

面向地铁站受淹分析的地表-地下空间耦合模拟方法

严心如^{1,2}, 卢雯珺^{1,2}, 李锦辉^{1,2}, 郑先朔^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学(深圳)广东省土木工程智能韧性结构重点实验室, 广东 深圳 518005;
2. 哈尔滨工业大学(深圳)智能土木与海洋工程学院, 广东 深圳 518005)

摘要:针对城市地下空间内涝模拟的难题,提出了地表-地下空间耦合的内涝模拟方法,对暴雨内涝下地表与地下空间进行耦合受淹分析,并以深圳市地铁为例进行了验证和压力测试。结果表明:相比仅考虑地表内涝的传统内涝模型,地表-地下空间耦合内涝模型的精度提高至 87.14%;在当前地铁口平台高度下,降雨重现期为 50、100、500、1000 a 的暴雨分别导致 8、11、16、18 个地铁口进水;若地铁口平台高度按照规范最低标准设置为超过地面高度 0.45 m,则当降雨重现期大于 100 a 时,7.91%的地铁口无法满足防涝要求。

关键词:城市内涝;地表-地下空间耦合;压力测试;地铁;深圳市

中图分类号:TV122 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)06-0042-10

Surface-underground space coupling simulation method for subway station flooding analysis//YAN Xinru^{1,2}, LU Wenjun^{1,2}, LI Jinhui^{1,2}, ZHENG Xianshuo^{1,2}(1. *Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent and Resilient Structures for Civil Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518005, China*; 2. *School of Intelligent Civil and Marine Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518005, China*)

Abstract: Aiming at the difficult problem of urban underground space waterlogging simulation, the surface-underground space coupling waterlogging simulation method was put forward, the coupled flooding of surface and underground space under rainstorm waterlogging was analyzed, and an example verification and pressure tests in Shenzhen City subway were carried out. The results show that compared to the traditional waterlogging model that only considers surface waterlogging, the accuracy of the surface-underground space coupling waterlogging model has been improved to 87.14%. It was found that under the current platform height of the subway entrance, the rainstorm with rainfall return periods of 50, 100, 500, and 1000 a caused water ingress at 8, 11, 16, and 18 subway entrances, respectively. If the platform height of the subway entrance is set to exceed the ground height by 0.45 m according to the minimum standard of the specifications, 7.91% of the subway entrances cannot meet the flood prevention requirements when the rainfall recurrence period is greater than 100 a.

Key words: urban waterlogging; surface-underground space coupling; stress test; subway; Shenzhen City

近年来,全球气候变化导致极端降雨事件频发,城市内涝风险不断升级^[1-5]。随着城镇化的推进,以地铁为代表的地下空间开发扩大了暴雨内涝的影响范围,导致内涝风险从地表向地下转移。例如,2021 年郑州“7·20”特大暴雨引发了严重的城市内涝,积水灌入地铁隧道导致 5 号线一列车被洪水围困,造成 14 人死亡^[6];2021 年 9 月 1 日,飓风“艾达”侵袭美国纽约并带来突发暴雨,造成纽约 28 个地铁站遭遇井喷式洪水的倒灌,纽约地铁全线停运^[7];2023 年深圳“9·7”特大暴雨造成地铁与地下商城严重内涝、地下系统设备进水损坏,部分地铁站

在雨停一周后仍处于关闭状态,造成了严重的社会经济损失^[8]。城市暴雨内涝的研究早已引起了国内外学者的广泛关注^[9-16],目前研究主要集中于地表^[17-21],包括地表径流、土地利用类型、淹没水深等方面,对城市地下空间内涝的研究相对较少^[22-23]。部分学者尝试通过开发新的水文水动力模型,实现对地下空间的内涝模拟,但地下空间的复杂性、地下水与地表水的耦合性、地下与地表空间平面位置的重叠性为地下空间内涝模拟带来极大挑战。例如, Han 等^[24]将地下商场、地铁等地下空间概化为蓄水节点,采用明渠流与经验堰流公式模拟地下空间洪

基金项目:国家自然科学基金重点项目(52239008);深圳市科技重大专项(KJZD20230923114911022)

作者简介:严心如(2000—),女,硕士研究生,主要从事灾害风险分析研究。E-mail:Wyxr_HIT77mt@163.com

通信作者:李锦辉(1978—),女,教授,博士,主要从事灾害风险分析研究。E-mail:jinhui.li@hit.edu.cn

水演进过程;郭元等^[25]对地下车库采用概化蓄水池法和水力连通法两种方式建模,分析局部内涝的成因、发展和影响;李鑫月等^[26]通过降低地表高程,将地下车库概化为二维地表进行内涝过程模拟。上述研究均采用不同概化方法构建了独立的地下空间,但缺乏连通性^[27-29],也无法与地表洪水演进过程相关联,因此无法适用于大范围的地铁内涝分析。

鉴于此,本文提出一种地表-地下空间耦合的内涝模拟方法,用于实现大范围暴雨内涝下地铁受淹模拟。基于该模型分析深圳地铁在不同降雨重现期下地表与地下空间的受淹情况,识别高风险地铁口,以期为地下空间防涝排洪提供理论支持。

1 地表-地下空间耦合的内涝模拟方法

本文提出的地表-地下空间耦合内涝模拟方法主要包括地铁线网建模、地表建模、耦合计算与模型输出,具体流程见图 1。由于本文主要关注受内涝影响的地铁位置及其对地表积水的反作用,积水进入地铁隧道后的流动过程对此没有影响,因此,在构建模型时将地铁线网简化为节点和管线两个基本元素。节点元素包括开放节点和封闭节点:开放节点允许地表积水向地下流动,以模拟地铁口进水,其平面位置、底部埋深和地表高程分别由地铁经纬度、地铁站层数和地铁口平台高度决定;封闭节点不允许地表积水流入,仅用于连接截面尺寸不同的地铁管线,其平面位置、底部埋深和地表高程分别由相连的地铁管线位置、地铁管线底部埋深和对应的数字高程决定。管线元素包括矩形管线和圆形管线:不

考虑地铁站的复杂结构,根据地铁站层数及占地面积将其简化为矩形管线;将地铁区间隧道简化为连接两个地铁站的圆形管线,管线的坡度根据地铁区间隧道两端的地铁站平面位置和高程数据设置,进而实现地表与地下空间的高效耦合计算。经过实地考察调研和信息收集,将地铁站每层高度简化为 5 m,上覆土层厚度统一为 3 m,地铁口宽度统一为 3 m。

地表-地下空间耦合的内涝模型以一维地下管流模型和二维地表漫流模型为基础,同时考虑开放节点的流量交换。一维管流模型基于质量和动量守恒,其控制方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial l} = \frac{Q_{up}}{\partial l} \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (Q^2/A)}{\partial l} + gA \frac{\partial H_{ul}}{\partial l} + gAS_{fp} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $Q_{up} = \text{sign}(H_{uc} - H_{gc})S \cdot [|\max(H_{gc}, D)| - |\max(H_{uc}, D)|]^e$ 式中: l 为管道方向的距离; t 为时间; A 为管道横截面积; Q 为管道流量; Q_{up} 为通过开放节点实现的地下与地表交换流量; H_{uc} 为开放节点处地下积水深; H_{gc} 为开放节点处地表水深; S 为指数型节点流量的缩放系数; e 为指数型节点流量的指数; D 为耦合节点与周围地面的相对高度; H_{ul} 为地下管道内平均水深; S_{fp} 为管线摩阻比降。

