

中文引用格式:马立强,赵昂,郑彬彬. 基于复杂网络的轨道交通站点暴雨内涝韧性影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(6): 142-147.

英文引用格式:MA Liqiang, ZHAO Ang, ZHENG Binbin. Research on influencing factors of rainstorm waterlogging resilience at rail transit stations based on complex network[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(6): 142-147.

# 基于复杂网络的轨道交通站点暴雨内涝韧性 影响因素研究\*

马立强 副教授, 赵昂, 郑彬彬\*\* 副教授

(山东工商学院 管理科学与工程学院, 山东 烟台 264005)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.06.0726

基金项目:国家自然科学基金资助(51804178);山东省社科规划研究项目(19CGLJ18)。

**【摘要】** 为提升暴雨内涝下城市轨道交通站点运营的稳定性,提出一种基于复杂网络的韧性影响因素重要性评估方法。基于韧性的定义和内涵,从稳定性、抵抗性、恢复性和适应性4个方面,提取23个暴雨内涝韧性影响因素,并根据其相互影响关系构建韧性影响因素复杂网络,建立包含点度中心性(DC)、接近中心性(CC)、介数中心性(BC)、聚类系数的影响因素重要性评价指标体系;采用序关系分析法(G1)-变异系数法(CV)组合赋权法赋权指标,运用多准则妥协解排序法(VIKOR)识别关键影响因素。结果表明:风险监测预警系统、移动通信设备、站点挡水能力、防汛设备维护与保养频率、应急供电设备、防汛工作人员专业水平、站点排水能力、防汛培训演练频率是城市轨道交通站点韧性的关键影响因素。

**【关键词】** 复杂网络; 轨道交通站点; 暴雨内涝; 韧性; 影响因素

## Research on influencing factors of rainstorm waterlogging resilience at rail transit stations based on complex network

MA Liqiang, ZHAO Ang, ZHENG Binbin

(School of Management Science and Engineering, Shandong Technology and  
Business University, Yantai Shandong 264005, China)

**Abstract:** To enhance the operational stability of urban rail transit stations during rainstorms and waterlogging for safe resident travel, a method for evaluating the importance of resilience influencing factors was proposed based on complex networks. Based on the definition and connotation of resilience, 23 influencing factors of rainstorm waterlogging resilience were extracted from four aspects of stability, robustness, resilience and adaptability. The complex network of influencing factors of resilience was constructed according to the influence relationship between influencing factors. The evaluation index system for the importance of these factors was established, including degree centrality (DC), closeness centrality (CC), betweenness centrality (BC), and clustering coefficient. The order relation analysis method (G1)-Coefficient of Variation (CV) combination weighting method was used to weight the index,

\* 文章编号:1003-3033(2025)06-0142-06; 收稿日期:2025-01-10; 修稿日期:2025-03-20

\*\* 通信作者:郑彬彬(1988—),男,山东东营人,博士,副教授,主要从事安全与应急管理等方面的研究。E-mail:zhengbin\_vip@sina.com。

and the VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) method was used to identify the key influencing factors. The results show that risk monitoring and early warning system, mobile communication equipment, water retaining capacity of stations, maintenance and repair frequency of flood control equipment, emergency power supply equipment, professional level of flood control staff, drainage capacity of stations, and frequency of flood control training and drilling are the key factors influencing the resilience of urban rail transit stations. The research results can provide new ideas and targeted suggestions for the emergency waterlogging prevention strategies of urban rail transit stations in the rainstorm waterlogging scenario.

