

王维莉, 薛雪. 人群聚集场所拥挤踩踏风险评估[J]. 灾害学, 2024, 39(1): 146–151, 157. [WANG Weili, XUE Xue. Risk Assessment of Stampede Accident in Crowd Gathering Place[J]. Journal of Catastrophology, 2024, 39(1): 146–151, 157. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.023.]

人群聚集场所拥挤踩踏风险评估^{*}

王维莉, 薛雪

(上海海事大学物流研究中心, 上海 201306)

摘要: 为更准确评估人群聚集场所的拥挤踩踏风险, 首先基于国内外踩踏事故影响因素的相关研究, 从“人、物、环、管”的因素出发, 选取拥挤踩踏事故的13个风险因子; 然后对2000—2022年全球范围内的200起踩踏事故进行概念编码, 统计各风险因子的频次; 最后利用因子分析的结果, 从“风险脆弱性、风险承受力、风险控制力”三个维度表征风险因素, 建立人群聚集场所的风险评估指标体系, 对风险因素及其风险水平进行量化评价。通过所建立的模型对“韩国梨泰院踩踏事故”风险等级评估发现, 该模型可用于计算人群聚集场所的风险水平并划分风险等级。以上海五角场环岛下沉式广场为例, 构建若干典型情境, 计算该场所拥挤踩踏风险等级, 并提出风险管控措施建议。

关键词: 拥挤踩踏; 事故统计; 风险因子; 风险评估; 因子分析

中图分类号: X45; X915.5; X913 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2024)01-0146-07

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2024.01.023

人群聚集场所往往人员密集、分布不均、流动性强、疏散困难^[1], 易引发拥挤踩踏等安全事故。例如: 2022年10月29日晚, 韩国首尔梨泰院站发生严重踩踏事故, 导致158人死亡, 196人受伤, 人群聚集场所的公共安全与风险管理成为社会关注的重点。因此对人群聚集场所的拥挤踩踏风险进行评估, 对于防范突发事件及其危害具有重要意义。

基于经典风险理论, 佟瑞鹏等^[2]用区域内滞留人数与总人数的比值表征踩踏事故风险概率, 用基于社会力模型求得的死亡人数表征事故严重程度, 同时考虑风险的触发因子, 得到了事故风险的定量表达式。为了全面考虑风险因素的影响, 刘晓芳等^[3]运用德尔菲法确定权重, 评估了城市街巷型公共空间人群聚集的安全风险, 并将其运用到厦门市中山路的聚集风险评估中; 叶瑞克等^[4]运用层析法确定权重实现了城市人群聚集区域的公共安全风险评估, 并以杭州西湖音乐喷泉广场为案例进行实证研究; 刘泽照等^[5]将模糊综合评价法应用于拥挤踩踏风险评估, 并对上海外滩踩踏事故开展实例应用; NIU等^[6]运用社会网络分析和历史事件统计分析确定了风险因素的权重。王起全等^[7]、刘艳等^[8]、焦志达等^[9]运用人工神经网络和数据包络分析法(DEA)实现了风险水平的计算; 王起全等^[10]、霍宇芒等^[11]采用赋权关联度算法和模糊物元法, 通过评价研究对象与对照样本的关联度来评估地下交通枢纽系统的踩踏风

险。此外, 学者们还运用个体受力微观模拟模型^[12]、Iterative Self-organizing Clustering Algorithm (ISODATA)算法^[13]、动态贝叶斯网络^[14]进行相关研究。以上研究在确定风险因素权重时较为主观, 且将各风险因素独立处理, 对风险因素间的相互作用关系关注较少。

鉴于此, 本研究搜集2000—2022年全球发生的200起踩踏事故数据, 构建拥挤踩踏事故数据集, 然后采用因子分析法提取踩踏风险共性因子, 从风险脆弱性、风险承受力和风险控制力^[4]三个维度构建拥挤踩踏风险评估指标体系, 采用梨泰院踩踏事故数据对该模型进行验证, 最后将此模型用于评估上海市五角场环岛下沉式广场的拥挤踩踏风险。

1 事故统计与风险因素分析

1.1 风险评估指标选取

事故致因的识别是风险评估的基础, 综合国内外踩踏致因研究^[15-24], 归纳拥挤踩踏风险因子如下。

人的因素, 主要包括人群密度、人群构成、人群心理特征、人群运动行为、异常人员及行为等。人群密度是单位面积的人员数量; 人群构成体现在人的年龄、性别、安全意识、行动能力等

