

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.02.008

# 基于DPSRC模型的地铁车站 暴雨内涝脆弱性评估方法

颜克胜<sup>1,2</sup>, 赵婧雅<sup>1,2</sup>, 袁宏川<sup>2</sup>

(1. 水电工程施工与管理湖北省重点实验室, 湖北宜昌 443002; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北宜昌 443002)

**摘要:** 针对城市暴雨内涝灾害频发面临的高风险问题, 构建地铁车站暴雨内涝脆弱性评估方法。基于驱动力-压力-状态-响应-调控(driver-pressure-state-response-control, DPSRC)模型的链式分析框架, 系统解析地铁暴雨内涝风险动态因果, 构建包含5个准则层、20个指标层的评估指标体系; 采用AHP-熵权法融合主客观权重, 提出地铁车站暴雨内涝脆弱性综合评估方法, 并以宁波地铁99座车站进行实证分析。结果显示: ①所提方法能准确有效地评估各车站的脆弱性; ②高(19.10%)、中(51.69%)与低(29.21%)脆弱性站点构成非对称分布, 其中70.79%的站点处于风险暴露状态, 系统防控需求迫切; ③站点防洪能力、站点监测预警能力与应急物资设备是主导高脆弱性站点形成的关键致因。研究可为城市地铁系统暴雨内涝风险管理、防灾减灾规划及韧性交通建设提供参考。

**关键词:** 城市轨道交通; 地铁车站; 暴雨内涝; 脆弱性评估; DPSRC模型; 宁波地铁

中图分类号: U231.96

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)02-0065-08

## Vulnerability Assessment Method for Metro Stations under Rainstorm Waterlogging Based on the DPSRC Model

YAN Kesheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Jingya<sup>1,2</sup>, YUAN Hongchuan<sup>2</sup>(1. Hubei Key Laboratory of Hydropower Engineering Construction and Management, Yichang, Hubei, 443002;  
2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002)

**Abstract:** To address the high risks faced by metro systems due to their enclosed underground spaces, vulnerable facilities, and structural complexity amidst frequent rainstorm waterlogging, it is imperative to develop a scientific vulnerability assessment method for metro stations to enhance comprehensive resilience. Based on the chain analysis framework of the driver-pressure-state-response-control (DPSRC) model, this study systematically analyzes the dynamic causality of metro rainstorm waterlogging risks and constructs an assessment index system comprising 5 criterion layers and 20 indicator layers. By integrating subjective and objective weights using the AHP-entropy weight method, a comprehensive vulnerability assessment approach for metro stations was proposed and applied to an empirical analysis of 99 stations in the Ningbo Metro. The results indicate that: ① The proposed method can accurately and effectively assess station vulnerability; ② Stations vulnerabilities exhibit an asymmetric distribution across high (19.10%), medium (51.69%), and low (29.21%) vulnerability levels, with 70.79% of stations exposed

收稿日期: 2025-06-05 修回日期: 2025-09-23

第一作者: 颜克胜, 男, 博士, 副教授, 主要从事交通基础设施韧性评估与管理研究, yankesheng@ctgu.edu.cn

通信作者: 赵婧雅, 女, 硕士研究生, 从事交通基础设施韧性评估与管理研究, 775034507@qq.com

基金项目: 湖北省教育厅科学技术研究计划优秀中青年人才项目(Q20231212); 湖北省高等学校哲学社会科学研究项目(22Q030); 水电工程施工与管理湖北省重点实验室开放基金(2023KSD29); 教育部人文社会科学研究一般项目(25YJCZH327)

引用格式: 颜克胜, 赵婧雅, 袁宏川. 基于DPSRC模型的地铁车站暴雨内涝脆弱性评估方法[J]. 都市轨道交通, 2026, 39(2): 65-72.  
Yan Kesheng, Zhao Jingya, Yuan Hongchuan. Vulnerability assessment method for metro stations under rainstorm waterlogging based on the DPSRC model[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(2): 65-72.

to risk, highlighting an urgent need for systemic prevention and control; ③ Waterlogging prevention capacity, monitoring and early warning capabilities, and emergency equipment reserves constitute the key contributing factors to high-vulnerability stations. This research provides a reference for rainstorm waterlogging risk management, disaster prevention, mitigation planning, and resilient transportation development in urban metro systems.

**Keywords:** urban rail transit; metro stations; rainstorm waterlogging; vulnerability assessment; DPSRC model; Ningbo Metro

随着全球气候变化加剧,极端降水事件频发,城市地下交通设施面临的内涝风险日益突出<sup>[1]</sup>。而在应对极端降水时,地铁设施可能存在水文气象阈值设定滞后、结构防水体系效能不足、设备防护能力有限等系统性缺陷。这些缺陷带来的连锁风险可能引发地铁站厅倒灌(如2021年郑州地铁)、轨区积水(如2023年北京地铁)及电力瘫痪(如2024年广州地铁)等次生灾害,进而造成运营中断等影响。由此可见,地铁作为城市交通系统的重要组成部分,其在极端暴雨中暴露的多维脆弱性,是韧性城市建设中需重点应对的挑战<sup>[2]</sup>。