**Keywords:** complex network; rail transit stations; rainstorm waterlogging; resilience; influencing factors

0 引言

城市轨道交通因其准时性、速达性、安全性和高密度,已成为现代城市不可或缺的出行方式之一<sup>[1]</sup>。截至 2022 年底,我国(不含港澳台地区)53 个城市共开通 290 条城市轨道交通运营线路,总长度为 9 584 km,全国城市轨道交通站点总数达到 5 609 个,全年完成的客运总量约为 194 亿人次<sup>[2]</sup>。城市轨道交通站大多位于地下,随着近年来极端天气事件频发,站点设备易受暴雨内涝的侵袭<sup>[3]</sup>,例如:郑州“7·20”暴雨导致地铁 5 号线在沙口路站至海滩寺站区间因严重积水迫停,造成 14 名旅客遇难。因此,研究暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性的关键影响因素,探究城市轨道交通站点事故发生机制,对城市轨道交通的安全运行具有重要意义。

诸多学者针对暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性开展了研究。何郑等<sup>[4]</sup>运用网络层次分析法和偏好顺序结构评估法(Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations, PROMETHEE) II,分析了在暴雨内涝灾害下地铁项目的施工韧性;祝连波等<sup>[5]</sup>基于可拓学理论构建博弈论组合赋权的物元模型,量化评估地铁车站抗涝韧性;郑建春等<sup>[6]</sup>使用综合流域管理(Integrated Catchment Modelling, ICM)软件模拟并提取入口站点的淹没指数,比较分析 2 种降雨情景下地铁车站出入口的韧性结果;焦柳丹等<sup>[7-8]</sup>采用社会网络分析法中的凝聚子群,分析网络中的相互关系,并采用解释结构模型分析韧性影响因素之间的层次关系,再运用社会网络分析法中的中心度分析、筛选关键影响因素。

现有研究大多集中于筛选暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性的影响因素,对于各因素之间的相互

影响还鲜有研究。鉴于此,笔者拟基于暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性影响因素间的关系,构建韧性影响因素复杂网络,利用中心度指标建立重要性评价指标体系,并运用多准则妥协解排序法(VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje, VIKOR)确定关键韧性影响因素,提出韧性提升和防汛对策建议,以期提升站点应对暴雨灾害的能力提供参考。

1 站点韧性影响因素识别

1.1 暴雨内涝对城市轨道交通站点的影响

在受暴雨影响的城市轨道交通系统中,暴雨灾害是致灾因子,城市轨道交通系统是承灾体,整个社会经济系统是孕灾环境。暴雨内涝对城市轨道交通站点的影响程度存在显著差异,主要取决于内涝强度、站点空间位置、排水系统效能和应急管理水平等因素。轨道交通站点普遍具有地下空间占比高、结构复杂、人员密集等特点,这导致其在暴雨内涝情境下表现出区别于其他交通基础设施的独特脆弱性。

暴雨内涝对城市轨道交通系统的影响具有显著的连锁效应和多系统联动性。首先,站点积水会导致设备短路,进而直接威胁乘客安全,触电、滑倒等事故风险显著增加;其次,持续积水会侵蚀电力设备、墙体和轨道等基础设施,严重时甚至可能引发结构坍塌,造成信号系统、自动售票机和电扶梯等关键设备的大面积损坏。这种影响会通过轨道交通网络的互联特性快速扩散,从单个站点蔓延至整个区域网络,导致大规模交通瘫痪。此外,轨道交通站点与地面排水系统、周边建筑、道路等系统高度耦合,内涝问题具有多系统联动性。

1.2 暴雨内涝下站点韧性

基于文献[9-10],将城市轨道交通站点在暴雨

灾害下的韧性定义为:当遇到不可预知或突发性的暴雨内涝灾害时,城市轨道交通站点具备的抵御和吸收暴雨内涝灾害的能力,遭受暴雨灾害时通过自我修复和其它体系的协同作用恢复到正常状态的能力,以及在今后遭受相同暴雨内涝灾害时最大程度减少损失、快速恢复的能力。

1.3 暴雨内涝下站点韧性影响因素识别

基于文献[4-8,11],从稳定性、抵抗性、恢复性和适应性4个方面,总结出4类共23个暴雨灾害下站点韧性影响因素,记为 $F_1 \sim F_{23}$ ,如图1所示。

