

文章编号:1671-6833(2023)02-0022-08

# 极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控

刘曙光, 郑伟强, 周正正, 庄琦, 金宇辰, 张之瑞

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**目前针对流域和城市区域的洪涝防控研究已经取得了丰富的成果,但城市内涝仍然时有发生,城市地下空间遭受洪水入侵的事件频频出现,给城市的可持续发展和居民的生命财产安全带来巨大隐患。首先,结合国内外地下空间洪涝灾害实例,介绍了城市地下空间洪涝灾害的基本情况,从水势发展、救援情况、入侵方式和灾损特征等4个方面分析了城市地下空间洪涝灾害的特点。分别从致灾因子、承灾体和防灾减灾能力3个方面讨论了城市地下空间洪涝防控所面临的主要科学问题,归纳总结目前存在的难点、痛点与堵点,分析了暴雨频率计算、地下空间属性和防洪非工程措施对洪涝防控的影响。其次,基于对国内外相关研究成果的总结梳理,将目前城市地下空间洪涝防控研究分为依托城市洪涝防控开展的研究和针对地下空间属性开展的研究两类,分别概述了两类研究的现状,并系统总结其优势与不足。最后,对未来城市地下空间洪涝防控的科学研究方向与工程技术热点进行了展望,为可持续发展城市建设和韧性城市建设提供科学参考。

**关键词:**极端暴雨;洪涝风险;地下空间;灾害防控;城镇化

**中图分类号:**TV122

**文献标志码:**A

**doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2023.02.017

随着中国城市建设不断推进,城镇化率稳步提升。2021年中国城镇常住人口达9.14亿,城镇化率为64.72%。参照欧美日韩等国家的发展规律,中国未来城镇化率还有约15%的提升空间,到2030年,城镇人口总数将有望突破10亿,届时城镇化率将达到70%<sup>[1]</sup>。城镇化率的升高为居民生活水平的提高提供了更多的可能,但日益增长的空间需求和有限的城市土地资源之间的矛盾也带来了城市拥挤、空气污染、热岛效应、雨岛效应等“城市病”。因此,合理开发城市的地下空间能够有效缓解城市人口增加引发的一系列问题。系统的现代城市地下空间建设始于19世纪中后期,主要以地下铁路、地下货运线为主;20世纪以来,随着越来越多的国际化大都市的建成,城市地下空间蓬勃发展,地下道路系统、地下商业服务、地下市政网络等展现出了巨大的生命力;如今,综合性的地下空间开发已经成为城市发展的必经历程,学科化、专业化、产业化的地下空间行业正在各大城市形成。

尽管城市地下空间促进了生活的便利与发展的

高效,却也加剧了资源的聚合和风险的集中,导致地下空间发生灾害事故的频次不断升高。据《2021中国城市地下空间发展蓝皮书》<sup>[2]</sup>统计,火灾、洪灾、地质灾害和施工灾害是中国地下空间面临的主要灾种,其中洪灾由于发生频次高、致灾面积广等特点,对地下空间的正常运转和城市居民的生命财产安全造成了巨大威胁。然而,相比地震、火灾等灾害,目前针对地下空间洪涝灾害防控的研究尚未成熟,灾害防治仍存在诸多挑战。本文首先阐述了洪涝灾害对城市地下空间致灾的特点;其次,分析了城市地下空间洪涝防控的主要困难,包括致灾属性的难点、承灾属性的痛点和减灾属性的堵点;最后,就城市地下空间洪涝防控的研究现状作了梳理,对今后相关领域的研究趋势进行展望。

## 1 极端暴雨下城市地下空间洪涝灾害

国内外相关案例表明,当城市发生洪涝灾害时,城市地下空间是最容易受灾的区域之一。以地铁为例,当城市的排洪除涝设施不能及时排除街道低洼

**收稿日期:**2022-10-09;**修订日期:**2022-11-03

**基金项目:**“十三五”国家重点研发计划(2018YFD1100401);国家自然科学基金资助项目(51909191)

**作者简介:**刘曙光(1962—),男,同济大学教授,博士,博士生导师,主要从事海洋科学、资源与环境、水利工程、岩土工程等方面的研究,E-mail: liusglu@tongji.edu.cn。

**引用本文:**刘曙光,郑伟强,周正正,等.极端暴雨下城市地下空间洪涝风险及灾害防控[J].郑州大学学报(工学版),2023,44(2):22-29.(LIU S G, ZHENG W Q, ZHOU Z Z, et al. Flood risk and control in urban underground spaces under extreme rainfall [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023,44(2):22-29.)

处的积水时,一旦积水沿着地铁出入口等各类连通通道向车站内灌水,损失将不可估量,近年来国内外较为严重的地铁洪涝灾害事故实例如表 1 所示。由于地下空间本身地势较低且相对封闭的特点,其对洪涝灾害往往能产生聚集、连锁和放大的效应,地下空间洪涝灾害一般具有以下特征<sup>[3]</sup>。

表 1 近年来国内外地铁洪涝灾害事故  
Table 1 Recent examples of flood hazards in subway

时间	地点	事故外因	灾情描述
2012.07	北京	持续强降雨	5 条地铁线因站点进水停运
2012.08	纽约	台风“桑迪”	7 条地铁线被淹,地下交通瘫痪
2013.09	上海	突发暴雨	6 号线触网失电,2 号线部分站点被淹
2014.08	釜山	突发暴雨	1、2、4 号线部分站点被淹
2016.05	广州	突发暴雨	6 号线被淹,隧道内水流成河
2016.07	武汉	持续强降雨	2、4 号线部分站点被淹
2020.09	马德里	突发暴雨	5 条线路部分站点被淹
2021.07	郑州	持续强降雨	5 号线严重倒灌致 14 人死亡