针对这一问题,学界已逐步开展地铁脆弱性评估问题的研究。尽管在评价维度与构成要素方面已形成多层次的框架体系,但系统性整合与动态性表征仍存在显著不足。具体而言,传统研究多聚焦于工程设施暴露度(如挡水结构可靠性、排水设施冗余度)与应急响应敏感性(如应急资源配置率、人员疏散效率)等静态要素<sup>[3-5]</sup>,而忽视了区域开发强度、政策调控滞后性等动态驱动力对脆弱性演化的影响。例如,段晓红<sup>[3]</sup>构建的耦合框架未涵盖脆弱性动态演化过程与外部环境交互影响,王军武等<sup>[4]</sup>基于PSR模型构建的指标体系对经济集聚效应等动态驱动力的量化表征存在局限,陈资等<sup>[5]</sup>提出的组合赋权-VIKOR框架难以处理指标间非线性关系。

在研究方法上,当前地铁脆弱性权重评定多采用层次分析法、模糊综合评价法及熵权法<sup>[6-8]</sup>,但单一方法存在显著局限:前两者依赖专家经验,主观性强且难以表征系统非线性机理;后者过度依赖数据分布,忽视了区域异质性与动态演化特征。例如,赵露薇等<sup>[6]</sup>利用文本挖掘和专家访谈构建因果模型,但其文本数据来源的覆盖广度与专家经验的主观偏好可能会削弱复杂系统风险传导路径的客观表征能力;WU等<sup>[7]</sup>采用层次分析法(AHP)建立了郑州市暴雨洪涝脆弱性评估模型,但易引入主观偏差;YU等<sup>[8]</sup>基于主客观综合赋权法与模糊综合评价模型构建了地铁站内涝风险评价体系,虽提升了动态适应性,但仍需强化复杂系统表征。研究证实,主客观综合赋权法通过融合专家知识与数学模型,可构建多源信息动态耦合机制,既能

消解单一方法偏差,又能增强权重指标对空间异质性与时间动态性的解释力,为脆弱性指标评估提供兼具理论严谨性与实践适应性的方法支撑。

鉴于驱动力-压力-状态-响应-调控(driver-pressure-state-response-control, DPSRC)模型的五维链式框架能解析多维度指标耦合效应,本文基于DPSRC模型构建地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系,并沿用AHP-熵权法融合主客观权重,提出地铁车站暴雨内涝脆弱性综合评估方法。通过评估与分析宁波地铁99座车站暴雨内涝脆弱性,验证所提方法的可行性与有效性。研究可为地铁系统的暴雨内涝风险分级管控、防灾资源优化配置及韧性能力提升提供理论依据与实践参考。

## 1 脆弱性评估指标体系构建

地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系的建立需遵循系统性、层次性与可操作性原则,科学解构地铁系统的暴雨内涝致灾机理与灾害响应特征。

DPSRC模型是可持续发展框架的扩展,广泛应用于环境评价、灾害风险评估以及脆弱性分析等领域<sup>[9]</sup>。该模型从驱动、压力、状态、响应和调控5个维度,将复杂系统问题分解为层次清晰、逻辑化的评价结构,能全面反映系统从外部驱动到内部状态的变化过程,以及各方响应与调控措施的作用,其模型结构如图1所示。

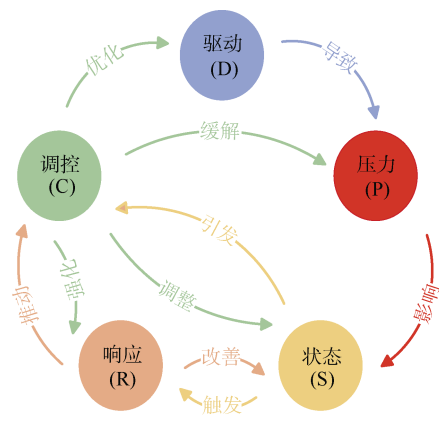


图1 DPSRC模型结构

Figure 1 DPSRC model structure

续表

| 文献、案例                   | 指标/影响因素                                                         |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| TANG 等 <sup>[13]</sup>  | 降雨量、积水量、结构渗漏率、径流系数、排水能力、绿化程度、区域经济水平、暴雨强度等                       |
| ZHANG 等 <sup>[14]</sup> | 暴雨预警、地铁站雨水位、地铁站挡水、地铁站排水、地铁隧道雨水位、地铁隧道排水、地铁列车自救和救援队、降雨强度、车站应急物资准备 |
| 东京暴雨事件 (2024 年)         | 极端降雨频次增加、排水系统设计标准滞后、基础设施投资不足、预警系统与运营系统联动不足、指挥调度能力不足             |
| 郑州“7·20”特大暴雨(2021 年)    | 短时雨强极值大、车站地势低洼、应急响应滞后、防淹设施失效、应急预案演练不足、应急物资设备不足、应急医疗能力不足、舆论引导滞后  |
| 北京地铁站被淹 (2023 年)        | 管网构建不合理、市政工程维护不足、公众应急意识薄弱、行人通道设计缺陷、生态补偿措施缺失、预警与运营脱节             |
| 广州地铁 21 号线进水事故 (2021 年) | 出入口建设陈旧、出入口地势低洼、施工管理缺陷、防护设施强度不足、隐患排查缺失、监理责任缺位、排水设备维护疏漏          |
| 纽约地铁站“瀑布” (2022 年)      | 基础设施老化、电力系统脆弱性、应急抽排能力不足、资金投入不足、雨水监测报警系统落后、人工智能算法未优化、市政排水能力不足    |
| 伦敦地铁内涝 (2023 年)         | 历史设施保护限制、多部门权责不清、排水系统覆盖不足、施工临时措施未拆除、运维响应滞后、公众防汛教育普及度低           |