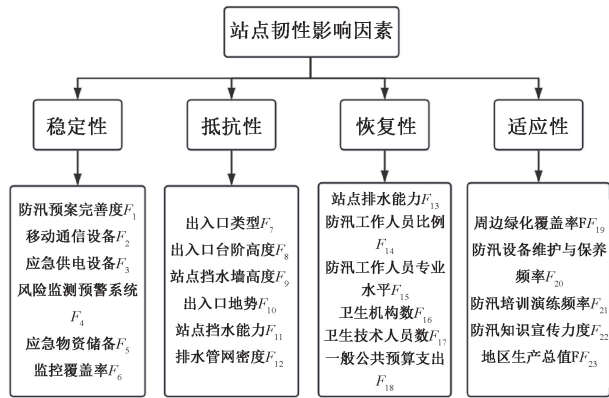


图1 站点韧性影响因素

Fig. 1 Influencing factors of station resilience

2 站点韧性因素重要度评价模型

根据复杂网络理论和VIKOR法,构建基于中心度指标的站点韧性因素重要度评价模型,探究网络的结构特性及韧性影响因素的重要性,确定暴雨内涝下站点的关键韧性影响因素。

2.1 复杂网络特征量化

基于韧性影响因素间的关系数据,利用复杂网络拓扑图量化网络特征,重点计算轨道交通站点韧性影响因素网络的点度中心性(Degree Centrality, DC)、接近中心性(Closeness Centrality, CC)、介数中心性(Betweenness Centrality, BC)和聚类系数4个中心度指标<sup>[12]</sup>。

- 1) DC反映网络中某一节点与其他节点的直接联系,数值越大,该节点越重要。
- 2) CC反映该节点在网络中与其他节点的便捷程度,数值越大,便捷程度越高,该节点越重要。
- 3) BC衡量一个节点对网络内其他节点的控制能力,BC越大,对其他节点的控制能力越强,该节点在网络中的重要性越高。
- 4) 聚类系数 $E$ 衡量各节点的聚集程度,数值越

大,该节点越重要。

2.2 基于组合赋权的韧性影响因素排序

基于站点韧性影响因素的中心度指标数据,先采用最小信息熵原理确定各指标权重,再应用VIKOR法对影响因素的重要性排序。

2.2.1 基于最小信息熵原理的组合权重

设 $\omega_{ai}(i=1,2,\cdots,n)$ 为基于序关系分析法(Ordere Relation Analysis Method, G1法)计算的指标主观权重<sup>[13]</sup>,设 $\omega_{bi}(i=1,2,\cdots,n)$ 为基于变异系数法(Coefficient of Variation, CV)计算的指标客观权重<sup>[14]</sup>。依据最小信息熵原理<sup>[15]</sup>,即G1法的主观权重和CV的客观权重差异越小越优,由此计算出组合权重,记为 $\omega_i(i=1,2,\cdots,n)$ 。

2.2.2 VIKOR法影响因素重要性排序

- 1) 根据标准化处理后的决策矩阵确定正理想解和负理想解<sup>[16]</sup>。
- 2) 计算各待评韧性影响因素节点的最大群体效益值 $S_j$ 和最小个体遗憾值 $R_j$ <sup>[16]</sup>。
- 3) 选取决策机制系数为0.5,计算各韧性影响因素节点的利益比率值 $Q_j$ <sup>[16]</sup>。
- 4) 根据各节点的利益比率值 $Q_j$ ,按从小到大的原则对各节点的重要性排序,数值越小越优。

3 站点韧性关键影响因素分析

邀请城市轨道交通运营管理领域及安全与应急管理领域的专家和学者,确定暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性影响因素间的相互作用关系,最终形成站点韧性影响因素的邻接矩阵,部分邻接矩阵见表1。

