doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.04.008

地铁车站洪涝灾害分级预警评价方法研究

余伟之
（中铁第四勘察设计院集团有限公司，武汉 430063）

摘 要：针对地铁车站在洪涝灾害应急响应方面存在响应不足或过度响应问题，提出洪涝灾害动态分级预警评价方法。首先，基于地铁车站洪涝灾害“成灾-防灾-抗灾”过程演化机理分析，从积水倒灌风险、脆弱性、防灾抗灾能力 3 方面构建洪涝灾害预警指标体系及指标分级量化表征方法；其次，基于小时降雨量及气象预警等级与积水深度关系，推导出积水倒灌风险的计算公式；再次，采用层次分析法与逼近理想解排序法分别提出脆弱性与防灾抗灾能力评价方案；最后，基于积水倒灌风险、脆弱性、防灾抗灾能力三者间作用关系，提出地铁车站洪涝灾害预警值计算方法以及预警等级判别标准，并依托两座实际地铁车站开展实例验证。研究结果表明，本文所提出的方法能够在综合考虑地铁车站场景特征与洪涝灾害动态特征的基础上有效实现动态分级预警，出入口台阶高度和水位监控覆盖率是影响预警等级的关键因素，在实际应用中应进一步关注积水深度和降雨量等数据的实时监测，提升车站水位监测传感器覆盖范围。研究成果可为地铁车站洪涝灾害超前预报预警与精准分级响应提供决策支持。

关键词：地铁车站；洪涝灾害；超前预警；分级响应
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)04-0061-10

A Hierarchical Early Warning Method for Flood Risk Assessment in Subway Stations

YU Weizhi
(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063)

Abstract: In view of the current problems of insufficient or excessive responses in flood disaster early warning and emergency management, a dynamic classification early warning evaluation for flood disasters has developed. Firstly, the early warning indicator system and quantification method for each warning indicator are developed based on the analysis of the disaster formation-prevention-resistance evolution mechanism of flood disasters in metro stations. The indicator system includes the risk of waterlogging and backflow, vulnerability, and disaster prevention and resistance capacities. Secondly, based on the relationship between hourly rainfall and meteorological warning levels with water accumulation depth, a quantitative method for assessing the risk of waterlogging and backflow in metro stations is proposed. Next, the evaluation methods of vulnerability and disaster prevention-resistance capacities are proposed based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). Finally, a comprehensive early warning value calculation method and warning level classification criteria for metro station flood disasters are established, and case verification is carried out relying

收稿日期：2024-10-19　修回日期：2025-03-11
作者简介：余伟之，男，硕士，高级工程师，主要从事地铁防灾减灾及节能研究，522743176@qq.com
基金项目：中铁建地下空间利用领域科研计划项目(2024-W19)
引用格式：余伟之. 地铁车站洪涝灾害分级预警评价方法研究[J]. 都市快轨交通，2025，38(4)：61-70.
YU Weizhi. A hierarchical early warning method for flood risk assessment in subway stations[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(4): 61-70.

on two actual metro stations. The research results show that this method can effectively achieve dynamic classification early warning on the basis of comprehensively considering the characteristics of subway stations and the flood disasters. The height of entrance and exit steps and the coverage rate of water level monitoring are the key factors affecting the early warning level. In practical applications, further attention should be paid to the real-time monitoring of data such as water accumulation depth and rainfall. The research outcomes can provide a decision-making support for advanced forecasting, early warning, and precise hierarchical response to flood disasters in metro stations.

Keywords: subway station; flood disaster; proactive warning; hierarchical response

地铁洪涝灾害具有发生不确定性高、影响范围大、演化扩散迅速等特征，一旦发生极易造成灾难性后果。已有地铁洪涝灾害的发生暴露出目前地铁系统在洪涝灾害的预警与应急响应处置等方面存在一定不足[1-2]。因此，实现地铁洪涝灾害的超前分级预警，并依据预警等级提前采取相应防汛措施，是预防地铁洪涝灾害发生并最大程度降低灾害损失的重要手段。

目前地铁洪涝灾害预警领域研究较少，已有相关研究多集中在地铁系统洪涝灾害脆弱性评估与基于降雨仿真的车站洪涝灾害风险分析。CHEN 等[3]综合考虑洪涝灾害的不确定性，采用局部空间依赖的概率方法构建了洪涝灾害脆弱性评估模型；WANG 等[4]基于模糊层次分析法(fuzzy analytic hierarchy process，FAHP)和地理信息系统(geographic information system，GIS)，提出一种城市地铁系统洪涝风险评估方法；杨可等[5]构建了地铁系统暴雨脆弱性影响因素指标体系，采用决策试验和评价试验法(decision-making trial and evaluation laboratory，DEMATEL)，结合对抗哈斯图技术(adversarial hasse diagram technology，AHDT)分析了影响因素重要性；李辉山等[6]将地铁洪涝灾害致灾因素划分为自然因素、周边环境因素、防汛能力因素三方面，并采用神经网络方法构建了地铁洪涝灾害预测模型；李浩然等[7]构建了地铁水灾灾害链演化网络模型，基于复杂网络测度指标分析了地铁水灾风险传递过程及关键风险节点；赵露薇等[8]提出一种基于模糊认知图(fuzzy cognitive map，FCM)法的地铁暴雨脆弱性评价方法，研究认为设备设施是地铁系统脆弱性的根本影响因素；方正等[9]基于城市综合流域排水(integrated catchment management，ICM)模型建立了地铁站及其周边区域降雨仿真模型，结果表明降雨强度达到 60.7 mm/h 以上时车站有被洪水淹没的危险；张丽佳[10]基于模拟分析认为地铁车站出入口内涝积水深度预警主要由地铁站出入口台阶高度决定。