基于 DPSRC 模型框架,本文将地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系划分为 5 个指标。

1) 驱动。反映暴雨内涝发生的长期背景条件,涵盖社会经济与环境因素对地铁车站脆弱性的间接作用,包括区域社会经济水平、地形与生态条件等。

2) 压力。是指在驱动因素作用下,地铁车站承受的直接灾害负荷,体现暴雨内涝的威胁,包括暴雨强度、年降雨量等。

3) 状态。衡量地铁车站当前的抗灾能力,聚焦工程设施与资源保障的静态防御水平,包括防洪能力、市政排水能力等。

4) 响应。评估灾害发生时的动态应急效能,体现地铁车站对突发内涝的快速处置能力,包括应急预案完备性、应急物资储备科学性等。

5) 调控。聚焦降低脆弱性的策略,通过政策、管理与技术手段实现系统性风险控制,包括设备维护计划、应急培训与宣传等。

为构建符合 DPSRC 模型理论框架的地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系,一方面通过系统梳理国内外相关文献,提炼已有研究中频繁使用的脆弱性影响因素;另一方面,结合典型城市地铁暴雨内涝事件的案例分析,识别实际灾害场景中的关键风险要素。这样既确保了指标体系在理论上的系统性,又增强了指标在实践中的可操作性与针对性。梳理指标如表 1 所示。

表 1 地铁车站暴雨内涝脆弱性评估典型指标  
Table 1 Typical indicators for vulnerability assessment of metro stations under rainstorm waterlogging

| 文献、案例                | 指标/影响因素                                                                                         |
|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 王军武等 <sup>[4]</sup>  | 区域性暴雨天气频率、24 h 最大降雨量、历史内涝次数、排水管网密度、径流系数、不良周边环境要素、安全生产检查次数、防汛应急预案演练次数、专业救援人员比例、救援物资储备情况、防汛应急预案编制 |
| 赵露薇等 <sup>[10]</sup> | 应急物资设备、应急避难场所数量、应急人员安排、应急联动响应机制、暴雨强度、年降雨量、人口密度、站点地形条件、周边绿化覆盖率、通信系统保障能力、疏导客流效率                   |
| 刘新荣等 <sup>[11]</sup> | 地质及水文条件、排水管网排水效率、防汛隐患排查、排水设施养护、内涝防灾指挥系统、地下空间防灾结构功能优化、城市排水系统效率、应急联动响应机制、城市绿化覆盖率                  |
| 陈佳等 <sup>[12]</sup>  | 24 h 最大降雨量、排水管网密度、防汛挡板高度、出入口周围地势情况、安全生产检查次数、防汛应急预案演练次数、专业救援人员比例、防汛应急预案编制、救援物资储备情况               |

在此基础上,采用如下步骤构建脆弱性评估体系。首先,基于表 1 中的指标并结合暴雨灾害致灾机理与地铁系统的空间特性,初步筛选出 32 项地铁车站暴雨内涝脆弱性影响因素,通过语义解析与逻辑重构对指标进行二次优化。

其次,基于 DPSRC 模型框架完成层级化整合:驱动力层保留“区域经济水平”“站点周边绿化程度”等反映长期风险累积的指标,剔除“径流系数”等间接驱动项,强化城市开发与生态承载力的矛盾解析;压力层聚焦暴雨输入的直接胁迫,将“降雨时空集中度”“短时雨强极值”合并为“暴雨强度”,新增“人口密度”等阈值参数,刻画灾害负荷强度;状态层筛选“站点防洪能力”“站点监测预警能力”等抗灾效能指标,删除“历史内涝次数”等滞后性结果,精准识别工程系统薄弱环节;响应层细化应急行动维度,新增“应急物资设备”“应急队伍协同效能”等操作性指标;调控层纳入“设备检修执行计划”“防灾文化培育度”等长效治理机制,剔除“资金投入规模”等模糊表述。

最后,为提升指标科学性,组织 11 位跨领域专家(涵盖轨道交通工程、城市规划、应急管理及水文气象)开展第 3 次筛选,针对传统 PSR 模型在驱动因子与制度调控方面的理论局限,引入“站点地形条件”作为

社会经济驱动因子,并将“区域经济水平”调整为“区域发展规划”,补充“多部门应急联动率”“智能监测系统更新周期”等指标,形成“社会经济驱动-外部环境胁迫-系统防御状态-即时应急响应-长效制度调控”

的闭环评估体系,最终确立 20 项核心指标,如表 2 所示。指标涵义定义了该指标在脆弱性评估框架中代表的具体概念;关键考量因素说明了计算该指标所需依赖的核心因素、具体要素或测量点。

