

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. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.001.]

## 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<sup>\*</sup>

祝连波<sup>1</sup>, 王世笛<sup>1</sup>, 林陵娜<sup>1</sup>, 许小进<sup>2</sup>, 石振群<sup>3</sup>

(1. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 扬州市交通产业集团, 江苏 扬州 225000;  
3. 杭州水务工程建设有限公司, 浙江 杭州 311400)

**摘要:**随着我国城市地铁建设的快速发展, 地铁车站内涝问题越来越突出。虽然国内外学者对地铁内涝问题进行了大量研究, 但是从韧性视角出发, 地铁车站抗涝水平的评论研究较少。根据国内外研究现状及调研结果, 建立了地铁车站抗涝韧性评估指标体系, 该体系包括人员管理、物资装备、环境3个一级指标及相应的18个二级指标, 基于序关系分析法和熵权法相结合的博弈论组合赋权法确定韧性指标权重。通过可拓学评价方法, 对评价对象进行物元化, 建立了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模型, 根据评估结果确定地铁车站抗涝等级。以广州地铁13号线新塘站为例进行抗涝韧性评估, 评价结果表明该车站的抗涝韧性级别为IV级, 与实际情况基本一致, 证明了评估模型具有一定的适用性和科学性。

**关键词:** 地铁车站; 博弈论组合赋权; 物元可拓模型; 抗涝韧性评估

**中图分类号:** U231<sup>+</sup>.4; X915.5; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2023)03-0001-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2023.03.001

地铁作为一种低碳、环保的公共交通工具, 以其舒适、安全、迅速的特点成为人们的重要交通工具。然而近年来由于频繁的暴雨和极端天气, 城市地下区域, 尤其是地铁车站的内涝灾害不断发生。据不完全统计, 近10年国内11个城市共发生19起地铁车站或线路雨水倒灌事件。2016年、2020年、2021年是地铁浸水事件高发年。特别是2021年“河南郑州‘7·20’特大暴雨灾害事件”造成了重大的人员伤亡情况和财产损失。全省共计因暴雨死亡失踪398人, 郑州市因灾死亡失踪人数占全省的95.5%, 其中地下空间溺亡39人, 洪水泥石流遇难189人, 直接经济损失532亿元<sup>[1]</sup>。

国内外学者对地铁站内涝问题进行了深入广泛的研究。马晴晴等<sup>[2]</sup>基于暴露性与敏感性分析对地铁站地表积水的脆弱性进行分析, 最终得到16条地铁线路上216个站点的脆弱性等级; 王军武等<sup>[3]</sup>对暴雨内涝下地铁车站应急响应策略进行研究, 采用SHEL系统模型识别响应效能影响因素, 分析各影响因素之间的相互作用机制, 最后利用Vensim软件, 结合成都地铁11号线相关数据进行模拟仿真。闫绪娟等<sup>[4]</sup>建立了Bow-Tie-贝叶斯网络灾害风险分析模型对地铁洪涝灾害进行

风险分析, 最后得出结论地铁和环境的不安全状态和管理的缺陷是导致灾害发生的重要中间事件。DUTTA等<sup>[5]</sup>从数值模拟方面入手, 构建出2D洪水扩散模型。TODA等<sup>[6]</sup>则建立了一个可以处理地表和地下空间洪水的洪水流模型。YONEYAMA等<sup>[7]</sup>采用流体体积法(VOF)建立了城市洪水条件下楼梯间和地下小空间的三维数值模拟模型, 为将来获得大量关于地下空间内涝积水疏散可能性的信息提供了依据。

随着科技发展及复杂系统可变因素日渐增多, 新理论视角如“韧性”开始得到广泛关注。黄亚江<sup>[8]</sup>基于韧性理论内涵建立地铁运营安全韧性概念模型, 从影响地铁运营的人员、机械设备、环境和管理因素4个方面进行安全韧性的评价; 崔欣等<sup>[9]</sup>考虑公交接驳的地铁网络韧性评估, 基于网络效率可达性指标构建了韧性评估模型, 提出了多故障下以韧性最大化为目标的修复策略。郭庆军等<sup>[10]</sup>将韧性理论引入地铁建设工程的安全管理, 为地铁建设工程安全管理建立基于韧性理论的系统分析方法。