(1)易灌难排,水势迅猛。地下空间位于城市地面以下,在区域遭受洪涝灾害时,容易造成汇流淹没;同时,地下空间内的积水难以依靠水流自重排放至城市管网或河网当中,通常必须采取强排措施抽排<sup>[4]</sup>。当入侵洪水流量大于设计排水流量,或排水设施出现故障时,城市地下空间将遭受洪涝灾害。

针对洪涝条件下地下空间排水困难的问题,中国的规范和行业标准从两方面对此进行了规定:一是减少洪水入侵量,如 GB 50157—2013《地铁设计规范》规定高架区间、敞开出入口和风井、隧道洞口的排水能力,GB 50158—2008《地下工程防水技术规范》对入口处的抬高作定性要求等;二是增大内部排水量,如 GB 50014—2021《室外排水设计规范》所规定的中心城区地下通道和下沉式广场的排水标准要显著高于其他区域。

(2)疏散救援困难。地下空间通过通道口与地面相连,洪灾发生时,地面上通常已形成内涝积水,且通常连通口正大量涌入积水,逃生标志缺失、逃生路线单一、逃生信息滞后等,导致救援人员施救和受灾人员自救均存在较大难度;同时,由于受灾人员对地下空间的环境了解程度较低、受灾时心理慌张与恐惧、缺乏逃生自救意识和知识等,都不利于救援行动的开展,加剧了地下空间洪涝灾害的危险性。以郑州“7·20”暴雨中 5 号线救援行动为例,虽然郑州地铁集团在 18:04 时发布线网停运指令,乘客开始外逃避难,但 18:37 时多数乘客却因水势湍急不得不返回车厢等待,最终直至 21:43 才全部撤离<sup>[5]</sup>。

(3)洪水入侵路径多样。地下空间与地面的连

通通道形式多样,包括人行通道口、车行通道口、通风井、室外电梯井、隧道口等,这些连通口的位置主要依据其功能特征确定,并未考虑防止洪水入侵的能力,即使有所考虑也主要是设置驼峰或台阶进行挡水<sup>[6]</sup>。连通口样式繁多使得洪水入侵的路径复杂多变,难以针对性地进行防御。例如,布拉格的 Florenc 地铁站曾因城市内涝积水过深,洪水从人行通道口涌入<sup>[7]</sup>;郑州 5 号线隧道则是因为涝水冲破隧道口停车场的挡水围墙,进而蔓延入行车区间<sup>[8]</sup>。

(4)灾害损失严重。城市地下空间连通性强,洪水从局部区域入侵后会迅速扩散,Morikane 等<sup>[9]</sup>采用水动力数值模型的方法,探究了洪水在地下空间内的传播过程,认为地下空间洪水水位上升快、淹没面积迅速增加;Toda 等<sup>[10]</sup>采用物理模型实验研究得到了类似的结论。这导致灾后检查难度大、排查周期长、维修成本高。此外,供电、供水等城市生命线工程也常位于地下,一旦出现局部损毁,将会引起大范围的基础设施瘫痪,加重内涝造成的损失。

2 城市地下空间洪涝防控的主要难点、痛点和堵点

开展洪水风险管理是国际上防控洪涝灾害的主要手段。研究中一般认为洪灾风险由致灾因子危险性、孕灾环境暴露性、承灾体脆弱性和防灾减灾能力 4 个要素组成<sup>[11]</sup>。对于城市地下空间洪涝风险而言,致灾因子包括强降水、上游泄洪、风暴潮等,其中极端暴雨是最主要的诱发因素。在一些空间尺度较小的研究中,为了提高结论的实用性与准确性,常常将洪水的水力要素(水深、流速、淹没历时等)作为致灾因子考虑。孕灾环境包括土地利用类型、地形、水系分布等,其中对地下空间洪涝防控影响较大的是地面沉降引起的地形改变和城市开发引起的下垫面改变<sup>[12]</sup>。承灾体为各类地下空间以及地下空间内的人或物等,对灾损程度影响较大的是地下空间本身的防洪属性,包括挡水、排水、储水设施等。防灾减灾能力以非工程措施为主,包括灾前预报与预警、灾中的抢险与救援、灾后恢复与管理等。

2.1 难点:暴雨频率分析的复杂性

基于实测降雨资料进行的暴雨频率分析是洪涝防控的重要保障,但暴雨的形成机制与发展规律十分复杂,这使得频率分析的结果存在一定的不确定性,基于此开展的地下空间防洪设计也存在着一定风险。暴雨频率分析复杂性主要体现在以下几个方面。

(1) 样本选取。国内外研究中的暴雨序列取样方法包括年最大值法、超定量法、年超大值法、年多个样法等。年最大值法即在  $N$  年数据中, 每年降雨资料中选取最大值组成样本序列进行分析, 因其取样简单、理论成熟, 且各地实测资料年限不断增长, 逐渐成为目前最常用的取样方法。除取样方法本身的差异以外, 不同取样方法也会影响适线计算的精度。王鹏飞<sup>[13]</sup>以渭南流域为例, 分别采用年最大值法、年多个样法和年超大值法 3 种取样方法, 根据概率点距相关系数、均方根误差、平均绝对误差 3 种精度评判标准, 选取广义极值(GEV)分布、广义帕累托(GP)分布、皮尔逊Ⅲ型(P-Ⅲ)分布等 13 种线型, 对流域内 39 个站点的降雨资料做了适线分析, 发现不同站点的最优取样方法、最优线型均不尽相同。