二维地表漫流模型即为水深平均的浅水方程,用以描述水平尺度远大于垂向尺度的非定常浅水流动,其控制方程为

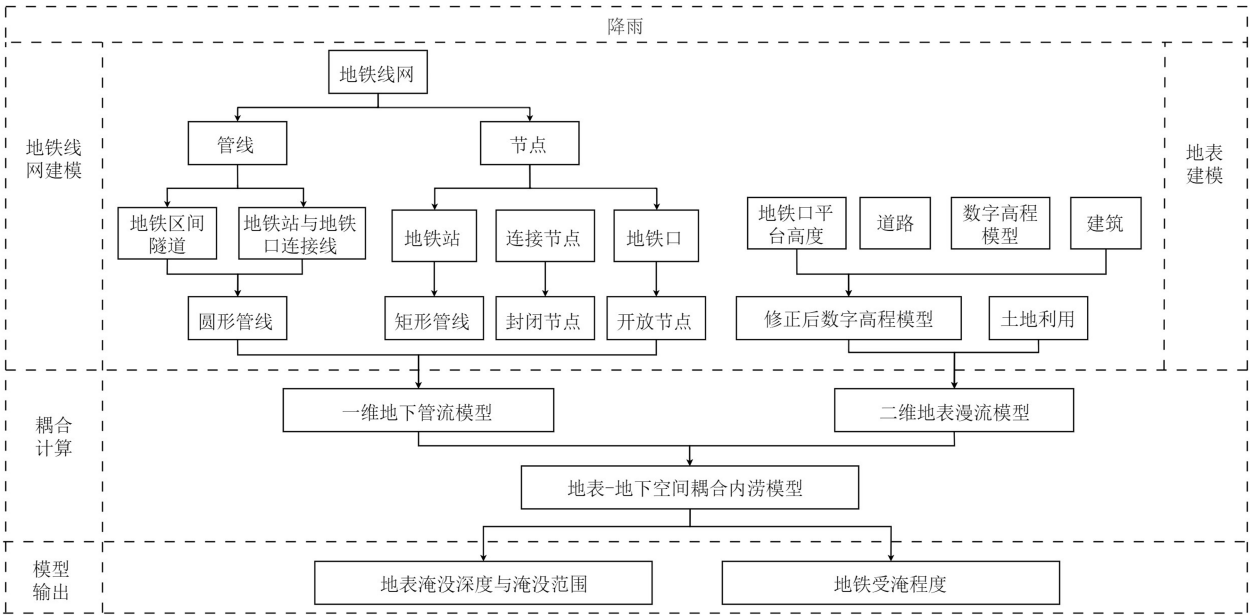


图 1 地表-地下空间耦合的内涝模拟流程
Fig. 1 Simulation process of surface-underground space coupling for waterlogging

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(v_x H_g)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y H_g)}{\partial y} = q \\ \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} = -g \left(\frac{\partial H_g}{\partial x} + S_{fx} - S_{ox} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} = -g \left(\frac{\partial H_g}{\partial y} + S_{fy} - S_{oy} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: H_g 为地表水深; S_{ox} 和 S_{oy} 分别为下垫面沿 x 和 y 方向的坡度; q 为与降雨和地表下渗速率相关的源项; S_{fx} 和 S_{fy} 分别为沿 x 和 y 方向的摩阻力, 与下垫面的曼宁系数相关。

二维地表漫流模型的计算参数主要包括地表下渗速率和地表曼宁系数, 其中下渗速率又包括自然下渗速率和等效下渗速率。本文根据不同土地利用类型, 结合研究区当地的土地渗透系数调研报告和前期研究确定自然下渗速率、地表曼宁系数。采用在道路上等效排水的方法模拟地下排水管网的排水效果, 利用研究区暴雨强度公式以及排水管网的设计重现期计算管网排水可以应对的降雨峰值强度, 根据排水管网的排水能力确定道路的等效下渗速率。

地表与地下空间洪水耦合模拟的关键在于地下网线开放节点的流量交换。本文首先利用二维模型模拟得到地表各个网格的水位、流速和流量; 其次, 在地铁线网的开放节点进行判断, 当开放节点处的地表水深大于节点高度时, 则允许地表积水进入地下, 并更新一维模型中的输入流量 Q_{up} 。等效地铁线网模型根据水力条件计算管线内的水位、流量等状况, 更新地下水流对地表水流的影响, 这个耦合过程不断迭代, 直到运行至设定时间完成全部模拟。基于上述流程, 实现一维与二维模型的耦合计算。

2 实例验证

2.1 研究区概况与暴雨过程选取

深圳截至 2024 年共开通 17 条地铁线路, 运营总里程约 595.1 km, 覆盖全市 9 个行政区。选取的实例验证研究区包括罗湖区、龙岗区和部分福田区, 总面积 136.48 km² (图 2)。2023 年“9·7”特大暴雨打破了深圳 1952 年有气象记录以来 7 项历史极值, 地铁 16 号线、1 号线出现内涝, 地下商城遭到严重水浸, 地下系统设备进水损坏, 因此利用该次暴雨过程对提出的地表-地下空间耦合内涝模拟方法进行验证, 并与传统不考虑地下空间的地表漫流内涝模型进行对比。暴雨过程从 9 月 7 日 17 时至 9 月 8 日 17 时, 降雨历时为 24 h。研究区有东晓街道、清水河街道、翠竹街道、东门街道、笋岗街道、莲塘街道、

桂园街道、东湖街道 9 个街道自动雨量站。

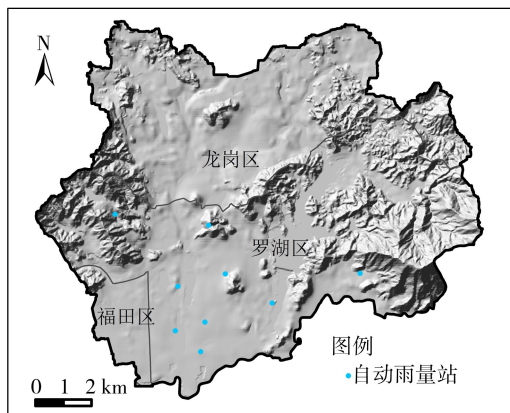


图 2 研究区概况

Fig. 2 Overview of study area

2.2 数据来源

构建模型需要空间数据和降雨数据。空间数据包括建筑矢量数据、道路矢量数据、地铁口和地铁线矢量数据、土地利用数据、数字高程数据以及地铁口平台高度数据。其中, 建筑矢量数据、道路矢量数据、地铁口和地铁线矢量数据来源于天地图、政府数据开放平台、OpenStreetMap; 土地利用数据来源于 GlobeLand30、Yang 等^[30]的研究成果; 数字高程数据来源于地理空间数据云、国家基础地理信息中心、商业卫星。降雨数据来源于 9 个自动雨量站、当地政府数据开放平台、气象局等。将 9 个自动雨量站的降水量平均值作为研究区降水量, 进而得到研究区降雨过程线和降雨强度 (图 3)。