表1 韧性影响因素邻接矩阵

| Table 1 Adjacency matrix of influencing factors |       |       |       |       |       |       |       |       |     |          |          |  |
|-------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|----------|----------|--|
| 因素                                              | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$ | $F_5$ | $F_6$ | $F_7$ | $F_8$ | ... | $F_{22}$ | $F_{23}$ |  |
| $F_1$                                           | 0     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_2$                                           | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_3$                                           | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_4$                                           | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_5$                                           | 1     | 1     | 0     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_6$                                           | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_7$                                           | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 1     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_8$                                           | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| ⋮                                               | ⋮     | ⋮     | ⋮     | ⋮     | ⋮     | ⋮     | ⋮     | ⋮     |     | ⋮        | ⋮        |  |
| $F_{22}$                                        | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | ... | 0        | 0        |  |
| $F_{23}$                                        | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 0     | 0     | ... | 1        | 0        |  |

基于影响因素的邻接矩阵,采用Gephi软件绘制站点韧性影响因素网络结构,如图2所示。图2

中,箭头出发端节点表示该因素对其他影响因素产生影响,箭头端节点表示该因素受其他影响因素的影响,双向箭头表示箭头两端的因素相互影响。

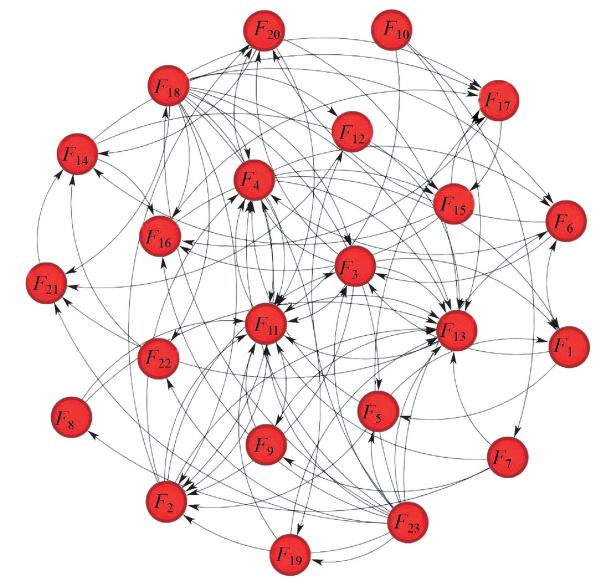


图 2 韧性影响因素网络结构

Fig. 2 Resilience network structure of influencing factors

3.1 重要度指标计算及数据处理

依据韧性影响因素节点重要度指标的计算方法,计算韧性影响因素网络中的 DC、CC、BC、聚类系数,结果见表 2。

表 2 结点的中心度指标值

| Table 2 Centrality index value of node |                 |                 |                 |                 |                |
|----------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 属性                                     | 因素              | DC <sub>j</sub> | CC <sub>j</sub> | BC <sub>j</sub> | E <sub>j</sub> |
| 稳定性                                    | F <sub>1</sub>  | 0.273           | 0.413           | 14.83           | 0.417          |
|                                        | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮              |
|                                        | F <sub>5</sub>  | 0.273           | 0.412           | 1.500           | 0.400          |
|                                        | F <sub>6</sub>  | 0.318           | 0.451           | 3.670           | 0.367          |
| 抵抗性                                    | F <sub>7</sub>  | 0.227           | 0.39            | 1.500           | 0.450          |
|                                        | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮              |
|                                        | F <sub>12</sub> | 0.182           | 0.330           | 0               | 0.500          |
| 恢复性                                    | F <sub>13</sub> | 0.682           | 0.400           | 43.330          | 0.214          |
|                                        | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮              |
|                                        | F <sub>18</sub> | 0.636           | 0.783           | 0               | 0.220          |
| 适应性                                    | F <sub>19</sub> | 0.182           | 0.366           | 0               | 0.583          |
|                                        | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮               | ⋮              |
|                                        | F <sub>23</sub> | 0.636           | 0.791           | 0               | 0.220          |