(2) 适配线型。关于暴雨频率分析的理论分布线型, 目前的研究尚未得出确切的结论。不同国家根据自身水文气象特点、工程应用实践等对暴雨频率分析的适配线型做出了工程上的规定。如英国推荐对数耿贝尔(Log-Gumbel)分布、瑞典等国家推荐 GEV 分布、德国推荐耿贝尔(Gumbel)分布和指数分布、法国推荐 GEV 和 GP 分布、中国推荐 P-Ⅲ分布等。Liang 等<sup>[14]</sup>在太湖流域降雨频率分析研究中对 GEV 和 P-Ⅲ分布曲线进行了对比, 结果表明 GEV 分布曲线比 P-Ⅲ分布曲线更加适用于该区域降雨频率分析研究。但实际中由于资料年限的有限性、水文序列的非一致性以及样本的单一性等影响, 应用年最大值法取样配合 GEV 分布适线的结果却往往并非最优。因此, 一些研究会根据实际计算结果对特定地区暴雨频率分析频率分布线型进行调整<sup>[15]</sup>。

(3) 空间分布。现行暴雨频率分析方法通常采用单个或若干个雨量站的实测资料, 基于一些理想化的设定, 如时间分配上考虑确定的雨型、空间分布上考虑均匀分布、点面数值转换等。然而, 近年来的一些研究已经表明, 传统暴雨频率分析方法正暴露出越来越多的问题。首先, 城镇化的不断推进导致水文过程愈发复杂, 一致性与独立性假设不再严格适用于城市地区的降雨序列; 其次, 降雨在空间上的异质性不仅直接影响暴雨频率分析推求的准确性, 其引起的洪水响应也会导致洪涝的模拟计算的不确定性增大。

(4) 规范衔接。以中国为例, GB 50210—2014《防洪标准》以非农人口数和经济当量为指标, 划定了 4 个等级的城市防洪标准, 其中上海市防洪重现

期为不低于 200 a; SL 723—2016《治涝标准》根据常住人口数与经济当量划定了 3 类标准, 其中上海市治涝的暴雨频率分析重现期仅为不低于 20 a; 上海市地方标准规定主城区治涝的暴雨频率分析重现期不低于 30 a; GB 50014—2021《室外排水设计规范》根据城镇类型和城区类型确定了雨水管渠的设计重现期, 其中上海市中心城区仅为 3~5 a, 中心地区下沉式广场可达 30~50 a。不同标准的表述差异较大, 除了各自的暴雨选择方法不同, 主要原因是长期以来管理体制等因素的制约, 中国城市防洪、排水和治涝标准的制订基本上是分离的, 对三者如何衔接和协调考虑得不够, 贾卫红等<sup>[16]</sup>对上海市排水标准与除涝标准之间的相融关系进行了探讨。

## 2.2 痛点: 地下空间的缺陷性

地面洪水入侵地下空间主要受到外部防汛环境和自身防御能力的影响<sup>[3]</sup>, 一般城市地下空间在规划和设计时并未充分考虑防汛的需求, 使得其在应对洪涝灾害时表现出各种各样的缺陷, 最终洪水入侵酿成巨大的损失。地下空间的缺陷主要体现在以下几个方面。

(1) 规划选址的不合理性。地下空间的选址主要考虑地震、地质灾害、火灾、爆炸等, 很少从洪涝灾害的方面考虑, 受用地的限制, 以及城市竖向规划设计不合理的影响, 大量的地下空间选址在洪泛区与低洼地带<sup>[4]</sup>。一旦发生城市洪涝, 地下空间除了需要承受露天范围内的汇水影响, 还需要应对低洼地段的汇流作用, 一些地下空间汇流面积大、汇流速度快, 引起受影响范围大、救灾难度大等问题。此外, 部分地下车库为了方便车辆行驶, 出入口的高程要低于室外地坪标高, 使地下车库成为区域内的低洼地段, 即使设置驼峰也难以防止洪水大规模入侵。

(2) 挡水措施的不灵活性。以中国为例, 虽然规范对地下空间的挡水措施有所要求, 但受行业功能和承灾能力的不同的影响, 挡水的要求差异较大, 高度范围在 150~1 250 mm<sup>[17]</sup>, 给实际的设计工作带来了一定的麻烦。城市地下空间连通性高, 不同职能的部分设防标准不同, 地面洪水往往会从防洪能力薄弱的连通口涌入, 造成地下大范围的洪水淹没。此外, 挡水高度的设定并未考虑低洼地段或易淹区域的特性, 通常采用统一定值, 这导致地势低的地下空间挡水绝对高程较低、地势高的地下空间挡水绝对高程较高等不合理现象, 对于面积较大的综合性地下空间区域, 这一矛盾更加显著。

(3) 排水设施的不完善性。地下空间排水设施布局根据建筑地下室地面排水需求布置, 目前相关



规范和设计均没有考虑洪水入侵水量复核地下空间总体排水能力<sup>[4]</sup>。地下空间遭受洪水入侵,一方面总体排水能力往往不足;另一方面即使总体排水满足要求,但由于排水设施的不合理布局,导致受淹初期排水速度与洪水涌入速度不匹配,局部受淹导致地下空间部分功能瘫痪进而对排洪造成影响。

2.3 堵点:非工程措施的薄弱性

从风险应急管理可持续发展的角度,采取防洪非工程措施在应对超设计标准暴雨、降低洪灾损失等方面具有重大意义。纵观国内外的各类地下空间洪涝受灾案例,许多严重的后果均是由于缺乏对既定非工程措施的有效执行而造成的。

