

刘敬严, 郑文文, 陈佳, 等. 面向三度空间的地铁车站暴雨内涝应急能力评价[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 172–176, 201. [LIU Jingyan, ZHENG Wenwen, CHEN Jia, et al. Evaluation of Rainstorm Water – logging Emergency Response Capability of Subway Station for Trio Spaces[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 172–176, 201. doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2024.01.027.]

面向三度空间的地铁车站暴雨内涝应急能力评价^{*}

刘敬严^{1,2}, 郑文文¹, 陈佳¹, 赵莉琴³

(1. 防灾科技学院土木工程学院, 河北 三河 065201; 2. 河北省工程结构多灾害韧性与应急处置技术创新中心, 河北 三河 065201; 3. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050043)

摘要:为科学评价地铁车站暴雨内涝应急能力,减少暴雨内涝灾害事故,基于三度空间理念,采用熵权云模型进行地铁车站暴雨内涝应急能力评价分析。首先从三度空间的物理空间、社会空间、信息空间出发,结合灾害应急的预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力过程属性,构建地铁车站暴雨内涝应急能力分析框架。参考借鉴地铁内涝灾害相关文献,建立了地铁车站暴雨内涝应急能力评价指标体系。随后,建立地铁车站暴雨内涝应急评价熵权云模型。利用云发生器 matlab 编程计算应急能力标准云和评价云的云数字特征,生成云滴及应急能力云图。对比评价云图和标准云图,结合贴近期度来判定应急能力等级。通过 SPSSAU 障碍度模型计算,找到应急能力障碍因子。最后,进行实例分析,发现地铁暴雨内涝应急能力因子主要是在社会空间和信息空间,并据此提出相应提升建议。

关键词: 地铁车站; 灾害; 应急能力; 暴雨内涝; 三度空间; 云模型

中图分类号: X43; X915.1; U231.96 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–811X(2024)01–0172–06

doi: 10.3969/j.issn.1000–811X.2024.01.027

受强降雨及连续性降雨影响,积水不能及时排出而造成损失,形成暴雨内涝灾害^[1]。在快速城市化发展、极端天气频发的今天,洪涝灾害影响大、损失重。地铁车站易发生内涝灾害,且疏散困难、救援难度大,易造成财产损失和人员伤亡。郑州地铁“7.20”特大暴雨事件,反映出加强地铁车站暴雨内涝应急能力评价工作,提升地铁车站暴雨内涝应急能力的重要性。

地铁暴雨内涝的研究主要聚焦在地铁车站暴雨内涝灾害风险和脆弱性。杨可等^[2]构建了暴雨条件下地铁系统脆弱性指标体系,并运用实验室综合决策法和对抗哈斯图技术方法进行指标重要性排序。王莉等^[3]进行了暴雨致灾的地铁水灾事件情景贝叶斯网络情景演化分析。陈佳等^[4]基于压力—状态—响应(PSR)理论构建地铁车站暴雨内涝脆弱性评价指标,利用 IOWA 算子和向量夹角余弦(VAC)进行地铁车站暴雨内涝脆弱性评价。赵露薇等^[5–6]构建了暴雨干扰下地铁系统脆弱性指标体系,并在 FCM 框架内模拟地铁系统脆弱性演化。王军武等^[7–8]采用投影寻踪方法和粒子群算法分析地铁车站工程暴雨内涝脆弱性。李辉山等^[9]从自然因素、周边环境和防汛能力3个维度分析灾害原因,构建 DNN 神经网络模型进行地铁洪涝灾害预测。闫绪娴^[10]构建地铁洪涝灾害事故树。WU^[11]基于语言直觉模糊集和 TOPSIS 进行地铁站工程内涝灾害应急预案决策研究。YU 等^[12]采用组合赋权法,构建地铁车站内涝风险的 AHP 模糊综合评价

