

基于模糊层次分析法的城市轨道交通暴雨灾害脆弱性评估研究

姚谈强 范书豪

重庆交通大学，重庆市，400074；

摘要：为提高城市轨道交通（URT）暴雨灾害脆弱性评估的准确性，本研究基于模糊层次分析法构建脆弱性评估模型。该方法通过引入三角模糊数，以克服传统方法在处理专家判断模糊性上的不足，并提升权重计算的科学性。以C市L₃号线为例，评估结果表明，其综合脆弱性指数V=3.85，处于中等偏低水平。风险结构分析表明，B2（敏感性）是影响URT脆弱性的首要准则层，C22（隧道排水泵站的设计容量）和C32（应急预案的完备与操作性）被确定为制约系统韧性的首要关键控制因子。本研究为URT管理者精准识别薄弱环节、制定优化策略以增强暴雨应对韧性提供了依据。

关键词：城市轨道交通；暴雨灾害；脆弱性评估；模糊层次分析法

DOI：10.64216/3080-1508.25.12.019

1 研究方法

1.1 脆弱性评估指标体系

本研究基于“暴露度-敏感性-适应性”框架构建评估体系，包含目标层（A层）、准则层（B层）和指标层（C层）。

表1 城市轨道交通暴雨灾害脆弱性评估指标体系

目标	准则	指标	评估指标	属性说明
A	B1	C11	线路低洼区段长度占比	线路处于易积水低洼地形的比例
		C12	地面及高架线路占比	系统暴露于雨水直接冲击的比例
		C13	沿线河流、水体密度	线路临近外部水源的潜在风险
		C14	车站外部排水系统流量	车站周边城市排水系统的设计能力
	B2	C21	关键设备的防水等级	设备抵抗浸泡的能力
		C22	隧道排水泵站的设计容量	隧道区域积水的排除能力
		C23	站台与站厅地面高差	地面水倒灌入站厅的可能性
		C24	车站入口防洪设施完好度	物理防护措施的可靠性
	B3	C25	信号、通信设备的老化程度	设备因老化导致故障的概率
		C26	员工操作规范培训覆盖率	员工应对突发情况的能力
		C27	车辆段地势高度	车辆段被淹的风险
		C28	外部电源依赖程度	应急电源的自主保障能力
	B3	C31	应急物资储备充足率	应急物资的准备情况
		C32	应急预案的完备和操作性	预案的覆盖范围和执行效率
		C33	应急处置队伍的响应时间	抢险队伍到达受灾点所需时间
		C34	跨部门协作机制的有效性	外部支持的畅通程度
		C35	灾害信息发布与疏散能力	乘客安全转移和信息透明度
		C36	历史灾害恢复经验积累	从过往事件中学习改进的能力

1.2 模糊层次分析法 (F-AHP)

F-AHP 将模糊集理论应用于传统 AHP, 通过三角模糊数 $\tilde{M} = (l, m, u)$ 来表示专家判断的重要性, 其中 l 表示最小值 (下界), m 表示最可能值, u 表示最大值 (上界)。

表 2 F-AHP 语义标度及其对应 TFNs

模糊语义标度	相对重要性	TFN $\tilde{M} = (l, m, u)$
相等重要	1	(1, 1, 1)
稍微重要	3	(2, 3, 4)
较重要	5	(4, 5, 6)
强烈重要	7	(6, 7, 8)
极端重要	9	(8, 9, 9)

注: 中间值 (如 2, 4, 6, 8) 用作相邻等级之间的中间模糊数。

F-AHP 的权重计算步骤如下:

Step 1: 构建模糊两两比较矩阵 \tilde{A}

专家依据表 2 将语言评估转化为模糊数 \tilde{a}_{ij} 构建模糊判断矩阵 \tilde{A} :

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij})_{n \times n} \quad (1)$$

其中 $\tilde{a}_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, u_{ij})$ 表示指标 i 相对于 j 的重要程度, 且 $\tilde{a}_{ji} = \frac{1}{\tilde{a}_{ij}} = \left(\frac{1}{u_{ij}}, \frac{1}{m_{ij}}, \frac{1}{l_{ij}}\right)$ 。

Step 2: 计算模糊综合程度 S_i

对于矩阵的每一行 i , 计算模糊综合程度 S_i :

$$S_i = \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} \times \left[\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n \tilde{a}_{kj} \right]^{-1} \quad (2)$$

其中, 模糊加法 $\sum_{j=1}^n \tilde{a}_{ij} = (\sum l_j, \sum m_j, \sum u_j)$; 模糊乘法 \tilde{M}^{-1} 为模糊逆。

Step 3: 计算模糊数 $S_i > S_j$ 的可能性程度

$$P = \sup_{x \geq y} [\min(\mu_{S_i}(x), \mu_{S_j}(y))] \quad (3)$$

其中 $\mu_{S_i}(x)$ 和 $\mu_{S_j}(y)$ 分别是 S_i 和 S_j 的隶属度函数。

Step 4: 确定非模糊权重向量 W'