综上所述, 国内外专家学者对地铁内涝进行

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2022-10-13 修回日期: 2023-01-24

基金项目: 江苏省住建厅项目(2018ZD165); 国家自然科学基金项目(72201188); 苏州科技大学大学生创新创业项目(091811104, 091991111); 江苏省中外合作办学高水平示范建设项目

第一作者简介: 祝连波(1973-), 女, 汉族, 湖南湘乡人, 博士, 教授, 主要从事装配式项目管理及建筑信息模型研究。

E-mail: 946917098@qq.com

通信作者: 王世笛(1998-), 女, 汉族, 河南平顶山人, 硕士研究生, 主要从事建设经济与管理研究。E-mail: 2372513645@qq.com

了大量的研究,并获得了丰硕的成果。然而,对地铁车站抗涝韧性研究较少,尤其缺乏从韧性视角评价地铁车站抗涝水平。因此本文从韧性视角出发(图1),借助文献频次统计建立地铁车站抗涝韧性评估指标体系,通过博弈论组合赋权和物元可拓评价构建地铁车站抗涝韧性评估模型,以期降低地铁内涝风险,提升地铁防涝韧性,保障地铁安全运行。

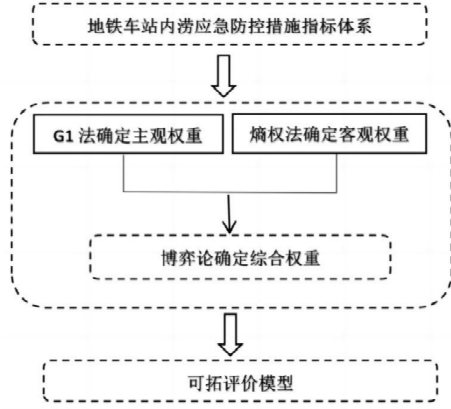


图1 抗涝韧性评估流程

## 1 地铁车站抗涝韧性

### 1.1 韧性及抗涝韧性内涵

“韧性”最初起源于拉丁文 resilience, 意思为“反弹、弹性”, 此外它还表示系统或个人在受到影响或干扰后恢复的能力。韧性最初在物理学上得到应用, SPERANZA<sup>[11]</sup> 和 MACASKILL 等<sup>[12]</sup> 学者也分别对韧性的应用提出了自己的见解。其中 OUYANG<sup>[13]</sup> 提出的“三阶段”韧性分析框架较好的诠释了韧性的特征。

如图2所示, 当外部干扰入侵系统时, 韧性使得系统机能产生三个阶段的变化。①抵御阶段( $0 < T < T_1$ ): 判断系统的防御能力, 通过系统最开始所遭受外部压力的大小来衡量; ②吸收阶段( $T_1 < T < T_2$ ): 判断系统的应对能力, 通过系统遭受外部压力造成损伤的严重程度来衡量; ③恢复阶段( $T_2 < T < T_4$ ): 判断系统的恢复能力, 通过计算系统遭受打击后恢复到原先状态和结构所需要的时间和原料来衡量。

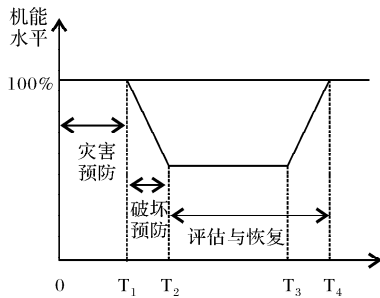


图2 系统机能变化曲线

因此, 本文将用抵御、吸收、恢复这三个阶段来描述地铁车站发生内涝时的防控过程, 而这三个阶段通过抗涝过程的稳定性、冗余性、恢复性来体现:

(1) 抵御阶段体现为抗涝过程的稳定性, 指在

地铁车站在遭受内涝前, 各项防控措施准备的是否充足, 各项设施是否健全, 应急方案是否完善。这一阶段重点是提高系统的抵御能力, 加强自身力量, 在危险来临时可以及时应对。