模型。LYU 等^[13]使用区间 FAHP–FCA 方法评估地铁系统洪水风险。

这些研究均是从传统灾害风险视角来进行分析的,只讨论了地铁车站暴雨内涝灾害风险和脆弱性,未涉及应急能力。

地铁应急能力的研究方面,李会宁^[14]依据事故致因理论,构建了地铁应急疏散能力评价指标,并采用贝叶斯网络模型进行评价分析。林立等^[15]基于可拓学理论,构建了包括灾前监测、灾中应对、灾后恢复及政府应急支持能力的地铁应急能力评价指标体系,采用层次分析法确定权重的物元模型,评价地铁突发事件应急能力。高宇航^[16]以扎根理论总结地铁站应急疏散影响因素,构建了管理因素、应急响应、建筑因素、人员因素的评价指标体系,采用灰色关联分析法评价地铁站应急疏散能力。袁孝伟^[17]从人、物、环境和管理四方面分析地铁系统的风险因素,构建了城市地铁应急能力评价指标体系,运用模糊综合评价法对广州地铁应急能力进行评价。

这些研究均只是从整体上探讨地铁突发事件的应急能力,对于暴雨内涝这种具体灾害情况分析不够详细。

地铁车站系统处于“三度空间”中,可在物理、社会和信息空间找到其相应的“投影”。方东平等^[18–19]在考察城市灾害韧性时提出从物理、社会、信息三度空间下进行“系统的系统”的思考,并在构建社区地震安全韧性评估系统时基于“三度空

^{*} 收稿日期: 2023–07–26

修回日期: 2023–08–15

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项(ZY20220206); 廊坊市科技局课题(2023011045)

第一作者简介: 刘敬严(1980–),女,汉族,河北保定人,博士,副教授,主要从事风险管理、技术经济研究。

E-mail: liujingyan999@163.com

间”理论框架, 梳理影响因素。随后, 学者结合三度空间理念, 从“物理-社会-信息”视角, 先后构建了城市韧性评价体系^[20]、暴雨内涝下交通系统安全韧性网络分层模型^[21]、社区韧性关键要素的治理机制^[22]。王秉^[23]在安全 4.0 时代的重大安全科学问题展望中指出人类世界正从原来的二元空间进入包括物理空间、社会空间与信息空间的三元空间。随后他从理论层面分析了“物理-社会-信息”三元空间安全态势感知路径问题^[24], 并建立理论模型, 探讨安全信息视域下的三元空间(物理-社会-信息)安全事件链防控问题^[25]。

本研究借鉴上述研究, 基于“三度空间(物理-社会-信息)”理念, 梳理影响地铁站暴雨内涝应急能力的主要因素, 结合应急能力动态演进的过程属性来构建指标体系。地铁站暴雨内涝应急能力影响因素众多, 并且具有模糊性、随机性的特点, 难以准确地量化。故采用云模型方法, 基于云数字特征和云图进行应急能力分析。云模型能够将模糊性和随机性相互映射在定性语言和定量数值转换中^[26], 已成功运用在地铁运营安全评价^[27]、项目安全风险评价^[28]、危险性预测^[29]、灾害风险预警^[30]、城市应急管理能力评估^[31]等领域。

1 地铁站暴雨内涝应急能力三度空间模型

1.1 地铁站暴雨内涝应急能力

地铁站暴雨内涝应急能力是为了应对暴雨及连续性大降雨的发生, 可能造成的内涝灾害, 尽量减少人员伤亡、降低经济损失、缩小后果影响范围以及尽快恢复正常运营状态的能力。地铁站暴雨内涝应急能力与地铁车站的自然要素与社会要素、硬件设施与软件环境、人力资源和体制资源、工程能力与组织能力等多方面因素息息相关。

地铁站暴雨内涝应急能力评价是在对地铁暴雨内涝灾害事故特点及应急能力构成深入研究的基础上, 运用科学、合理的评价方法, 对地铁站暴雨内涝应急能力进行量化的分析, 并将评价结果作为反馈信息, 以改善地铁的应急管理状况, 提高暴雨内涝应对综合能力。