4 个指标均为正向性指标,采用下式标准化处理以消除量纲影响,从而得到标准化评价决策矩阵:

$$y_{ij} = \frac{r_{ij} - \min(r_{ij})}{\max(r_{ij}) - \min(r_{ij})}$$

(1)

式中: $r_{ij}$  为第  $i$  个指标中第  $j$  个因素的中心度; $y_{ij}$  为标准化后的指标数值。

3.2 韧性影响因素重要度评价

3.2.1 基于 G1-CV 组合赋权计算指标权重

组织专家评估复杂网络中 4 类中心度指标,重点分析其复杂程度、代表性和使用频率等特征,得到中心度指标的重要性排序结果:聚类系数>DC>CC>BC。据此给出相邻指标相对重要性之比的理性赋值,依次为 1.3、1.2 和 1.4。

采用 G1 法和 CV,分别计算指标的主观权重和客观权重,再基于最小信息熵原理求出各评估指标的组合同权重,结果见表 3。

表 3 组合赋权的计算结果

| Table 3 Calculation results of combination weighting |       |       |       |       |
|------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 权重                                                   | DC    | CC    | BC    | 聚类系数  |
| $\omega_{ai}$                                        | 0.268 | 0.223 | 0.159 | 0.350 |
| $\omega_{bi}$                                        | 0.224 | 0.238 | 0.368 | 0.170 |
| $\omega_i$                                           | 0.255 | 0.240 | 0.252 | 0.253 |

3.2.2 基于 VIKOR 的韧性因素重要度排序

依据 VIKOR 法,首先,确定各个指标的正、负理想解,由于 4 个指标均为正向指标,其正理想解均为 1,负理想解均为 0;其次,计算韧性因素的群体效益值、个体遗憾值以及兼顾群体效益和个体遗憾的折中利益比率值,计算结果见表 4 和图 3。

表 4 韧性影响因素的  $S_j$ 、 $R_j$  以及  $Q_j$  值

| Table 4 $S_j$ , $R_j$ and $Q_j$ values of resilience influencing factors |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
| 因素                                                                       | $S_j$ | $R_j$ | $Q_j$ |
| F <sub>1</sub>                                                           | 0.73  | 0.21  | 0.59  |
| F <sub>2</sub>                                                           | 0.57  | 0.18  | 0.26  |
| F <sub>3</sub>                                                           | 0.59  | 0.20  | 0.42  |
| F <sub>4</sub>                                                           | 0.47  | 0.16  | 0.05  |
| F <sub>5</sub>                                                           | 0.79  | 0.25  | 0.83  |
| F <sub>6</sub>                                                           | 0.76  | 0.24  | 0.77  |
| F <sub>7</sub>                                                           | 0.79  | 0.25  | 0.84  |
| ⋮                                                                        | ⋮     | ⋮     | ⋮     |
| F <sub>22</sub>                                                          | 0.91  | 0.26  | 1     |
| F <sub>23</sub>                                                          | 0.59  | 0.25  | 0.66  |

3.3 韧性因素重要度结果分析

根据前文所述, $Q_j$  值越小,指标越关键。因此,风险监测预警系统能力是最重要的韧性影响因素,位于最中心的位置,对其他韧性因素的影响范围最广,对站点韧性的影响也最大。按韧性影响因素的重要程度,其余韧性影响因素依次为:移动通信设备、站点挡水能力、防汛设备维护与保养频率、应急



