

深隧排涝工程对特大城市防洪排涝情势的影响

谢 松¹,王磊之²,覃光华¹,缪 璐³,郭 靖⁴,苏 鑫²,郭伟建⁴,胡鉴闻²

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护全国重点实验室,四川 成都 610065;
2. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室,江苏 南京 210029; 3. 南京市江宁区水务局,江苏 南京 211100;
4. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

摘要:为探究深隧排涝工程对城市防洪排涝情势的影响,以杭州城西片区在建的我国首个深隧排涝项目——南排深隧工程为例,通过构建包含深隧排涝工程在内的水文水动力模型,开展多种方案下的定量模拟,解析了深隧排涝工程对排涝能力以及排涝标准提升的空间规律,揭示了其与一般性排涝工程在排涝效果上的本质差异,并总结出深隧排涝工程对特大城市防洪排涝情势影响的一般性规律。结果表明:深隧排涝工程可显著提升杭州城西地区排涝标准,其排涝标准从不足 20 年一遇提升至全面达到 20 年一遇,部分地区甚至可达 50 年一遇;深隧排涝工程对排涝能力的提升效果与所处位置的地势和距离进水口的距离有关,地势越低、距离进水口越近的地区,其排涝能力提升效果越显著;深隧排涝工程与一般性排涝工程的区别在于,一般排涝工程是将洪涝风险从上游向下游传递,而深隧排涝工程则能消除局部洪涝风险,在更大程度上发挥排涝效益。

关键词:深隧排涝工程;防洪排涝;特大城市;杭州城西;南排深隧工程

中图分类号:TV212 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)03-0111-08

Impact of deep tunnel drainage project on flood control and drainage situation in mega cities//XIE Song¹, WANG Leizhi², QIN Guanghua¹, MIAO Lu³, GUO Jing⁴, SU Xin², GUO Weijian⁴, HU Jianwen² (1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 3. Jiangning District Water Bureau, Nanjing City, Nanjing 211100, China; 4. POWERCHINA Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China)

Abstract: In order to explore the impact of deep tunnel drainage projects on urban flood control and drainage situations, taking the South Drainage Deep Tunnel Project, the first deep tunnel drainage project under construction in the western part of Hangzhou, China, as an example, a hydrological and hydrodynamic model that incorporates the deep tunnel drainage project was constructed, and quantitative simulations were carried out under various schemes. The spatial patterns of the improvement in drainage capacity and drainage standards by the deep tunnel drainage project were analyzed, the essential differences in drainage effect between deep tunnel drainage projects and conventional drainage projects were revealed, and the general laws of the impact of deep tunnel drainage projects on flood control and drainage situations in mega cities are summarized. The results show that the deep tunnel drainage project can significantly improve the drainage standards in the western part of Hangzhou, with the drainage standards increasing from less than a 20 a return period to a comprehensive 20 a return period, and even reaching a 50 a return period in some areas. The improvement effect of the deep tunnel drainage project on the drainage capacity is related to the terrain and distance from the water inlet. The lower the terrain and the closer the distance to the water inlet, the more significant the improvement effect on drainage capacity. The difference between deep tunnel drainage projects and conventional drainage projects is that conventional drainage projects transfer flood risks from upstream to downstream, while deep tunnel drainage projects can eliminate local flood risks and maximize drainage benefits.

Key words: deep tunnel drainage project; flood control and drainage; mega city; western part of Hangzhou; the South Drainage Deep Tunnel Project

近年来,全球气候变化增加了极端暴雨事件的发生概率。在快速城市化背景下,建成区不断扩张,不透水面积增加,城市下垫面硬化,这使得在极端暴雨来袭时,城市暴雨内涝灾害频繁^[1-5]。2021 年河

基金项目:中央级公益性科研院所科研业务费专项资金项目(Y523005,Y523007);杭嘉湖南排工程科研项目
作者简介:谢松(1998—),男,硕士研究生,主要从事防洪排涝研究。E-mail:xiesong@stu.scu.edu.cn
通信作者:王磊之(1991—),男,高级工程师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:wanglz@nhri.cn

南“7·20”特大暴雨灾害造成河南省 150 个县(市、区)1478.6 万人受灾,因灾死亡失踪 398 人,直接经济损失高达 1200.6 亿元;2023 年 7 月 29 日,北京及周边地区遭遇灾害性特大暴雨,导致北京 33 人死亡、18 人失踪;2023 年加拿大新斯科舍省“7·21”特大暴雨事件中,局部地区 24 h 内降水量超过 250 mm,相当于往年同期 3 个月的降水量,致使全省多条道路、铁路和桥梁等关键基础设施受到严重破坏,约 8 万户家庭遭受洪涝影响。联合国相关报告显示,全球每年因洪涝造成的经济损失高达数百亿美元。总体来说,城市洪涝问题已成为全球城市化进程中亟待解决的重大挑战,对城市基础设施和生命财产安全构成严重威胁。