指标 i 的非模糊权重 W'_i 定义为 S_i 大于所有其他 S_j 的最小可能性程度:

$$W'_i = \min_{j \in \{1, \dots, n\}, j \neq i} P \quad (4)$$

Step 5: 归一化权重向量 W

对非模糊权重向量 W' 进行归一化处理, 得到最终的指标权重 W :

$$W_i = \frac{W'_i}{\sum_{i=1}^n W'_i} \quad (5)$$

最终, 通过权重 W 和评估得分, 即可计算出 URT 系统对暴雨灾害的综合脆弱性指数。

2 案例应用与结果分析

2.1 案例描述与数据采集

本研究选取 C 市轨道交通 L₃ 号线作为评估对象。该线路是 C 市早期建成的骨干线路之一, 全长约 30 公里, 设站 22 座, 其中地下区段占比超过 60%。该线路地下区段占比高, 途经低洼老城区, 部分排水设施老化, 历史运营中多次因强降雨发生积水、中断事件, 具备典型研究价值。采用专家问卷调查法, 邀请 10 名 URT 防灾领域专家。每位专家依据表 3 对指标相对重要性进行两两比较, 并将语言评价转化为 TFNs。最终采用几何平均法聚合专家意见, 形成综合的模糊两两比较矩阵。

2.2 F-AHP 权重计算

通过对目标层下的三个准则层进行 F-AHP 计算, 得到它们的非模糊权重 W' 和归一化权重 W 。计算结果如表 3 所示:

表 3 准则层权重计算结果

准则层	名称	模糊综合程度	非模糊权重 W'_i	归一化权重 W_i	权重排名
B1	暴露度	(0.23, 0.35, 0.49)	0.852	0.285	3
B2	敏感性	(0.32, 0.44, 0.58)	0.981	0.328	1
B3	适应性	(0.38, 0.48, 0.65)	0.957	0.319	2

根据上表结果显示, B2 (敏感性) 的权重最高为 0.328, 其次是 B3 (适应性) 为 0.319。这表明影响该线路暴雨灾害脆弱性的主导因素并非地理环境的暴露程度, 而更多取决于其内部结构和设备抗损能力, 以及

灾中与灾后的恢复调控能力。

通过计算各准则层下的具体指标权重, 得到全局权重。计算结果如表 4 所示 (仅列出前 5 个指标):

表4 指标全局权重计算结果

准则层	符号	评估指标	准则层权重	全局权重W _G	全局排名
B2	C22	隧道排水泵站的设计容量	0.165	0.0541	1
B3	C32	应急预案的完备性和可操作性	0.158	0.0504	2
B2	C21	关键设备的防水等级	0.150	0.0492	3
B3	C33	应急处置队伍的响应时间	0.140	0.0447	4
B1	C11	线路低洼区段长度占比	0.135	0.0385	5

具体指标层面, C22(隧道排水泵站的设计容量)是影响L₃号线脆弱性的首要关键因子。进一步证实了B2(敏感性)在整个评估体系中的主导作用。这反映了在暴雨侵袭时,快速排除积水的能力是制约安全运营的核心。此外, C32(应急预案)和C21(设备防水等级)也占据了重要地位,分别体现了管理预案与工程防护两类因素在系统脆弱性构成中的重要作用。

2.3 脆弱性指数计算与分析

通过查阅L₃号线的历史运营记录、设施检测报告以及对现场管理人员的访谈,采用1~5分制进行赋值,确定了各指标的实际得分S_{Actual}。综合脆弱性指数V计算公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^m W_{G,i} \times S_{Actual} \quad (6)$$

基于专家咨询与行业共识,建立脆弱性等级划分标准: [4.0~5.0]区间为低脆弱性, [3.0~4.0]为中等脆弱性, [1.0~3.0]为高脆弱性。根据式(6),计算C市L₃号线综合脆弱性指数V=3.85。结合评估等级划分标准,可以判断L₃号线的脆弱性属于中等偏低水平。

3 结论

本研究构建了基于TFNs的F-AHP评估模型,有效解决了URT暴雨灾害脆弱性评估中指标权重的主观模糊性问题。实证分析结果显示,C市L₃号线的综合脆弱性指数V=3.85,处于中等偏低水平。风险结构分析表明,B2(敏感性)是影响脆弱性的首要准则层;在具体指标中,C22(隧道排水泵站的设计容量)全局权重最高,是制约该线路暴雨灾害韧性的首要关键控制因子。这些

发现与历史受灾情况高度吻合,验证了评估模型的指导价值。

基于脆弱性评估模型的计算结果和关键因子分析,本研究针对C市L₃号线的风险结构特征提出以下优化建议:鉴于B2中的C22(隧道排水泵站的设计容量)权重最高,应优先加大基础设施升级投资,确保泵站排水能力能够应对更高重现期的极端暴雨,并提升C21(关键设备防水等级)。管理侧应着力提升C32(应急预案的完备与操作性),定期组织实战化联合演练,以有效缩短C33(应急处置队伍的响应时间)。

本研究主要存在两方面局限:其一,模型遵循静态评估框架,难以反映暴雨致灾过程的动态演变;其二,评估在数据层面依赖于内部资料与定性判断,其可获性与客观性可能受限。未来可尝试将实时监测与预测信息耦合进模型,实现脆弱性的动态评估;并可进一步集成模糊DEMAREL等方法,以探明指标间的复杂因果关系与系统内部的风险传导机制。

参考文献

- [1] INGVARDSON J B, NIELSEN O A. Effects of new bus and rail rapid transit systems - an international review [J]. Transport Reviews, 2018, 38(1): 96~116.
- [2] 汤洪霞, 郑静萱, 李梦笛, et al. 城市轨道交通系统暴雨风险演化网络特性及韧性提升策略 [J]. 铁道标准设计, 2025, 69(08): 64~71.
- [3] 宋必伟, 康丹, 位文强, et al. 城市轨道交通内涝风险评估研究及实践 [J]. 给水排水, 2024, 60(07): 26~32.