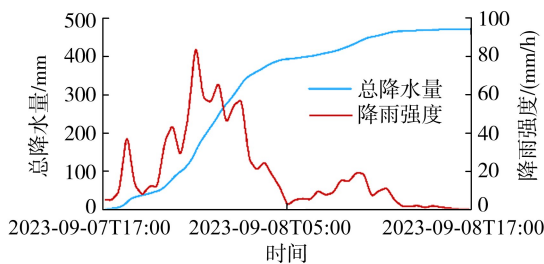
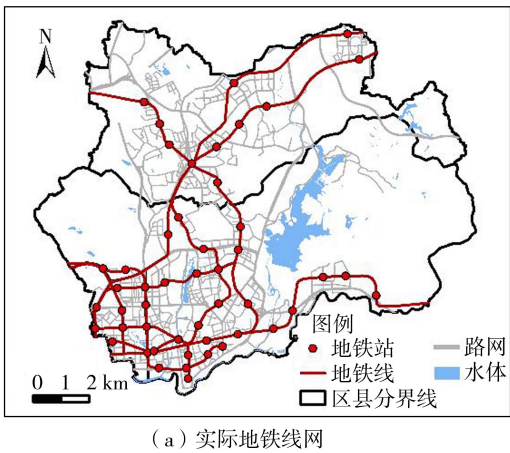


图 3 深圳“9·7”特大暴雨降雨过程线和降雨强度

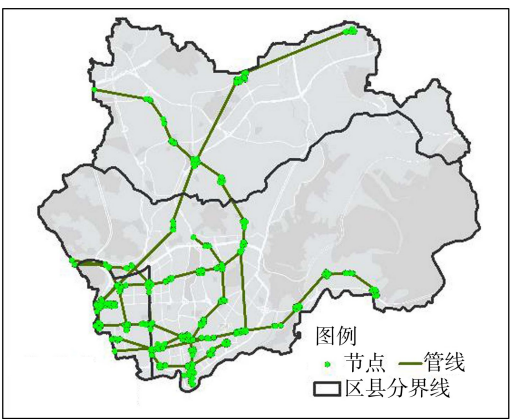
Fig. 3 Rainfall hydrograph and rainfall intensity of “9·7” extremely heavy rainstorm in Shenzhen

2.3 地铁线网概化

根据研究区内地铁站和地铁线相关数据, 对数据做初步处理, 得到实际地铁线网, 如图 4(a) 所示。为了提高计算效率, 未考虑不受内涝影响的地铁线高架段及其对应地铁口以及置于建筑内部的地铁口, 并将弯曲复杂的地铁线简化为直线。基于地铁线概化方法, 确定所有节点和管线的底部埋深、顶部高程, 得到概化后的等效地铁线网, 共 8 条地铁线、49 个地铁站、215 个地铁口, 如图 4(b) 所示。



(a) 实际地铁线网



(b) 等效地铁线网

图 4 研究区实际地铁线网和等效地铁线网

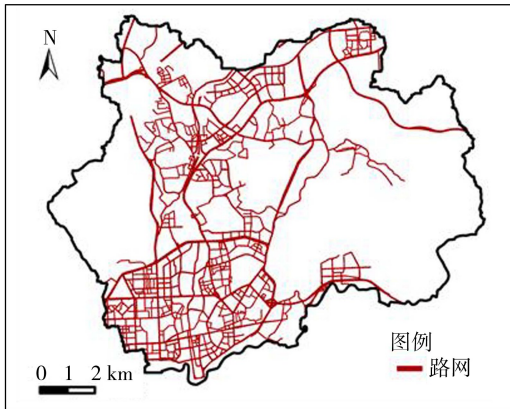
Fig. 4 Actual subway network and equivalent subway network in study area

2.4 地表二维漫流模型构建

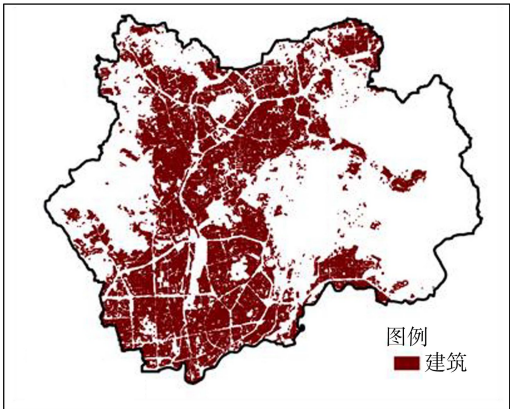
利用软件 MIKE21 构建二维漫流模型。区域原始数字高程数据的分辨率为 6 m, 经过投影、重采样和边界处理转化至研究区内, 将建筑、道路、地铁口矢量数据和土地利用数据转化为栅格数据 (图 5(a)~(c))。将地铁口高度叠加至数字高程数据上得到地铁口高程, 依据《深圳市道路设计标准》高程进行处理, 并依据刘子龙等^[31]的方法进行地表数字高程处理, 将道路高程减小 0.15 m 以使地面雨

水流入道路的篦子和检查井, 最后将修正的数字高程数据 (图 5(d)) 用于建立耦合模型。结合黄晖等^[32-33]的研究和道路上等效排水的方法确定不同土地利用类型的计算参数 (表 1)。

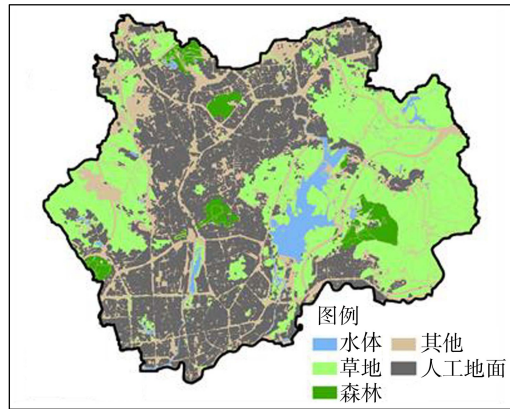
深圳市采用 P-Ⅲ 分布曲线拟合和最小二乘法得到的分流域暴雨强度公式表, 由于深圳市中心城区排水管网设计重现期为 5 年一遇, 可得研究区暴雨强度为 68.52 mm/h。按照等量原则, 将该部分管网排水效果量化等效为道路下渗过程, 得到等效下



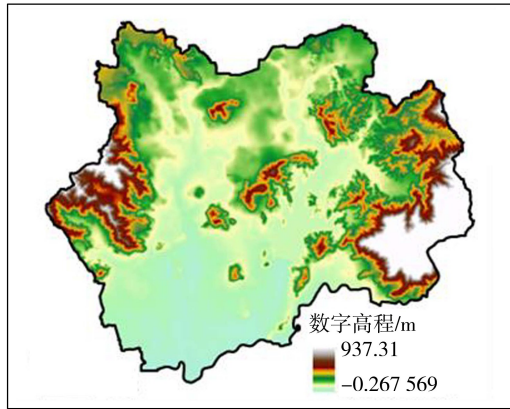
(a) 路网数据



(b) 建筑数据



(c) 土地利用类型



(d) 修正后的数字高程

图 5 地表二维漫流模型数据集

Fig. 5 Two-dimensional surface flood model dataset

渗速率为 68.52 mm/h。

表 1 不同土地利用类型的参数

Table 1 Parameters for different land use types				
土地利用类型	自然下渗速率/(mm/h)	等效下渗速率/(mm/h)	总下渗速率/(mm/h)	曼宁系数
林地	80.0	0	80.00	0.07
草地	40.0	0	40.00	0.04
建筑	1.1	0	1.10	0.03
道路	0	68.52	68.52	0.25
裸地	30.0	0	30.00	0.03