为有效应对城市洪涝问题,各国政府修建了大量的城市防洪排涝工程,例如通过修建城市河道堤防来抵御外部和内部河道洪水入侵,通过拓浚河道以及强化泵站外排能力将城市洪涝输送到外部区域。此外,近年来大量学者引入了低影响开发^[6-9]、海绵城市建设^[10-13]等先进的雨洪管理理念,并在我国代表性城市开展了应用实践,取得了一定的成效^[14-15]。然而,随着极端暴雨事件趋多增强,传统的城市防洪排涝工程包括海绵措施已难以应对当前的洪涝灾害挑战。首先,低影响开发和海绵城市建设主要侧重于缓解而不是彻底解决城市洪涝问题,极端暴雨下的城市洪涝规模早已远超海绵城市的设计应对能力;其次,近年来城市下垫面硬化速度加快,导致城市产汇流机制发生变化,汇流速度明显加快,洪峰流量成倍增加,与城市“雨岛效应”叠加,在超标准暴雨情景下,传统城市防洪排涝工程的排水能力已难以满足城市日益增长的排水需求,城市洪涝问题日益凸显。

在此背景下,深隧排涝工程应运而生,该工程通过修建埋藏于地下深处的隧道将洪涝直接输送至外海、外江等远离城区的区域。相较于传统排涝工程,深隧工程的外排距离更长,因此对洪涝情势和特性的影响更为显著。传统城市排涝工程通常是通过泵站、闸站与河道将洪涝外排至附近地势较低的承泄区,其本质是将洪涝从高风险区转移至低风险区,而深隧工程则是将洪涝外排至与本区域无关的外部区域。此外,深隧工程在建设过程中通常要避开现有的地下管网、地铁等地下设施,因此其埋深通常超过数十米。同时,由于其输送目的地为区域界外,输送距离相对较远,因此造价十分高昂,目前主要应用于少数特大城市,如东京、纽约、香港等。这导致当前针对深隧工程排涝效能的研究案例相对有限。

学者们针对深隧工程的结构安全及其对城市防

洪除涝标准的影响开展了一系列研究。信春雷等^[16]基于隧道力学和渗流力学,通过数值模拟和模型试验,研究了渗流应力耦合作用下支护和衬砌的力学特性,为深埋高水位山岭隧道的初期支护和二次衬砌的初步设计提供了理论依据。Hu 等^[17]运用层次全息模型,结合社会网络分析和物元可拓方法,开发了大型深排水隧道工程的施工安全风险评估模型。Li 等^[18]利用机器学习技术,探索了在仅依赖实时数据和避免复杂的模型模拟过程的情况下,控制深隧排水系统运行的方法。Wu 等^[19]在暴雨洪水管理模型的基础上,建立了广州市东濠涌流域城市暴雨模型,评估了不同重现期的暴雨下深隧工程的合理方案,发现深隧工程将该地区的河道防洪和排水标准提高了 2 a 暴雨设计重现期,并使河流下水道溢流污染物负荷减少了 30%~40%。Yang 等^[20]研究了深隧工程优化调度运行策略的除涝效果,结果表明深隧工程将各子系统的内涝风险降雨重现期从 1 年一遇提升到了 10 年一遇。

综上所述,当前关于深隧工程的研究多集中于其自身结构安全方面,也有少量研究通过数值模拟探索了其地区防洪排涝标准的提升作用,但关于深隧工程对防洪排涝影响的研究仍然缺乏系统性和深入性。一方面,深隧工程作为解决城市洪涝问题的强有力手段,其对城市防洪排涝格局的空间影响规律尚待明晰;另一方面,作为一种特殊的排涝设施,深隧工程与常规排涝工程在防洪排涝效能上的差异也有待深入分析。基于此,本文选取杭州这一典型特大城市城西地区在建的国内首个深隧排涝工程——南排深隧工程为研究对象,分析深隧工程建设对城市防洪排涝情势的空间影响规律,辨识深隧工程和一般性排涝工程在排涝效能上的区别,以期科学认识深隧工程在防洪排涝方面的作用提供借鉴。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

杭州市城西片区地处杭嘉湖区域西南端(图 1),位于 30°10'N~30°25'N、120°0'E~120°10'E,以平原为主,地势低洼,高程为 2.0~10 m,西南部为天目山的余脉。研究区内拥有京杭大运河、西湖等重要水体,西溪湿地位于研究区中部。城西片区属亚热带季风气候,降水充沛,春末夏初常出现持续时间较长的梅雨天气,7—10 月易受台风暴雨侵袭。研究区是杭州“西延”战略的重要区域,阿里巴巴、梦想小镇、之江实验室等大型企业坐落于此,是浙江省投资热度最高、开发强度最大、发展潜力最充分的区域之一。然而,近年来随着城建区不断扩大,农田、水面

等调蓄空间骤减,城市汇流速度显著加快,导致城西片区遭遇了数次严重洪涝灾害,如 1999 年暴雨、2007 年“罗莎”台风、2013 年“菲特”台风等事件均造成了严重的洪涝灾害,给城西片区带来了巨大的生命和经济损失。