综上，已有地铁洪涝灾害研究多面向灾前固有属性评价，缺乏一种综合考虑动态灾害信息与固有属性特征的分级预警方法，导致地铁站系统面临洪涝灾害时存在响应不足或过度响应问题。本文基于地铁站洪涝灾害成灾-防灾-抗灾形成演化机理，综合考虑地铁车站积水倒灌风险、洪涝灾害脆弱性和防灾抗灾能力之间的耦合影响关系，构建地铁车站洪涝灾害预警指标体系与灾害动态分级预警计算方法及判别标准。研究成果以期为地铁洪涝灾害的超前预测预警与精准响应处置提供理论支撑和实际指导。

1 地铁车站洪涝灾害成因及防灾抗灾流程

地铁车站洪涝灾害形成发展过程可分为成灾、防灾、抗灾、救灾 4 个阶段[11]，如图 1 所示。地表积水倒灌是导致地铁车站洪涝灾害发生的最直接原因，在灾害形成初期，短时强降雨以及排水管网排水不畅导致车站周边形成积水。随着积水深度和积水时间的持续增加，车站面临的积水倒灌风险也随之升高。

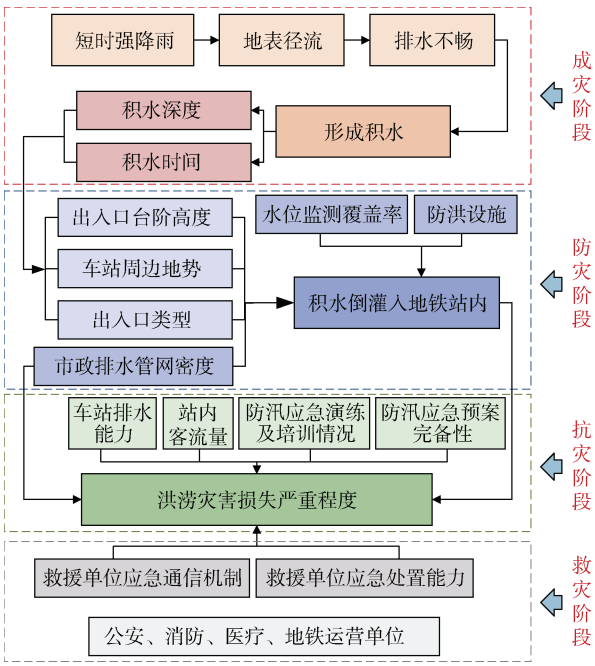


图 1 地铁车站洪涝灾害形成及防灾抗灾过程

Figure 1 Formation and mitigation process of flood disasters in subway stations

一旦积水形成或即将形成时，车站将进入防灾工作阶段，此时出入口台阶高度、车站区域地势、出入口类型将直接影响积水倒灌入车站的概率及严重程度。此外，水位监测传感器能够实现对车站出入口、风亭等位置水位的实时监控，并将监测数据上传至车站控制室综合监控系统，实现对洪涝灾害的提早预测。进而及时开启或布置挡水板、防汛沙袋等防洪设施，抵御积水倒灌风险。

当有积水开始倒灌入车站内时，车站将进入抗灾工作阶段。在这一阶段中，防汛应急演练及培训、防汛应急预案等因素将直接影响到站内工作人员防汛应急处置能力，同时站内客流量拥挤时会增大应急疏散组织引导的难度。除以上因素外，车站排水能力也直接影响到洪涝灾害后果严重程度。为防止雨水倒灌，区间隧道进出地面洞口处一般设置有大型雨水泵，车站内雨水经排水系统收集后由排水泵排出。

当积水已经倒灌入地铁车站内并导致人员被困时，车站将进入救灾工作阶段。此时，建立与消防、公安、医疗等救援力量的协同应急救援联动响应机制，高效开展应急抢险，对于有效限制洪涝灾害后果损失至关重要。

2 地铁车站洪涝灾害预警模型

2.1 地铁车站洪涝灾害预警指标体系构建

为实现对地铁车站洪涝灾害的提早分级预警，需建立分级预警等级评价指标体系及方法。预警等级的确定主要考虑积水倒灌风险、车站洪涝灾害脆弱性、洪涝防灾抗灾能力 3 方面因素，预警值的计算式为

$$\mathrm{PV} = S_{\mathrm{f}} \cdot \frac{V_{\mathrm{s}}}{C_{\mathrm{r}}} \tag{1}$$

式中，PV 表示地铁车站洪涝灾害预警值，其值与潜在事故严重程度呈正相关；S_{f} 表示积水倒灌入车站的风险值；V_{s} 表示地铁车站洪涝灾害脆弱性评价值；C_{r} 表示地铁车站洪涝防灾抗灾能力评价值。

由式(1)可知，随着积水倒灌风险的升高，地铁车站洪涝灾害预警值也应随之升高。脆弱性与防灾抗灾能力为相互抵抗关系，对于脆弱性较高的地铁车站应相应提升预警值，当地铁车站防灾抗灾能力较强时则可相应降低预警值。

基于地铁车站洪涝灾害预警值确定基本逻辑，从积水倒灌风险因素、灾害脆弱性因素、防灾抗灾能力因素 3 个方面，确定地铁车站洪涝灾害预警指标。

2.1.1 积水倒灌风险预警指标

1) 积水深度。地铁车站周边积水深度升高时会导致雨水直接涌入站内，《地铁设计规范》(GB 50157—2013)[12]规定地铁出入口地面标高应出该处室外地面 30～45 cm，参照《北京城市积水内涝风险地图》[13]给出的内涝积水风险划分标准，将积水深度指标分级预警阈值确定为 15、27、40 和 60 cm。

2) 积水时间。地铁车站周边积水时间与洪涝灾害发生概率显著相关，长时间积水增加了车站进水的风险。参考《安徽省城市内涝治理工作指南》[14]、《武汉市排水防涝系统规划设计标准》[15]等标准规范中关于积水时间的评价标准，将积水时间指标分级预警阈值确定为 0.5、1.0、1.5 h。

3) 气象预警等级。暴雨预警信号是地铁洪涝灾害预警的重要参考信息，气象预警等级指标分级表征主要参考我国暴雨预警信号等级，按照预测降雨量不同数值范围划分为蓝色、黄色、橙色、红色 4 级。