2.5 地表淹没深度

运行地表-地下空间耦合的内涝模型,得到研究区地表最大淹没深度云图(图 6),图中标注的黄色点位为罗湖区建设路、深南东路、东门老街、红岭中路、红岭南路等 6 处比较严重的积水点。分别提取该 6 处积水点地表-地下空间耦合内涝模型和传统内涝模型的模拟水深,与实际淹没深度对比,结果如表 2 所示。积水点的实际淹没深度数据通过实地调研、灾害现场报道、图片和视频并结合图中的路障、行人和车辆淹没高度得到。由表 2 可见,地表-地下空间耦合的内涝模型的模拟水深相对误差在 13% 以内,传统内涝模型的模拟水深相对误差约 20%,说明地表-地下空间耦合的内涝模型具有更好的精度。建设路、深南东路、红岭中路、红岭南路周围的地铁口不存在进水现象,因此两个模型的地表淹没深度相差较小。然而,东门老街范围内有 3 个地铁口出现了进水现象,地表淹没深度因部分积水流入地下空间而减小,而传统内涝模型没有考虑进入地下空间的水流量,因此耦合模型精度提高了 12%。

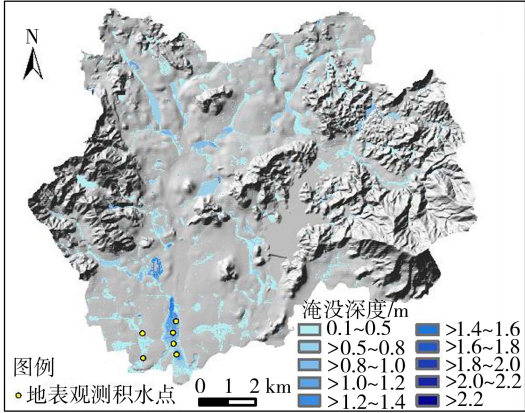


图 6 研究区地表最大淹没深度云图

Fig. 6 Surface maximum submergence depth cloud map of study area

2.6 地铁口受淹程度

提取所有地铁口所在栅格的淹没水深与地铁口平台高度进行对比,将淹没水深大于平台高度的地铁口定义为高风险地铁口。根据地表-地下空间耦合内涝模型模拟结果,共有 9 个高风险地铁口,分别

表 2 各积水点模型模拟水深与实际淹没深度对比

Table 2 Comparison between model simulated water depth and actual submergence depth of each water accumulation point

地点	实际淹没深度/m	模拟水深/m		相对误差/%	
		地表-地下空间耦合内涝模型	传统内涝模型	地表-地下空间耦合内涝模型	传统内涝模型
建设路	0.52	0.51	0.50	0.87	3.44
深南东路	0.75	0.70	0.69	7.20	8.00
红岭中路	0.50	0.51	0.51	1.60	1.60
红岭南路	0.35	0.39	0.38	12.86	8.57
建设路地铁口	0.44	0.49	0.50	11.59	13.68
东门老街	0.60	0.65	0.72	8.00	20.00

为老街站 1、2、B、C 口、长龙站 A 口、布吉站东 2 口、笋岗站 C₁、E、D 口。根据深圳市防汛防旱防风指挥部办公室发布的公告^[34],2023 年深圳“9·7”特大暴雨过程中,地铁 1 号线岗厦至罗湖、3 号线福保至水贝、5 号线布心至黄贝岭等区段由于积水较深而暂停服务。本次模拟中的高风险地铁口老街站 1、2、B、C 口位于地铁 1 号线岗厦至罗湖区段,长龙站 A 口在 5 号线相应区段附近,布吉站东 2 口位于 3 号线关闭服务区段。模拟中的 6 个高风险地铁口与实际情况一致,笋岗站 3 个高风险地铁口并未在地铁关闭服务公告中。

利用淹没水深时程曲线进行进一步分析,选取地铁口平台高度分别为 0、0.15、0.45、0.60 m 的老街站 C 口、长龙站 A 口、笋岗站 C₁ 口、笋岗站 E 口绘制地铁口淹没水深时程曲线,并对比地表-地下空间耦合内涝模型与传统内涝模型的模拟结果,如图 7 所示。由图 7 可见,地表-地下空间耦合内涝模型的结果显示淹没水深在超越地铁口平台高度后迅速达到峰值并平稳下降;传统内涝模型的结果中淹没深度在超越地铁口平台高度后仍持续上升,峰值淹没水深远高于平台高度。由于传统内涝模型无法考虑地铁进水,因此在地铁口附近其淹没水深远大于地铁口平台高度。而地表-地下空间耦合内涝模型在地铁口处设置了开放节点,当淹没水深大于地铁口平台高度时,部分积水流入地下并连通扩散,从而维持地铁口淹没水深,更准确地模拟了地表内涝。值得注意的是,在笋岗站 C₁ 口和 E 口,地表-地下空间耦合内涝模型结果显示其积水深度刚刚达到实际地铁口高度,通过防汛沙袋等措施即可防止积水进入地铁站内。

3 压力测试

3.1 实际地铁口平台高度下的淹没深度

基于 2023 年深圳“9·7”特大暴雨降雨过程

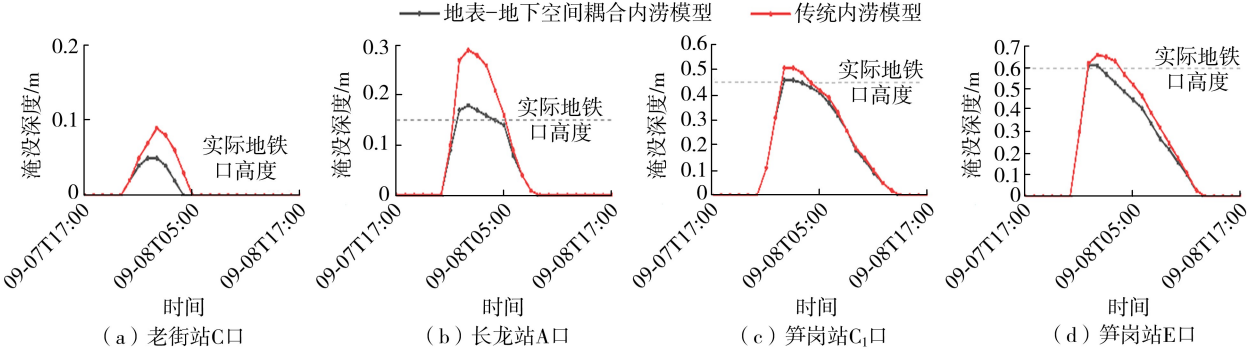


图 7 地铁口淹没水深时程曲线

Fig. 7 Time history curve of submerged water depth at subway entrance

线,采用放大系数法拟合得到重现期 P 分别为 50、100、500、1 000 a 的降雨过程线 (图 8)。运行地表-地下空间耦合的内涝模型,得到不同降雨重现期下的地表最大淹没深度和高风险地铁口分布情况 (图 9)。由图 9 可见,随着降雨重现期的增大,地表淹没范围增加后保持稳定,但最大淹没深度持续增大,高风险地铁口的数量也逐渐增加。