(2) 吸收阶段体现为抗涝过程的冗余性, 指地铁车站在遭受内涝过程中, 救援服务、救援设备具有的应对风险的能力。该阶段主要是对风险冲击做出反应, 减少风险来临的伤亡。

(3) 恢复阶段体现为抗涝阶段的恢复性, 指地铁车站在遭受内涝后, 各项管理措施、保障设备恢复原先的正常状态。该阶段是对风险冲击过后做出的调整。

### 1.2 抗涝韧性指标体系

对地铁车站抗涝过程进行韧性评价的关键是建立评价指标体系。首先, 运用文献频次统计筛选出评价指标, 在中国知网全文数据库搜索界面中分别输入“地铁车站”“内涝灾害”“韧性评估”等进行查询: 搜索的时间设置为2010—2022年, 此时一共检索出527篇相关文献, 通过筛选审查里面与韧性的稳定性, 冗余性, 恢复性相关的内容, 最终选定116篇的有效文献; 最终从人员管理, 物资装备, 环境3方面建立一级指标, 基于这3个一级指标因素的内涵差异最终选取18个二级指标<sup>[14-20]</sup>, 如表1所示。

## 2 博弈论组合赋权确定权重

### 2.1 序关系分析法确定主观权重

序关系分析法是一种秩序性的评价, 即通过相关专家确定两个指标间大小顺序, 以此来确定权重。步骤如下:

(1) 确定指标顺序。设被评价对象为A, 对应的评价指标为:  $C_1, C_2, \dots, C_m$ , 若评价指标  $C_i$  在某一评价准则或者评价对象下其重要程度大于  $C_j$ , 那么记:  $C_i > C_j$ 。

(2) 判断重要程度比。假设判断  $C_{k-1}/C_k$  重要程度之比为  $W_{k-1}/W_k$  (权重之比), 二者比值为:  $W_{k-1}/W_k = r_k (k = m, m-1, \dots, 2)$ 。

$$W_m = [1 + \sum_{k=2}^m \prod_{i=k}^m r_i]^{-1} \quad (1)$$

得到  $W_{k-1}$  的权重:  $W_{m-1} = r_k W_m$ , 依次计算出全部指标的权重。

### 2.2 熵权法确定客观权重

(1) 对各指标数值进行标准化。设共有  $k$  个指标, 建立的第  $j$  个指标向量为  $X_j = (X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{nj})^T$ , 则第  $i$  个管段的第  $j$  个指标标准化值为:

$$Y_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_j)}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (2)$$

(2) 求各指标的信息熵。

$$H_j = -(\ln n)^{-1} \sum_{i=1}^n F_{ij} \ln F_{ij} \quad (3)$$

式中:  $F_{ij} = \frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^n Y_{ij}}$ , 且规定当  $F_{ij} = 0$  时,

$$\lim_{F_{ij} \rightarrow 0} F_{ij} \ln F_{ij} = 0$$

(3) 计算各指标熵权。将信息熵代入:

$$W_j = \frac{1 - H_j}{k - \sum H_j} \quad (4)$$

计算各指标权重。

表 1 地铁站抗涝韧性指标体系

目标层	一级指标	二级指标
地铁站抗涝韧性评估研究 A	人员管理防控 $B_1$	应急指挥机构运营管理稳定性 $C_{11}$
		防汛预案完善度稳定性 $C_{12}$
		应急医疗救援系统冗余性 $C_{13}$
		应急通讯指挥系统冗余性 $C_{14}$
		防洪安全知识教育恢复性 $C_{15}$
		应急培训次数及演练恢复性 $C_{16}$
	物资装备防控 $B_2$	移动通信设备稳定性 $C_{21}$
		应急供电设备稳定性 $C_{22}$
		防洪物资保障冗余性 $C_{23}$
		救援物资保障冗余性 $C_{24}$
		防洪物资恢复性 $C_{25}$
		救援物资恢复性 $C_{26}$
	环境防控 $B_3$	风险监测的稳定性 $C_{31}$
		风险预警的稳定性 $C_{32}$
		地铁口排水系统冗余性 $C_{33}$
		地铁周边道路排水系统冗余性 $C_{34}$
		地铁警示标志恢复性 $C_{35}$
		排水系统排水能力恢复性 $C_{36}$