2.1.2 洪涝灾害脆弱性预警指标

1) 车站区域地势。地铁车站出入口地势相对于周围地势较低时，雨水更容易汇集在车站出入口处，增加了雨水倒灌入车站的风险。

2) 出入口台阶高度。出入口台阶高度决定了积水倒灌入车站的难易程度，台阶高度越高则积水倒灌可能性越小。根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)，车站出入口台面应高出周围地面 30～45 cm，当出入口高度无法满足此要求时，应在出入口加设防淹闸槽。

3) 出入口类型。车站出入口类型一般分为敞开型、半封闭型、封闭型、隐藏性，不同类型出入口受暴雨影响程度不同。如敞开型出入口直接暴露于室外，雨水可直接落入出入口内，因此受到影响最大，隐藏型出入口一般位于大型商场、高铁站等建筑内部，雨水难以直接对车站出入口产生影响。

4) 实时客流量。地铁车站内客流量越高，洪涝灾害下受影响人员数量越大，进而增加了应急疏散组织与救援引导的难度。

5) 市政排水管网密度。地铁车站周边市政排水管网密度直接影响到内涝积水的潜在严重程度，排水管网密度越高，短时强降雨形成积水越能够更快排出，进而降低地铁车站洪涝灾害风险。

2.1.3 防灾抗灾能力预警指标

1) 车站排水能力。车站排水能力越强，车站内积水就越能够得到快速清理。依据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)，高架区间、敞开出入口、敞开风井及隧道洞口的雨水泵站、排水沟及排水管渠的排水能力，应按当地 50 年一遇的暴雨强度计算。

2) 防洪设施配备。地铁车站内配备的防洪设施能够有效抵御洪涝灾害，站内防洪设施主要包括无线对讲机、防汛铁锹、挡水板、防汛沙袋、防滑垫、柴油发电机、抢修灯等。

3) 水位监控覆盖率。车站各出入口、风亭等位置水位监控覆盖率越高，车站越能够及时快速开展防汛工作。

4) 防汛应急演练及培训情况。按照车站开展防汛应急演练及培训的频率和开展效果，对其进行分级评价，相关数据获取可基于日常管理数据。

5) 防汛应急预案完备性。按照车站防汛应急预案编制完备性对其进行分级评价，相关数据获取可基于车站防汛应急预案及岗位责任制文件。

基于地铁车站洪涝灾害预警指标分析，构建地铁车站洪涝灾害预警指标体系如表 1 所示，积水倒灌风险与灾害脆弱性预警指标按照严重程度从高到低分为Ⅰ～Ⅳ级，防灾抗灾能力从高到低分为Ⅰ～Ⅳ级。基于预警指标体系，将分别构建积水倒灌风险、灾害脆弱性、防灾抗灾能力定量评价方法，用于地铁车站洪涝灾害综合预警值的计算。

2.2 地铁车站积水倒灌风险量化方法

积水深度可从积水实测值和预测值两方面进行判别，

表 1 地铁车站洪涝灾害预警指标体系

Table 1 Early warning indicator system for flood disasters in subway stations

一级指标	二级指标	分级量化表征方法	指标数据获取
积水倒灌风险 B1	积水深度 C1	Ⅰ级：大于等于 0.60 m；Ⅱ级：大于等于 0.40 m，小于 0.60 m；Ⅲ级：大于等于 0.27 m，小于 0.40 m；Ⅳ级：小于 0.27 m	传感器监测或实测
	积水时间 C2	Ⅰ级：大于 1.5 h；Ⅱ级：大于 1.0 h；Ⅲ级：大于 0.5 h；Ⅳ级：小于 0.5 h	传感器监测或实测
	气象预警等级 C3	红色预警(Ⅰ级)：3 小时内降雨量将达 100 mm 以上，或者已达 100 mm 以上且降雨可能持续；橙色预警(Ⅱ级)：3 小时内降雨量将达 50 mm 以上，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续；黄色预警(Ⅲ级)：6 小时内降雨量将达 50 mm 以上，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续；蓝色预警(Ⅳ级)：12 小时内降雨量将达 50 mm 以上，或者已达 50 mm 以上且降雨可能持续	气象部门预测
洪涝灾害脆弱性 B2	车站区域地势 C4	Ⅰ级：低于周边地势；Ⅱ级：与周边地势相近；Ⅲ级：稍高于周边地势；Ⅳ级：显著高于周边地势	固有设计参数
	出入口台阶高度 C5	Ⅰ级：出入口高度高于周围地面小于 30 cm；Ⅱ级：出入口高度高于周围地面 30～45 cm；Ⅲ级：出入口高度高于周围地面 45 cm 以上	固有设计参数
	出入口类型 C6	Ⅰ级：敞开型；Ⅱ级：半封闭型；Ⅲ级：封闭型；Ⅳ级：隐藏型	固有设计参数
	实时客流量 C7	Ⅰ级：十分拥挤；Ⅱ级：客流较大；Ⅲ级：客流适中；Ⅳ级：客流较小	传感器监测
	市政排水管网密度 C8	Ⅰ级：较低；Ⅱ级：一般；Ⅲ级：较高；Ⅳ级：高	固有设计参数
洪涝灾害防灾抗灾能力 B3	车站排水能力 C9	Ⅰ级：雨水泵房按照 100 a 暴雨重现期设计，且设备全启动时富裕能力大于 30%；Ⅱ级：雨水泵房按照 100 a 暴雨重现期设计，富裕能力小于 30%；Ⅲ级：雨水泵房按照 50 a 暴雨重现期设计，且设备全启动时富裕能力大于 30%；Ⅳ级：雨水泵房设计小于 50 a 暴雨重现期	固有设计参数
	防洪设施配备 C10	Ⅰ级：防洪设施配备完善且保持完好；Ⅱ级：防洪设施基本完善；Ⅲ级：防洪设施配备不完善或较多损坏	日常管理数据
	水位监控覆盖率 C11	Ⅰ级：各出入口、垂直电梯、风亭均设有水位监测传感器；Ⅱ级：各出入口、垂直电梯、风亭部分设有水位监测传感器；Ⅲ级：各出入口、垂直电梯、风亭少数设有水位监测传感器；Ⅳ级：各出入口、垂直电梯、风亭未设有水位监测传感器	固有设计参数
	防汛应急演练及培训情况 C12	Ⅰ级：常态有效开展；Ⅱ级：基本有效开展；Ⅲ级：未按要求严格开展；Ⅳ级：几乎从未开展	日常管理数据
	防汛应急预案完备性C13	Ⅰ级：编制完善；Ⅱ级：基本完善；Ⅲ级：存在部分缺失；Ⅳ级：存在严重缺失	日常管理数据