表 2 地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系

Table 2 Vulnerability assessment index system of rainstorm waterlogging in metro stations

| 一级指标  | 二级指标(指标属性)                   | 指标涵义             | 关键考量因素                                                                 |
|-------|------------------------------|------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 驱动(D) | D <sub>1</sub> 区域发展规划(+)     | 综合经济水平与城市规划情况    | 经济密度、建筑容积率、地下空间开发率                                                     |
|       | D <sub>2</sub> 站点地形条件(+)     | 周边道路和地面地势        | 站点绝对高程(对比历史洪水位)                                                        |
|       | D <sub>3</sub> 站点周边绿化程度(+)   | 周边绿化覆盖率          | 绿地率(乔灌木结构占比)                                                           |
| 压力(P) | P <sub>1</sub> 暴雨强度(-)       | 降雨的集中程度          | 短历时降雨强度(如 1 h 最大雨量)                                                    |
|       | P <sub>2</sub> 年降雨量(-)       | 长期降雨强度           | 年均降雨总量                                                                 |
|       | P <sub>3</sub> 人口密度(-)       | 人口聚集程度           | 周边 1 km 常住人口密度                                                         |
|       | P <sub>4</sub> 地下水位(-)       | 地下水位升降对车站结构渗漏的影响 | 年均地下水位变化                                                               |
| 状态(S) | S <sub>1</sub> 站点防洪能力(+)     | 站点防排水能力          | 出入口踏步高度与级数、防淹挡板高度与覆盖点位<br>数、排水沟/挡水坎设置、变形缝与渗漏点状况、过<br>渡段防洪措施、应急挡板/沙袋覆盖率 |
|       | S <sub>2</sub> 站点监测预警能力(+)   | 对暴雨积水涌入的预警能力     | 积水传感器布设密度(出入口)                                                         |
|       | S <sub>3</sub> 市政排水能力(+)     | 市政管网排水效率         | 管网排水标准、管径淤积率                                                           |
|       | S <sub>4</sub> 通信系统保障能力(+)   | 通信系统稳定性          | 多信道备份率(光纤/卫星/无线电)                                                      |
|       | S <sub>5</sub> 站点周边医疗救助能力(+) | 周边医疗卫生资源         | 1 km 内二甲及以上医院数量                                                        |
|       | S <sub>6</sub> 疏导客流效率(+)     | 客流疏导速度和效果        | 疏散路径容量(人/min)                                                          |
| 响应(R) | R <sub>1</sub> 应急处置预案(+)     | 防汛应急专项预案         | 情景构建完整性、职责分工颗粒度                                                        |
|       | R <sub>2</sub> 应急避难场所数量(+)   | 周边安全避难空间数量       | 1 km 内避难场所数量                                                           |
|       | R <sub>3</sub> 应急物资设备(+)     | 应急物资、防汛物资数量      | 防水挡板/沙袋覆盖关键点比率                                                         |
|       | R <sub>4</sub> 应急队伍协同效能(+)   | 应急救援联动质量与效果      | 联合演练年频次                                                                |
| 调控(C) | C <sub>1</sub> 设备检修执行计划(+)   | 设备定期检修执行力度       | 关键设备日常维护完成率、缺陷整改闭环周期                                                   |
|       | C <sub>2</sub> 应急联动响应机制(+)   | 跨部门应急协同机制完善度     | 信息共享平台实时性                                                              |
|       | C <sub>3</sub> 防灾文化培育度(+)    | 防汛知识宣传与应急教育培训力度  | 员工应急持证上岗率、防灾科普载体多样性                                                    |

2 脆弱性评估模型构建

目前,综合评价模型已被广泛应用于社会、经济、水文、自然环境等诸多领域,主要有模糊综合评价法、TOPSIS 模型、AHP-熵权法等。模糊综合评价法擅长处理定性指标模糊性问题, TOPSIS 模型依赖数据标准化计算, AHP-熵权法能够兼顾评估问题中主观经验与客观数据的信息价值。因此,本文采用 AHP-熵权法建立地铁车站暴雨内涝脆弱性评估模型,具体流程如下。

2.1 层次分析法(AHP)确定主权重

1) 构造矩阵。采用 1~9 标度法对准则层指标进行两两重要性比较,形成判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

(1)

式中,  $n$  为指标总数。

2) 计算特征向量并归一化得到权重向量  $W$ 。

$$W_c = \frac{V_c}{\sum_{k=1}^n V_k} (c = 1, 2, \cdots, n)$$

(2)

式中,  $c$ 、 $k$  为索引变量,  $V_c$  为特征向量的第  $c$  个分量。

3) 一致性检验。计算出判断矩阵  $A$  的最大特征根  $\lambda_{\max}$ , 对判断矩阵进行一致性检验, 得到一致性指标 CI, 和一致性比率 CR。

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \sum_{c=1}^n \frac{(AW)_c}{W_c} \quad (3)$$

式中,  $(AW)_c$  为矩阵  $A$  与向量  $W$  乘积的第  $c$  个分量。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

当一致性比率  $CR < 0.1$  时, 权重结果有效, 否则需修正判断矩阵。

## 2.2 熵权法确定客观权重

1) 数据标准化。对原始数据极差归一化, 消除量纲影响。

$$Z_{ab} = \frac{X_{ab} - X_{\min b}}{X_{\max b} - X_{\min b}} \quad (6)$$

式中,  $Z_{ab}$  为标准化后的无量纲数据;  $X_{ab}$  为第  $a$  个地铁车站在第  $b$  个指标上的数据,  $X_{\max b}$  和  $X_{\min b}$  分别为第  $b$  个指标的最大值和最小值。