### 2.3 博弈论确定组合权重

博弈论又叫做对策论,它是运筹学科中的一种,也是现代数学的一个新分支。博弈论赋权法的基本思想是将采取不同赋权法得出的权重综合之后,使得最终权重的偏差最小化。具体方法如下。

(1) 计算指标权重。假设用  $p$  种方法确定每个指标的权重,  $\mathbf{W}_q = [w_{q1}, w_{q2}, \dots, w_{qn}] (q=1, 2, \dots, p)$ , 其任意线性组合表示为:

$$\mathbf{W} = \sum_{q=1}^p \alpha_q \cdot \mathbf{w}_q^T (\alpha_q > 0) \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{W}$  为权重的线性组合;  $\alpha_q$  为权重系数;  $\mathbf{w}_q^T$  为基本权重向量集  $\mathbf{w}_q$  的转置矩阵。

(2) 优化组合。通过对线性组合  $\alpha_q$  系数优化,使所求权重向量  $\mathbf{W}$  与每个  $\mathbf{w}_q$  的离差最小,即可得最优  $\mathbf{w}_q^*$ , 可得对策模型表示为:

$$\mathbf{W}^* = \min \left\| \sum_{q=1}^p \alpha_q \cdot \mathbf{w}_q^T - \mathbf{w}_q^* \right\|_2, (q=1, 2, \dots, p) \quad (6)$$

(3) 解最优组合系数。将式(6)进行微分,得到最优化线性方程组:

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & \dots & w_1 w_p^T \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_p w_1^T & \dots & w_p w_p^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ \vdots \\ w_p w_p^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

将解出的最优组合系数  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p)$  进行归一化处理后,再代入公式(5),即得各评价指标最终权重向量。

## 3 基于组合权重的物元可拓评价模型

### 3.1 确定经典域和节域

以地铁站抗涝韧性为事物  $N$  构建多维物元  $\mathbf{R} = (\mathbf{N}, \mathbf{C}, \mathbf{V})$ , 其中  $\mathbf{C}$  为地铁站抗涝韧性评价的指标集,  $\mathbf{V}$  为  $\mathbf{C}$  的量值。

$\mathbf{R}_i$  为物元  $\mathbf{R}$  的经典域, 则有

$$\mathbf{R}_i = (\mathbf{U}_i, \mathbf{C}, \mathbf{V}_i) = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_i & c_1 & (a_{i1}, b_{i1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_i & (a_{ii}, b_{ii}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_m & (a_{im}, b_{im}) \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{C} = \{c_1, \dots, c_i, \dots, c_m\}$  为地铁站抗涝韧性评价的指标集;  $\mathbf{V}_i$  为评价指标集  $\mathbf{C}$  关于韧性等级  $\mathbf{U}_i$  的取值范围, 其中  $b_{ii}$ 、 $a_{ii}$  分别为地铁站抗涝韧性评价的指标集  $c_i$  在第  $i$  安全等级的下限值和上限值。

令  $\mathbf{R}_u$  为物元  $\mathbf{R}$  的节域, 则有:

$$\mathbf{R}_u = (\mathbf{U}, \mathbf{C}, \mathbf{V}_u) = \begin{pmatrix} \mathbf{U} & c_1 & (a_{u1}, b_{u1}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_i & (a_{ui}, b_{ui}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_m & (a_{um}, b_{um}) \end{pmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{V}_u$  为评价指标集  $\mathbf{C}$  关于韧性等级域  $\mathbf{U}$  的取值范围,  $b_{ui}$ 、 $a_{ui}$  分别为指标  $c_i$  在全部韧性等级的上限值和下限值。

### 3.2 确定物元

令  $\mathbf{R}_i$  为  $\mathbf{R}$  的待评价物元, 则有:

$$\mathbf{R}_i = (\mathbf{B}_i, \mathbf{C}_i, \mathbf{V}_i) = \begin{pmatrix} \mathbf{B}_i & c_{i1} & v_{i1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{ij} & v_{ij} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{in} & v_{in} \end{pmatrix} \quad (10)$$