实测值主要指地铁车站周边积水深度实际值，预测值为基于气象预警信息估计得到的积水深度。1 h 最大降水量即短时强降水是影响积水深度及洪涝灾害形成的主要原因，通过广泛收集国内多个城市典型内涝点下不同降雨量与积水深度关系相关研究的原始数据[16-22]，对不同降雨量数据下的积水深度值进行拟合分析。为保证拟合公式的准确性和应用便捷性，选用多项式拟合方法，拟合结果如图 2 所示，R^2=0.81 说明拟合结果具有显著相关性。

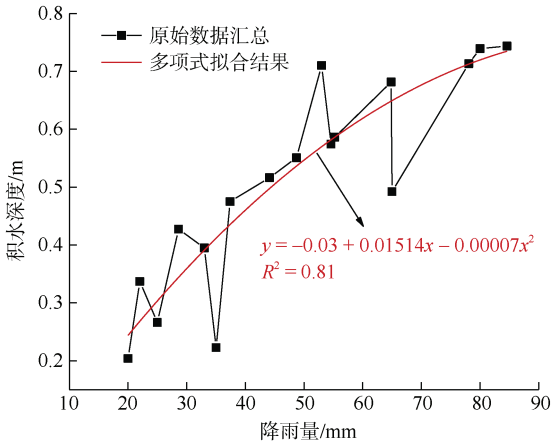


图 2　降雨量与积水深度关系及多项式拟合结果

Figure 2　Relationship between rainfall and water depth and polynomial fitting results

在图 2 的基础上得到积水深度与小时降雨量换算公式(2)

$$D_w = -0.03+0.01514x-0.00007x^2 \tag{2}$$

式中，x 为小时降雨量，mm；D_w 为积水深度，m。

将气象预警等级中的降雨量预警阈值转化为小时降雨量平均值，并将其代入式(2)，得到不同气象预警等级下的预计积水深度如表 2 所示。基于表 2 计算结果与表 1 中积水时间指标分级阈值，暴雨红色预警等级下的预计积水深度将至少达到Ⅱ级标准。依据式(2)可实现基于小时降雨量预报值对地铁车站周边洪涝积水深度进行预测。

表 2　不同气象预警等级下预计积水深度

Table 2　Estimated depth of water accumulation under different meteorological early warning levels

预警等级	判别标准	平均小时降雨量/mm	预计积水深度/m
蓝色	12 小时内降雨量将达 50 mm 以上	5	0.04
黄色	6 小时内降雨量将达 50 mm 以上	9	0.10
橙色	3 小时内降雨量将达 50 mm 以上	17	0.21
红色	3 小时内降雨量将达 100 mm 以上	34	0.40

由于原始数据获取的局限性，本文提出的降雨量与积水深度计算公式仅作为一种参考方法。在实际应用中可通过不断扩充原始数据样本量，持续提升计算公式的准确性。另外，该公式构建过程中暂未充分考虑区域地理位置因素对积水深度的影响，未来可进一步考虑地势标高分级，对同等降雨量场景下的不同等级地势标高区域积水数据分别进行分析，以优化该计算方法的适用范围与准确性。

由于地铁车站出入口台阶高度是影响积水倒灌至地铁车站内风险的首要因素，故将积水深度与地铁车站各出入口地面标高最低值的比值作为积水倒灌风险的直接计算方法。同时引入车站周边区域积水时间作为一项重要影响因素，积水倒灌风险值计算式为

$$S_f = \frac{D_w}{H_e}\cdot V_T \tag{3}$$

$$H_e = h_{step} + (h_e - h_w) \tag{4}$$

式中，D_w 表示地铁车站周边洪涝积水深度实测值或预测值，预测值可根据降雨量信息由式(2)计算得到；V_T 表示车站周边区域积水时间严重程度的分级赋值，V_T 参考《安徽省城市内涝治理工作指南》[23]，赋值方法见表 3，车站周边区域更长的积水时间会增加积水倒灌风险，因此具有更高的严重程度赋值；H_e 表示地铁车站各出入口台阶高度相对于最大汇水高程的最低值；h_{step} 表示出入口台阶高度；h_e 表示各出入口地面高程最低值；h_w 表示区域最大汇水高程。

表 3　积水时间严重程度分级赋值

Table 3　Grading value of severity of water time

严重性等级	积水时间/h	分级赋值
Ⅰ级	t>1.5	1.2
Ⅱ级	t>1.0	1.0
Ⅲ级	t>0.5	0.8
Ⅳ级	t<0.5	0.6

2.3　地铁车站洪涝灾害脆弱性评价

为获得各项脆弱性指标权重值，基于层次分析法(analytic hierarchy process，AHP)通过专家评分确定各指标的相对重要性，采用 1～9 标度法分别对脆弱性指标重要性两两比较，构造完整的专家判断矩阵，矩阵形式为[24]

$$\boldsymbol{A} = (a_{ij})_{n\times n} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & .. & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \tag{5}$$

式中，n 表示该层次内指标个数；a_{ij} 表示指标 i 相比于指标 j 的相对重要性标度。

基于专家判断矩阵，分别计算矩阵最大特征值与一致性指标 CR 为

$$\lambda_{\max}=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{W})_i}{nW_i},i=1,2,\cdots,n \tag{6}$$

$$\mathrm{CR}=\left(\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}\right)\cdot\frac{1}{\mathrm{RI}} \tag{7}$$