张忠义等^[32]在分析武汉洪涝灾害时提出从预防、准备、响应、恢复方面提升城市应急软能力。本研究将地铁站暴雨内涝应急能力分为预防能力、准备能力、响应能力和恢复能力。

预防能力指地铁车站预防城市暴雨积水内涝灾害过程中所体现出来的能力。利用科学技术手段和管理措施来预防灾害事故的发生。从出入口地势情况、出入口台阶高度、出入口建设类型、防汛应急预案、防汛应急制度、气象信息预警分析等方面入手, 预防暴雨积水内涝灾害发生。

准备能力是地铁站在暴雨来临之前及时接收当地气象、水文部门和防汛办关于天气、雨情的预报, 并及时向各单位各部门传达发布预警信息, 做好相应准备工作。包括车站挡水系统、车站排水系统、雨水监测报警系统、防汛应急演练、防汛应急物资、应急救援队伍、广播宣传系统等准备工作。

响应能力是暴雨来临时, 启动执行应急预案、汛情信息分析与发布、综合指挥调度、利用应急排水设备、应急通讯设备、应急供电设备等进行人员疏散和抢险救灾的能力。

恢复能力是恢复运营条件、恢复运营秩序、

灾后预案完善、应急医疗救助和舆论引导的能力。

1.2 地铁站暴雨内涝应急能力三度空间

地铁站是超大规模地下建筑群、大型交通运输系统和人员动态密集场所。应急工作需要由可持续的物质系统和社会群体结合形成, 并通过社会群体发挥作用。灾害应急涉及建筑工程系统, 也涉及经济、社会、信息等系统。有必要从实体、信息、社会三度空间出发构建评价体系。物理空间是对社会空间与信息空间的物质支撑。社会空间是连接物理空间和信息空间的桥梁。信息空间是物理空间与社会空间信息交互的保障。社会-物理-信息系统框架考虑各个子系统存在的空间, 能综合全面地分析系统问题。

地铁站暴雨内涝应急能力三度空间模型如图 1 所示。

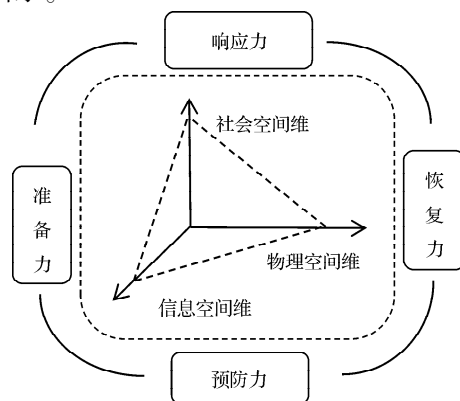


图1 地铁站暴雨内涝应急能力三度空间模型

物理空间是地铁站暴雨内涝应急能力的物质基础, 主要是地铁车站建筑和相关设施设备。社会空间是地铁站暴雨内涝应急能力的行动规范, 主要是应急人员和应急管理制度。社会空间可以规范多元主体的行动, 提高地铁车站系统对灾害或风险的恢复力和适应力。信息空间是地铁站暴雨内涝应急能力的联动保障, 主要是信息技术应用, 保障雨水监测报警系统、广播通信系统等防汛系统联动。

从应急能力的预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力内涵出发, 地铁车站应对暴雨内涝灾害时, 首先是预防能力。预防能力主要是日常的规划, 取决于地铁车站建筑及防汛设施等物理空间的抗汛水平, 防汛应急制度及防汛预案等社会空间, 以及信息空间的汛情预警能力。准备能力主要体现在暴雨来临前做的应对准备工作, 主要包括挡水墙、防汛挡板、排水沟等物理空间和防汛物资和防汛应急人员等社会空间。响应能力主要是应急排水设备、应急通信设备、应急供电设备等物理空间和社会空间的应急预案启动执行和指挥调度能力及信息空间的汛情信息分析与发布。恢复能力主要是物理空间方面的机车车辆、电梯系统、自动检票机、屏蔽门安全门等的运营条件恢复和社会空间方面的运营秩序恢复及信息空间的舆论引导。