(1)灾前。首先是极端暴雨预报的准确性问题。以中国为例,尽管过去数十年间气象预报的水平取得了巨大的飞跃,依托数值模拟技术在大空间尺度的极端暴雨预报技术已十分成熟<sup>[18]</sup>,但由于暴雨形成机制尚未探明、模型简化与近似等因素,暴雨雨强和落区等与城市地下空间洪涝灾害防控直接相关的信息预报具有较大的不确定性<sup>[19]</sup>。若预报偏于保守,会消耗城市应对超强暴雨的警惕性与敏感性;反之,则容易对成灾暴雨出现漏报,造成不必要的损失。其次是“四预”的有效性,即预报与预警能否得到有效响应。国内外各大城市均有针对洪涝灾害的应急预案,然而这些预案是否通过预演来实现优化调整和与预报预警的合理衔接,在很大程度上取决于城市管理者的主观因素,因此也存在很大的不确定性与不可控性。最后是社会公众的认知性问题。中国在突发性自然灾害科普与社会教育工作方面存在针对性不强、实践性不够、宣传性不佳、专业性不足等问题,导致群众防灾意识弱、减灾能力缺失等现象,加剧了地下空间洪涝灾害的危险性。

(2)灾中。地下空间的洪涝灾害往往与城市内涝并发,因此合理分配救灾资源与采取制动措施十分重要,既要规避地下空间受淹后潜在的严重后果,又要兼顾城市其他区域快速发展的涝情。郑州“7·20”暴雨造成的5号线重大人员伤亡事故,在很大程度上是由于有关部门对快速变化水情的重视程度与响应速度严重不足造成的<sup>[5]</sup>。在城市应急响应日趋重要的背景下,对城市积水和城市管网排水能力的实时监测是多部门联合调度的技术参考<sup>[20]</sup>,但目前针对地下空间的涝情监测仍停留在水位上,监测结果尚未应用于防洪预案编制和逃生路线规划中,使得管理部门难以掌握地下空间的受灾情况。

(3)灾后。欧美和日本等国家洪水保险制度的建设对中国洪涝灾害防控具有重要的借鉴意义,洪

水保险不仅提高了洪涝灾害风险管理的水平,降低了洪涝灾害造成的实际损失,也促进了预警机制、应急机制、风险转移机制和防洪工程建设等的结合,提高城市的防洪韧性。但由于部分民众对洪灾风险认识不足导致缺乏参保积极性,洪水风险的赔付机构尚未明确导致风险分散能力不足,洪水保险市场尚未成型导致法律法规制度建设进展缓慢等,在洪水风险综合管理领域仍与发达国家存在较大差距。

3 城市地下空间洪涝防控研究

国内外关于城市地下空间洪涝防控的研究总体上可以分为两类,一类是依托城市洪涝防控的研究开展,侧重针对致灾因子和综合风险进行研究;另一类则针对地下空间自身的防灾属性开展,侧重对承灾体与防灾减灾进行研究。

3.1 依托城市洪涝防控开展的研究

(1)暴雨频率分析。传统暴雨频率分析的频率分析采用点雨量对面雨量进行估计,通常存在站点固定、线型固定、资料年限较短、空间分布不合理、资料一致性假设不成立等问题,对其准确性提出了较大挑战。随机暴雨移置法(stochastic storm transposition, SST)是一种基于区域性概率重采样与暴雨空间变换相结合的地区性降雨频率分析方法,在美国已经有了广泛的应用<sup>[21]</sup>,根据预先选定的“暴雨目录”(storm catalog)对序列进行模拟、延长后,进行频率分析计算。Zhou等<sup>[22]</sup>采用SST分析了巴尔的摩都市圈极端降雨的空间异质特性,指出SST能够降低预先假定线型、假定均匀分布等对结果的影响;庄琦等<sup>[23]</sup>基于卫星降雨数据,采用SST对上海市进行暴雨频率分析,认为此法不仅能够有效弥补传统方法中资料年限短、一致性假设不成立等缺陷,对空间异质性的考虑也使计算结果更为可靠。SST虽然能够规避传统方法的不足,但通常需要高分辨率的遥感数据作为支撑<sup>[24]</sup>,因此在推广上还需深入研究。此外,仅考虑暴雨频率分析的空间异质性仍无法满足城市洪涝防控的需求,暴雨空间异质性引起水文过程响应与洪涝灾情变化相关研究仍有待开展。

(2)综合风险评估。城市洪水风险图是水灾发生时指导居民迅速避难的地图,包含了洪水发生时预测的危险区域(浸水区域)、危险程度(估计浸水深)、逃生区域和逃生路线等避难信息<sup>[3]</sup>。风险图中包含的风险评估与区划信息对地下空间的选址具有指导意义,基于情景模拟方法编制的风险图能够探讨不同挡水措施和排水设施对洪涝风险的影响。因此,对城市地下空间开展综合风险评估、绘制洪水

风险图是填补地下空间自身缺陷、完善防洪非工程措施布局、实现地下空间洪涝防控的重要手段。Lyu 等<sup>[25]</sup>采用区间层次分析法(I-AHP)从危险性、暴露性、脆弱性 3 个层面选取平均雨量、地面高程、地铁线密度等 12 个指标,依托区域洪涝风险等级计算对广州市地铁线开展洪涝风险评估。Wang 等<sup>[26]</sup>选取暴雨强度、暴雨频率、出入口数、人流密度、GDP 等 20 个指标,分别采用一般层次分析法(AHP)和模糊层次分析法(FAHP)对北京市地铁系统开展洪涝风险评估,分别从危险性、暴露性、脆弱性、综合风险度 4 个层面针对高风险的地铁站和地铁线提出防洪措施。Sugimoto 等<sup>[27]</sup>基于 GIS 技术研究了海啸背景下名古屋市地铁系统的洪涝风险,确定了各设计工况下的淹没水深、淹没范围和洪水入侵时间,为名古屋市地铁防洪提供了量化的参考。这类风险评估依托城市地面的洪涝风险开展,一定程度上能反映地下空间的受淹风险,但却忽略了其易灌难排、洪水