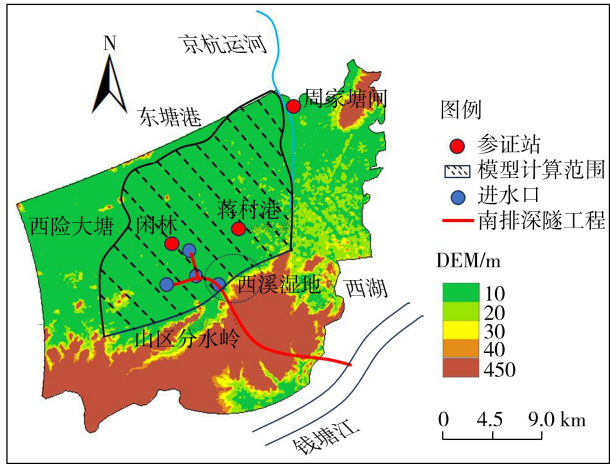


图 1 研究区及深隧工程示意图

Fig. 1 Sketch of research area and deep tunnel project

为有效解决城西片区的洪涝问题,杭州市政府决定新辟一条从西溪湿地直通钱塘江的地下深隧排水通道,即南排深隧工程。该工程是国内排涝规模最大、洞径最大和埋深最大的深层隧洞排水系统工程。排涝主隧洞长约 11 km,起于城西片区西溪湿地,终于钱塘江,洞径达 11 m,设有 4 处进水口,出口位于钱塘江边九溪一带,在隧洞出口新建排涝能力为 200~300 m³/s 的排涝闸站,将杭州城西片区的洪涝水抽排至钱塘江。

1.2 数据来源

数据主要包括自然地理数据、气象水文数据以及水利工程数据,其中自然地理数据和气象水文数据主要用于构建水文水动力模型,水利工程数据主要用于不同模拟方案的设置以及对比。

a. 自然地理数据。①DEM 数据(时空分辨率 30 m×30 m)、行政区划数据均来源于资源环境科学与数据中心。②河湖水系数据来源于杭州市林业水利局,主要包括杭州城西片区的区域河流、湖泊水系等信息。

b. 气象水文数据。①降雨数据来源于杭州市林业水利局,主要包括典型降雨事件(如“菲特”台风)的降水量、降水历时等关键信息。②水位数据来源于杭州市林业水利局,主要包括研究区内各水文站点历次洪水的最高水位值、安全水位值等数据,用于研究方案的对比分析。

c. 水利工程数据。①杭州城西片区防洪排涝

工程和调度资料来源于杭州市林业水利局,包括河道、闸泵等工程资料以及相关工程调度规则。②南排深隧工程数据来源于杭州市林业水利局,主要包括在建的南排深隧工程进水口位置、工程相关参数、调度规则等,作为后续研究方案对比的重点。

2 研究方法

2.1 水文水动力模型

2.1.1 模型建立

杭州城西片区的运西水系河网纵横,水流互相连通,非恒定流计算方法能更准确地模拟实际防洪排涝过程中的动态变化。因此,本文采用一维非恒定流水动力学模型,建立了杭州市运西片河网水文水动力模型。该模型计算范围覆盖整个杭州市运西片区,东至京杭大运河,南至山区分水岭,西至西险大塘,北至东塘港。计算总面积为 486 km²,其中山区面积为 104 km²,平原区面积为 382 km²。在模型参数选择方面,主要通过设立初始参数值进行模拟,并利用参证站的实测水位数据进行率定和验证,以确保模型模拟结果的合理性。在加入南排深隧工程后,模型在原有基础上新增 4 个进水口,通过调整进水口的流量来实现排涝模拟。

2.1.2 模型验证

选取实测资料较为完整的 2013 年 10 月 6 日 8 时至 10 月 9 日 7 时“菲特”台风洪水事件,对构建的水文水动力模型进行验证。各参证站的位置见图 1,其实测最高水位及计算最高水位见表 1,各参证站的实测及计算水位过程线见图 2。由表 1 和图 2 可知,3 个参证站的水位过程的可决系数 R² 均高于 0.9,且最高水位的计算值与实测值相差较小,两者吻合较好,表明本文建立的水文水动力模型及率定的参数是合理的,可用于后续模拟方案的计算与分析。

表 1 参证站实测最高水位和计算最高水位

Table 1 Measured and calculated highest water level at reference stations			
参证站	实测水位/m	计算水位/m	差值/m
闲林	4.25	4.22	-0.03
蒋村港	3.95	3.95	0
周家塘闸	3.70	3.75	0.05

2.2 模拟方案设置

本文旨在解析深隧工程建设对城市防洪排涝情势的影响,因此,模拟方案需考虑深隧工程建设的工况。同时,为了量化深隧工程建设对研究区排涝能力(标准)的影响,方案拟基于不同的设计暴雨输入条件进行设置。鉴于研究区现状排涝标准基本为 20 年一遇,而在深隧工程建成后预计将达到 50 年