2) 熵值计算。通过信息熵量化指标离散程度, 熵值越小则指标区分度越高。

$$P_{ab} = \frac{Z_{ab}}{\sum_{a=1}^m Z_{ab}} \quad (7)$$

$$E_b = -\frac{1}{\ln m} \sum_{a=1}^m P_{ab} \ln P_{ab} \quad (8)$$

式中,  $P_{ab}$  为将标准化的数据转化为占比, 反映第  $a$  个样本在第  $b$  个指标上的相对贡献;  $m$  为地铁车站的数量;  $E_b$  为第  $b$  个指标的熵值。

3) 权重确定。根据熵值计算客观权重, 反映数据内在信息量。

$$W_b = \frac{1 - E_b}{\sum_{b=1}^n (1 - E_b)} \quad (9)$$

式中,  $W_b$  为第  $b$  个指标的权重。

## 2.3 综合计算指标权重

通过线性组合综合主客观权重, 引入调节系数  $\alpha$  和  $\beta$  平衡两者贡献度, 增强评估结果的鲁棒性。

$$\begin{cases} W_{\text{综合}} = \alpha W_{\text{AHP}} + \beta W_{\text{熵权}} \\ \alpha + \beta = 1 \end{cases} \quad (10)$$

通常根据评估目标的数据特征与决策者的风险偏好来分配系数实现差异化权重整合。一般地, 可取等值配置  $\alpha = \beta = 0.5$ , 以均衡主客观权重贡献<sup>[15]</sup>。

## 2.4 加权综合评估法计算脆弱性

脆弱性可由加权综合评估法得到:

$$V_i = \sum_{j=1}^n W_j X_{ij} \quad (11)$$

式中,  $V_i$  为第  $i$  个地铁车站脆弱性,  $W_j$  为第  $j$  个指标综合权重,  $X_{ij}$  为第  $i$  个地铁车站在第  $j$  指标的标准化值。

## 3 实例分析

### 3.1 数据收集与处理

宁波市作为国务院批复确定的长三角地区综合交通枢纽城市, 其年均降雨量达 1 788.3 mm, 且受台风路径影响显著, 常出现暴雨内涝等灾害事件。例如, 2013 年“菲特”台风引发轨道交通 1 号线部分站点进水; 2019 年“利奇马”台风期间, 地铁运营部门紧急组织 247 人次应急抢险; 2021 年“烟花”台风期间, 单日最大降水量达 289 mm, 致使地铁 4 号线东钱湖站周边道路出现 1.2 m 深度积水。既有研究在台风致灾机理、防灾减灾规划及韧性提升等领域为宁波市防灾减灾提供了多维度理论支撑, 但聚焦地铁暴雨内涝脆弱性评估的研究未见报道, 因此选定宁波地铁作为研究城市地铁车站暴雨内涝脆弱性的对象。截至 2024 年年底, 宁波地铁已开通 5 条线路, 线网总里程达 195 km, 共设车站 133 座(其中地下车站 99 座), 日均客流量已达到 200 万人次, 城市轨道交通客运分担率突破 50%。

为确保地铁站暴雨内涝脆弱性评估的科学性和准确性, 数据的获取涉及两种途径: 一是客观数据采集, 其中, 对于  $D_1 \sim D_3$ 、 $P_1 \sim P_4$ 、 $S_3$ 、 $S_5$ 、 $R_2$  指标, 以客观数据收集方式统计, 具体来源于 2024 年《宁波统计年鉴》《宁波市水情年报》等政府公开工作报告; 二是问卷调查结合专家打分, 对于  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $R_1$  等不宜量化的脆弱性影响因素, 通过德尔菲法邀请 11 位防灾规划与交通工程专家(高校、设计院、地铁运营部门)对主观指标进行量化评分。评分过程严格依据表 2 中“关键考量因素”列将抽象指标转化为具体可操作的评分项。采用 1~5 分制(1 分代表最差/风险最高, 5 分代表最优/风险最低), 对每个站点的各项指标进行评分。以  $S_1$ (站点防洪能力)为例, 评分依据其关键考量因素, 即依据变形缝止水带完好率、预留孔洞封堵密封等级和混凝土渗漏点密度, 专家基于现场勘查资料、设计图纸、运维记录及专业经验, 按 1~5 分制实现量化评估, 最终得分通过综合计算(如平均值或加权平均)获得。

### 3.2 指标权重计算

按照主客观赋权法并综合专家意见与参考文献<sup>[15]</sup>,

本文中的  $\alpha$  和  $\beta$  均取 0.5，根据式(10)计算出宁波地铁车站的脆弱性评估综合权重，见表 3。

表 3 地铁车站暴雨内涝脆弱性评估综合权重

Table 3 Comprehensive weight of metro stations vulnerability assessment under rainstorm waterlogging