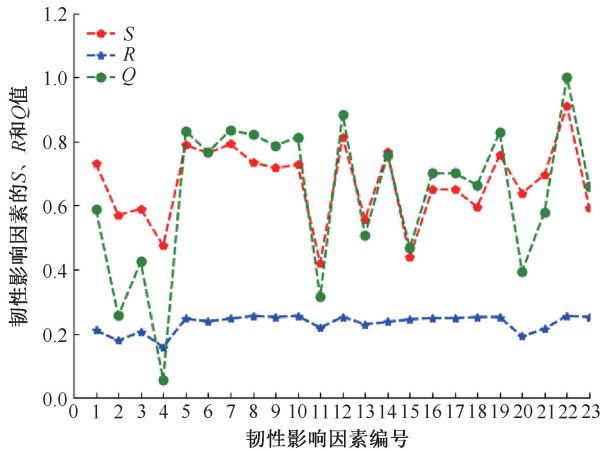


图3 VIKOR 评价结果

Fig.3 VIKOR evaluation results

供电设备、防汛工作人员专业水平、站点排水能力和防汛培训演练频率。这些因素在复杂网络分析中表现出较高的中心性特征,其影响范围显著大于其他因素,可判定为暴雨内涝下城市轨道交通站点韧性关键影响因素。

### 3.4 暴雨内涝防控对策建议

1) 稳定性。部署水位、水压、温湿度等多维传感器,建立物联网中枢,实现监测站点的实时数据采集;基于历史灾情数据训练长短记忆预测模型;部署4G/5G/WiFi6 多模基站,并采用国际防护等级 68 防水标准,以增强移动通信设备的稳定性。

2) 抵抗性。站点工作人员需定期检查防洪物资(如挡水沙袋、防滑垫等)并确认其库存量充足;在站点的出入口、通风口等关键部位设置防洪闸门。根据站点的实际情况选择手动、电动或液压等方式

控制的防洪闸门。

3) 恢复性。建立“站厅层排水沟-集水井泵排系统-外围市政管网对接”的 3 级排水体系,增加排水机器的数量,并更换排水功率更大的排水泵;制定相应的考核标准,定期考核防汛工作人员的设备操作熟练度和决策科学性。

4) 适应性。增加防汛演练的次数;定期检查和维修防洪闸门和排水泵;在洪水来临前,提前调试闸门和排水泵。

## 4 结 论

1) 提出城市轨道交通的韧性定义:当遇到不可预知或突发性的暴雨内涝灾害时,城市轨道交通站点具备的抵御和吸收暴雨内涝灾害的能力,遭受暴雨灾害时通过自我修复和其它体系的协同作用恢复到正常状态的能力,以及在今后遭受相同暴雨内涝灾害时最大程度减少损失、快速恢复的能力。

2) 韧性影响因素分为稳定性、抵抗性、恢复性和适应性 4 类,DC、CC、BC 和聚类系数的组合权重分别为 0.255、0.240、0.252 和 0.253。

3) 关键韧性影响因素为风险监测预警系统、移动通信设备、站点挡水能力、防汛设备维护与保养频率、应急供电设备、防汛工作人员专业水平、站点排水能力和防汛培训演练频率。

4) 在影响因素识别时,将城市轨道交通韧性影响因素分为 4 类,未来研究需进一步验证其合理性和适用性。此外,重要度评价指标的选取也缺乏合理性验证。

## 参 考 文 献

- [1] FERNANDA S, ELISABETTA G, PAOLO T. Analysing the attractiveness, availability and accessibility of healthcare providers via social network analysis(SNA)[J]. Decision Support Systems, 2019, 120:25-37.
- [2] 交通运输部. 2022 年交通运输行业发展统计公报[R], 2023.
- [3] 邓旭东, 王雪, 徐文平, 等. 城市地铁网络脆弱性对比分析[J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(3): 152-156. DENG Xudong, WANG Xue, XU Wenping, et al. Comparative analysis of vulnerability of urban metro network[J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(3): 152-156.
- [4] 何郑, 杨宇轩, 颜红艳, 等. 暴雨内涝灾害下地铁项目施工韧性评估与实证研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(12): 4 781-4 790. HE Zheng, YANG Yuxuan, YAN Hongyan, et al. Assessment and empirical research for construction resilience of railway projects under waterlogging disasters[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(12): 4 781-4 790.
- [5] 祝连波, 王世笛, 林陵娜, 等. 基于博弈论组合赋权-物元可拓模型的地铁车站抗涝韧性评估研究[J]. 灾害学,

2023,38(3):1-6,42.