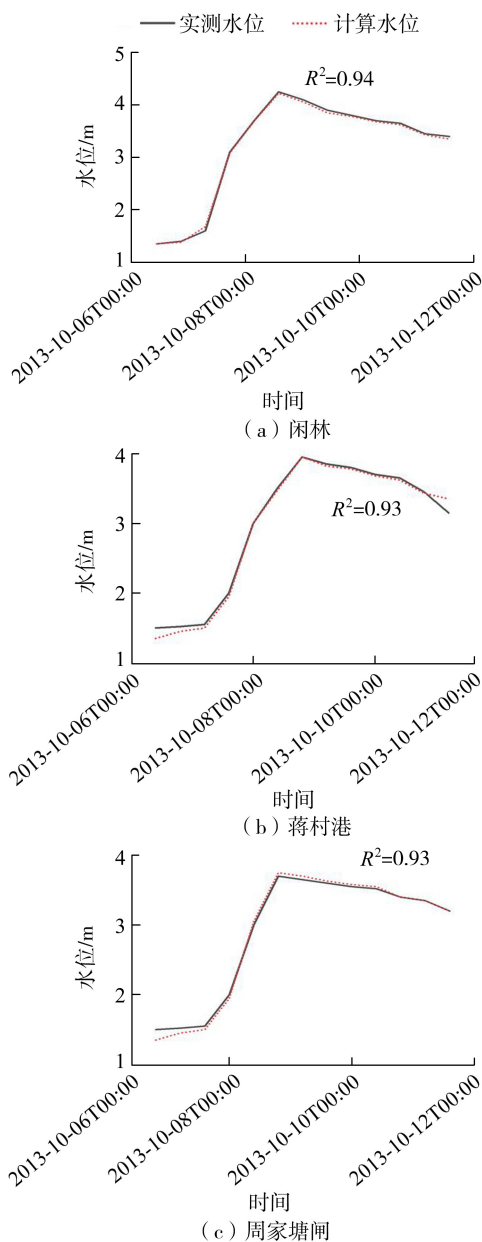


图2 参证站实测和计算水位过程线

Fig. 2 Measured and calculated water level curves at reference stations

一遇,因此设置20年一遇和50年一遇两种排涝暴雨输入条件进行模拟。具体方案设置详情如下:

a. 方案1:20年一遇设计暴雨情况下的现状工况,即杭州城西片区现状防洪排涝工程规模和调度方案。该方案主要为了检验未建设深隧工程时城西片区是否满足20年一遇排涝标准。

b. 方案2:20年一遇设计暴雨情况下加入深隧工程的工况。该方案与方案1进行对比,旨在研究南排深隧工程对城市排涝标准的提升效果。

c. 方案3:50年一遇设计暴雨情况下的现状方案。相较于方案1,该方案将设计暴雨输入条件提升至50年一遇,用于检验现状工况在50年一遇设计暴雨情景下的排涝能力。

d. 方案4:50年一遇设计暴雨情况下加入深隧工程的方案。相较于方案3,该方案主要研究南排深隧工程建设能否将城西片区排涝标准提升至50年一遇。

e. 方案5:20年一遇设计暴雨情况下,采用一般性排涝工程将城市洪涝水排至京杭运河。该方案的排涝流量和能力与深隧工程设计能力相同,主要用于与方案1和方案2进行对比,研究一般排涝工程与深隧排涝工程在具体排涝效果上的差异。

根据研究区内河流的走向及其在防洪排涝中的重要性,本文选取了24个位于各排涝河道的代表站点,以及位于京杭运河上的拱宸桥站(以下简称站点25)共25个代表站点进行研究,研究站点的位置分布见图3。其中,拱宸桥站位于防洪河道京杭大运河上,处于相对下游的位置,其保证水位为3.16m;其余24个站点均分布在城西片区的连通河网内部,其保证水位均为3.5m。

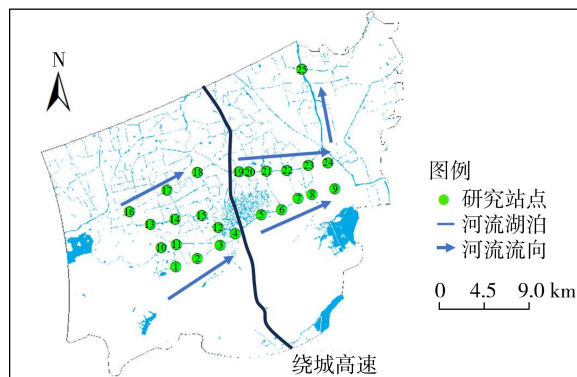


图3 研究站点分布

Fig. 3 Distribution of research stations

2.3 防洪排涝风险定量表征

采用风险度^[21]表征防洪排涝风险,并以此为依据分析深隧排涝工程对防洪排涝风险的影响。风险度定义为在规定的条件下和规定的时间内,系统不能完成预定功能的概率。在本文中,当一场洪水事件发生时,若河道断面的最高水位超过或即将超过其安全设计水位,则视为该河道断面承担洪涝风险。由于不同的来流条件下河道所能达到的最高水位不同,因此河道断面承担的洪涝风险也有所差异。本文的洪涝风险大小则用定量计算风险度的方式来体现。采用一次二阶矩法中的验算点法,对各研究站点河道的防洪风险度进行计算,具体计算步骤如下:

步骤1 根据水文水动力模型确定一场降雨事件对应的水位过程,获取洪峰水位 h_s ,并给出第一次假定:

$$S^* = S \quad (1)$$

$$\mu_s = h_s \quad (2)$$

式中: S 为最高洪水位; S^* 为 S 经过正态分布转换后

的值; μ_s 为最高洪水水位分布的均值,按照对数正态分布处理。

步骤2 根据流域/防洪规划确定最高防洪水位 R ,将 R 按照对数正态分布处理。令 $r^*=R$,其中 r^* 为 R 经正态分布转换后的值。

步骤3 根据对数正态分布理论,可靠概率是参数 λ 和 ζ 的函数,参数 λ 和 ζ 与对数正态分布参数的均值 μ 和根方差 σ 有如下关系:

$$\lambda = \ln \mu - \sigma^2 / 2 \tag{3}$$

$$\zeta^2 = \ln (1 + \sigma^2 / \mu^2) \tag{4}$$

基于式(3)计算 R 和 S 的参数 λ_R, λ_S :

$$\lambda_R = \ln \mu_R - \sigma_R^2 / 2 \tag{5}$$

$$\lambda_S = \ln \mu_S - \sigma_S^2 / 2 \tag{6}$$

式中; μ_R, σ_R 分别为 R 经对数正态分布处理后的参数的均值和根方差; μ_S, σ_S 分别为 S 经对数正态分布处理后的参数的均值和根方差。

步骤4 基于试算点法计算根方差和均值 $\sigma_R, \sigma_S, \mu_R, \mu_S$,计算公式如下:

$$\sigma_R = r^* \zeta_R \tag{7}$$

$$\sigma_S = S^* \zeta_S \tag{8}$$

$$\mu_R = r^* (1 - \ln r^* + \lambda_R) \tag{9}$$

$$\mu_S = S^* (1 - \ln S^* + \lambda_S) \tag{10}$$

式中 ζ_R, ζ_S 为变异系数,取太湖流域设计暴雨所采用变异系数 0.25。

步骤5 计算方向余弦:

$$\alpha_R = \sigma_R / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{11}$$

$$\alpha_S = -\sigma_S / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{12}$$

式中 α_R, α_S 分别为 R 和 S 的方向余弦。

步骤6 计算可靠性指标 β :

$$\beta = (\mu_R - \mu_S) / \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \tag{13}$$

步骤7 计算 r^* 和 S^* :

$$r^* = \mu_R - \alpha_R \beta \sigma_R \tag{14}$$

$$S^* = \mu_S + \alpha_S \beta \sigma_S \tag{15}$$

步骤8 基于计算得到的 r^* 和 S^* 进行迭代假定计算,直至连续两次计算的 β 值小于预设的允许误差限值,方可停止计算。

步骤9 用最后确定的可靠性指标 β 计算风险度 P_f :

$$P_f = 1 - \varphi(\beta) \tag{16}$$

式中 φ 为标准正态概率密度函数。

3 结果与分析

3.1 深隧排涝工程对城市排涝标准的提升效果

4 种方案下研究站点的最高水位与安全水位差值的空间分布如图 4 所示。从图 4 可以看出,在现状 20 年一遇设计暴雨条件下,方案 1 中仍有部分研究站点的最高水位超过保证水位,表明现状杭州城西片区的排涝能力尚未完全达到 20 年一遇设计标准。在方案 2(加入南排深隧工程)的情况下,城西片区所有研究站点的最高水位均不超过保证水位,表明南排深隧工程建成后可将城西区域排涝标准全面提升至 20 年一遇。在方案 3 中 50 年一遇设计暴雨条件下,现状工况城西片区所有研究站点的

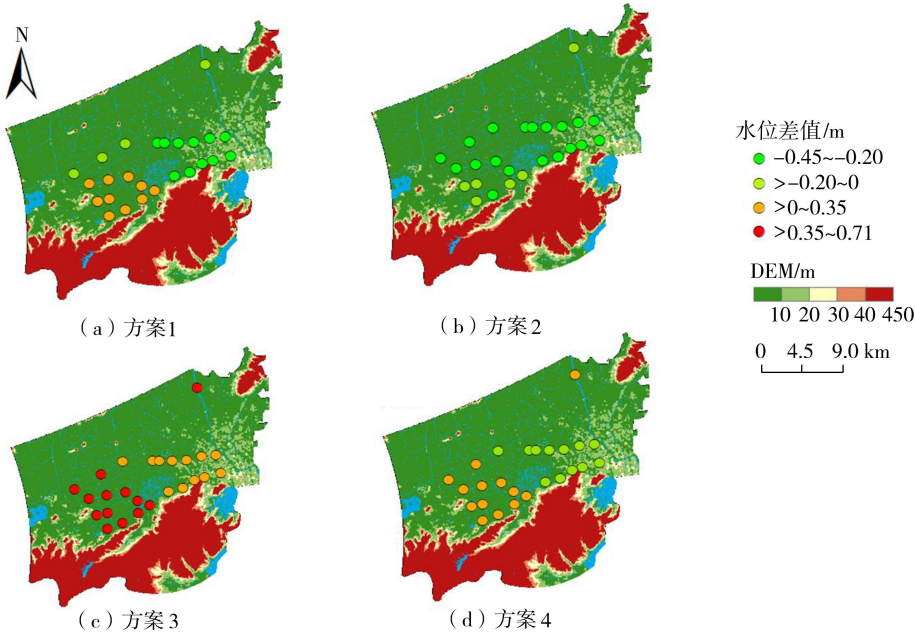


图 4 4 种方案下研究站点最高水位与安全水位差值的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of difference between highest water level and safe water level at research stations under four schemes