入侵方式多样等特点,很难准确量化地下空间内的洪水演变进程,所得结果在规划层面的意义更大。一些研究也尝试将风险评估进一步拓展到地下空间内,如 Forero-ortiz 等<sup>[28]</sup>根据 Infoworks 模型确定洪涝发生时地铁站点外的水力条件,将其作为边界输入一维模型,对巴塞罗那地铁 3 号线沿途的车站与隧道开展洪涝风险评估,对不同区段的风险进行分析,探讨了不同排水设施对地铁隧道洪涝风险的影响。Ozaki 等<sup>[29]</sup>采用类似的方法对大阪市区内一处大型综合地下空间开展洪水入侵特性研究,分析了该地下空间洪水涌入的时间、扩散情况等。以上研究虽然较为合理地确定了外部边界,但对地下空间本身的特征缺乏考虑,尤其是洪水从地上进入地下时的复杂物理变化、地下空间复杂的结构等,因此无法准确计算地下空间内的洪水要素。

3.2 针对地下空间属性开展的研究

表 2 为部分针对地下空间防灾属性开展的研究

表 2 针对地下空间防灾属性开展的研究

研究者	研究内容	主要结论	研究特点	局限性
Ishigaki 等 <sup>[30]</sup> (2006 年)	采用实物模型研究了地下空间洪水发生时不同人群逃生的困难程度	洪水封门时,成年男性逃生的极限水深为 0.4 m、女性 0.35 m、儿童不足 0.3 m	模拟了疏散的场景,定量计算了人员撤离的困难等级	现场条件为理想情况,与真实情况存在差异
Toda 等 <sup>[31]</sup> (2009 年)	以神户市某地下商场为例,采用二维模型对地面洪水涌入形成的洪涝灾害进行风险分析	探明了该商场内的洪水演进过程,探讨了入口处设置阶梯对地下空间防洪减灾的作用	开发了一套城市雨洪模型,用于强降雨与河道溢引引发的地下空间洪涝分析	二维水动力模型较为简单,对复杂的阻水作用考虑不充分
申若竹 <sup>[32]</sup> (2012 年)	采用物理模型实验探究了洪水在地铁车站内的演进过程,确定了人在洪水中的稳定性,针对性地提出改进措施	地下空间逃生的临界条件约为楼梯上流速 4 m/s,光脚有利于从楼梯逃生,安全率反映逃生通道是否安全与可行	真实地反映了洪水在地铁站内的扩散过程,探明了不同着装情况的逃生难易程度	未能形成明确的逃生路线,仅考虑了人在楼梯上的风险
Ishigaki 等 <sup>[33]</sup> (2016 年)	以大阪市某地下商业中心为例,探究了地面洪水入侵后的洪水演进过程,基于人员逃生难易程度开展洪水风险评估	多连通口会导致入侵洪水的不确定性增大,但商场与地铁站连通有利于减缓洪水扩散速度,给逃生提供更多时间	模型考虑了该商场的全部 129 个连通口,较为准确地模拟了地面洪水入侵的情况	逃生措施基于社会经验提出,未经过严格的数理推导与计算,存在较大主观性
Kim 等 <sup>[34]</sup> (2018 年)	采用二维水动力模型对韩国京畿道某一地下办公区进行洪水风险分析,模拟了淹没过程	模型很好地刻画了该地下空间的细节,能够模拟局部的复杂水流运动,获得更准确的水深与淹没时间	基于自适应传递方法建立“层间连接”,改进传统二维水动力模型	对大型的、连通情况较为复杂的地下空间,二维模型的建立比较困难
Han 等 <sup>[35]</sup> (2019 年)	基于二维水动力模型,采用概率-后果矩阵对某研究所地下办公区开展洪涝风险评估	定量计算了不同区域的洪灾疏散难易程度,为逃生路线规划提供参考	采用 FI 指数为评估标准,考虑地下空间相对封闭性对水流的影响	二维模型较为简单,未充分考虑地下空间的复杂构造
Shin 等 <sup>[36]</sup> (2021 年)	以韩国某住宅区下的综合地下空间为例,建立二维水动力模型并开展洪水风险评估,并确定了最佳逃生路线	绘制该地下空间内的最佳逃生路线,根据逃生时间与路径制定了紧急挡水设施的调度方案	开展了多层地下空间的洪灾逃生路线绘制研究,直接采用水动力模型结果进行路线选择	未考虑人流量增大引起的路线拥挤问题,也未兼顾不同人群的逃生需求
Li 等 <sup>[37]</sup> (2022 年)	采用 LES 模型结合 VOF 方法对流体-人相互作用进行了模拟,对人开展洪灾风险评估	探明了楼梯上水体与人相互作用的流场变化规律,指出最危险的位置位于平台下游第 3 级阶梯附近	考虑了阶梯上流体的紊动,基于人体的力学稳定性对洪灾风险进行判别	模型采用假定边界输入,所得定量结论的普遍性有待考究