ZHU Lianbo, WANG Shidi, LIN Lingna, et al. Based on the combination of game theory and weighted matter-element extension model study on waterlogging resilience assessment of metro stations[J]. Journal of Catastrophology, 2023, 38(3): 1-6,42.

- [6] 郑建春,张岑,李永坤,等.基于 InfoWorks ICM 模型的地铁场站内涝积水防控研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2019,55(5):648-655.

ZHENG Jianchun, ZHANG Cen, LI Yongkun, et al. Prevention and control of waterlogging in metro stations: an InfoWorks ICM analysis[J]. Journal of Beijing Normal University: Natural Science, 2019, 55(5): 648-655.

- [7] 焦柳丹,李东荣,张羽,等.暴雨灾害下城市轨道交通车站韧性关键影响因素研究[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2023,42(5):109-115.

JIAO Liudan, LI Dongrong, ZHANG Yu, et al. Key influencing factors of urban rail transit station resilience under rainstorm disaster[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2023, 42(5): 109-115.

- [8] JIAO Liudan, LI Dongrong, ZHANG Yu, et al. Identification of the key influencing factors of urban rail transit station resilience against disasters caused by rainstorms[J]. Land, 2021, 10(12): DOI:10.3390/2021/10121298.

- [9] WU Xiao, LYU Xuejiao, ZHAO Yanling, et al. Ecological resilience assessment of an arid coal mining area using index of entropy and linear weighted analysis: a case study of Shendong coalfield, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 109: DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105843.

- [10] 石婷婷.从综合防灾到韧性城市:新常态下上海城市安全的战略构想[J].上海城市规划,2016(1):13-18.

SHI Tingting. From comprehensive defense to resilient cities: strategic conception of Shanghai's city security in the new normal[J]. Shanghai Urban Planning Review, 2016(1): 13-18.

- [11] GB50517—2013, 地铁设计规范[S].

GB50517-2013, Code for design of metro[S].

- [12] 李磊,马梦格,折亚亚,等.复杂网络下雨洪灾害链风险分析及断链减灾研究[J].中国安全科学学报,2023,33(12):192-197.

LI Lei, MA Mengge, SHE Yaya, et al. Risk analysis of rainstorm flood disaster chain and research on disaster mitigation of broken chain under complex network[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(12): 192-197.

- [13] 宋亮亮,张劲松,杜建波,等.基于云模型的水利工程运行安全韧性评价[J].水资源保护,2023,39(2):208-214.

SONG Liangliang, ZHANG Jinsong, DU Jianbo, et al. Assessment of operation safety resilience of water conservancy projects based on cloud model[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(2): 208-214.

- [14] 王景春,赵福全,王炳华,等.多因素影响下的地铁车站深基坑韧性评估[J].中国安全科学学报,2019,29(10):154-159.

WANG Jingchun, ZHAO Fuquan, WANG Binghua, et al. Resilience evaluation for deep foundation pit of metro station under influence of multiple factors[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(10): 154-159.

- [15] 代革联,王松松,牛超,等.基于 G1-CV 熵组合权重模型的含水层富水性研究[J].煤炭技术,2023,42(8):132-138.

DAI Gelian, WANG Songsong, NIU Chao, et al. Study on aquifer water richness based on G1-CV entropy combined weight model[J]. Coal Technology, 2023, 42(8): 132-138.

- [16] 徐冬梅,徐梦臣,王文川,等.VIKOR 法在城市供水方案优选中的应用[J].人民长江,2020,51(2):116-118,159.

XU Dongmei, XU Mengchen, WANG Wenchuan, et al. Application of VIKOR method in urban water supply scheme optimization[J]. Yangtze River, 2020, 51(2): 116-118, 159.

**作者简介:** 马立强 (1974—),男,山东德州人,博士,副教授,主要从事安全与应急管理、消防安全管理等方面的研究。E-mail:maliqiang@163.com。