式中，$\boldsymbol{W}$ 表示判断矩阵特征向量，可在式(5)基础上计算得到；W_i 为判断矩阵经归一化得到的权重值，RI 可依据矩阵阶数通过查表得到[25]。CR<0.1 说明通过一致性检验。在此基础上将最大特征值及对应特征向量 W 进行归一化处理，即可得到各指标权重值。

地铁车站洪涝灾害脆弱性指标权重及指标分级赋值方法如表 4 所示，各专家数据 CR 值均小于 0.1，判断矩阵通过一致性检验。依据表 1 预警指标分级量化表征方法，指标实际值处于从高到低不同等级(Ⅰ～Ⅳ级)时分别赋值为 10、6、3、1。由表 4 可知，出入台阶高度指标权重最高，是影响地铁洪涝灾害脆弱性的首要因素，在实际工程中对于出入口台阶高度较低的车站应采取充分的补偿措施。

表 4　地铁车站洪涝灾害脆弱性指标权重及分级赋值

Table 4　Weight and grading value of flood disaster vulnerability indicators in subway station

指标	指标权重 ω_j
地势及标高	0.183 4
出入口台阶高度	0.357 3
出入口类型	0.102 7
实时客流量	0.114 2
市政排水管网密度	0.242 5

本文采用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution，TOPSIS)，通过构造“正负理想解”得出评价对象与正理想解的接近程度作为评价结果等级的判别依据[26-27]。采用 TOPSIS 法确定脆弱性等级分为 4 个步骤。

步骤 1：依据脆弱性指标权重构建加权决策矩阵，同式(5)矩阵形式，加权决策矩阵中元素 c_{ij} 表达式为：

$$c_{ij}=\omega_j*a_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n) \tag{8}$$

式中，ω_j 表示指标权重，可由表 4 中获取；e_{ij} 表示第 i 个评价对象的第 j 个评价指标值。

步骤 2：确定各脆弱性评价指标的正理想解 C_j^+ 和负理想解 C_j^-，分别为

$$C_j^+=\max_{1\leqslant i\leqslant m}\left\{c_{ij}\right\},j-1,2,\cdots,m \tag{9}$$

$$C_j^-=\min_{1\leqslant i\leqslant m}\left\{c_{ij}\right\},j-1,2,\cdots,m \tag{10}$$

步骤 3：采用欧式距离分别计算评价对象与正、负理想解间的距离 D_i^+ 和 D_i^-，分别为

$$D_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_{ij}-C_j^+)^2},i=1,2,\cdots,m \tag{11}$$

$$D_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{n}(c_{ij}-C_j^-)^2},i=1,2,\cdots,m \tag{12}$$

步骤 4：计算评价对象的相对贴近度，即

$$E_i=\frac{D_i^-}{D_i^++D_i^-} \tag{13}$$

基于 TOPSIS 法的计算结果，可用相对贴进度表征洪涝灾害脆弱性 V_s，采用等间距法划分脆弱性等级，如表 5 所示。

表 5　地铁车站洪涝灾害脆弱性相对贴近度评价标准

Table 5　Evaluation criteria for the relative closeness of flood disaster vulnerability in subway station

等级	含义	脆弱性 V_s
Ⅰ级	脆弱性高，较难抵御洪涝灾害	[0.75，1.00]
Ⅱ级	脆弱性偏高，勉强抵御洪涝灾害	[0.50，0.75)
Ⅲ级	脆弱性较低，能够抵御洪涝灾害	[0.25，0.50)
Ⅳ级	脆弱性低，能够有效抵御洪涝灾害	(0.0，0.25)

2.4　地铁车站洪涝灾害防灾抗灾能力评价

基于研究确定的洪涝灾害防灾抗灾能力预警指标，采用 AHP 法与 TOPSIS 法相结合的方法确定防灾抗灾能力预警指标权重结果见表 6，防灾抗灾能力等级评价标准见表 7。依据表 1 将指标实际值处于不同等级(Ⅰ～Ⅳ级)时分别赋值为 10、6、3、1。由表 6 可知，水位监测覆盖率指标权重最高，需在实际工程中得到进一步重视。

表 6　地铁车站洪涝灾害防灾能力指标权重及分级赋值

Table 6　Weight and grading value of flood disaster prevention capacity in subway station

指标	指标权重
车站排水能力	0.132 1
水位监控覆盖率	0.295 2
防洪设施配备	0.128 2
防汛应急演练及培训情况	0.252 9
防汛应急预案完备性	0.191 6

表 7　地铁车站洪涝灾害防灾能力相对贴近度评价标准

Table 7　Evaluation criteria for the relative closeness of flood disaster prevention capacity in subway station

等级	含义	防灾能力 C_r
Ⅰ级	防灾能力强，能有效抵御洪涝灾害	[0.75，1.00]
Ⅱ级	防灾能力较强，能够抵御洪涝灾害	[0.50，0.75)
Ⅲ级	防灾能力较弱，勉强抵御洪涝灾害	[0.25，0.50)
Ⅳ级	防灾能力弱，较难抵御洪涝灾害	(0.0，0.25)

3　地铁车站洪涝灾害分级预警评价方法

3.1　地铁车站洪涝灾害分级预警判别标准

基于地铁车站洪涝灾害预警值计算方法，分别考虑地铁车站洪涝灾害预警模型框架下的最不利场景和最理想场景，计算两种场景下的预警值，在此基础上，采取等间距法确定预警阈值及分级范围，提出地铁车站洪涝灾害分级预警标准。

设定在地铁车站洪涝灾害最不利场景下，积水深度已经与出入口台阶持平，即 D_w/H_e=1。积水时间达 1.5 h，基于表 3 可得 V_T=1.2。脆弱性与防灾能力按照较不利场景 V_s/C_r=2 进行取值，即防灾能力不能有效抵御承灾体脆弱性，由此计算得到不利场景下地铁洪涝灾害预警值阈值：PV_{bad}=[1×1.2]×2=2.4。