| 二级指标                      | AHP   | 熵权    | 综合权重  |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| D <sub>1</sub> 区域发展规划     | 0.034 | 0.028 | 0.031 |
| D <sub>2</sub> 站点地形条件     | 0.047 | 0.020 | 0.034 |
| D <sub>3</sub> 站点周边绿化程度   | 0.036 | 0.017 | 0.027 |
| P <sub>1</sub> 暴雨强度       | 0.066 | 0.067 | 0.067 |
| P <sub>2</sub> 年降雨量       | 0.074 | 0.046 | 0.060 |
| P <sub>3</sub> 人口密度       | 0.032 | 0.066 | 0.049 |
| P <sub>4</sub> 地下水位       | 0.032 | 0.029 | 0.030 |
| S <sub>1</sub> 站点防洪能力     | 0.066 | 0.112 | 0.089 |
| S <sub>2</sub> 站点监测预警能力   | 0.053 | 0.095 | 0.074 |
| S <sub>3</sub> 市政排水能力     | 0.061 | 0.056 | 0.058 |
| S <sub>4</sub> 通信系统保障能力   | 0.060 | 0.021 | 0.041 |
| S <sub>5</sub> 站点周边医疗救助能力 | 0.042 | 0.030 | 0.036 |
| S <sub>6</sub> 疏导客流效率     | 0.053 | 0.087 | 0.070 |
| R <sub>1</sub> 应急处置预案     | 0.052 | 0.063 | 0.058 |
| R <sub>2</sub> 应急避难场所数量   | 0.050 | 0.027 | 0.039 |
| R <sub>3</sub> 应急物资设备     | 0.052 | 0.098 | 0.075 |
| R <sub>4</sub> 应急队伍协同效能   | 0.050 | 0.055 | 0.053 |
| C <sub>1</sub> 设备检修执行计划   | 0.045 | 0.027 | 0.036 |
| C <sub>2</sub> 应急联动响应机制   | 0.057 | 0.020 | 0.037 |
| C <sub>3</sub> 防灾文化培育度    | 0.038 | 0.036 | 0.036 |

3.3 宁波地铁各车站脆弱性计算结果

根据式(11)计算宁波地铁 99 座车站的脆弱性，结果如图 2 所示，以下分别从线路的脆弱性对比、空间分布特征、关键指标贡献度 3 方面展开分析。

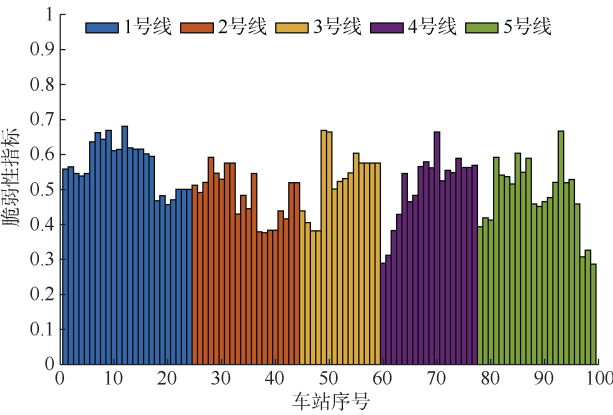


图 2 宁波地铁车站暴雨内涝脆弱性计算结果  
Figure 2 Vulnerability results of Ningbo metro stations under rainstorm waterlogging

从各线路的脆弱性对比来看，宁波市各线路暴雨内涝脆弱性呈现阶梯式分布(见图 3)。1 号线均值最高(0.571±0.068)，因其贯穿城市核心区(如东门口站)，高客流密度与地下设施复杂性导致排水系统长期超负荷；5 号线均值最低(0.483±0.096)，得益于郊区站点(布政站、兴庄路站)的低人口密度和新型防洪设计，但标准差较大，反映内部风险分化，新兴开发区站点(如海晏北路站)因市政排水滞后成为局部高风险点；3 号线(0.530±0.089)和 4 号线(0.511±0.097)均值居中但标准差突出，揭示过渡区域站点脆弱性波动显著：核心区换乘站(如樱花公园站)受制于历史规划限制，而郊区站点(庄桥火车站)受益于防洪标准升级。

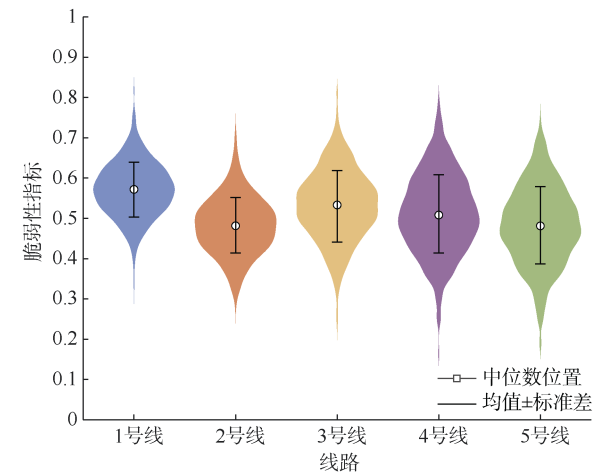


图 3 宁波地铁 1~5 号线车站暴雨内涝平均脆弱性值及标准差  
Figure 3 Average vulnerability values and standard deviations of Ningbo metro stations in Lines 1~5 under rainstorm waterlogging