究。与地上空间不同,城市地下空间(尤其是通道口、地铁隧道、地下连廊等)洪水流速较大,对人员的疏散与逃生有很大的影响<sup>[12]</sup>,而城市洪涝防控的研究中往往更关注淹没水深,因此相关成果主要用于灾前的规划与布局,却难以在地下空间洪涝灾害发生时指导救援;此外,仅考虑外界洪水涌入的洪涝风险防控也无法适应地下空间洪水入侵路径的多样性。针对这些问题,一些研究摒弃了对外界入侵洪水的准确推算,转而更加关注地下空间自身的特性,对洪涝灾害下的人员安全、复杂流态模拟等开展研究,取得了丰富的成果,其中以东亚地区的研究最具代表性<sup>[38]</sup>。这类研究的成果对地下空间防洪预案的编制、防洪工程措施的布设等具有指导作用,但其多采用假定的边界条件,与实际情况存在一定的差异。

4 结论与展望

目前国内外城市规划布局与实际建设普遍存在一定差异,前期规划与地下空间建设存在不平衡现象。近年来,随着地下空间的规模和数量大幅度增加,社会影响面和风险管理需求也在不断提升,然而一些部门和单位仍然存在对风险管理认识不充分、策略实施不规范的问题。城市地下空间的洪涝风险管理,不仅与地下空间的防灾属性有关,也与周边的城市环境紧密相关,还受到管理者水平、受灾人员情况等多重复杂因素影响,明显缺失的重视程度与决策执行能力造成了不少损失。因此,城市地下空间洪涝灾害的防控还需要建设更科学、更完善的体系。

(1)提高暴雨频率分析的准确性。暴雨频率分析是城市防洪标准制定的重要依据,也是强化“四预”的技术支撑,既是科学问题又是应用问题。加强全球气候变化、城镇化快速发展下的城市极端暴雨、水文过程效应的研究,是城市洪涝防控的治本之策。此外,重新审视防洪-治涝-排水标准的关系,研究暴雨频率分析的线型选配、参数估计方法,因地制宜确定不同地区的暴雨频率分析频率曲线,编制地下空间防洪标准,这既是地铁挡水、排水的依据,也是城市防洪减灾的重要基础工程。

(2)推进城市洪涝风险管理。严重的城市洪涝往往是地下空间受淹的直接诱因,从这个角度来说,城市洪涝防控与地下空间洪涝防控是一体的。推进城市洪水风险图绘制、城市洪涝风险区划等工作,不仅能在规划层面将洪灾的损失显著降低,亦能对现有布局采取针对性措施,提高城市防洪韧性。在此基础上,将相关的研究成果推广到针对地下空间的

洪涝风险管理,开展地下空间洪涝风险评估、防汛安全论证等,提高地下空间防汛综合能力,促进个性化、精准化防洪措施的制定与落地。

(3)加快数字化技术的应用。传统研究普遍采用预先设定的情景,得到的多是静态结果,包括降雨时空分布、洪水风险图、洪灾应急预案等,实际情况往往复杂多变,导致很多方案仅仅停留在纸面上,无法发挥防洪减灾的作用,甚至可能加剧洪涝损失。因此,实现地下空间的动态洪涝风险管理具有重要意义。例如,依托智能监测技术实时掌握地下空间内部及周边环境的洪涝情况,基于高速计算能力对当下和未来开展洪涝风险评估,利用可视化技术辅助管理和决策等。

(4)重视洪水中人身安全的研究。地下空间的特殊性使得洪涝灾害的致死率显著升高,因此在地下空间洪涝防控中,人的安全性特别重要,目前学界的相关研究更侧重单体人。随着城市地下空间向多功能化、集约化发展,对洪灾中人群安全性进行研究是十分必要的,结合地下空间的动态洪灾管理手段,实现撤离方案的动态更新与监测,将洪涝灾害对人的生命威胁降到最低,具有重要意义。

(5)强化社会的防灾减灾意识。人民城市人民建,城市的防洪仅仅依靠专家学者、水利水务部门、政府机构等是远远不够的,还需要全社会的参与。基层管理者、社会群众等是众多防洪措施的最终参与者与执行者,其对地下空间洪涝灾害的错误认知和自救知识的缺乏会扩大洪灾损失,因此有必要针对地下空间洪涝灾害,乃至城市洪涝灾害开展全民科普与教育,全面提高社会的防灾意识。

参考文献:

[1] 乔文怡,李玢,管卫华,等. 2016—2050 年中国城镇化水平预测[J]. 经济地理, 2018, 38(2): 51-58.  
QIAO W Y, LI L, GUAN W H, et al. Prediction of urbanization level in China: 2016—2050 [J]. Economic Geography, 2018, 38(2): 51-58.

[2] 中国工程院战略咨询中心,中国岩石力学与工程学会地下空间分会,中国城市规划学会. 2021 中国城市地下空间发展蓝皮书[R]. 北京:科学出版社, 2021.  
Strategic Consulting Center of the Chinese Academy of Engineering (CAE-SCC), Chines Society for Rock Mechanics and Engineering (CSRME), Urban Planning Society of China (UPSC). Blue book of underground space development in China (2021) [R]. Beijing: Science Press, 2021.

