qiang<sup>5</sup>, YUAN Sheng-nan<sup>3</sup>, WANG Yan-fang<sup>3</sup>, LIU Yuan<sup>3</sup>

(1. Yangtze Eco-Environment Engineering Research Center, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430014, China; 2. National Engineering Research Center for Ecological Environment of Yangtze River Economic Belt, Wuhan 430014, China; 3. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Tianjin 300381, China; 4. Everbright Sponge City Development <Zhenjiang> Co. Ltd., Zhenjiang 212001, China; 5. China Tianchen Engineering Co. Ltd., Tianjin 300400, China)

**Abstract:** This paper introduced the construction of the deep tunnel drainage system along Jinshan Lake, proposed the systematic treatment scheme including deep tunnel transmission and storage and terminal wetland ecological treatment, and designed the corresponding projects, so as to protect the water environment quality of Jinshan Lake in Zhenjiang and improve the drainage and waterlogging prevention capacity of the old urban area. The design parameters and process characteristics of the main tunnel, inflow shaft, multi-functional rainwater pumping station, rainwater treatment station and ecological wetland of the deep tunnel system were introduced, and the key points and difficulties of the design were summarized. After the completion of the project, the system becomes the first multi-functional deep tunnel project in the high-density old city that integrates rainwater transmission and

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研资助项目(NBZZ202300940)

storage, ecological purification of runoff pollution and drainage and waterlogging prevention, which can provide reference for similar projects.

**Key words:** deep tunnel drainage system; drainage and waterlogging prevention; inflow shaft; ecological wetland

## 1 工程概况

金山湖是镇江市的应急备用水源地,其水质的好坏直接关系到沿岸居民的生活质量,但与此同时金山湖也是运粮河、古运河和虹桥港的受纳水体,其水质易受到沿线雨水排口及其上游支流的影响,根据水力水质模型测算,入湖年均径流量为 $1\,084.54\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 、年均TP排放量为 $6.06\text{ t/a}$ ,严重影响金山湖水生态环境质量<sup>[1]</sup>。此外,金山湖流域雨水泵站排涝能力较低,应对超标降雨能力明显不足,30年一遇降雨下内涝点主要集中在金山湖南岸长江路、东吴路沿线。

在详细对比分析全面雨污分流改造、分散点状调蓄于高密度老城区建设的可行性和经济性的基础上,针对金山湖流域雨天径流污染严重、金山湖水生态环境质量恶化、老城区排水防涝标准偏低、源头低影响开发(LID)设施充分建设仍然满足不了现实要求等问题,创新性地提出了沿金山湖排水深隧系统治理方案,通过排水深隧的转输调蓄、末端生态湿地的处理净化,对现状管网系统进行有效补充,从而实现老城区径流污染削减、金山湖水水质改善、排水防涝标准提升和海绵城市试点达标等多重目标。详细阐述了沿金山湖排水深隧系统工程的整体方案和工程设计,旨在为其他类似项目提供参考和借鉴。

## 2 工程总体设计方案

沿金山湖排水深隧系统工程的平面布置如图1所示。工程服务范围为镇江沿金山湖5个连片老城区,服务面积达 $8.75\text{ km}^2$ ,工程设计排水防涝标准为30年一遇,片区年径流总量控制率目标为91.3%,对应设计日降雨量为60 mm。工程建设内容包括雨水处理站及生态湿地、深隧及入流竖井、末端多功能雨水泵站、浅层支隧、现状泵站改造和深隧智慧调度平台。沿金山湖排水深隧主线起点为江南泵站东北侧新河西岸处江南泵站竖井(Y-1),终点为征润州北侧末端出水井(Y-8),总长约为6.4 km,沿途分别收集新河桥浅层支隧、迎江路雨水泵站、宝