不同降雨重现期下,提取每个地铁口所在栅格的地表淹没深度,结合地铁口实际平台高度判断是否存在进水可能性 (表 3)。研究区内共有 215 个地

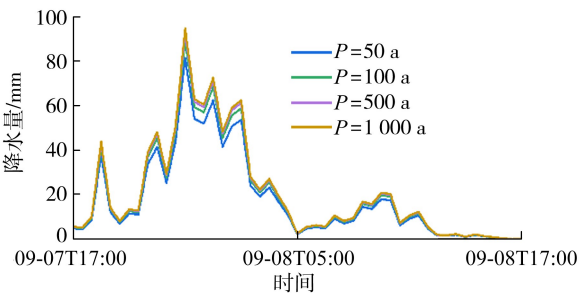


图 8 不同重现期降雨过程线

Fig. 8 Rainfall process lines with different return periods

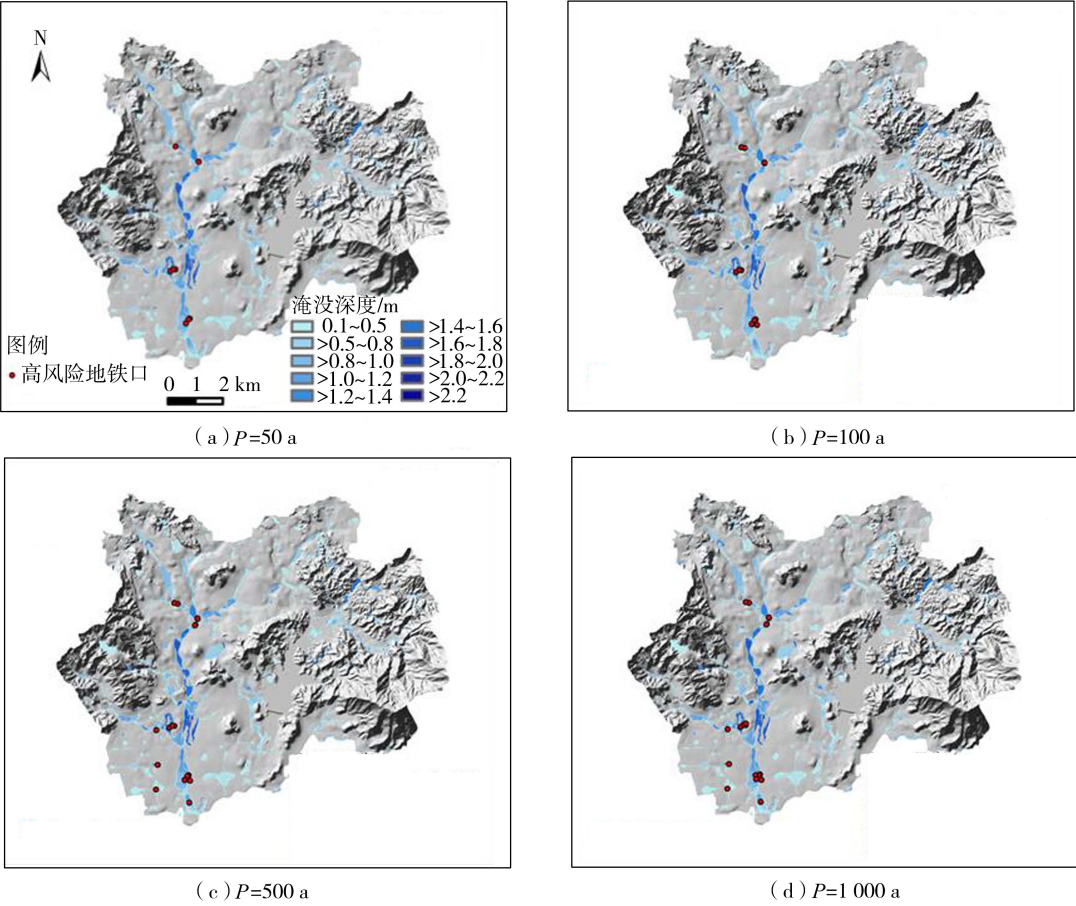


图 9 不同降雨重现期的地表最大淹没深度云图和高风险地铁口

Fig. 9 Surface maximum submergence depth cloud map and high-risk subway entrances under different rainfall return periods

表 3 不同降雨重现期下地铁口淹没情况

Table 3 Inundation situation at subway entrances under different rainfall return periods

地铁口	地铁口平台高度/m	不同降雨重现期下的淹没深度/m			
		$P=1\,000\text{ a}$	$P=500\text{ a}$	$P=100\text{ a}$	$P=50\text{ a}$
老街站 1 口	0	+0.14	+0.10	+0.07	+0.04
老街站 2 口	0	+0.17	+0.13	+0.10	+0.05
老街站 G 口	0.30	+0.06	-0.02	-0.06	-0.08
老街站 B 口	0.15	+0.15	+0.14	+0.10	0.00
老街站 C 口	0	+0.14	+0.11	+0.08	+0.03
长龙站 C ₂ 口	0.45	+0.11	+0.09	+0.02	-0.07
长龙站 A 口	0.15	+0.12	+0.07	+0.05	+0.03
布吉站东 1 口	0.45	+0.11	+0.08	+0.05	-0.09
布吉站东 2 口	0	+0.15	+0.12	+0.09	+0.04
布吉站 D ₂ 口	0.30	+0.05	+0.03	-0.01	-0.14
布吉站 D ₁ 口	0.30	+0.11	+0.08	0.00	-0.05
红岭站 C ₁ 口	0.45	+0.17	+0.10	-0.03	-0.04
红岭南站 A 口	0.15	+0.06	+0.02	-0.03	-0.06
人民南站 D 口	0.30	+0.05	+0.02	-0.02	-0.10
红岭北站 G 口	0.45	+0.04	0.00	-0.05	-0.06
笋岗站 C ₁ 口	0.45	+0.15	+0.11	+0.05	+0.02
笋岗站 E 口	0.60	+0.12	+0.08	+0.06	+0.03
笋岗站 D 口	0.30	+0.11	+0.10	+0.07	+0.03

注：“+”表示地铁口淹没深度高于地铁口平台高度，“-”表示地铁口淹没深度低于地铁口平台高度。

铁口,存在进水风险的地铁口主要分布在老街、长龙、布吉、笋岗、红岭、红岭南、人民南和红岭北 8 个地铁站。降雨重现期为 50 a 时,有 8 个高风险地铁口,最大淹没深度超过地铁口平台高度 0.05 m;降雨重现期为 100 a 时,有 11 个高风险地铁口,最大淹没深度超过地铁口平台高度 0.10 m;降雨重现期为 500 a 时,有 16 个高风险地铁口,最大淹没深度超过地铁口平台高度 0.14 m;降雨重现期为 1 000 a 时,有 18 个高风险地铁口,最大淹没深度超过地铁口平台高度 0.17 m。不同降雨重现期下最大的超过平台淹没深度均出现在老街站,究其原因,老街站修建时间较早,36%地铁口平台高度为 0,72%地铁口平台高度小于 0.45 m;老街地铁站位于道路交叉口、东门步行街,地势低洼,易汇聚积水。

GB50157—2013《地铁设计规范》和 SJG162—2024《深圳市工程建设标准-城市地下空间防涝技术指导》,地铁口平台高度应大于 0.45 m,但不宜大于 0.90 m,且不应低于淹没水位以上 0.15 m。罗湖区部分地铁站的修建时间为 2000—2010 年,早于规范颁布时间,这些地铁口的平台高度设计已无法适应当前气候变化后的极端强降雨。

3.2 规范规定地铁口平台高度下的淹没深度

由地表-地下空间耦合的内涝模型模拟结果可知 67%高风险地铁口平台高度小于 0.45 m。根据

若研究区内的地铁口平台高度全部满足规范要求,分析此时降雨重现期为 500 a 时地铁口的淹没水深。通过调整等效地铁线网模型中的节点高程,建立所有地铁口平台高度均为 0.45 m 的地表-地下空间耦合内涝模型,模拟得到地铁口淹没水深。提取所有地铁口所在栅格的模拟水深,绘制调整至规范规定平台高度的淹没水深时程曲线(图 10),并与实际情况进行对比。若老街站 C 口的平台高度从 0 增加至 0.45 m,其淹没水深时程曲线始终低于地铁