[3] 刘曙光,陈峰,钟桂辉. 城市地下空间防洪与安全

- [M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- LIU S G, CHEN F, ZHONG G H. Flood control and safety of urban underground space[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
- [4] 陈峰, 刘曙光, 刘微微. 城市地下空间地面洪水侵入成因和特征分析[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(2): 38-43.
- CHEN F, LIU S G, LIU W W. Causes and characteristics of flooding in urban underground space[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(2): 38-43.
- [5] 国务院灾害调查组. 河南郑州“7·20”特大暴雨灾害调查报告[R/OL]. (2021-01-21) [2022-08-13]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/>.
- The State Council of The People's Republic of China. Investigation report of “7·20” catastrophic rainstorm disaster in Zhengzhou, Henan Province[R/OL]. (2021-01-21) [2022-08-13]. <https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/>.
- [6] 娄厦, 刘曙光, 钟桂辉, 等. 上海地下交通设施防洪调查[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(3): 611-618, 626.
- LOU S, LIU S G, ZHONG G H, et al. Investigation on flood control of traffic facilities in underground spaces in Shanghai[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(3): 611-618, 626.
- [7] VANÍČEK I, JIRÁSKO D, VANÍČEK M. Interaction of transport infrastructure with natural hazards (landslides, rock falls, floods) [J]. Ce/Papers, 2018, 2(2/3): 135-164.
- [8] 刘家宏, 裴羽佳, 梅超, 等. 郑州“7·20”特大暴雨内涝成因及灾害防控[J]. 郑州大学学报(工学版), 2023, 44(2): 38-45.
- LIU J H, PEI Y J, MEI C, et al. Waterlogging cause and disaster prevention and control of “7·20” torrential rain in Zhengzhou[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2023, 44(2): 38-45.
- [9] MORIKANE M, INOUE T, ISHIGAKI T, et al. Effects of counter measures for reducing underground inundation caused by pluvial flooding[J]. Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering), 2012, 68(4): 1003-1008.
- [10] TODA K, INOUE K, OYAGI R, et al. Hydraulic model test of inundation water intrusion into complicated underground space[J]. Proceedings of Hydraulic Engineering, 2004, 48: 583-588.
- [11] 孙章丽, 朱秀芳, 潘耀忠, 等. 洪水灾害风险分析进展与展望[J]. 灾害学, 2017, 32(3): 125-130, 136.
- SUN Z L, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Flood risk analysis: progress, challenges and prospect [J]. Journal of Catastrophology, 2017, 32(3): 125-130, 136.
- [12] 吕海敏, 沈水龙, 严学新, 等. 上海地面沉降对轨道交通运营风险评估[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(3): 392-400.
- LYU H M, SHEN S L, YAN X X, et al. Risk assessment of metro system induced by land subsidence in Shanghai[J]. Journal of Nanjing University (Natural Science), 2019, 55(3): 392-400.
- [13] 王鹏飞. 基于不同选样方法的短历时暴雨公式研究——以陕西省渭河流域为例[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- WANG P F. A study of short-duration rainstorm formula based on different sample selection methods——take Shaanxi Weihe River Basin as an example [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [14] LIANG Y Y, LIU S G, GUO Y P, et al. L-moment-based regional frequency analysis of annual extreme precipitation and its uncertainty analysis [J]. Water Resources Management, 2017, 31(12): 3899-3919.
- [15] BEN-ZVI A. Rainfall intensity-duration-frequency relationships derived from large partial duration series [J]. Journal of Hydrology, 2009, 367(1/2): 104-114.
- [16] 贾卫红, 李琼芳. 上海市排水标准与除涝标准衔接研究[J]. 中国给水排水, 2015, 31(15): 122-126.
- JIA W H, LI Q F. Study on linkage between drainage standards and waterlogging control standards in Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(15): 122-126.
- [17] 田利勇, 陈峰, 卢伟华, 等. 城市地下空间出入口挡水设防标准探讨[J]. 中国市政工程, 2013(增刊1): 28-31, 133.
- TIAN L Y, CHEN F, LU W H, et al. Research on flood control entrance standard of urban underground space [J]. China Municipal Engineering, 2013 (S1): 28-31, 133.
- [18] 李泽椿, 谌芸, 王新敏, 等. 从“75·8”到“21·7”的思考[J]. 气象与环境科学, 2022(2): 1-13.
- LI Z C, CHEN Y, WANG X M, et al. Thinking of extreme rainstorms from the August 1975 event to the July 2021 event [J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2022(2): 1-13.
- [19] 肖志祥, 黎金玲, 罗小莉. 1415 号台风“海鸥”广西极端暴雨预报偏差分析及地形订正[J]. 气象研究与应用, 2021, 42(4): 14-19.