1.3 地铁站暴雨内涝应急能力指标体系

本文对国内外暴雨内涝背景下地铁灾害风险、脆弱性以及韧性评价指标体系的文献以及城市暴雨内涝应急能力评价指标体系的文献进行梳理。依据地铁站暴雨内涝应急能力三度空间框架, 从物理空间、社会空间和信息空间选取合适的表征预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力的应急能力指标(表1)。

表 1 暴雨内涝应急能力评价指标体系

三度空间	预防力 A_1	准备力 A_2	响应力 A_3	恢复力 A_4
物理空间	A_{11} 出入口建设类型	A_{21} 车站挡水系统	A_{31} 应急排水设备	A_{41} 运营条件恢复
	A_{12} 出入口地势情况	A_{22} 车站排水系统	A_{32} 应急通信设备	
	A_{13} 出入口台阶高度	A_{23} 雨水监测报警系统	A_{33} 应急供电设备	
社会空间	A_{14} 防汛应急预案	A_{24} 防汛应急演练	A_{34} 应急预案启动执行	A_{42} 运营秩序恢复
	A_{15} 防汛应急制度	A_{25} 防汛应急物资	A_{35} 指挥调度能力	A_{43} 灾后预案完善
		A_{26} 应急救援队伍		A_{44} 应急医疗能力
信息空间	A_{16} 气象信息预警分析	A_{27} 广播宣传系统	A_{36} 汛情信息分析与发布	A_{45} 舆论引导

表 2 暴雨内涝应急能力标准云数字特征

等级	取值区间	标准云数字特征	描述
I 级	[0, 30)	(15, 5, 1)	较差
II 级	[30, 60)	(45, 5, 1)	一般
III 级	[60, 80)	(70, 3.3, 1)	较强
IV 级	[80, 100)	(90, 3.3, 1)	非常强

2 地铁车站暴雨内涝应急能力评价方法

2.1 云发生器

云模型是用云数字特征来反映定性概念的定量特征。三个云数字特征包括期望 Ex (Expected Value), 熵 En (Entropy) 和超熵 He (hyper Entropy)。云中的每个云滴都是定性概念数域空间的点的映射。期望 Ex (Expected Value) 是中心值或标准值, 是最能代表该定性概念的云滴; 熵 En (Entropy) 是模糊性; 超熵 He (hyper Entropy) 是随机性和离散性。

期望值 Ex 、熵 En 和超熵 He , 通过逆向云发生器计算样本的均值和方差而得到, 具体算法如下。

$$Ex = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (1)$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2; \quad (2)$$

$$En = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}|; \quad (3)$$

$$He = \sqrt{S^2 - E_n^2}; \quad (4)$$

输出云数字特征 (Ex , En , He)。

云图的生成, 通过正向云发生器生成云滴而得到, 具体算法如下。

1) 生成正态随机数 $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$;

2) 生成正态随机数 $X \sim N(E_x, E'^2_n)$;

3) 计算云滴隶属度

$$\mu(x) = e^{-\left[\frac{(x-E_x)^2}{2(E_n)^2}\right]}; \quad (5)$$

4) 生成云滴 $(x, \mu(x))$;

5) 重复进行步骤(1)到(4), 生成所需云滴数。

2.2 标准云图

双边约束 $[Z_{\min}, Z_{\max}]$ 的标准云的数字特征公式为:

$$\bar{E}_x = \frac{Z_{\min} + Z_{\max}}{2}; \quad (6)$$

$$\bar{E}_n = \frac{Z_{\max} - Z_{\min}}{6}; \quad (7)$$

$$\bar{H}_e = c. \quad (8)$$

式中: c 为常数, 根据评语本身的模糊程度进行具体调整。

地铁车站暴雨内涝应急能力云模型的分值区间、等级描述以及标准云数字特征见表 2。

利用正向云发生器 matlab 编程构建标准评价云生成标准云图, 作为应急能力评价的基准参照图(图 2)。

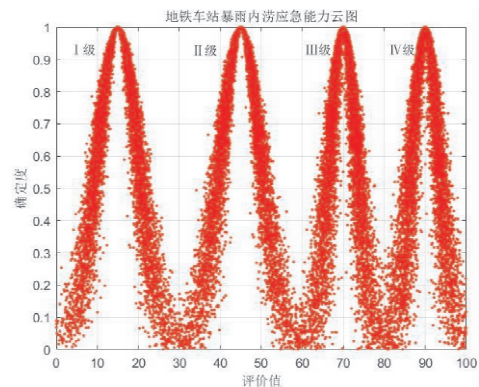


图 2 暴雨内涝应急能力标准云图

2.3 评价云图

用 matlab 编程模拟逆向云发生器求指标评价云的数字特征 (Ex , En , He); 加权汇总, 得到评价云结果。

$$F = (w_1, w_2, \dots, w_n) \begin{bmatrix} Ex_1 & En_1 & he_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Ex_n & En_n & he_n \end{bmatrix} = (Ex' En' He'). \quad (9)$$

式中: (w_1, w_2, \dots, w_n) 为采用熵权法确定的权重 w_j 。

利用 matlab 编程模拟正向云发生器生成云滴形成云图, 对比评价云图与标准云图, 引入贴近度, 确定韧性等级。

$$T = \frac{1}{|Ex - \bar{Ex}|}. \quad (10)$$

式中: T 为贴近度, \bar{Ex} 为标准云的期望。

3 实例分析

北京地铁金安桥站是 6 号线西端终点站, 也是北京地铁 S1 号线、11 号线、6 号线三线换乘站, 共设有 8 个出入口: A、B、C、D、E、F、H、J、K, 如图 3 所示。



图3 金安桥地铁站示意图

金安桥地铁站区域周边自然地势低洼，特别是地铁站的 B 口和 C 口，周边道路很容易积水。金安桥是下凹式立交桥。这种下凹式立交桥桥下往往积水深度大、积水面积大、持续时间长、交通影响大。在 2021 年 7 月 18 日北京强降雨时地铁口出现积水发生了地铁站倒灌现象。共调集 4 站 10 车 45 名消防指战员携带手抬泵 10 台，浮艇泵 5 台及救援器材，40 名消防员连续排水 3 h。反思“7·18”地铁站出现雨水倒灌问题教训，地铁公司加强了暴雨内涝应急能力建设。

物理空间方面，站外广场进行了翻修改造，站前广场平整了路面，增加了通铺的雨水算子和排水沟。在站前广场处新建了 1.2 m 高的混凝土挡水墙。并在地铁站出入口准备了设置了 5 层高强度挡水板，每层 20 cm，共 1 m 高。对该地铁站周边北辛安路金安桥下的排水设施进行改造，增强瞬时排水能力。社会空间方面，加强了预防、演练、抢险等一系列工作措施。修订完善防汛应急预案，对出现积水情况，对于车辆限流、导行和道路临时封闭，都做了预案，开展防汛综合演练和安全检查。

邀请来自地铁运营单位、高校、应急管理部門的 6 位专家打分评议得到各指标分值。利用云逆向发生器 matlab 编程计算求出指标层的云数字特征，采用熵权法确定权重(表 3)。

通过计算得知，目标层评价云即综合评价云特征值(58.05，3.08，2.04)。利用正向云发生器 matlab 编程生成评价云滴，生成综合评价云图。将综合评价云与图 2 标准云图做对比，发现评价对象处在Ⅱ级(一般)和Ⅲ级(较强)之间，更接近Ⅲ级韧性，如图 4 所示。计算综合评价云与各等级标准云的贴近期分别为 0.023，0.077，0.084，0.031。可知评价云与Ⅲ级标准云(较强)贴近期最大，因此判定为应急能力较强。