设定在地铁车站洪涝灾害理想场景下，积水深度仅达到地面标高与出入口台阶高度中间位置，即 D_w/H_e=0.5。积水时间小于 0.5 h，基于表 3 可得 V_T=0.6。脆弱性与防灾能力按照较理想场景 V_s/C_r=0.5 进行取值，即防灾能力能有效抵御承灾体脆弱性，由此计算得到理想场景下地铁车站洪涝灾害预警值阈值：PV_{good}=[0.5×0.6]×0.5=0.15。

基于得到的最不利场景与理想场景下预警值结果，当预警值 PV>PV_{bad} 时，应设定为Ⅰ级预警，当 PV<PV_{good} 时，设定为最低等级即Ⅳ级预警。在此基础上按照 4 级预警划分预警值范围，同时参考《国家城市轨道交通运营突发事件应急预案》[28]《地铁运营安全评价标准》[29]等相关标准规范中对于地铁运营突发事件的严重程度和应急响应分级，提出地铁车站洪涝灾害分级预警标准见表 8，预警值越高，表示潜在的洪涝灾害威胁越大，需要采取更严格的应对措施。

表 8　地铁车站洪涝灾害分级预警判别标准及响应策略

Table 8　Classification criteria for early warning and response strategies of flood disaster in subway station

预警等级	预警值 PV	分级响应
Ⅰ级	(2.4，+∞]	可能发生特别重大事件后果，必要时视情采取封站措施，并及时疏导客流，做好相关设施设备停用和相关线路列车限速、停运准备
Ⅱ级	(1.28，2.4]	可能发生重大事件后果，增派人员加强值守和检查巡视，必要时视情采取限流等控制措施，做好雨水疏排和车站出入口挡水工作
Ⅲ级	(0.15，1.28]	可能发生较大事件后果，加强对车站出入口等重点区域的检查巡视和监测，确保排水设备和防汛物资等完备充足，做好应急准备
Ⅳ级	(0.0，0.15]	可能发生一般事件后果，加强气象预警信息和降雨情况监测，整备防汛物资，做好排水设备设施检查

3.2　预警评价方法实例分析

基于构建的地铁车站洪涝灾害分级预警评价方法，以某轨道交通线路两座典型车站 YB 和 YC 站为例，展示预警方法应用。通过实际场景数据收集，车站洪涝灾害脆弱性与防灾抗灾能力评价结果见表 9。

表 9　实例车站洪涝灾害脆弱性与防灾抗灾能力评价结果

Table 9　Evaluation results of disaster vulnerability and disaster prevention and resistance capacity of sample stations

车站	一级指标	二级指标	分级量化表征方法	评估结果
YC 站	洪涝灾害脆弱性	车站区域地势	出入口标高最低值为 90.69 m，最大汇水高程 89.94 m—Ⅱ级(分值 6)	0.38
		出入口台阶高度	50 cm—Ⅲ级(分值 3)	
		出入口类型	半封闭型—Ⅱ级(分值 6)	
		实时客流量	客流适中—Ⅲ级(分值 3)	
		市政排水管网密度	一般—Ⅱ级(分值 6)	
YB 站	洪涝灾害脆弱性	车站区域地势	出入口标高最低值为 89.5 m，最大汇水高程 89.84 m—Ⅰ级(分值 10)	0.46
		出入口台阶高度	50 cm—Ⅲ级(分值 3)	
		出入口类型	半封闭型—Ⅱ级(分值 6)	
		实时客流量	客流较大—Ⅱ级(分值 6)	
		市政排水管网密度	一般—Ⅱ级(分值 6)	

续表

车站	一级指标	二级指标	分级量化表征方法	评估结果
YC 站、YB 站	洪涝灾害防灾抗灾能力	车站排水能力	按照 50 a 暴雨重现期设计—Ⅲ级(分值 3)	0.72
		防洪设施配备	均配备防汛沙袋、雨衣和雨鞋等防汛物资—Ⅰ级(分值 10)	
		水位监控覆盖率	各出入口、垂直电梯、风亭底部集水井配置了超声波水位传感器—Ⅰ级(分值 10)	
		防汛应急演练及培训情况	基本有效开展—Ⅱ级(分值 6)	
		防汛应急预案完备性	制订了包括地铁线路、车站、运营控制中心等范围内的防汛应急工作预案—Ⅰ级(分值 10)	

由表 9 计算可知，YC 站洪涝灾害脆弱性水平为 0.38，由于 YB 站地势稍低于最大汇水高程，同时车站客流量更高，其洪涝灾害脆弱性水平为 0.46，较 YC 站相比上升了 21%；两座车站位于同一线路，车站防洪设计及应急管理工作开展情况具有一致性，因此二者防灾抗灾能力评估结果同为 0.72。

基于 YB 和 YC 两座车站脆弱性与防灾抗灾能力评价结果，积水时间保守设定预计为 1 h 以上，根据式(1)计算不同气象预警等级与积水深度等级下洪涝灾害预警值变化及预警等级如图 3 所示。

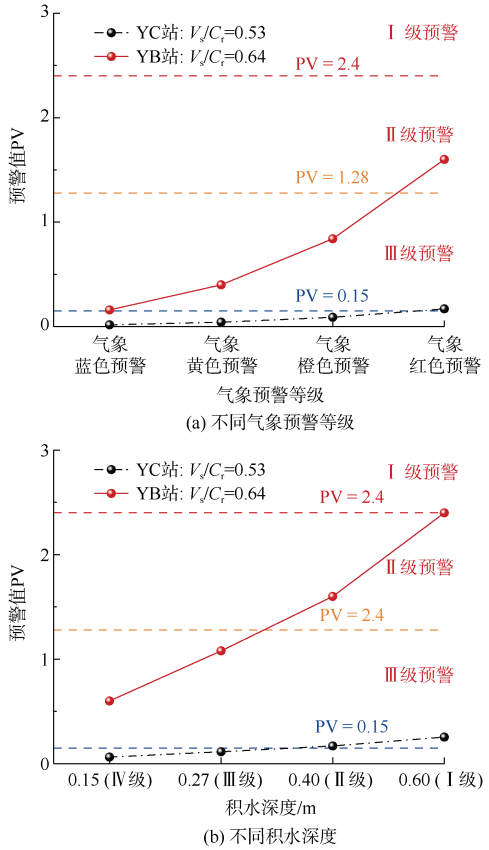


图 3 不同气象预警等级与积水深度下地铁车站洪涝灾害预警值

Figure 3 Warning value of flood disaster in subway station under different meteorological warning levels and water depth