- XIAO Z X, LI J L, LUO X L. Bias analysis and topographic correction of Guangxi extreme rainstorm forecast of Typhoon Kalmaegi[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2021, 42(4): 14-19.
- [20] 张金萍, 张朝阳, 左其亭. 极端暴雨下城市内涝模拟与应急响应能力评估[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2023, 44(2): 30-37.
- ZHANG J P, ZHANG C Y, ZUO Q T. Urban waterlogging simulation and emergency response capacity evaluation under extreme rainstorms [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2023, 44(2): 30-37.
- [21] WRIGHT D B, SMITH J A, VILLARINI G, et al. Long-term high-resolution radar rainfall fields for urban hydrology[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2014, 50(3): 713-734.
- [22] ZHOU Z Z, SMITH J, WRIGHT D, et al. Storm catalog-based analysis of rainfall heterogeneity and frequency in a complex terrain[J]. *Water Resources Research*, 2019, 55(3): 1871-1889.
- [23] 庄琦, 刘曙光, 周正正. 上海城区降雨时空分布变化与暴雨频率分析[J]. *水文*, 2021, 41(4): 74-80.
- ZHUANG Q, LIU S G, ZHOU Z Z. The change of spatio-temporal precipitation and rainfall frequency analysis in Shanghai[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(4): 74-80.
- [24] 周正正, 刘曙光, WRIGHT D B. 基于随机暴雨移置方法的暴雨频率分析[J]. *水科学进展*, 2020, 31(4): 583-591.
- ZHOU Z Z, LIU S G, WRIGHT D B. Analysis of urban design storm based on stochastic storm transposition[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(4): 583-591.
- [25] LYU H M, SUN W J, SHEN S L, et al. Flood risk assessment in metro systems of mega-cities using a GIS-based modeling approach[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1012-1025.
- [26] WANG G P, LIU Y, HU Z Y, et al. Flood risk assessment of subway systems in metropolitan areas under land subsidence scenario: a case study of Beijing[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 637.
- [27] SUGIMOTO K, OKUOKA K, TANIKAWA H. Establishment of three-dimensional subway GIS data for inundation analysis in urban area[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser G (Environmental Research)*, 2017, 73(5): 283-289.
- [28] FORERO-ORTIZ E, MARTÍNEZ-GOMARIZ E, PORCUNA M C, et al. Flood risk assessment in an underground railway system under the impact of climate change—a case study of the Barcelona metro [J]. *Sustainability*, 2020, 12(13): 5291.
- [29] OZAKI T, ASANO N, ISHIGAKI T, et al. Characteristics of underground mall inundation by flush flood in short time heavy rainfall[J]. *Journal of Japan Society of Civil Engineers Ser. B1 (Hydraulic Engineering)*, 2014, 70(4): 1417-1422.
- [30] ISHIGAKI T, TODA K, BABA Y, et al. Experimental study on evacuation from underground space by using real size models[J]. *Proceedings of Hydraulic Engineering*, 2006, 50: 583-588.
- [31] TODA K, KAWAIKE K, YONEYAMA N, et al. Underground inundation analysis by integrated urban flood model[C]//16th IAHR-APD Congress and 3rd Symposium of IAHR-ISHS. Berlin: Springer, 2009:166-171.
- [32] 申若竹. 地下空间洪水入侵的机理及防洪对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- SHEN R Z. Study on the flood invasion mechanism and countermeasures for flood control in underground space [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [33] ISHIGAKI T, KAWANAKA R, OZAKI T, et al. Vulnerability to underground inundation and evacuation in densely urbanized area[J]. *Journal of Disaster Research*, 2016, 11(2): 298-305.
- [34] KIM H J, RHEE D S, SONG C G. Numerical computation of underground inundation in multiple layers using the adaptive transfer method [J]. *Water*, 2018, 10(1): 85.
- [35] HAN Y S, SHIN E, EUM T, et al. Inundation risk assessment of underground space using consequence-probability matrix[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(6): 1196.
- [36] 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.
- [37] LI Q J, XIA J Q, XIE Z H, et al. Hazard and vulnerability in urban inundated underground space: hydrodynamic analysis of human instability for stairway evacuation [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 70: 102754.
- [38] FORERO-ORTIZ E, MARTÍNEZ-GOMARIZ E, CAÑAS PORCUNA M. A review of flood impact assessment approaches for underground infrastructures in urban areas: a focus on transport systems [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2020, 65(11): 1943-1955.



guished by tentatively introducing the physical parameters  $\lambda$ ,  $c_p$  of solid and liquid into the temperature relaxation time  $\tau_T$ , as a result, a novel solid-liquid conjugate boiling heat transfer LB model was proposed in this study. After verifying the accuracy, stability and rationality of the model, boiling heat transfer at different wettability surfaces were simulated by the solid-liquid conjugate model and the original pseudo-potential model. The results showed that the unintentional neglect of different heat transfer capacities of solid and liquid regions in the original pseudo-potential model led to the appearance of large low-density phase transition region around the bubble root. The existence of low-density phase transition region produced additional interphase forces and greatly changed the wall contact angle of bubbles. However, the solid-liquid conjugate heat conduction model realized characterization of different thermophysical properties of solid and liquid regions by introducing a temperature relaxation time function. The low-density phase transition region only appeared in a very small range and at very low level, the actual bubble wall contact angles obtained by the conjugate heat transfer model were closer to the setting bubble contact angle. For other wettable surfaces except superhydrophilic surfaces, the maximum relative error of the actual contact angle obtained by the conjugate heat transfer model was 8.6%, which was 9.8% lower than that of the original pseudopotential model. The solid-liquid conjugate boiling heat transfer LB model could more accurately describe the actual microscopic process of boiling heat transfer.

**Keywords:** phase change; solid-liquid conjugate boiling heat transfer model; gas-liquid flow; bubble; LBM

(上接第 29 页)

**Flood Risk and Control in Urban Underground Spaces with Extreme Rainfall**

LIU Shuguang, ZHENG Weiqiang, ZHOU Zhengzheng, ZHUANG Qi, JIN Yuchen, ZHANG Zhirui

( College of Civil Engineering , Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Although plenty of studies have been carried out, waterlogging in urban areas is common. The frequent happening of flood inundation in urban underground spaces has great threat to the sustainable development of city and the life and property security of citizens. Firstly, according to the flooding events in urban underground spaces around the world, the basic information and characteristics of flood disasters in urban underground spaces were introduced in this study. The characteristics of flood disasters in underground spaces were analyzed from four aspects, including inundation development, rescue condition, invasion pattern, and damage feature. Then, the major scientific problems of flood control in urban underground spaces were raised from three aspects, i. e. factors, carriers, and defenders, based on which the difficulties, vulnerabilities, and poor executions were summarized and discussed. The influences on flood preventing of designed rainfalls, physical property and non-structural measures were concluded. Next, with an overview of related studies, studies on flood control in urban underground spaces were divided into two types, one based on flood control in urban areas and the other focused on features of underground spaces, both of which were analyzed in detail. Finally, an outlook of academic study and technical improvement on prospective flood control in urban underground spaces was conducted, as a scientific perspective to the development of sustainable societies and resilient cities.

**Keywords:** extreme rainfall; flood risk; underground spaces; disaster control; urbanization