表 3 暴雨内涝应急能力评价云数字特征

目标层	Ex	En	he	准则层	权重	Ex	En	he	指标层	权重	Ex	En	he
A	58.05	3.08	2.04	A_1	0.163	73.94	3.49	2.26	A_{11}	0.153	77.63	3.13	1.73
									A_{12}	0.226	58.13	4.44	3.09
									A_{13}	0.100	74.00	2.51	1.51
									A_{14}	0.206	70.88	3.60	2.33
									A_{15}	0.151	66.50	3.13	2.23
									A_{16}	0.163	75.38	3.29	2.00
				A_2	0.228	64.80	2.60	1.66	A_{21}	0.105	65.00	4.18	2.88
									A_{22}	0.218	63.13	3.97	2.71
									A_{23}	0.211	66.75	4.60	3.39
									A_{24}	0.183	59.88	2.82	1.12
									A_{25}	0.136	66.25	4.28	2.85
									A_{26}	0.147	69.13	3.60	2.39
				A_3	0.359	49.25	2.84	1.86	A_{27}	0.135	71.88	3.19	2.14
									A_{31}	0.131	68.63	4.39	3.04
									A_{32}	0.157	72.75	4.60	2.79
									A_{33}	0.209	61.50	5.22	3.80
									A_{34}	0.248	57.25	5.01	3.47
									A_{35}	0.121	67.50	4.18	2.93
				A_4	0.250	54.15	3.61	2.49	A_{36}	0.110	68.88	3.55	2.60
									A_{41}	0.161	65.63	3.55	2.22
									A_{42}	0.189	72.50	4.80	3.37
									A_{43}	0.171	68.25	3.97	2.58
									A_{44}	0.180	59.88	3.55	2.31
									A_{45}	0.189	54.63	3.29	2.13

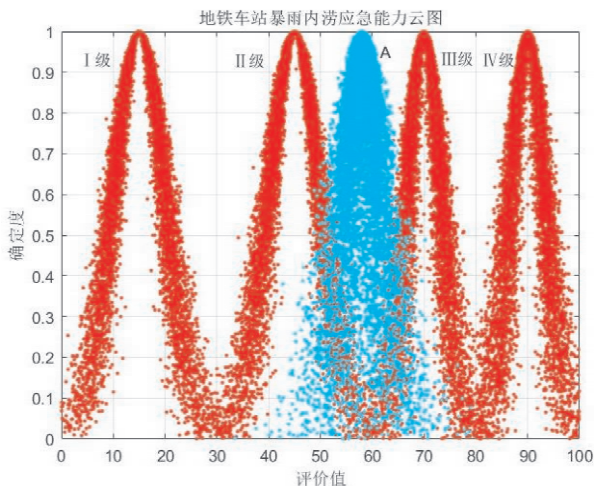


图4 暴雨内涝应急能力评价云图

运用障碍度模型探索地铁站暴雨内涝应急能力的障碍因素。将数据输入 SPSSAU 障碍度模块进行计算。结果发现主要障碍因素是应急预案启动执行、出入口台阶高度、应急供电设备、汛情信息发布、应急医疗能力、舆论引导、指挥调度能力和雨水监测报警系统。

虽然采取的措施一定程度上提升了暴雨内涝应急能力,但防汛仍不容乐观。采取的措施大多是从物理空间进行了加强。社会空间和信息空间仍有很多需要完善的地方。

基于三度空间视角,结合案例分析,提出地铁站暴雨内涝应急能力提升建议。

1)物理空间方面。推进海绵城市建设,提升城市抗涝韧性。改造地铁站周边道路、站前广场、绿地公园,减少地铁站周边暴雨内涝风险。

2)社会空间方面。进一步总结极端降雨天气应急抢险工作经验教训,完善应急预案体系,加强模拟演练。加强暴雨内涝应急宣传,提升民众认知和灾害应急时的社会公众参与度。加强应急管理队伍建设,建立专业的应急处置小组、专业消防救援队等,吸收地铁站志愿者,作为暴雨内涝灾害应急响应的重要补充力量。

3)信息空间方面,综合运用现代计算机网络技术进行危害分析与风险评估、形成智能辅助方案、进行应急决策与指挥。

4 结论

依据三度空间理论分析地铁站暴雨内涝应急能力,结合灾害应急的预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力过程属性,构建地铁站暴雨内涝应急能力分析框架。引入熵权云模型进行地铁站暴雨内涝应急能力评价分析。