式中:  $\mathbf{B}_i$  为第  $i$  个待评一级指标;  $\mathbf{C}_i = \{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}\}$  为  $\mathbf{B}_i$  的二级评估指标集;  $\mathbf{V}_i$  为专家对  $\mathbf{B}_i$  各二级指标评判值的集合。

### 3.3 确定各评价等级的关联度

根据经典数学中距的定义, 则点与区间两端的距值为:

$$\rho(v_i, V_{oi}) = \left| v_i - \frac{a_{oi} + b_{oi}}{2} \right| + \frac{a_{oi} - b_{oi}}{2}; \quad (11)$$

$$\rho(v_i, V_{pi}) = \left| v_i - \frac{a_{pi} + b_{pi}}{2} \right| + \frac{a_{pi} - b_{pi}}{2} \quad (12)$$

其中：式(11)为评分  $v_i$  与各安全评价等级  $v_{0i}$  区间两端的距，式(12)为评分  $v_i$  与节域区间两端的距。则评价对象  $P$  各指标关于各评价等级的关联函数值为：

$$K_j(v_i) = \frac{\rho(v_i, V_{0ji})}{\rho(v_i, V_{Pi}) - \rho(v_i, V_{0ji})} \quad (13)$$

则评价对象  $P$  关于等级  $j$  的关联度为：

$$K_j(P) = \sum_{i=1}^n \alpha_i K_j(v_i) \quad (14)$$

式中： $\alpha_i$  为各评价指标博弈组合权重。

#### 3.4 确定评价等级

汇总计算地铁抗涝韧性评价总的关联度，得出最终的评定等级，若

$$K_j(P) = \max_{j \in \{1, 2, \dots, m\}} K_j(P) \quad (15)$$

则评价对象  $P$  属于等级  $j$ 。

## 4 工程实例

### 4.1 工程概况

与中西部相比，华南地区一直是我国降雨量最多的地区。以广东地区为例，广州地铁 13 号线东起于鱼珠站，途经增城区和黄埔区，西止于新沙站，全长 27.03 km，均为地下路线；共设置 11 座车站，全部为地下车站。2020 年 5 月 21 日至 22 日广州大暴雨，广州地铁 13 号线官湖站、新沙站、沙村站、南岗站等站外出现区域性洪涝，洪水倒灌进站导致地铁隧道被淹，13 号线全线停运。鉴于广州地铁 13 号线存在发生内涝灾害的可能性和敏感性，选择其中新塘站进行抗涝韧性评估。

### 4.2 韧性评价指标权重计算

邀请 10 名专家学者（其中 2 名地铁安全管理领域的专家，2 名韧性研究领域高级学者，4 名轨道交通领域技术工程师，2 名地铁管理人员）对评价指标进行打分，根据式(1) - 式(4)分别得到序关系分析法和熵权法权重，再由式(5) - 式(7)得出博弈后的最优权重(表 2)。

### 4.3 确定经典域和节域

将韧性评价划分为  $(0, 60]$ 、 $(60, 80]$ 、 $(80, 90]$ 、 $(90, 100]$  四个等级，分别用 I、II、III、IV 表示，依次代表韧性低、中等、较高、高，以此确定各项定性指标的经典域与节域。

以人员管理防控  $B_1$  为例，其经典域为：

$$R_1(B_1) = \begin{bmatrix} U_1 & c_{11} & (0, 60) \\ & c_{12} & (0, 60) \\ & c_{13} & (0, 60) \\ & c_{14} & (0, 60) \\ & c_{15} & (0, 60) \\ & c_{16} & (0, 60) \end{bmatrix}; \quad (16)$$

$$R_2(B_1) = \begin{bmatrix} U_2 & c_{11} & (60, 80) \\ & c_{12} & (60, 80) \\ & c_{13} & (60, 80) \\ & c_{14} & (60, 80) \\ & c_{15} & (60, 80) \\ & c_{16} & (60, 80) \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$R_3(B_1) = \begin{bmatrix} U_3 & c_{11} & (80, 90) \\ & c_{12} & (80, 90) \\ & c_{13} & (80, 90) \\ & c_{14} & (80, 90) \\ & c_{15} & (80, 90) \\ & c_{16} & (80, 90) \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$R_4(B_1) = \begin{bmatrix} U_4 & c_{11} & (90, 100) \\ & c_{12} & (90, 100) \\ & c_{13} & (90, 100) \\ & c_{14} & (90, 100) \\ & c_{15} & (90, 100) \\ & c_{16} & (90, 100) \end{bmatrix} \quad (19)$$