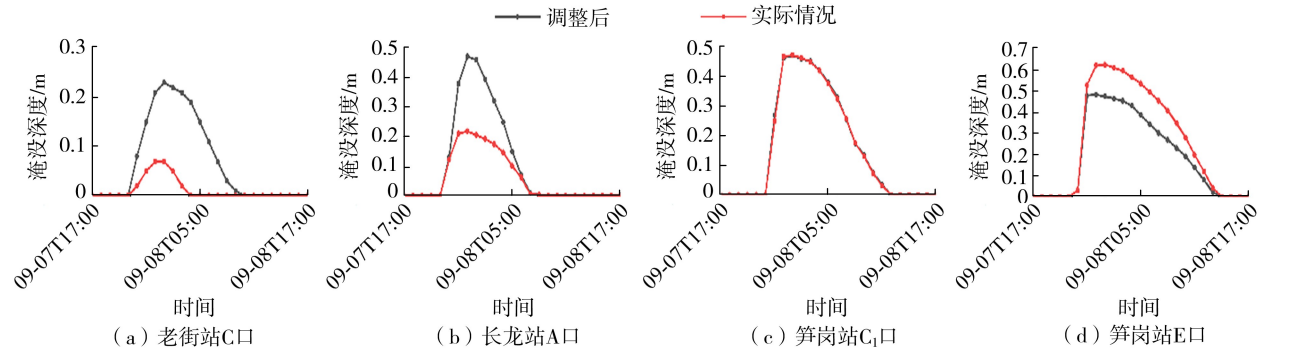


图 10 降雨重现期为 500 a 时不同地铁口淹没水深时程曲线

Fig. 10 Time history curves of different submerged water depths at subway entrances under 500 a rainfall return period

口可以避免进水风险,此时街道的最大淹没水深增加。若长龙站 A 口平台高度为 0.45 m,其最大淹没水深依然大于 0.45 m,说明此地铁口还有进水风险,但进水持续时间明显缩短,表明该地铁口仍需要采取进一步措施以防止地铁受淹。若笋岗站 E 口的平台高度从 0.60 m 减小至 0.45 m,则此地铁口进水持续时间延长,从而增加了该地铁口的内涝风险。上述分析表明,在最低规范高度的设计下长龙站 A 口、笋岗站 C₁ 口、笋岗站 E 口无法规避降雨重现期为 500 a 的暴雨内涝风险。

分析当地铁口平台高度分别为 0.45 m 和 0.90 m 时,不同降雨重现期下地铁口淹没水深范围占比情况,结果如表 4 所示。统计所有地铁口淹没水深模拟数据的分位数,与理论分布的分位数进行比较,分析得到地铁口淹没水深满足 $\alpha=0.3877$, $\beta=0.46873$ 的 Gamma 分布。基于 Gamma 分布,计算各地铁口淹没水深的均值、方差,得到地铁口平台高度分别为 0.45 m、0.90 m 时的 95%地铁口淹没水深低于平台的高度 $H_{95\%}$ 。绘制不同降雨重现期下所有地铁口淹没水深散点图以及 $H_{95\%}$ 曲线;为满足规范中“地铁口平台不应低于淹没水位以上 0.15 m”的规定,增加了高于淹没水位 0.15 m 的曲线,如图 11 所示。由图 11(a)可见,当地铁口平台高度为 0.45 m、降雨重现期分别为 50、100、500、

1 000 a 时, $H_{95\%}$ 分别为 0.24、0.32、0.38、0.40 m,均位于地铁口平台以下,说明该平台高度在不同降雨重现期下,95%的地铁口进水风险很低。对整个研究区而言,规范规定的最小地铁口平台高度可以规避大多数地铁口进水的风险。但是若以规范规定的地铁口平台高度应高于淹没水位 0.15 m 的标准,重现期为 100、500、1 000 a 条件下,无法实现 95%地铁口平台高度达到规范要求。由图 11(b)可见,当地铁口平台高度为 0.90 m、降雨重现期分别为 50、100、500、1 000 a 时, $H_{95\%}$ 分别为 0.27、0.35、0.41、0.45 m,不同降雨重现期下所有地铁口淹没水深均在 0.90 m 以下,且能满足地铁口平台高度应高于淹没水位 0.15 m 的要求。因此当地铁口平台高度设置为规范规定上限时,研究区内所有地铁口均能规避进水风险。

3.3 建议

由模拟结果可知,降雨重现期大于 100 a 时,至少 7.91%的地铁口平台高度无法满足高于淹没水位 0.15 m 的规范要求。根据地铁口台阶尺寸规格和大于淹没水位 0.15 m 水深统计值,建议将老街站 1、2、B、G 口的平台高度分别设为 0.75、0.75、0.60、0.60 m,长龙站 A 口平台高度设为 0.75 m,布吉站东 2、D₁ 口平台高度设为 0.75、0.60 m,笋岗站 D 口

表 4 不同情况下地铁口淹没水深范围占比

淹没水深范围/m	不同平台高度、降雨重现期下地铁口淹没水深范围占比/%							
	$P=50\text{ a}$		$P=100\text{ a}$		$P=500\text{ a}$		$P=1\,000\text{ a}$	
	0.45 m	0.90 m	0.45 m	0.90 m	0.45 m	0.90 m	0.45 m	0.90 m
0~0.1	86.98	86.05	82.79	82.33	81.86	82.79	80.93	82.30
>0.1~0.2	5.12	5.12	5.58	4.19	3.72	2.79	4.65	3.26
>0.2~0.3	2.79	3.26	2.79	4.19	3.71	3.72	3.72	3.72
>0.3~0.4	3.26	1.86	4.19	3.26	2.79	2.33	1.86	1.86
>0.4~0.5	0.93	2.33	2.33	3.26	3.72	2.79	3.25	1.40
>0.5~0.6	0.46	0.47	1.86	0.93	2.33	1.86	2.33	3.26
>0.6~0.7	0.46	0.93	0.47	0.47	1.40	2.33	2.79	1.40
>0.7~0.8	0	0	0	1.40	0.47	0.47	0.47	1.40
>0.8~0.9	0	0	0	0	0	0.93	0	1.40

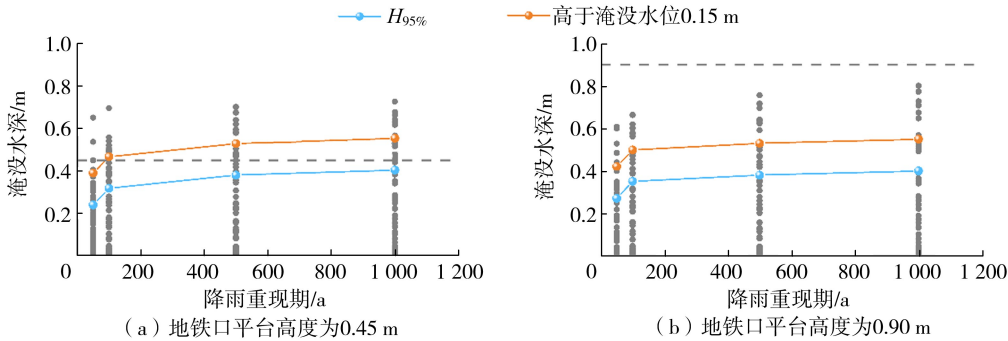


图 11 不同地铁口平台高度下淹没水深散点图及 $H_{95\%}$ 曲线

Fig. 11 Scatter plot of submerged water depth at different platform heights of subway entrances and $H_{95\%}$ curve