^{*} 收稿日期: 2023-05-29 修回日期: 2023-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(71904116); 上海市科技创新行动计划项目(19DZ1209600, 18DZ1201500)

第一作者简介: 王维莉(1987-), 女, 汉族, 湖北武汉人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事公共安全与城市应急管理研究。

E-mail: wlwang@shmtu.edu.cn

方面;心理特征是指恐慌、异常兴奋等心理状态;运动行为包括人群的运动方向和速度;异常人员及行为则是指推搡、跌倒、骚乱等行为。

物的因素,一是引起火灾、爆炸、坍塌等事故的异常设备、设施;另外是场地状态,包括安全出口的状态(如宽度、个数)、疏散通道的状态(如阻碍、缺乏疏散标志)。

环境因素,主要包括自然环境因素和人工环境因素。自然环境因素主要为不良的气象条件、复杂的地理环境和地质灾害;人工环境包括楼梯、桥梁等踩踏事故的高发地以及不充足的照明条件。

管理因素,主要是指人群管控不善、信息沟通不畅、应急管理不当。包括对人流流量、人群秩序未提前进行干预;对谣言传播、突发情况未及时采取措施;聚集后的疏散工作不当以及在突发事件中未采取合理措施保障公共安全。

1.2 踩踏事故数据集构建

通过国内外主流媒体的报道,收集整理了2000—2022年全球共200起踩踏事件,并记录下列信息:日期、地区、聚集活动类型(体育、宗

教、娱乐等)、事故发展过程,并运用前文总结的风险因子,对拥挤踩踏事故触发和演化过程进行风险因素概念性编码^[6](表1)。将历史拥挤踩踏事故按照年份分组,整理分类的结果如表2所示。

2 基于因子分析的风险评估指标体系

因子分析是从变量群中提取共性因子的统计技术,可以在多变量中找出隐藏的具有代表性的因子,将相同本质的变量归入一个因子,从而减少变量的数目,体现变量间的关系。每一个变量都可以表示为公共因子的线性函数与特殊因子之和:

$$\begin{cases} X_1 = a_{11}F_1 + a_{12}F_2 + \cdots + a_{1m}F_m + \varepsilon_1 \\ X_2 = a_{21}F_1 + a_{22}F_2 + \cdots + a_{2m}F_m + \varepsilon_2 \\ \cdots \\ X_p = a_{p1}F_1 + a_{p2}F_2 + \cdots + a_{pm}F_m + \varepsilon_p \end{cases} \quad (1)$$

式中:可观测的 p 维随机变量为: $X = (X_1, X_2, \cdots, X_p)^T$; $F = (F_1, F_2, \cdots, F_m)^T$, ($m < p$)中的 F_1, F_2, \cdots, F_m 就是所需寻找的公共因子。

表1 踩踏事故影响因素的概念编码

事故	事故触发与演化过程	概念编码
2014 年上海“陈毅”广场跨年活动踩踏事件	大量市民在外滩聚集庆祝新年,造成36人死亡	人群密度
	上下人流不断对冲后在阶梯中间形成僵持	人群运动行为(对冲人流)
	人群突然增加的向下压力造成楼梯底部的行人不平衡	人工环境(楼梯)
	人流不平衡造成的行人坠落	异常人员及行为
	民警命令楼梯上的人群后退,但他们继续失去控制	应急管理不当
2022 年韩国梨泰院万圣节活动踩踏事故	恐慌导致人群摔倒和踩踏	人群心理特征(恐慌心理)
	近10万狂欢人群涌来这里庆祝即将到来的万圣节	人群密度
	人流密集程度超出预期	人群管控不善
	踩踏事故发生一条狭窄的小巷内,地面还凹凸不平	自然环境、疏散通道
	自上而下的人流遭遇下方地铁站出口横向穿行的人群	运动行为