由图 3 可知：当气象预警等级在橙色及以下时，预警值相对偏低，且预警等级处于同一级别，由于 YB 站相比于 YC 站车站地势更低，更容易受到内涝积水的影响，因此在同等气象预警等级下，YB 站高于 YC 站一个预警等级；随着积水深度的增加，预警值呈明显上升趋势；当积水深度达到 0.4 m 时，YC 站预警等级由Ⅳ级提升至Ⅲ级；在同等积水深度等级下，YB 站同样高于 YC 站一个预警等级。

实例分析结果表明，所提出的预警等级计算方法能够在充分考虑地铁车站自身属性与洪涝灾害场景严重性的基础上，实现科学确定预警等级，以避免不同地铁车站面对同等严重程度的洪涝灾害时响应不足或过度响应的情况。即使洪涝灾害场景因素是确定预警等级的关键，但降低地铁车站洪涝灾害脆弱性，提升防灾抗灾能力仍然能够有效抵御或避免严重洪涝灾害后果的发生。

在本文提出的地铁车站洪涝灾害预警方法框架下，精准实时监测积水深度和降雨量等数据是实现有效预警的关键基础。基于行业相关研究成果，未来地铁车站系统应进一步提升车站水位监测传感器覆盖范围，优化传感器配置方案及精细化部署位置，真正实现地铁车站洪涝灾害的源头治理。

4 结论

以地铁车站洪涝灾害预警为研究对象，基于灾害动态信息与车站固有属性参数提出地铁车站洪涝灾害预警评价方法及判别标准，得出的主要结论如下：

1) 基于地铁车站洪涝灾害成灾-防灾-抗灾演化过程，从积水倒灌风险、洪涝灾害脆弱性、防灾抗灾能力 3 方面构建了涵盖 13 个指标的洪涝灾害预警指标体系及评价方法，与传统方法相比充分考虑了地铁车站自身特征与灾害场景特征对预警等级的耦合影响。

2) 出入口台阶高度和水位监控覆盖率是影响预警等级的关键因素，在实际应用中应重点关注积水深

度和降雨量等数据的实时监测，同时提升车站水位监测传感器覆盖范围。

3）实例分析结果表明，在同等气象预警等级或积水深度场景下，车站洪涝灾害脆弱性评价值上升21%将导致预警等级存在一个等级的显著差异。根据车站地势标高及最大汇水高程合理设置车站出入口台阶高度应作为地铁防涝设计的重点。

参考文献

[1] 黄永，佘廉，赖文波. 城市地下空间洪涝水灾应急响应：问题、成因与对策：基于郑州“7·20”特大暴雨国务院灾害调查报告的启示[J]. 中国应急救援，2022(5)：4-9.
HUANG Yong, SHE Lian, LAI Wenbo. Problems, causes and countermeasures of emergency response to flood in urban underground space: based on the state council's disaster investigation report of Zhengzhou "7·20" heavy rain[J]. China emergency rescue, 2022(5): 4-9.

[2] 张蕾，吕伟，雷鹏. 基于SPN-MC模型的城市地铁洪涝灾害应急响应流程效能分析[J]. 中国安全生产科学技术，2023，19(6)：20-25.
ZHANG Lei, LYU Wei, LEI Peng. Efficiency analysis on emergency response process of urban subway under flood disaster based on SPN-MC model[J]. Journal of safety science and technology, 2023, 19(6): 20-25.

[3] CHEN W L, WANG X L, DENG S H, et al. Integrated urban flood vulnerability assessment using local spatial dependence-based probabilistic approach[J]. Journal of hydrology, 2019, 575: 454-469.

[4] 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.

[5] 杨可，黄国忠，张磊，等. 基于DEMATEL-AHDT的暴雨条件下地铁系统脆弱性影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文)，2023，54(6)：22-33.
YANG Ke, HUANG Guozhong, ZHANG Lei, et al. Analysis of influencing factors of subway system vulnerability under rainstorm conditions based on DEMATEL-AHDT[J]. Water resources and hydropower engineering, 2023, 54(6): 22-33.

[6] 李辉山，白莲，刘平. 基于DNN神经网络的地铁洪涝灾害评估研究[J]. 铁道标准设计，2022，66(12)：131-136.
LI Huishan, BAI Lian, LIU Ping. Research on subway flood disaster assessment based on DNN neural network[J]. Railway standard design, 2022, 66(12): 131-136.

[7] 李浩然，欧阳作林，姜军，等. 城市轨道交通灾害链演化网络模型及其风险分析：以地铁水灾为例[J]. 铁道标准设计，2020，64(2)：153-157.
LI Haoran, OU-YANG Zuolin, JIANG Jun, et al. Urban rail transit disaster chain evolution network model and its risk analysis—taking subway flood as an example[J]. Railway standard design, 2020, 64(2): 153-157.

[8] 赵露薇，王青娥. FCM下暴雨干扰地铁系统脆弱性演化分析[J]. 中国安全科学学报，2022，32(10)：186-192.
ZHAO Luwei, WANG Qing'e. FCM-based vulnerability evolution analysis of metro systems under storm disturbances[J]. China safety science joumal, 2022, 32(10): 186-192.

[9] 方正，刘非，肖雪莲，等. 基于城市综合流域排水模型的地铁站防洪模拟研究[J]. 武汉大学学报(工学版)，2016，49(1)：60-65.
FANG Zheng, LIU Fei, XIAO Xuelian, et al. Analysis of inundation of metro station based on integrated catchment management model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2016, 49(1): 60-65.