平台高度设为 0.75 m。运行地表-地下空间耦合的内涝模型,得到不同降雨重现期下地铁口的淹没水深,如表 5 所示。可见,此时地铁口淹没水深都没有超过平台高度,可保证高风险地铁口规避进水风险。

表 5 地铁口平台建议高度

Table 5 Recommended elevation for subway entrance platforms

地铁口	地铁口淹没水深/m				地铁口平台建议高度/m
	P=1 000 a	P=500 a	P=100 a	P=50 a	
老街站 1 口	0.63	0.58	0.51	0.41	0.75
老街站 2 口	0.63	0.58	0.50	0.30	0.75
老街站 G 口	0.53	0.48	0.35	0.22	0.60
老街站 B 口	0.46	0.42	0.31	0.19	0.60
长龙站 A 口	0.54	0.51	0.49	0.34	0.75
布吉站东 2 口	0.74	0.70	0.58	0.45	0.75
布吉站 D ₁ 口	0.46	0.43	0.35	0.23	0.60
笋岗站 D 口	0.68	0.68	0.56	0.54	0.75

4 结 论

a. 基于地铁线网概化建立的地表-地下空间耦合的内涝模型实现了地表水通过开放节点流入地下空间的空间耦合,能够准确模拟地铁口受淹程度,模型模拟精度提高至 87.14%。

b. 当降雨重现期为 50 a 时,研究区 8 个地铁口存在进水风险,分布在老街、长龙、布吉、笋岗、红岭、红岭南、人民南和红岭北地铁站。当降雨重现期分别为 100、500、1 000 a 时,高风险地铁口数量则分别增加至 11、16、18 个。

c. 若地铁口平台高度按照规范最低标准设置为超过地面高度 0.45 m,当降雨重现期大于 100 a 时,部分地铁口无法满足平台高度高于淹没水位 0.15 m 的要求;若地铁口平台高度按照规范规定最高标准设置为超过地面高度 0.90 m,则所有地铁口均能规避进水风险。综合考虑内涝风险和经济效益,建议将老街站 1、2、B、G 口,长龙站 A 口,布吉站东 2、D₁ 口,笋岗站 D 口平台高度加高至 0.60~0.75 m。

参考文献:

[1] 王垚,史海匀. 粤港澳大湾区极端降雨的时空变化及其驱动因素探究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 28-37. (WANG Yao, SHI Haiyun. Exploring spatiotemporal variations and driving factors of extreme precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 28-37. (in Chinese))

[2] 张晨钰,王伟,黄莉,等. 高度城镇化背景下深圳市易涝点驱动因子分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(2): 35-45. (ZHANG Chenyu, WANG Wei, HUANG Li, et al. Analysis of driving factors for waterlogging points in Shenzhen City under high urbanization background[J].

Water Resources Protection, 2024, 40 (2): 35-45. (in Chinese))

[3] 王浩,王佳,刘家宏,等. 城市水循环演变及对策分析[J]. 水利学报, 2021, 52(1): 3-11. (WANG Hao, WANG Jia, LIU Jiahong, et al. Analysis of urban water cycle evolution and countermeasures [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(1): 3-11. (in Chinese))

[4] 陈晓宏,罗佳颖,罗丹. 粤港澳大湾区极端降水的气温响应结构研究[J]. 水力发电学报, 2023, 42(12): 1-13. (CHEN Xiaohong, LUO Jiaying, LUO Dan. Temperature response structure of precipitation extremes in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2023, 42 (12): 1-13. (in Chinese))

[5] 舒章康,李文鑫,张建云,等. 中国极端降水和高温历史变化及未来趋势[J]. 中国工程科学, 2022, 24(5): 116-125. (SHU Zhangkang, LI Wenxin, ZHANG Jianyun, et al. Historical changes and future trends of extreme precipitation and high temperature in China [J]. Engineering Sciences, 2022, 24 (5): 116-125. (in Chinese))

[6] 张孝奎,冯立超,崔晓莉. 郑州“7·20”暴雨情景下城市韧性内涝防治体系构建研究:以福州滨海新城核心区为例[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 79-83. (ZHANG Xiaokui, FENG Lichao, CUI Xiaoli. Study on urban resilient waterlogging control system under 7·20 rainstorm in Zhengzhou: core area of Fuzhou Binhai new town[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2): 79-83. (in Chinese))

[7] 卢文刚,廖泽舜. 城市突发极端暴雨灾害风险防范与应急处置研究:以美国“艾达”飓风事件为例[J]. 中国应急救援, 2024(5): 50-57. (LU Wengang, LIAO Zeshun. Research on risk prevention and emergency response of urban sudden extreme rainstorm disaster: taking Hurricane Ida in the United States as an example [J]. China Emergency Rescue, 2024(5): 50-57. (in Chinese))

[8] 卢陈,胡晓张,吴尧,等. 深圳河流域 2023 年“9·7”极端特大暴雨分析及洪涝治理思考[J]. 中国防汛抗旱, 2024, 34(1): 24-28. (LU Chen, HU Xiaozhang, WU Yao, et al. Analysis of “9·7” extraordinary rainstorm in 2023 in the Shenzhen River Watershed and thinking of flood strategies[J]. China Flood & Drought Management, 2024, 34(1): 24-28. (in Chinese))

[9] AMIRI A, SOLTANI K, EBTEHAJ I, et al. A novel machine learning tool for current and future flood susceptibility mapping by integrating remote sensing and geographic information systems[J]. Journal of Hydrology, 2024, 632: 130936.

[10] 赖成光,廖耀星,王兆礼. 不同暴雨情景下的城市内涝响应特征分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(3): 101-108. (LAI Chengguang, LIAO Yaoxing, WANG Zhaoli. Analysis