其节域如下：

$$R_u(B_1) = \begin{bmatrix} U & c_{11} & (0, 100) \\ & c_{12} & (0, 100) \\ & c_{13} & (0, 100) \\ & c_{14} & (0, 100) \\ & c_{15} & (0, 100) \\ & c_{16} & (0, 100) \end{bmatrix} \quad (20)$$

表 2 二级指标权重

二级指标	描述	序关系分析法权重	熵权法权重	博弈权重
应急指挥机构运营管理稳定性 $C_{11}$	指挥机构面对洪涝灾害迅速作出反应的能力	0.136	0.249	0.143
防汛预案完善度稳定性 $C_{12}$	防汛应急方案完善程度	0.220	0.141	0.216
应急医疗救援系统冗余性 $C_{13}$	救援人员救援能力	0.333	0.246	0.330
应急通信指挥系统冗余性 $C_{14}$	通讯指挥人员指挥能力	0.155	0.133	0.151
防洪安全知识教育恢复性 $C_{15}$	防洪安全知识的教育程度	0.076	0.106	0.076
应急培训次数及演练恢复性 $C_{16}$	应急演练的培训程度	0.080	0.126	0.083
移动通信设备稳定性 $C_{21}$	通讯设备的耐用值	0.130	0.123	0.115
应急供电设备稳定性 $C_{22}$	供电设备的耐用值	0.178	0.112	0.082
防洪物资保障冗余性 $C_{23}$	防洪物资供应充沛性	0.231	0.253	0.250
救援物资保障冗余性 $C_{24}$	救援物资供应充沛性	0.252	0.291	0.293
防洪物资恢复性 $C_{25}$	防洪物资囤积准备程度	0.086	0.111	0.116
救援物资恢复性 $C_{26}$	救援物资囤积准备程度	0.012	0.111	0.144
风险监测的稳定性 $C_{31}$	风险监测系统的耐用值	0.118	0.153	0.132
风险预警的稳定性 $C_{32}$	风险预警系统的耐用值	0.118	0.127	0.125
地铁口排水系统冗余性 $C_{33}$	地铁口排水系统排水能力	0.276	0.149	0.220
地铁周边道路排水系统冗余性 $C_{34}$	地铁周边道路排水系统排水能力	0.237	0.286	0.257
地铁警示标志恢复性 $C_{35}$	地铁警示标志完善度	0.065	0.150	0.090
排水系统排水能力恢复性 $C_{36}$	排水系统排水能力恢复值	0.185	0.135	0.177

#### 4.4 确定物元

根据相关标准和规范, 10 位专家对地铁站各指标进行打分, 总分 100 分, 得出人员管理防控  $B_1$  的评价物元为:

$$R_1(B_1) = \begin{bmatrix} B_1 & C_{11} & 92 \\ & C_{12} & 74 \\ & C_{13} & 94 \\ & C_{14} & 91 \\ & C_{15} & 93 \\ & C_{16} & 82 \end{bmatrix} \quad (21)$$

#### 4.5 计算关联度

由计算式(11) - 式(13), 得关联度计算结果(表 3)。由式(14)可得评价对象人员管理防控、物资装备防控、环境防控关联度计算结果(表 4)。将一级指标关联度计算结果继续代入式(14)得出地铁站抗涝韧性评价等级(表 4)。