从空间分布特征来看，宁波市各线路暴雨内涝脆弱性呈现“核心高、边缘低”格局。具体而言，通过自然断点法统计分析出的高脆弱性站点(得分>0.5917)的占比为 19.10%，主要集中于城市核心区域(如 1 号线东门口站、3 号线樱花公园站)，这些站点普遍面临地下空间局促、排水设施老化与防洪能力薄弱的多重压力；中脆弱性站点(0.4675≤得分≤0.5917)的占比为 51.69%，广泛分布于核心区边缘过渡带及近郊新建区，而低脆弱性站点(得分<0.4675)的占比为 29.21%，多分布于郊区(如 4 号线庄桥火车站)，其优势在于采用了更高标准的防洪设计，且人口密度较低。其中，中、高脆弱性站点合计占比为 70.79%，这一分布特征揭示了城市中心与边缘区域在灾害应对能力上的结构性矛盾：城市中心因历史遗留问题与功能集聚致内涝风险

高,郊区则借规划升级与调控措施强化实现有效控险。值得注意的是,5号线部分站点(如盍孟港站)虽属边缘区域,但因应急物资储备不足和人口密度骤增,形成“新兴脆弱点”,说明快速城市化可能消解边缘区的低风险优势。

从高脆弱性站点的关键指标贡献度来看(见表4),排名前5的站点在站点防洪能力( $S_1$ 均分0.42)、站点监测预警能力( $S_2$ 均分0.45)和应急物资设备( $R_3$ 均分0.41)3个关键指标上表现显著缺陷。其中,海晏北路站的变形缝止水带老化、混凝土渗漏点密度超标等问题突出,直接降低了物理阻水效能;樱花公园站出入口积水传感器布设密度不足,且缺乏站厅层关键区域(如电扶梯底端)的实时水浸监测节点,导致风险感知滞后;儿童公园站防水挡板及沙袋未能覆盖关键点位,且缺乏物联网动态监控体系,暴露出物资储备科学性与覆盖率的双重不足。以上结果表明,高脆弱性站点的风险并非单一因素所致,而是多重脆弱性指标的叠加效应。

表4 脆弱性排名前5的站点对比

Table 4 Comparison of the top 5 stations by vulnerability

| 站名    | 脆弱性得分  | 站点防洪能力( $S_1$ ) | 站点监测预警能力( $S_2$ ) | 应急物资设备( $R_3$ ) |
|-------|--------|-----------------|-------------------|-----------------|
| 海晏北路站 | 0.6809 | 0.40            | 0.45              | 0.35            |
| 樱花公园站 | 0.6687 | 0.42            | 0.38              | 0.45            |
| 儿童公园站 | 0.6647 | 0.45            | 0.42              | 0.40            |
| 江夏桥东站 | 0.6627 | 0.38            | 0.50              | 0.42            |
| 舟孟北路站 | 0.6431 | 0.45            | 0.48              | 0.44            |

### 3.4 有效性验证

为验证评估结果的有效性,选取宁波地铁历史暴雨灾害事件进行实证分析。结果表明:高脆弱性站点评估结果与实际灾损程度显著关联。例如,在2021年“烟花”台风期间(单日最大降水量为289 mm),评估为高脆弱性的海晏北路站因结构渗漏( $S_1=0.42$ )与物资短缺( $R_3=0.41$ ),引发变电所渗水停电事故;2019年“利奇马”台风事件中,樱花公园站因监测预警能力不足( $S_2=0.45$ )导致轨区积水深度达0.8 m,占全线总抢险人次的17.4%。

### 3.5 地铁车站暴雨内涝脆弱性管理建议

#### 3.5.1 防洪能力提升专项

1) 结构性渗漏治理。仔细排查结构性渗漏点,特别是对变形缝、施工缝等容易渗漏的关键部位进行重点排查,发现渗漏及时采取针对性的治理方案;在关

键设备房(如变电所、通信机房)入口增设可快速部署的防水隔舱。

2) 排水系统升级。针对宁波市核心商业区高客流站点(如东门口站)实施排水能力提升工程,扩容现有排水泵站能力、增设冗余排水设施(如移动泵车接口)、优化站内排水沟渠布局与坡度,确保在极端降雨条件下快速导流。同时,应结合宁波市“高潮位+暴雨”复合型内涝特征,在出口处设置防倒灌设施。

#### 3.5.2 监测预警与应急响应优化

1) 部署立体监测体系。在高风险区域(如地下二层站厅、设备走廊等),补充部署水浸传感器与视频智能分析节点,实现对内涝风险的立体化实时监测。结合宁波智慧城市建设基础,推动监测数据接入市级防汛平台,提升预警时效性。

2) 动态物资管理。建立“平急两用”物资网络,配置动态物资储备系统;基于物联网实时监控防汛物资库存,与周边社区形成应急物资补给圈。

#### 3.5.3 长期韧性规划

1) 设计标准升级。新建线路需满足“百年一遇”暴雨重现期要求,并预留20%排水余量。对于既有线路高脆弱性站点,在实施改造工程时,应尽可能参照此标准提升局部排水能力。

2) 跨系统协同。建立宁波市轨道交通防灾云平台,接入水务局、气象局数据,开发内涝推演数字孪生模块,并制定与宁波市防汛应急预案相衔接的内涝风险分级响应预案。

## 4 结论

1) 基于DPSRC模型构建了地铁车站暴雨内涝脆弱性评估指标体系,结合AHP-熵权法主客观赋权提出了综合评估方法,为城市地铁内涝风险防控与韧性提升提供了参考。

2) 宁波地铁99座车站的脆弱性评估表明:70.79%的地铁车站处于中、高脆弱性水平,高脆弱性站点主要受站点防洪能力、站点监测预警能力与应急物资设备的影响。建议通过结构性渗漏治理、排水系统升级等措施提升站点防洪能力,同时部署立体监测体系和动态物资管理来优化监测预警与应急响应能力,通过设计标准升级和跨部门模块建设增强系统韧性。