塔路浅层支隧、平政桥雨水泵站、绿竹巷浅层支隧等来水,各路来水与主隧连接处设置入流竖井,并在主隧末端设置多功能雨水泵站、雨水处理站和生态湿地。



图1 排水深隧系统工程总体布置

Fig.1 General layout of the deep tunnel drainage system

项目的运行工况如图2所示。

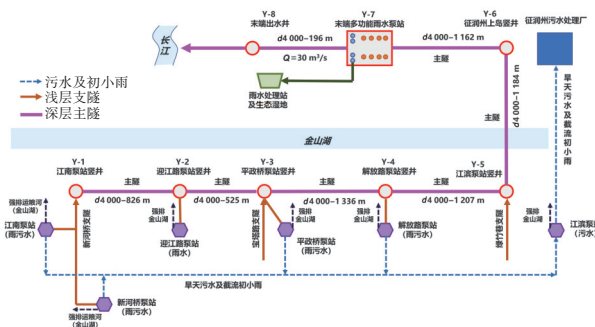


图2 项目运行工况

Fig.2 Project operating conditions

① 旱天污水和雨天初小雨(降雨量 $<10\text{ mm}$ ),通过对现状雨污水泵站进行改造,增设截流井及限流闸门,将旱天污水和初小雨通过现状沿金山湖设置的污水泵站逐级提升至江滨污水泵站,再提升转输至现状征润州污水处理厂,经过处理后出水达一级A标准排放长江。

② 中到大雨(降雨量 $10\sim 60\text{ mm}$ ),雨水由浅层

支隧进入现状雨水泵站,有效利用进水检查井及雨水泵站的初步沉砂及格栅预处理功能后进入深隧,主隧调蓄容积达 $7.8\times 10^4\text{ m}^3$ ,再通过末端多功能雨水泵站的初雨处理泵组提升至新建的雨水处理站及生态湿地,生态化处理后排放。

③ 降雨继续增大(降雨量 $>60\text{ mm}$ ),雨水仍优先以重力流进入深隧,通过末端多功能雨水泵站的排涝泵组将涝水外排长江,超过深隧输送能力的雨水,通过现状沿金山湖雨水泵站泵排至金山湖,总排涝能力达 $50.6\text{ m}^3/\text{s}$ ,可保障城区排涝安全。

3 工程设计

3.1 深隧及入流竖井

深隧设计流量为 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ,隧道断面内径为 $4\text{ m}$ ,外径为 $4.64\text{ m}$ ,长度约为 $6\,400\text{ m}$ ,埋深为 $21.5\sim 26.7\text{ m}$ ,坡度为 $0.1\%$ ,全线顶管施工。管道结构采用预制钢筋混凝土,混凝土强度等级为C55,抗渗等级为P10,管道采用钢承口接口以及楔形密封橡胶圈,接口密封采用抗微生物侵蚀的双组分聚硫密封胶。

主隧起点绝对标高为 $-14.00\text{ m}$ ,终点绝对标高为 $-20.23\text{ m}$ ,从江南泵站东北侧新河口处,自西向东沿金山湖南岸铺设,途经现状迎江路泵站、平政桥泵站、解放路泵站至梦溪路近岸,穿金山湖后至末端多功能雨水泵站。

主线设置6座竖井,分别为江南泵站竖井(Y-1)、迎江路泵站竖井(Y-2)、平政桥泵站竖井(Y-3)、解放路泵站竖井(Y-4)、江滨泵站竖井(Y-5)和征润州上岛竖井(Y-6),竖井在施工过程中兼作顶管工作井或接收井,其模型如图3所示。作为深隧与浅层支隧的衔接设施,竖井采用折板消能+底部消能池方式,其设计参数如表1所示。