#### 4.6 韧性等级评定

由表 4 可知, 人员管理抗涝韧性评价为Ⅳ级, 物资装备抗涝韧性评价为Ⅳ级, 环境抗涝韧性评价为Ⅲ级, 目标层即地铁站抗涝韧性等级为Ⅳ级, 韧性高。

表 3 二级指标评价关联度

二级指标	权重	总分	平均得分	评价指标关联度				韧性等级
				$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
应急指挥机构运营管理稳定性 $C_{11}$	0.143	100	92	-0.800	-0.600	-0.200	0.333	Ⅳ
防汛预案完善度稳定性 $C_{12}$	0.216	100	74	-0.350	0.300	-0.188	-0.381	Ⅱ
应急医疗救援系统冗余性 $C_{13}$	0.330	100	94	-0.850	-0.700	-0.400	2.000	Ⅳ
应急通讯指挥系统冗余性 $C_{14}$	0.151	100	91	-0.775	-0.550	-0.100	0.125	Ⅳ
防洪安全知识教育恢复性 $C_{15}$	0.076	100	93	-0.825	-0.650	-0.300	0.750	Ⅳ
应急培训次数及演练恢复性 $C_{16}$	0.083	100	82	-0.550	-0.100	0.125	-0.308	Ⅲ
移动通信设备稳定性 $C_{21}$	0.115	100	93	-0.825	-0.650	-0.300	0.750	Ⅳ
应急供电设备稳定性 $C_{22}$	0.082	100	92	-0.800	-0.600	-0.200	0.333	Ⅳ
防洪物资保障冗余性 $C_{23}$	0.250	100	95	-0.875	-0.750	-0.500	4.000	Ⅳ
救援物资保障冗余性 $C_{24}$	0.293	100	91	-0.775	-0.550	-0.100	0.125	Ⅳ
防洪物资恢复性 $C_{25}$	0.116	100	96	-0.900	-0.800	-0.600	3.000	Ⅳ
救援物资恢复性 $C_{26}$	0.144	100	95	-0.875	-0.750	-0.500	4.000	Ⅳ
风险监测的稳定性 $C_{31}$	0.132	100	91	-0.775	-0.550	-0.100	0.125	Ⅳ
风险预警的稳定性 $C_{32}$	0.125	100	92	-0.800	-0.600	-0.200	0.333	Ⅳ
地铁口排水系统冗余性 $C_{33}$	0.220	100	71	-0.275	0.450	-0.237	-0.396	Ⅱ
地铁周边道路排水系统冗余性 $C_{34}$	0.257	100	64	-0.100	0.125	-0.308	-0.419	Ⅱ
地铁警示标志恢复性 $C_{35}$	0.090	100	92	-0.800	-0.600	-0.200	0.333	Ⅳ
排水系统排水能力恢复性 $C_{36}$	0.177	100	94	-0.850	-0.700	-0.400	2.000	Ⅳ

表 4 一级指标关联度

总目标	一级指标	权重	评价指标关联度				韧性等级
			$j=1$	$j=2$	$j=3$	$j=4$	
地铁车站抗涝韧性评估研究 A	人员管理防控 B1	0.266	-0.697	-0.393	-0.229	0.676	IV
	物资装备防控 B2	0.309	-0.839	-0.677	-0.354	2.081	IV
	环境防控 B3	0.362	-0.521	-0.231	0.088	-0.145	III
	目标层 B4		-0.633	-0.397	-0.138	0.770	IV

#### 4.7 评价结果分析

(1) 人员管理防控方面, 等级评价为韧性高, 表明该地铁站在人员识别把控内涝方面做的整体比较好。但是其中防汛预案完善度稳定性和应急培训次数及演练恢复性评价等级为韧性中等和较高, 因此我们应该健全组织, 加强领导, 建立防汛安全责任制, 保障地铁车站中内涝应急演练频率。

(2) 物资装备防控方面, 等级评价为韧性高, 表明该地铁在通讯和应急供电设备稳定性较好, 防洪沙袋、挡板、防滑垫等各类防汛物资准备充足。

(3) 环境防控方面, 等级评价为韧性较高。针对地铁口排水系统和地铁周边道路排水系统韧性评价中等, 相关管理部门应留意广东暴雨汛期, 开展雨水径流控制和资源化利用、雨水管网系统、内涝防治系统三位一体的综合化治理<sup>[21]</sup>, 对高效排水和防渗水系统进行重新建立和项目布局, 构建城市排水和防渗系统, 以管理雨水“停滞、贮藏、渗透、排水、利用”的总体流程。

## 5 结语

地铁位于地面之下, 很容易受到暴雨等自然灾害的侵袭。如果暴雨入侵地铁被淹, 不单单是造成严重的经济损失, 更重要的是会威胁到人民群众的生命安全, 因此对地铁车站抗涝韧性水平的研究具有重要的意义。