3) 未来研究需深化地铁网络级联效应演化路径与韧性动态响应机制,结合系统动力学与复杂网络理论构建网络化韧性分析体系,解析单站失效触发线路乃至全网运输中断的级联传播路径及其概率特征,依

托数字孪生技术建立韧性动态评估模型,系统解析暴雨扰动下地铁网络拓扑结构失稳与功能退化耦合效应。

## 参考文献

- [1] Zhang Wenxia, Clark R, Zhou Tianjun, et al. 2023: weather and climate extremes hitting the globe with emerging features[J]. *Advances in atmospheric sciences*, 2024, 41(6): 1001-1016.
- [2] Hou Xingshuai, Gao Qiang, Xiao Zishuang, et al. Rainstorm flood risk assessment of urban metro system in different operating periods: a case study of the central urban area of Tianjin, China[J]. *Natural hazards review*, 2024, 25(4): 05024014.
- [3] 段晓红. 基于多层复杂网络的地铁系统脆弱性因素耦合分析[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(5): 93-102.  
Duan Xiaohong. Coupling analysis of subway system vulnerability factors based on multi-layer complex network[J]. *Safety and environmental engineering*, 2023, 30(5): 93-102.
- [4] 王军武, 吴寒, 杨庭友. 基于投影寻踪的地铁车站工程暴雨内涝脆弱性评价[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(9): 1-7.  
Wang Junwu, Wu Han, Yang Tingyou. Vulnerability assessment of rainfall and waterlogging in subway stations based on projection pursuit model[J]. *China safety science journal*, 2019, 29(9): 1-7.
- [5] 陈资, 马伟炼. 基于组合赋权-VIKOR 的地铁站内涝风险评估[J]. *都市轨道交通*, 2023, 36(5): 38-43.  
Chen Zi, Ma Weilian. Risk evaluation of waterlogging in subway stations based on comprehensive weighting-VIKOR method[J]. *Urban rapid rail transit*, 2023, 36(5): 38-43.
- [6] 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 journal*, 2022, 32(10): 186-192.
- [7] Wu Zening, Shen Yanxia, Wang Huiliang. Assessing urban areas' vulnerability to flood disaster based on text data: a case study in Zhengzhou City[J]. *Sustainability*, 2019, 11(17): 4548.
- [8] Yu Haiying, Liang Chuan, Li Ping, et al. Evaluation of waterlogging risk in an urban subway station[J]. *Advances in civil engineering*, 2019, 2019: 5393171.
- [9] 魏超, 叶属峰, 过仲阳, 等. 海岸带区域综合承载力评估指标体系的构建与应用: 以南通市为例[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5893-5904.  
Wei Chao, Ye (S/Z)F, Guo Zhongyang, et al. Constructing an assessment indices system to analyze integrated regional carrying capacity in the coastal zones: a case in Nantong[J]. *Acta ecologica sinica*, 2013, 33(18): 5893-5904.
- [10] 赵露薇, 王青娥. 暴雨干扰下地铁系统脆弱性形成机制[J]. *中国安全科学学报*, 2022, 32(6): 193-199.  
Zhao Luwei, Wang Qing'e. Study on vulnerability formation mechanism of metro system under storm disturbance[J]. *China safety science journal*, 2022, 32(6): 193-199.
- [11] 刘新荣, 周小涵. 特大暴雨城市地下空间防灾体系构建的思考[J]. *地下空间与工程学报*, 2022, 18(01): 28-34.  
LIU Xinrong, ZHOU Xiaohan. Consideration on Construction of Disaster Prevention System in Urban Underground Space after Heavy Rainstorm[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2022, 18(01): 28-34.
- [12] 陈佳, 刘敬严, 邓曦. 基于 IOWA-VAC 的地铁车站暴雨内涝脆弱性评价[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(4): 88-91.  
Chen Jia, Liu Jingyan, Deng Xi. Vulnerability assessment of heavy rainfall and waterlogging in subway stations based on IOWA-VAC[J]. *Water resources and power*, 2023, 41(4): 88-91.
- [13] Tang Junqing, Xu Lei, Luo Chunling, et al. Multi-disruption resilience assessment of rail transit systems with optimized commuter flows[J]. *Reliability engineering & system safety*, 2021, 214: 107715.
- [14] Zhang Chao, Qin Tingxin, Wang Wan, et al. Case-based risk analysis model for rainstorm inundation in metro systems based on a Bayesian network[J]. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 2024, 38(8): 3149-3163.
- [15] 程娅娅, 高玉琴, 刘云革, 等. 极端暴雨情景下的城市脆弱性评价[J]. *灾害学*, 2024, 39(1): 222-227.  
Cheng Yaya, Gao Yuqin, Liu Yunping, et al. Assessment of urban vulnerability in extreme rainstorm scenarios[J]. *Journal of catastrophology*, 2024, 39(1): 222-227.

(编辑: 傅依萱)