最高水位均超过保证水位。在方案 4(50 年一遇设计暴雨条件下,加入南排深隧工程)中,尽管局部研究区的最高水位超过保证水位,但与方案 3 相比,水位显著降低,且与保证水位的差值控制在 0.5 m 以内,部分研究区的最高水位甚至能够控制在保证水位以内。从空间上看,地势低的地区水位较地势高的地区水位更容易超过保证水位,说明地势低的地区更容易遭受城市内涝的影响。综上所述,南排深隧工程能够大幅缓解城西片区排涝压力,将城西片区的排涝标准从不足 20 年一遇提升至全面达到 20 年一遇,局部地区甚至达到 50 年一遇标准,但总体仍不足以达到 50 年一遇的标准。

3.2 深隧排涝工程对城市排涝能力提升的空间规律

3.2.1 排涝能力提升与所处地势高低的关系

为了消除研究站点与深隧工程进水口的距离对结果的影响,以绕城高速公路为界,将所有研究站点划分为两类:绕城高速以西(站点 1~4、站点 10~18)和绕城高速以东(站点 5~9、站点 19~25),其中绕城高速以西的研究站点距离深隧工程进水口较近,以东的研究站点距离深隧工程进水口较远。在 50 年一遇设计暴雨情况下,对比南排深隧工程加入前后(即方案 3 和方案 4)各研究站点的最高水位降低值,结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,深隧工程对水位降低的效果随着研究站点高程的增加而降低(考虑到研究站点 25 距离进水口太远,故不纳入考虑范围),表明深隧排涝工程对地区排涝能力的提升效果与该地区所处位置的地势密切相关,地势较低的地区最高水位降低值较大,排涝能力提升效果较明显。

3.2.2 排涝能力提升与距进水口远近的关系

为了消除研究站点地势高低对结果的影响,选取高程较为接近的研究站点 1~7、站点 10~18 共 16 个研究站点进行分析。各研究站点距离进水口的距离与水位降低值的关系如图 6 所示。从图 6 中可以看出,当研究站点高程较为接近时,研究站点的水位降低值整体呈现出随着研究站点与进水口距离的增加而减小的趋势,表明深隧工程能及时将进水口附近的涝水排送至外海,对距离进水口较近的地区排涝能力提升效果更为显著。

3.3 深隧排涝工程和一般排涝工程的区别

采用风险度计算方法,对方案 1、方案 2 及方案 5 进行计算和对比,结果如表 2 所示。对比方案 1 和方案 2 可知,在引入南排深隧工程后,洪涝水被直接抽排至钱塘江,上游和下游各研究站点的洪涝风险度均呈现一定程度的降低,表明深隧工程总体上

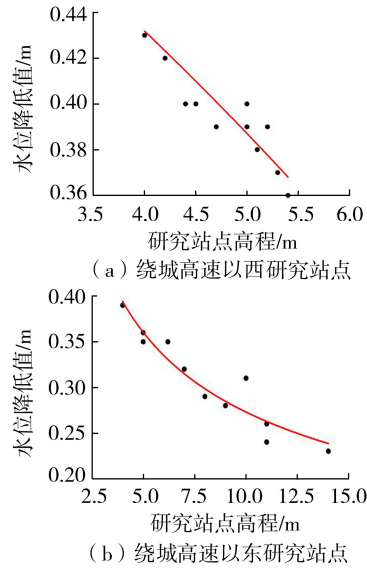


图 5 研究站点水位降低值与高程关系

Fig. 5 Relationship between water level decrease and elevation at research stations

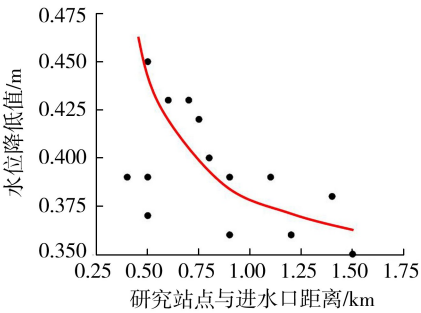


图 6 研究站点水位降低值与进水口距离的关系

Fig. 6 Relationship between water level decrease at research station and distance from research station to inlet