表2 风险因素统计表

年份	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
2000	2	0	1	1	3	0	1	0	1	0	1	0	3
2001	10	1	4	5	9	3	0	1	1	4	6	1	4
2002	3	1	2	3	2	0	3	2	0	1	1	0	4
2003	3	3	2	2	3	0	2	1	0	3	1	0	4
2004	9	4	5	3	7	0	1	2	1	4	6	2	4
2005	6	5	3	7	10	3	3	2	4	7	5	4	5
2006	10	2	2	3	11	5	3	2	0	3	8	5	6
2007	5	1	2	3	5	0	2	0	0	3	3	0	3
2008	6	2	4	5	7	3	5	1	1	2	4	1	7
2009	6	4	3	4	8	0	3	1	3	3	4	2	4
2010	10	4	8	8	11	2	4	0	1	5	6	1	5
2011	6	0	2	5	7	4	1	3	0	0	2	1	5
2012	5	1	3	4	4	3	1	0	0	2	3	0	4
2013	6	4	2	2	5	4	5	0	0	4	3	2	4
2014	9	1	3	5	11	5	1	3	0	1	8	2	6
2015	6	4	6	5	5	2	1	0	0	1	3	2	5
2016	2	0	0	2	2	1	0	0	0	1	0	1	2
2017	7	3	1	5	8	1	0	0	1	2	6	1	4
2018	3	1	1	1	3	1	0	0	0	0	2	0	1
2019	3	1	0	2	1	2	1	0	0	0	2	0	2
2020	3	2	2	2	3	1	0	0	0	1	3	0	3
2021	3	1	0	1	2	1	1	0	0	0	3	0	2
2022	8	2	1	3	10	2	1	0	0	0	7	0	5

注:(1)人群密度;(2)人群构成;(3)人群心理特征;(4)人群运动行为;(5)异常人员及行为;(6)安全出口状态;(7)设备或物品异常;(8)疏散通道及标识;(9)自然环境;(10)人工环境;(11)人群管控不善;(12)信息沟通不畅;(13)应急管理不当;表中数字表示各因素造成事故的频次(事故由多项因素引起)。

2.1 KMO 和球形 Bartlett 检验

首先采用 KMO 和球形 Bartlett 进行因子分析适用性检验, 其中 KMO (Kaiser - Meyer - Olkin) 统计量是用于比较变量间简单相关系数和偏相关系数的指标, 取值在 0 ~ 1 之间, Bartlett 球状检验用于检验相关矩阵中各变量间的相关性^[25]。KMO 统计量越接近于 1, 变量间的相关性越强, 越适合进行因子分析。由表 3 所示, 本文数据的 KMO 检验已达 0.767, Bartlett 球形检验在 0.1% 的水平上显著, 因此可以进行因子分析。

表 3 KMO 和 Bartlett 检验

KMO 取样适切性量数		0.767
近似卡方		218.927
巴特利特球形度检验	自由度	78
	显著性	0.000

2.2 风险评估指标体系的构建

1) 公因子提取。由适用性检验的结果可知, 影响拥挤踩踏事故的多个因素间存在一定的相关性。接下来利用主成分分析法计算各因子的特征值和贡献率, 根据特征值大于 1 的原则提取因子, 将其设为 (F_1 , F_2 , F_3) 作为拥挤踩踏事故风险评估的一级指标, 其累计方差贡献率已达 73.56%, 即提取的公因子能反映各原始变量 73.56% 的信息 (表 4), 碎石图如图 1 所示。

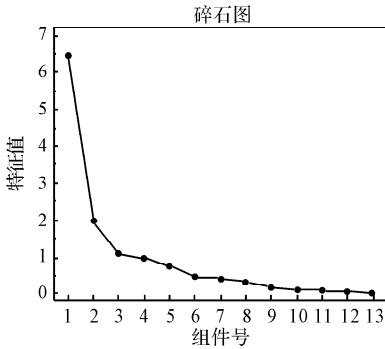


图 1 碎石图

公因子权重主要依据其方差贡献率确定:

$$A_i = \frac{a_i}{a_1 + a_2 + \cdots + a_n} \quad (2)$$

式中: n 为提取的公因子个数, a_i 表示各个公因子所解释的方差百分比; A_i 表示各公因子的权重, 依据表 4 的结算结果得到各一级指标的权重如表 5 所示。

2) 公因子命名。即根据变量的相关性大小对变量进行分组, 使同组内变量间的相关性较高, 不同组变量的相关性较低, 而代表每组数据基本结构的新变量称为公共因子, 旋转成分矩阵可以反映各变量在公共因子上的载荷值。从旋转分析结果 (表 6) 看, 第一个主成分的相关指标包括人群密度、人群管控不善、异常人员及行为、人群心理

表 4 总方差解释

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比	累积 / %	总计	方差百分比	累积 / %	总计	方差百分比	累积 / %
1	6.482	49.863	49.863	6.482	49.863	49.863	3.822	29.397	29.397
2	1.976	15.201	65.065	1.976	15.201	65.065	3.175	24.426	53.823
3	1.104	8.490	73.555	1.104	8.490	73.555	2.565	19.732	73.555
4	0.982	7.553	81.108	—	—	—	—	—	—
5	0.764	5.877	86.985	—	—	—	—	—	—
6	0.468	3.600	90.585	—	—	—	—	—	—
7	0.437	3.365	93.950	—	—	—	—	—	—
8	0.316	2.431	96.380	—	—	—	—	—	—
9	0.170	1.309	97.690	—	—	—	—	—	—
10	0.125	0.960	98.650	—	—	—	—	—	—
11	0.091	0.700	99.350	—	—	—	—	—	—
12	0.052	0.397	99.748	—	—	—	—	—	—
13	0.033	0.252	100.000	—	—	—	—	—	—