1)地铁站暴雨内涝应急能力需要从预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力的全过程展开分析。

2)地铁站暴雨内涝应急能力需要从物理空间、社会空间、信息空间的三度空间视角展开全空间分析。

3)建立地铁站暴雨内涝应急能力评价熵权云模型,用云发生器算法求云数字特征,生成云滴及云图,并与标准云图对比结合贴近度来判定应急能力。

4)对金安桥地铁站综合评价结果为Ⅲ级即应急能力较强。在应急能力建设过程中不仅要注重物理空间的应急能力,还应该加强社会空间和信息空间方面的应急能力。

5)指标体系建立过程中虽然尽可能涵盖了地铁车站的物理空间、社会空间、信息空间以及应急能力的预防能力、准备能力、响应能力、恢复能力过程,但由于地铁车站暴雨内涝应急能力影响因素较为复杂,后续可以进一步细化指标体系,并深入分析各指标间的数量关系。

6)本文采用了熵权云模型对地铁站暴雨内涝应急能力进行评价分析,后续研究可以运用更多评价方法进行实证分析。

参考文献:

- [1] 姚蕊,杨群涛,张书亮. 城市暴雨内涝灾害脆弱性研究综述[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 93-100.
- [2] 杨可, 黄国忠, 张磊, 等. 基于 DEMATEL - AHDIT 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.
- [3] 王莉, 张诚刚, 霍颖楠. 基于 Bayes 网络的地铁水灾事件情景构建及演化分析[J]. 安全与环境工程, 2023, 30(1): 101-106.
- [4] 陈佳, 刘敬严, 邓曦. 基于 IOWA - VAC 的地铁站暴雨内涝脆弱性评价[J]. 水电能源科学, 2023, 41(4): 88-91, 60.
- [5] 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.
- [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.
- [7] 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.
- [8] 王军武, 田梦圆, 潘子瑶, 等. 地铁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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] WU H, WANG J W, LIU S, et al. Research on decision - making of emergency plan for waterlogging disaster in subway station project based on linguistic intuitionistic fuzzy set and TOPSIS[J]. Mathematical Biosciences and Engineering, 2020, 17(5): 4825-4851.
- [12] YU H Y, LIANG C, LI P, et al. Evaluation of waterlogging risk in an urban subway station[J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019(10): 1-12.
- [13] LYU H M, SHEN S L, ZHOU A A, et al. Data in flood risk assessment of metro systems in a subsiding environment using the interval FAHP - FCA approach[J]. Data Brief, 2019, 26: 104468.
- [14] 李会宁. 基于贝叶斯网络的地铁站应急疏散能力评价模型研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
- [15] 林立, 宋仲仲, 汤霖. 基于可拓学的地铁突发事件应急能力评价模型[J]. 现代城市轨道交通, 2020(6): 89-94.
- [16] 高宇航. 地铁站突发事件应急疏散能力评价方法及应用[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [17] 袁孝伟. 城市地铁应急能力评价指标体系研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
- [18] 方东平, 李在上, 李楠, 等. 城市韧性: 基于“三度空间下系统的系统”的思考[J]. 土木工程学报, 2017, 50(7): 1-7.
- [19] 方东平, 李全旺, 李楠, 等. 社区地震安全韧性评估系统及应用示范[J]. 工程力学, 2020, 37(10): 28-44.
- [20] 张家玉, 杨晓冬. 三度空间理念下城市韧性评价与提升策略研究[J]. 工程管理学报, 2021, 35(6): 55-60.
- [21] 唐少虎, 朱伟, 程光, 等. 暴雨内涝下城市轨道交通系统安全韧性评估[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(7): 143-150.
- [22] 何兰萍, 蔚芷吟. 基于三维空间的城市社区韧性治理: 以 W 市 D 社区的经验为例[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2023, 25(1): 15-22.