表 2 最高水位风险度计算值

Table 2 Calculated risk value of maximum water level							
研究 站点	风险度/%			研究 站点	风险度/%		
	方案 1	方案 2	方案 5		方案 1	方案 2	方案 5
1	100	40	43	14	100	18	22
2	100	27	31	15	100	15	25
3	100	60	64	16	53	11	15
4	100	41	42	17	53	9	13
5	5	1	10	18	44	8	15
6	5	1	10	19	22	8	25
7	4	1	8	20	15	10	19
8	1	0	1	21	13	2	18
9	0	0	1	22	5	1	8
10	100	44	49	23	3	1	5
11	100	30	35	24	1	0	3
12	100	22	24	25	24	20	30
13	100	18	23				

可以降低区域洪涝风险。对比方案 1 和方案 5 可知,在现状情况下,一般排涝工程通过将洪涝水排至下游河道后,上游研究站点(站点 1~4、站点

10~18)的洪涝风险度降低,如站点1和站点18的风险度分别从100%和44%降低到43%和15%,而下游研究站点(站点5~9、站点19~25)的洪涝风险度增加,如站点25的风险度从24%增加至30%,表明一般排涝工程将洪涝风险由上游河道转移至下游河道。对比方案2与方案5可知,如将一般性排涝工程替换为南排深隧工程,不仅上游研究站点的洪涝风险度继续降低,而且下游研究站点的洪涝风险度也有所降低,如站点25的风险度由原先的24%降低为20%,且在局部区域(研究站点9、24)完全消除了洪涝风险。这是因为深隧排涝工程将洪涝水通过深层隧道直接排到外海,避免了洪涝风险在区域内的转移,所以城西片区尤其是地势相对较低的下游区域的洪涝风险度显著降低。由此可见,深隧排涝工程相比于一般排涝工程能够显著降低防洪排涝风险。

4 结 论

- a. 南排深隧工程的实施将显著提升杭州城西片区的排涝标准,该工程可使城西片区的排涝标准从不足20年一遇提升至全面达到20年一遇,部分区域甚至可达50年一遇。
- b. 深隧排涝工程对排涝能力的提升效果与该地区距离进水口的远近和所处位置的地势密切相关,地势越低、距离进水口越近的区域,其排涝能力的提升效果越显著。
- c. 与一般性排涝工程将洪涝风险转移至下游河道不同,深隧工程能够将城市洪涝水抽排至外海,可直接消除局部地区的洪涝风险,不会对城市河道和流域河道造成威胁。

参考文献:

[1] 张建云,宋晓猛,王国庆,等.变化环境下城市水文学的发展与挑战:I.城市水文效应[J].水科学进展,2014,25(4):594-605. (ZHANG Jianyun, SONG Xiaomeng, WANG Guoqing, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment:I. hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014,25(4):594-605. (in Chinese))

[2] 王浩,梅超,刘家宏.海绵城市系统构建模式[J].水利学报,2017,48(9):1009-1014. (WANG Hao,MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2017,48(9): 1009-1014. (in Chinese))

[3] 李超超,程晓陶,申若竹,等.城市化背景下洪涝灾害新特点及其形成机理[J].灾害学,2019,34(2):57-62. (LI Chaochao,CHENG Xiaotao,SHEN Ruozhu,et al. New

characteristics and formation mechanism of flood and waterlogging disasters in the context of rapid urbanization [J]. Disaster Science, 2019, 34 (2): 57-62. (in Chinese))

[4] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等.中国城市洪涝问题及成因分析[J].水科学进展,2016,27(4):485-491. (ZHANG Jianyun,WANG Yintang,HE Ruimin,et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science,2016,27(4):485-491. (in Chinese))

[5] 陈文龙,夏军.广州“5·22”城市洪涝成因及对策[J].中国水利,2020(13):4-7. (CHEN Wenlong, XIA Jun. Analysis of causes and countermeasures of extraordinary rainstorm in 22nd, May, Guangzhou [J]. China Water Resources,2020(13):4-7. (in Chinese))

[6] 张武兴,王伟伟,姜宁,等.基于SWMM的海绵服务区低影响开发研究[J].市政技术,2022,40(9):188-192. (ZHANG Wuxing, WANG Weiwei, JIANG Ning, et al. Research on low impact development of sponge service area based on SWMM [J]. Journal of Municipal Technology,2022,40(9):188-192. (in Chinese))

[7] 陈燕,杨杰,徐家平.南京极端降水变化对低影响开发设施设计雨量的影响[J].自然灾害学报,2022,31(4):87-96. (CHEN Yan, YANG Jie, XU Jiaping. Influence of extreme precipitation changes in Nanjing on design rainfall depth of low impact development [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31 (4): 87-96. (in Chinese))

[8] 彭力,鲁莉萍.城市公园绿地低影响开发雨水系统的实践研究[J].市政技术,2022,40(6):132-136. (PENG Li, LU Liping. Study on low impact development of rainwater system in urban parks [J]. Municipal Technology,2022,40(6):132-136. (in Chinese))

[9] 刘碧云.基于低影响开发的老城区雨洪管理措施研究:以西峰区南大街片区为例[D].兰州:兰州交通大学,2022.