表 5 人群聚集场所拥挤踩踏风险评估指标体系

公因子及权重		f_{ij}	b_{ij}	B_{ij}	W_{ij}
F_1 风险脆弱性 (0.678)	人群密度		0.327	0.246	0.167
	人群管控不善		0.326	0.245	0.166
	异常人员及行为		0.235	0.177	0.120
	人群心理特征		0.191	0.144	0.098
	人群运动行为		0.249	0.188	0.127
F_2 风险承受力 (0.207)	人工环境		0.286	0.266	0.055
	人群构成		0.289	0.243	0.050
	自然环境		0.313	0.266	0.055
	设备或物品异常		0.287	0.244	0.051
F_3 风险控制力 (0.115)	疏散通道及标识		0.44	0.333	0.038
	安全出口状态		0.359	0.272	0.031
	信息沟通不畅		0.299	0.227	0.026
	应急管理不当		0.222	0.168	0.019

特征和人群运动行为, 此类因素是引起踩踏事故的直接因素, 将其归纳为风险脆弱性, 风险脆弱性是系统自身存在的易受伤害和损失的因素, 在灾害来临时表现出的敏感性; 第二个主成分是由人工环境、人群构成、自然环境和设备或物品异常四个指标构成的, 这类因素影响踩踏事故后果的严重程度, 将其归纳为风险承受力, 关系到系统对风险的抵抗和承受能力; 最后一个主成分包含疏散通道及标识、安全出口状态、信息沟通、应急管理, 将其归纳为风险控制力, 风险控制力是指主观避免或减少风险发生可能性及潜在损失的能力。

表6 旋转后成分矩阵

	成分		
	1	2	3
人群密度	0.894		
人群管控不善	0.848		
异常人员及行为	0.812		
人群心理特征	0.675		
人群运动行为	0.648		
人工环境		0.815	
人群构成		0.813	
自然环境		0.775	
设备或物品异常		0.652	
疏散通道及标识			0.772
安全出口状态			0.755
信息沟通不畅			0.638
应急管理不当			0.624

提取方法: 主成分分析法。

旋转方法: 凯撒正态化最大方差法。

旋转在 8 次迭代后已收敛。

3) 二级指标权重计算。在各公因子的指标及其权重确定后, 借助因子分析的得分系列矩阵得到公因子的线性组合, 用汤普森(Thomson)回归法对二级指标的权重进行计算^[25]。

表8 风险指标与判别标准

风险指标	事故致因	判别标准	判别值
人群密度	密度过大	$\rho \geq 2.13 \text{ 人/m}^2$	100
		$0.71 \leq \rho \leq 2.13 \text{ 人/m}^2$	$(\rho - 0.71)/1.42 \times 100$
		$\rho \leq 0.71 \text{ 人/m}^2$	0
异常人员及行为	争抢、骚乱、跌倒等行为	有异常人员及行为	100
		无异常人员及行为	0
运动行为	速度差异、对冲人流	速度差异 $\Delta v \geq 0.5 \text{ m/s}$ 且有对冲人流	100
		速度差异 $\Delta v \geq 0.5 \text{ m/s}$ 或有对冲人流	50
		速度差异 $\Delta v < 0.5 \text{ m/s}$ 且无对冲人流	0
心理特征	恐慌、兴奋	人群有异常情绪	100
		人群心理较为稳定	0
人群管理	无限流措施、秩序管理混乱	人群管理无效	100
		人群管理有效	0
人群构成	有行动能力弱、安全意识不足的弱势群体	人群中存在比例 $p \geq 5\%$	100
		人群中存在比例 $0 < p \leq 5\%$	0
人工环境	存在高危地形、照明条件不足	影响人群流动	100
		未对人群流动产生影响	0
自然环境	恶劣的气候条件、地质灾害等	自然环境糟糕	100
		自然环境良好	0
设施设备	设施设备被破坏、引起火灾爆炸事故	设施设备异常	100
		设施设备状态良好	0
安全出口状态	数量不足、关闭状态	出口不足或未开启	100
		出口充足且正常使用	0
疏散通道及标识	疏散通道被占、无安全指示标识	不符合标准	100
		符合标准	0
信息沟通	无电子屏幕宣传广播、无法及时向人群传递疏散消息	信息传递受影响	100
		信息沟通通畅	0
应急管理	未采取应急措施、应急措施不当	无应急预案、工作方案不健全	100
		有完善管理方案与应急预案	0