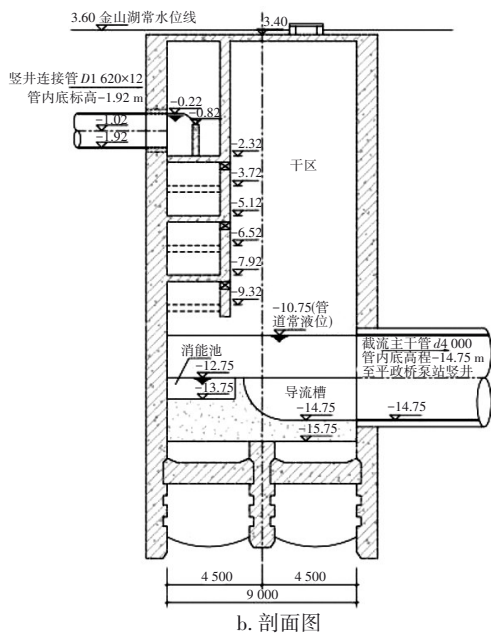
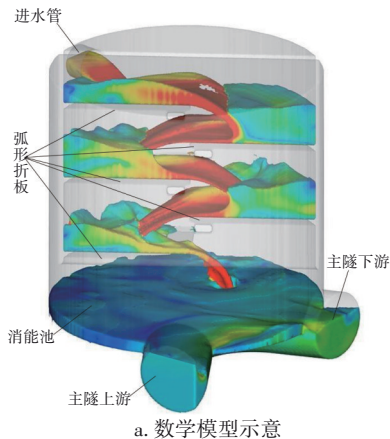


图3 排水深隧系统入流竖井模型  
Fig.3 Model of inflow shaft in deep tunnel drainage system

表 1 入流竖井设计参数

Tab.1 Design parameters of inflow shaft

编号	尺寸( $\phi\times H$ )/ (m $\times$ m)	设计入流流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	扇形消能折板 尺寸/m
Y-1	16 $\times$ 22.45	2.42	$R=6.0$ ,间距 1.45
Y-2	9 $\times$ 23.61	2.15	$R=2.5$ ,间距 1.10
Y-3	16 $\times$ 20.88	10.32	$R=6.0$ ,间距 2.50
Y-4	16 $\times$ 23.71	5.40	$R=5.5$ ,间距 2.15
Y-5	16 $\times$ 23.09	9.71	$R=5.0$ ,间距 2.30
Y-6	13 $\times$ 26.78		

3.2 末端多功能雨水泵站

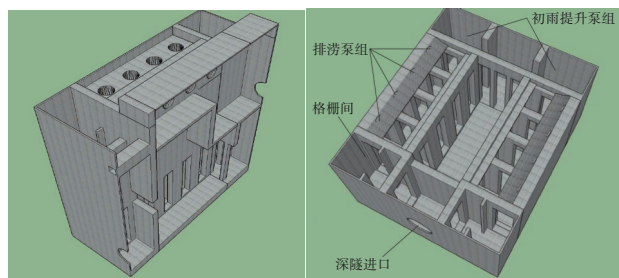
末端多功能雨水泵站位于征润州北侧,是深隧系统的终端泵站,主要功能为初期雨水提升和涝水快速排放。末端多功能雨水泵站包括闸门、格栅清污机、初雨提升泵组和排涝泵组,其平面净尺寸为 $25.0\text{ m}\times 29.3\text{ m}$ ,深度为 $29.4\text{ m}$ ,对称布局,顶部为涝水出水箱涵,宽度为 $7.3\text{ m}$ ,深度为 $6.3\sim 16.3\text{ m}$ 。

末端多功能雨水泵站采用全地下式结构,深隧接入末端泵站处底高程为 $-20.23\text{ m}$ ,泵站厂区地面高程为 $6.50\text{ m}$ ,主泵井位于泵房中心,两侧为排涝泵组,末端为初雨提升泵组,采用共同的集水井。末端多功能雨水泵站结构示意如图4所示。

泵站设垂直式格栅清污机2套,栅条间隙为 $50\text{ mm}$ ,栅槽宽度为 $3.15\text{ m}$ ,栅槽深度为 $24\text{ m}$ ,安装角