(1) 本文从韧性的稳定性, 冗余性, 恢复性出发, 从人员管理, 物资装备, 环境三方面入手构建了地铁车站抗涝韧性指标体系。在指标权重的计算中, 运用博弈论的思想优化序关系分析法主观权重和熵权法客观权重取得最优解, 比单一或简单线性赋权更合理。

(2) 根据韧性评价方法选取原则, 选择可拓评价法, 建立博弈论组合赋权法物元可拓地铁抗涝韧性评价模型。通过确定经典域、节域, 建立物元模型, 计算关联度的方式对广州地铁 13 号线新塘站进行抗涝韧性评价, 并针对其中的不足提出相应的改进建议, 验证了模型的有效性。

## 参考文献:

- [1] 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]. 北京: 应急管理部, 2022.
- [2] 马晴晴, 吴珊, 王昊, 等. 基于暴露性和敏感性的地表降雨积水影响下的地铁站脆弱性研究[J]. 水利水电技术(中英

- 文), 2022, 53(10): 74-85.
- [3] 王军武, 田梦圆, 潘子瑶, 等. 地铁车站暴雨内涝应急响应投入策略研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18(5): 11-17.
- [4] 闫绪娟, 王俊丽, 范玲, 等. 韧性城市视角下地铁洪涝灾害风险分析: 基于 Bow-Tie—贝叶斯网络模型[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 36-43.
- [5] DUTTA D, TAKAMURA H, HERATH S. Understanding flood behavior in underground facilities for urban flood risk management[J]. New Technologies for Urban Safety of Mega Cities in Asia, 2003(10): 201-212.
- [6] TODA K, OYAGI R, MOUE K. On the Inundation Process in the Underground Space in Urban Flooding[J]. Annual Report of Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 2004, 47B: 293-302.
- [7] YONEYAMA N, ONISHI Y, ASAI Y. Evacuation criteria during urban flooding in underground space[C]//11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008.
- [8] 黄亚江, 李书全, 李益铎, 等. 基于 DEMATEL-ISM-ANP 的地铁运营安全韧性综合评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 171-177.
- [9] 崔欣, 路庆昌, 徐标, 等. 考虑公交接驳的地铁网络韧性评估及故障修复策略[J]. 都市快轨交通, 2023, 36(1): 93-98.
- [10] 郭庆军, 郝倩雯, 王艺洁, 等. 基于 ANP-可拓云模型的地铁系统韧性评价[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(4): 943-950.
- [11] 张洁斐, 任刚, 马景峰, 等. 基于韧性评估的地铁网络修复时序决策方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(4): 14-20.
- [12] SPERANZAC I, WIESMANN U, RIST S. An indicator framework for assessing livelihood resilience in the context of social-ecological dynamics[J]. Global Environmental Change, 2014, 28: 109-119.
- [13] MACASKILL K, GUTHI P. Multiple interpretations of resilience in disaster risk management[J]. Procedia Economics and Finance, 2014, 18: 667-674.
- [14] MINOY, DUEAS-OSORIO L, XINGM. A three-stage resilience analysis framework for urban infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012, 36/37: 23-31.
- [15] 王葵, 刘新荣, 周小涵, 等. 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(1): 28-34.
- [16] 黄亚江, 李书全, 项思思. 基于 AHP-PSO 模糊组合赋权法的地铁火灾安全韧性评估[J]. 灾害学, 2021, 36(3): 15-20, 40.
- [17] 宋英华, 李玉枝, 霍非舟, 等. 城区内涝条件下城市公交-地铁双层交通网络的脆弱性分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(2): 114-120.
- [18] 吕彪, 管心怡, 高自强. 地铁网络服务韧性评估与最优恢复策略[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(5): 198-205, 221.
- [19] 黄莺, 刘梦茹, 魏晋果, 等. 基于韧性曲线的城市地铁网络恢复策略研究[J]. 灾害学, 2021, 36(1): 32-36.
- [20] 吴强, 刘志钢, 钟晓, 等. 上海地铁运营安全双重预防机制建设的思考[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(S1): 54-59.
- [21] 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.

(下转第 42 页)