[10] 张丽佳. 上海市地下轨道交通暴雨内涝脆弱性研究[D]. 上海：华东师范大学，2011.
ZHANG Lijia. Waterlogging vulnerability study of underground metro in Shanghai urban areas[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.

[11] 夏侯遐迩，王一凡，陈佳龙，等. 基于FDA模型的地铁列车洪淹事故致因分析[J]. 中国安全生产科学技术，2022，18(10)：24-30.
XIAHOU Xiaer, WANG Yifan, CHEN Jialong, et al. Causes analysis of subway train flooded accidents based on FDA model[J]. Journal of safety science and technology, 2022, 18(10): 24-30.

[12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范：GB 50157—2013[S]. 北京：中国建筑工业出版社，2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[13] 北京市水务局. 北京城市积水内涝风险地图[EB/OL]. (2024-06-08)[2024-06-14]. https://www.beijing.gov.cn/ywdt/zwzt/2024aqdx/xqfw/202406/t20240614_3712420.html.

[14] 安徽省住房和城乡建设厅. 安徽省城市内涝治理工作

指南[EB/OL]. (2023-01-20)[2025-06-05]. http://dohurd.ah.gov.cn/wjgk/tfwj/56609971.html.

[15] 武汉市自然资源和城乡建设局. 武汉市排水防涝系统规划设计标准[EB/OL]. (2013-10-30)[2025-06-05]. https://zrzyhgh.wuhan.gov.cn/zwgk_18/fdzdgk/jcgk/qtwjygk/202001/t20200107_614966.shtml.

[16] 高维英, 李明, 李菁. 西安城市内涝分布特征及其与降雨量的关系[J]. 陕西气象, 2014(2): 17-20.

[17] 贾斌凯, 李怀恩, 黄绵松, 等. 单位 LID 措施缓解城市内涝效益分析计算: 以固原市为例[J]. 给水排水, 2021, 57(1): 58-64.
JIA Binkai, LI Huaien, HUANG Miansong, et al. Benefit analysis and calculation of unit LID measures to alleviate urban waterlogging: a case study of Guyuan city[J]. Water & wastewater engineering, 2021, 57(1): 58-64.

[18] 姚林塔, 孙运凡, 郑颖青, 等. 利用最大降水量拟合福州城市内涝积水深度的误差分析[J]. 气象与减灾研究, 2018, 41(2): 148-153.
YAO Linta, SUN Yunfan, ZHENG Yingqing, et al. Error analysis of waterlogging depth using maximum precipitation fitting in Fuzhou City[J]. Meteorology and disaster reduction research, 2018, 41(2): 148-153.

[19] 宋瑞宁, 任梦瑶, 刘强, 等. 基于 InfoWorks ICM 模型的内涝预警降雨量阈值研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(2): 5-8.
SONG Ruining, REN Mengyao, LIU Qiang, et al. Study on the waterlogging warning rainfall depth threshold based on InfoWorks ICM model[J]. Water resources and power, 2021, 39(2): 5-8.

[20] 宋瑞宁, 谢芳, 李小宁, 等. 设计降雨特征对城市内涝模拟结果的影响分析[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(03): 136-143.
SONG Ruining, XIE Fang, LI Xiaoning, et al. Design rainfall characteristics affects urban flood inundation simulation[J] Joumal of water resources & water engineering, 2023, 34(3): 136-143.

[21] 史悦, 彭宇欣, 丁艳萍, 等. 基于容积法的地下空间暴雨内涝风险模型及应用[J]. 中国给水排水, 2019, 35(23): 127-133.
SHI Yue, PENG Yuxin, DING Yanping, et al. Rainstorm waterlogging risk model for underground space based on volumetric method and its application[J]. China water & wastewater, 2019, 35(23): 127-133.

[22] 李东荣. 暴雨灾害下城市轨道交通线路韧性评估研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
LI Dongrong. Research on resilience evaluation of urban rail transit line under rainstorm disaster[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.

[23] 安徽省住房城乡建设厅. 关于印发《安徽省城市内涝治理工作指南》的通知[EB/OL](2023-01-20) [2025-06-05]. http://dohurd.ah.gov.cn/wjgk/tfwj/56609971.html.

[24] 张敏, 韩阳, 马运康, 等. 全自动运行地铁突发事件应急响应能力评价指标体系研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2023, 25(1): 52-60.
ZHANG Min, HAN Yang, MA Yun-kang, et al. Emergency response capability evaluation index system of fully automatic operation metro[J]. Journal of UESTC (Social Sciences Edition), 2023, 25(1): 52-60.

[25] 陈尚, 蒋毅, 宋珍. 电力电缆火灾风险评价模型与预警信号分级[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 3-7.
CHEN Shang, JIANG Yi, SONG Zhen. Fire risk assessment model and early warning signal classification of power cable[J]. Southern power system technology, 2020, 14(4): 3-7.

[26] 胥明, 许杰, 万友生, 等. 基于 CRITIC 法与 TOPSIS 地铁车站施工安全评价[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 157-166.
XU Ming, XU Jie, WAN Yousheng, et al. Safety evaluation of subway station construction based on CRITIC method and TOPSIS[J]. Journal of natural disasters, 2022, 31(3): 157-166.

[27] 陈婷婷, 宋永发. AHP-TOPSIS 法在地铁车站方案选择中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2013, 9(2): 326-332.
CHEN Tingting, SONG Yongfa. Application of AHP-TOPSIS in scheme comparison of subway stations[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2013, 9(2): 326-332.

[28] 中华人民共和国中央人民政府. 国务院办公厅关于印发国家城市轨道交通运营突发事件应急预案的通知[EB/OL]. (2015-05-14)[2025-06-05]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2015-05/14/content_9751.htm.

[29] 中国人民共和国建设部. 地铁运营安全评价标准: GB/T 50438—2007[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for the operation safety assessment of existing metro[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.

（编辑：王艳菊）