度为 $90^\circ$ 。泵站内设2套泵组,初雨提升泵组设计规模为 $20\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,采用4台潜污泵将初期雨水提升至雨水处理站和生态湿地进行处理;排涝泵组设计规模为 $30\text{ m}^3/\text{s}$ ,泵组出水通过高位出水涵和 $d4\ 000\text{ mm}$ 自流管至末端出水井外排长江,采用8台混流泵,泵组相关设计参数见表2。



a. 内部剖面

b. 结构示意图

图4 末端多功能雨水泵站结构示意图

Fig.4 Structural diagram of terminal multi-functional rainwater pumping station

表2 末端多功能雨水泵站设计参数

Tab.2 Design parameters of terminal multi-functional rainwater pumping station

项目	单泵设计流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	设计扬程/kPa	功率/kW	数量/台	水泵型式
初雨提升泵组	0.58	300	280	4	潜污泵
排涝泵组1	4.33	92~157	630	6	井筒悬吊式混流泵
排涝泵组2	2.0	92~157	400	2	井筒悬吊式混流泵

### 3.3 雨水处理站及生态湿地

新建雨水处理站1座,近期建设高效污水净化器5套、加药系统1套。高效污水净化器单台处理规模为 $400\sim 450\text{ m}^3/\text{h}$ ,包括快混区、絮凝区和沉淀区。加药系统包括PAC、PAM加药设备各1套,通过化学絮凝沉淀对径流雨水中的主要污染物(COD、TP、SS)进行去除。

采用垂直潜流+表流人工湿地,设计规模为 $5\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ ,总面积为 $9.5\times 10^4\text{ m}^2$ 。垂直潜流湿地、表流湿地表面负荷分别为 $4.32, 0.59\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ ,理论总水力停留时间为43.25 d。垂直潜流湿地深度为1.3 m,采用20~32 mm砾石填料结构,填料孔隙率约40%~45%,底部采用砂壤+复合土工膜防渗结构。

垂直潜流湿地由7个子单元并联构成,采用穿孔管均匀布水,从上游填料进水到下游填料经穿孔

管收集出水,进水配水管及出水管均采用可调式PVC配水、排水系统。根据因地制宜和适应性原则,湿地植物选用菖蒲、香蒲、芦苇等。

将现状干塘及氧化塘( $65\text{ hm}^2$ )作为超标雨水的储存单元,晴天时通过一体化泵站将储存雨水提升至雨水处理站及生态湿地进行处理排放。雨水处理站及生态湿地的设计进、出水水质如表3所示。通过典型年降雨雨量核算,全年雨水处理站及生态湿地运行98~174 d,可大大削减污染物负荷,COD、TP、SS的削减量分别为490~870、7.8~13.9、1 323~2 349 t/a。系统末端处理工艺流程见图5。

表3 设计进、出水水质

Tab.3 Design influent and effluent quality

 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 

项目	COD	TP	SS
雨水处理站设计进水水质	150	2.0	300
湿地设计进水水质	70	0.5	50
湿地设计出水水质	50	0.4	30

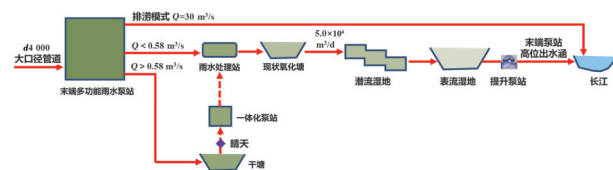


图5 系统末端处理工艺流程

Fig.5 Process flow of system terminal treatment

### 3.4 浅层支隧及现状泵站改造

浅层支隧为现状雨水管道与入流竖井的连接通道,主要包括新河桥、宝塔路和绿竹巷3条浅层支隧。新河桥浅层支隧内径为2 m,长为530 m,埋深为10.1~13.88 m,坡度为0.1%;宝塔路浅层支隧内径为2.2 m,长为620 m,埋深为9.35~10.33 m,坡度为0.2%;绿竹巷浅层支隧内径为1.6 m,长度为250 m,埋深为8~10 m,坡度为0.5%。3条支隧均采用顶管法施工。

将现状雨水泵站作为预处理站,雨水径流经浅层支隧进入入流竖井前先进行预处理,通过现状雨水泵站的粗格栅及前端进水沉砂井对漂浮物及大型栅渣进行拦截,从而减轻后期深隧的维护量。