(下转第 201 页)

nally stabilizing". The comprehensive assessment of drought risk is "light risk"; The three subsystems of risk, exposure and drought resistance are the main reasons affecting the trend change of the comprehensive assessment results of drought risk in the study area. The evaluation indicators of cultivated land rate, reservoir transfer and storage rate, and agricultural population ratio are diagnosed as medium hindrance factors, which are the objects that needed to be regulated. The confidence probability interval increases the reliability information of the risk assessment results, which can reflect the actual drought risk situation under the combined effect of various uncertain factors, and fully reflects the information of "uncertainty" represented by the number of linkages.

Keywords: regional; drought risk; assessment and diagnosis; dynamic differentiation coefficient; triangular fuzzy number; stochastic simulation; Suzhou, Anhui

(上接第 176 页)

- [23] 王秉. 安全 4.0 时代的重大安全科学问题展望[J]. 灾害学, 2022, 37(2): 6-11.
- [24] 王秉, 史志勇, 朱菁菁, 等. 面向三元空间的安全态势感知路径[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 15-21.
- [25] 王秉, 史志勇, 徐方廷. 安全信息视域下的三元空间安全事件链防控[J]. 情报杂志, 2023, 42(6): 119-123, 169.
- [26] 刘纪坤, 王佳茹, 王翠霞. 改进组合赋权-云模型下的地铁站突发事件应急能力评价[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(5): 1398-1406.
- [27] 张渺. G1-EW 组合赋权云模型下地铁运营安全风险评价[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(6): 163-170.
- [28] 刘敬严, 赵莉琴, 田静. 城市轨道交通项目安全风险二维云模型评价[J]. 防灾科技学院学报, 2022, 24(3): 50-56.
- [29] 马天行, 林允, 周晓斌, 等. 煤层底板突水危险性预测的熵权-正态云模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(S1): 171-177.
- [30] 刘敬严, 陈佳, 田静, 等. 韧性理念下地铁火灾灾害风险二维云模型预警[J]. 灾害学, 2023, 38(3): 43-47, 74.
- [31] 程方明, 王琛琛, 袁晓芳. 安全发展视角下城市应急管理能力评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 158-167.
- [32] 张忠义, 庄越. 试论我国城市应急软能力提升路径: 基于 2016 年武汉洪涝灾害的理性思考[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(3): 119-123.

Evaluation of Rainstorm Water – logging Emergency Response Capability of Subway Station for Trio Spaces

LIU Jingyan^{1,2}, ZHENG Wenwen¹, CHEN Jia¹, ZHAO Liqin³

(1. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, China;
2. Hebei Technology Innovation Center for Multi-Hazard Resilience and Emergency Response of Engineering Structures, Sanhe 065201, China; 3. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, 050043, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the emergency response capacity of rainstorm water – logging of subway stations and reduce the accidents of rainstorm water – logging, the entropy weight cloud model is established to evaluate the emergency response capacity of rainstorm water – logging in subway stations based on the concept of three – dimensional space. Firstly, the analysis framework of the emergency response capability of subway stations for rainstorm water – logging is constructed. The analysis framework including the physical, social and information spaces and the emergency prevention, preparation, response and recovery capabilities. An evaluation index system for the emergency response capacity of rainstorm water – logging in subway stations is established by referring to the references related to subway water – logging disasters. The entropy weight cloud model for emergency evaluation of rainstorm water – logging in subway stations is established. The emergency response capability cloud digital characteristics, including standard cloud and assessment cloud, are calculated by using the cloud generator MATLAB. cloud droplets and cloud maps are generated. The determination of level needs to compare standard cloud and assessment cloud and combined with the pasting progress. Through the calculation of the obstacle degree model, the fire emergency response capability obstacle factor is found. Finally, a case analysis is carried out. It is found that the obstacles to subway emergency response capability are mainly in social space and information space. The corresponding improvement suggestions are put forward accordingly.

Keywords: subway station; disaster; emergency response capacity; rainstorm water – logging; trio spaces; cloud model