- of urban waterlogging response characteristics under different rainstorm rainfall scenarios[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):101-108. (in Chinese))
- [11] 卢兴超,徐宗学,李永坤,等. 基于多智能体模型的城市洪涝灾害动态风险评估[J]. 水资源保护,2024,40(4):36-47. (LU Xingchao, XU Zongxue, LI Yongkun, et al. Assessment on dynamic risk of urban flooding and waterlogging disaster based on multi-agent models [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(4): 36-47. (in Chinese))
- [12] 黄亦轩,徐宗学,陈浩,等. 深圳河流域内陆侧洪涝风险分析[J]. 水资源保护,2023,39(1):101-108. (HUANG Yixuan, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis on flood/waterlogging risk at inland side of the Shenzhen River Basin[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 101-108. (in Chinese))
- [13] 张之琳,邱静,程涛,等. 粤港澳大湾区城市洪涝问题及其分析[J]. 水利学报,2022,53(7):823-832. (ZHANG Zhilin, QIU Jing, CHENG Tao, et al. Urban flood issues and analysis in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 823-832. (in Chinese))
- [14] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护,2020,36(6):1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(6): 1-6. (in Chinese))
- [15] 刘智勇,陈晓宏,林凯荣,等. 极端降水影响下粤港澳大湾区城市洪涝人口暴露度预估[J]. 中国水利,2024(13):34-38. (LIU Zhiyong, CHEN Xiaohong, LIN Kairong, et al. Estimation of population exposure to urban flooding in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area under extreme rainfall[J]. China Water Resources, 2024(13): 34-38. (in Chinese))
- [16] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展,2025,45(1):1-9. (XU Zongxue, LU Xingchao, SHI Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))
- [17] 徐冰,雷晓辉,王昊,等. 基于SWMM模型的沿海城市内涝模拟研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2019,17(3):211-218. (XU Bing, LEI Xiaohui, WANG Hao, et al. Research on urban flooding simulation in a coastal city based on SWMM model[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2019, 17(3): 211-218. (in Chinese))
- [18] 梅超,陈宇枫,刘家宏,等. 基于情景模拟的城市内涝对道路交通的影响评估[J]. 水资源保护,2022,38(6):31-38. (MEI Chao, CHEN Yufeng, LIU Jiahong, et al. Impact assessment of urban waterlogging on road traffic based on scenario simulation [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(6): 31-38. (in Chinese))
- [19] 黄国如,陈文杰,喻海军. 城市洪涝水文水动力耦合模型构建与评估[J]. 水科学进展,2021,32(3):334-344. (HUANG Guoru, CHEN Wenjie, YU Haijun. Construction and evaluation of an integrated hydrological and hydrodynamics urban flood model[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(3): 334-344. (in Chinese))
- [20] 程晓陶,刘昌军,李昌志,等. 变化环境下洪涝风险演变特征与城市韧性提升策略[J]. 水利学报,2022,53(7):757-768. (CHENG Xiaotao, LIU Changjun, LI Changzhi, et al. Evolution characteristics of flood risk under changing environment and strategy of urban resilience improvement [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(7): 757-768. (in Chinese))
- [21] 侯俊,陈诚,郑玉磊,等. 基于MIKE FLOOD模型的平原水网地区内涝治理效果模拟研究[J]. 水利水电科技进展,2024,44(6):41-47. (HOU Jun, CHEN Cheng, ZHENG Yulei, et al. Simulation study on effectiveness of waterlogging control in plain water network areas based on MIKE FLOOD model [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(6): 41-47. (in Chinese))
- [22] NAKASAKA Y, ISHIGAKI T. Vulnerability to mega underground inundation and evacuation assuming devastating urban flood[J]. Journal of Disaster Research, 2021, 16(3): 321-328.
- [23] SHIN E, KIM H J, RHEE D S, et al. Spatiotemporal flood risk assessment of underground space considering flood intensity and escape route[J]. Natural Hazards, 2021, 109(2): 1539-1555.
- [24] HAN K Y, KIM G, LEE C H, et al. Modeling of flood Inundation in urban areas including underground space [R]. Daegu:Kyungpook National University, 2008.
- [25] 郭元,王路瑶,陈能志,等. 极端降水下的城市地表-地下空间洪涝过程模拟[J]. 水科学进展,2023,34(2):209-217. (GUO Yuan, WANG Luyao, CHEN Nengzhi, et al. Simulation of the flood process in urban surface-underground space under extreme rainfall[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(2): 209-217. (in Chinese))
- [26] 李鑫月,侯精明,刘园,等. 基于一维二维耦合水动力模型的极端暴雨下地下空间洪水过程模拟[J]. 水动力学研究与进展 A 辑,2024,39(3):434-441. (LI Xinyue, HOU Jingming, LIU Yuan, et al. Underground space flood process under extreme rainstorm based on a one-dimensional and two-dimensional hydrodynamic coupling model[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2024, 39(3): 434-441. (in Chinese))

(下转第 65 页)

hydrologic prediction model based on phase-space reconstitution [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006,37(5):583-587. (in Chinese))

[35] 徐建新,郝志斌,蒋晓辉,等. 区域水资源系统动力学特征分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 519-524. (XU Jianxin,HAO Zhibin, JIANG Xiaohui, et al. Analysis of dynamic characteristics for the regional water resources system[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 519-524. (in Chinese))

[36] 何中政,迟英凡,王超,等. 考虑时间序列特征的水资源耦合系统有序度评价方法研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(5): 51-60. (HE Zhongzheng, CHI Yingfan, WANG Chao, et al. Study on evaluation of order degree of water resources coupling system considering time series characteristics [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(5): 51-60. (in Chinese))

[37] 杨舒媛,张晓昕,魏保义,等. 北京市滨水空间环境品质提升的潜力分析探索[J]. 水利学报, 2024, 55(8): 931-941. (YANG Shuyuan, ZHANG Xiaoxin, WEI Baoyi, et al. Analysis and exploration on the potentiality of waterfront environment quality improvement in Beijing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(8): 931-941. (in Chinese))

[38] 赵勇,何凡,何国华,等. 国家水网规划建设十点认识与思考[J]. 中国水利, 2023(14): 24-33. (ZHAO Yong, HE Fan, HE Guohua, et al. Ten insights and reflections on the planning and construction of the national water network [J]. China Water Resources, 2023(14): 24-33. (in Chinese))

[39] 刘奕汝,杨培涛. 区域森林生态-自然-经济-社会复合系统的耦合协调度:以长沙市为例[J]. 林业科学, 2023, 59(9): 139-146. (LIU Yiru, YANG Peitao. Coupling coordination degree of regional forest ecological-nature-economy-society complex system;a case study in Changsha [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(9): 139-146. (in Chinese))

(收稿日期:2025-04-09 编辑:王芳)

+++++

(上接第 51 页)

[27] 刘宏伟,储少志,蔡钊,等. 极端暴雨洪水条件下厂区不同排水方案的防洪能力模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(3): 30-39. (LIU Hongwei, CHU Shaozhi, CAI Zhao, et al. Simulation study on flood control capacity of different drainage schemes in factory area under extreme rainstorm flood conditions[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(3): 30-39. (in Chinese))

[28] 张旭旻,陈颖冰,李永坤,等. 雨量数据缺失条件下基于实测流量的北京市“23·7”极端暴雨降水反演[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(6): 38-44. (ZHANG Xumin, CHEN Yingbing, LI Yongkun, et al. Precipitation retrieval of the “23·7” extreme rainstorm in Beijing based on measured discharge under the deficiency of rainfall data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(6): 38-44. (in Chinese))

[29] 李致家,张心愿,白云鹏,等. 海河“23·7”流域性特大洪水复盘模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(5): 13-19. (LI Zhijia, ZHANG Xinyuan, BAI Yunpeng, et al. Retrospective simulation on the Haihe “23·7” basin-wide extreme flood[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(5): 13-19. (in Chinese))

[30] YANG Jie, HUANG Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[31] 刘子龙,张晓昕,叶婉露,等. 城市内涝模型的地表DEM处理方法研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2024, 60(6): 881-888. (LIU Zilong, ZHANG Xiaoxin, YE Wanlu, et al. Surface digital elevation model for urban local flooding simulation [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Sciences). 2024, 60(6): 881-888. (in Chinese))

[32] 黄晖,毕舒怡,字肖萌,等. 深圳城市绿地土壤入渗性能及影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2020, 36(14): 74-79. (HUANG Hui, BI Shuyi, ZI Xiaomeng, et al. Urban green spaces in Shenzhen: soil infiltration capacity and its influencing factors [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(14): 74-79. (in Chinese))

[33] 莫斌,陈晓燕,杨以翠,等. 不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 水土保持研究, 2016, 23(1): 13-17. (MO Bin, CHEN Xiaoyan, YANG Yicui, et al. Research on soil infiltration capacity and its influencing factors in different land uses [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(1): 13-17. (in Chinese))

[34] 深圳市应急管理局. 深圳市防汛防旱防风指挥部办公室关于防御强降雨的公告 [EB/OL]. (2023-09-08) [2025-06-18]. https://yjgl.sz.gov.cn/zwgk/xxgkml/qt/tzgg/content/post_10824932.html. (收稿日期:2025-03-06 编辑:王芳)