### 3.5 深隧智慧调度平台

利用先进的控制算法、优化调度模型、实时控制(RTC)等技术,搭建了金山湖智慧联合调度平台,对现状雨污水泵站、竖井、深隧、雨水处理站及湿地

进行实时监测及运行管控。通过7个远程控制站(RTU)、11台静压式液位计、5台超声波互相关流量计等硬件设施,对浅层支隧液位、深隧主隧液位和流量进行监测并实时反馈。构建“三级”监测体系,将SWMM作为观测模型进行离线模拟研究,通过在线控制模型Simuwater耦合,制定系统联调联控策略,实现深隧系统智慧调度。

#### 4 工程设计重点、难点及解决措施

① 沿金山湖排水深隧系统包括主隧及竖井、浅层支隧、多功能雨水泵站、雨水处理站及生态湿地等多种设施,运行调度工况复杂,对工艺、电气及自控专业要求较高,为此项目设计中通过布设液位计、流量计等,搭建深隧智慧调度平台,进行智慧调度和管控<sup>[2-3]</sup>。

② 工程主隧内径为4 m,埋深约21.5~26.7 m,单次顶管距离达1 333 m,采用全线顶管法施工,超过国标规范《混凝土和钢筋混凝土排水管》(GB/T 11836—2009)、《顶进施工法用钢筋混凝土排水管》(JC/T 640—2010)中管径适用范围,给工程设计、施工均带来了较大的难度,为此进行了原型管材结构及密封性能试验,制定了内径4 m钢承口钢筋混凝土管顶管管节制作、施工及验收标准,为工程设计、施工提供了相应参考。

③ 工程范围内的浅层支隧均处于老城区,用地紧张,与现状管线交叉较多;此外,入流竖井的平面位置、跌水形式、施工方法等都需要结合周边现状,经综合比较分析后确定。

#### 5 结语

沿金山湖排水深隧系统工程是我国高密度老城区建成的首个集雨水转输调蓄、径流污染生态净化和排水防涝于一体的多功能深隧工程,在设计、建设、运维过程中,基于最大日负荷总量(TMDL)的“总量控制”理念,运用SWMM模型计算耦合量化工程规模;运用瞬态分析程序(TAP)、计算流体动力模型(CFD)等对深隧、竖井及泵站的水力流态、浪涌风险等进行分析,可为工程设计提供依据;通过管材试验等研究,编制钢承口混凝土顶管管节制作、施

工及验收标准,可为工程建设、运维提供参考。

该工程于2022年10月建设完成,目前处于运营阶段,数学模型模拟结果表明,金山湖沿线连片老城区的排涝标准将提升至30年一遇,年径流总量控制率将提升至91.3%。内径4 m顶管深隧技术对于中小城市排水系统治理具有一定的经济性和可行性,对片区水安全、水环境和水生态的综合提升具有重要意义。

#### 参考文献:

- [1] 刘绪为,胡坚,王浩正,等. 基于TMDL的金山湖水环境治理模拟耦合计算与实践[J]. 中国给水排水, 2022, 36(1): 105-109.  
LIU Xuwei, HU Jian, WANG Haozheng, et al. Simulated coupling calculation and practice of water environment treatment in Jinshan Lake based on total maximum daily load [J]. China Water & Wastewater, 2022, 36(1): 105-109 (in Chinese).
- [2] 赵吉,郭佳,苏德慧. 基于瞬变流模型的深层排水隧道浪涌风险分析[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 110-114.  
ZHAO Ji, GUO Jia, SU Dehui. Surge risk analysis of deep drainage tunnel system based on transient flow model [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 110-114 (in Chinese).
- [3] 宋嘉美,高祯,杨园晶,等. 深圳市前海-南山排水深隧系统工程设计[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 76-81.  
SONG Jiamei, GAO Zhen, YANG Yuanjing, et al. Design of Qianhai-Nanshan deep tunnel drainage system in Shenzhen [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 76-81 (in Chinese).

作者简介:方帅(1991-),男,安徽安庆人,硕士,工程师,注册公用设备工程师(给水排水),主要从事海绵城市建设、水环境治理方面的研究和设计工作。

E-mail: 1025187828@qq.com

收稿日期:2023-03-28

修回日期:2023-04-22

(编辑:沈靖怡)