[10] 刘发欣,程文,刘昕,等.海绵城市建设中低影响开发的应用及研究进展[J].净水技术,2022,41(9):18-25. (LIU Faxin, CHENG Wen, LIU Xin, et al. Research progress and application of low impact development in sponge city construction [J]. Water Purification Technology,2022,41(9):18-25. (in Chinese))

[11] 舒心怡,徐宗学,叶陈雷,等.海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深流速联合分布特征[J].水资源保护,2025,41(1):76-84. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei,et al. Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities [J]. Water Resources Protection,2025,41(1):76-84. (in Chinese))

[12] 杨柳,李小英,王莹,等.海绵城市雨水调蓄设施优化设计与运行调度研究进展[J].水资源保护,2025,41

(1):140-149. (YANG Liu, LI Xiaoying, WANG Ying, et al. Research progress on optimization design and operation dispatch of rainwater storage facilities in sponge cities [J]. Water Resources Protection, 2025, 41 (1) : 140-149. (in Chinese))

[13] 李永坤, 薛联青, 邸苏闯, 等. 基于 Infoworks ICM 模型的典型海绵措施径流减控效果评估 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2020, 48 (5) : 398-405. (LI Yongkun, XUE Lianqing, DI Suchuang, et al. Evaluation of runoff reduction effect of typical sponge measures based on Infoworks ICM model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (5) : 398-405. (in Chinese))

[14] 张建云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 海绵城市建设有关问题讨论 [J]. 水科学进展, 2016, 27 (6) : 793-799. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, HU Qingfang, et al. Discussion and views on some issues of the sponage city construction in China [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (6) : 793-799. (in Chinese))

[15] 刘家宏, 王佳, 王浩, 等. 海绵城市内涝防治系统的功能解析 [J]. 水科学进展, 2020, 31 (4) : 611-618. (LIU Jiahong, WANG Jia, WANG Hao, et al. Effectiveness of urban inundation control system in sponge city construction [J]. Advances in Water Science, 2020, 31 (4) : 611-618. (in Chinese))

[16] 信春雷, 高波, 李苍松. 深埋高水位山岭隧道支护与衬砌外水压力分析 [J]. 公路交通科技, 2013, 30 (2) : 77-82. (XIN Chunlei, GAO Bo, LI Cangsong. Analysis of

external water pressure on support and lining of deep mountain tunnels below high water table [J]. Highway Transportation Technology, 2013, 30 (2) : 77-82. (in Chinese))

[17] HU Kai, WANG Junwu, WU Han. Construction safety risk assessment of large-sized deep drainage tunnel projects [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021 : 7380555.

[18] LI Pengcheng, ZHOU Shihua, CAO Jing, et al. Study on auxiliary operation control of machine learning in multiobjective complex drainage system [J]. Water Science and Technology, 2022, 85 (8) : 2277-2294.

[19] WU Haichun, HUANG Guoru, MENG Qingqiang, et al. Deep tunnel for regulating combined sewer overflow pollution and flood disaster: a case study in Guangzhou City, China [J]. Water, 2016, 8 (8) : 329.

[20] YANG Hui, TONG Xin, GOU Defei. Study on the waterlogging operation effects of InfoWorks ICM dispatching strategies [J]. E3S Web of Conferences, 2021, 228 : 01009.

[21] 梁在潮, 李泰来. 江河堤防防洪能力的风险分析 [J]. 长江科学院院报, 2001, 18 (2) : 7-10. (LIANG Zaichao, LI Tailai. Risk analysis and computation of flood control capacity for river levee [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001, 18 (2) : 7-10. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 23 编辑: 王芳)

(上接第 74 页)

[32] 张丽, 朱勇, 寻昊. 城市市政排水与水利防洪排涝标准的相容性衔接研究 [J]. 水利发展研究, 2024, 24 (8) : 31-37. (ZHANG Li, ZHU Yong, XUN Hao. Research on the compatibility and connection between urban municipal drainage and hydraulic flood control and drainage standards [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24 (8) : 31-37. (in Chinese))

[33] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 晋城市不同区域洪涝驱动要素分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2024, 60 (2) : 203-217. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Driving factors for urban flooding / waterlogging in different zones in Jincheng City [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60 (2) : 203-217. (in Chinese))

[34] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 海绵措施空间布局优化下的晋城市洪涝水深流速联合分布特征 [J]. 水资源保护, 2025, 41 (1) : 76-84. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Flood depth-flow velocity joint distribution characteristics of Jincheng City under spatial layout optimization of sponge facilities [J]. Water Resources

Protection, 2025, 41 (1) : 76-84. (in Chinese))

[35] 舒心怡, 徐宗学, 叶陈雷, 等. 考虑空间异质性特征的城市洪涝动态风险分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2024, 60 (3) : 375-385. (SHU Xinyi, XU Zongxue, YE Chenlei, et al. Dynamic risk of urban flooding / waterlogging with attention to spatial heterogeneity of the underlying surface [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2024, 60 (3) : 375-385. (in Chinese))

(收稿日期: 2024 - 09 - 24 编辑: 施业)