表7 因子得分系数矩阵

	成分		
	1	2	3
人群密度	0.327	-0.119	-0.071
人群管控不善	0.326	-0.149	-0.065
异常人员及行为	0.235	-0.058	0.011
人群心理特征	0.191	0.055	-0.082
人群运动行为	0.249	0.080	-0.234
人工环境	-0.025	0.286	-0.049
人群构成	0.027	0.289	-0.157
自然环境	-0.111	0.313	-0.017
设备或物品异常	-0.277	0.287	0.253
疏散通道及标识	-0.182	-0.008	0.440
安全出口状态	-0.010	-0.150	0.359
信息沟通不畅	-0.134	0.130	0.299
应急管理不当	0.030	-0.002	0.222

提取方法: 主成分分析法。

旋转方法: 凯撒正态化最大方差法。

旋转在 8 次迭代后已收敛。

表7所示是各因子得分系列矩阵, 可得到各公因子的回归方程:

$$F_1 = 0.327f_{11} + 0.326f_{12} + 0.235f_{13} + 0.191f_{14} + 0.249f_{15}; \quad (3)$$

$$F_2 = 0.289f_{21} + 0.313f_{22} + 0.287f_{23} + 0.286f_{24}; \quad (4)$$

$$F_3 = 0.359f_{31} + 0.440f_{32} + 0.299f_{33} + 0.222f_{34}。 \quad (5)$$

对数据进行归一化处理:

$$B_{ij} = \frac{b_{ij}}{\sum_{j=1}^n b_{ij}}, (i = 1, 2, 3; n = 5, 4, 4)。 \quad (6)$$

继而得到二级指标的权重:

$$W_{ij} = A_i \times B_{ij}。 \quad (7)$$

由此所搭建的城市人群聚集场所拥挤踩踏风险评估指标体系如表5所示。

3 风险评估模型与验证

3.1 风险评估模型

结合各指标权重,利用以下公式确定人群聚集场所的拥挤踩踏风险指数:

$$I = \sum_{i=1}^n W_i Y_i \quad (8)$$

式中: I 是人群聚集区域的拥挤踩踏风险指数, W_i 是风险因素 i 的权重, Y_i 是风险因素 i 的判别值。风险指标的判别值如表 8 所示。

为确定人员密集场所拥挤踩踏风险级别,需要建立相应的评判规则。参考文献[26]的风险指数值对应关系表,事故发生的最小割集权重之和的均值为 15,本研究中建立的人员密集场所拥挤风险评判规则如表 9 所示。

表 9 人群聚集场所风险级别和风险指数值的对应关系

危险级别	风险程度	判别标准
一级	异常严重,需立即疏散人群	$I \geq 75$
二级	非常严重,需加强警戒并严格控制	$50 \leq I < 75$
三级	比较严重,需严密监控	$25 \leq I < 50$
四级	正常预防	$15 \leq I < 25$

3.2 模型可行性验证

2022 年 10 月 29 日,正值万圣节活动,因很多市民自发聚集在梨泰院洞庆祝节日。梨泰院洞中心汉密尔顿酒店旁一条狭窄的小巷内挤满了人(大约 18 m² 的空间容纳了 300 多人),自上而下的人流遭遇下方地铁站出口横向穿行的人群时,行进速度更加缓慢,人们互相推搡又因地势狭窄有坡度且凹凸不平,导致斜坡上的人群如多米诺骨牌般倒下,人群压力使下层人们无法动弹,最终酿成惨剧,造成 158 人死亡、196 人受伤。

根据新闻报道可知,当时现场人员密度极大、人群异常兴奋、形成了明显的对冲人流和速度差异、人群互相推搡、管理部门事先对聚集人数缺乏预估以及管理措施,同时地势复杂、疏散通道狭窄,街边震耳欲聋的音乐也导致信息沟通不畅通。运用本研究所提出的模型计算人群拥挤踩踏风险值以确定风险级别(表 10),结果显示梨泰院聚集活动中的拥挤踩踏风险水平高达 81.6 分,危险级别为一级。因此,该模型可用于计算人群聚集场所拥挤踩踏风险水平并划分风险级别,模型结果可以明确显示该场所的风险程度以及应加强管控的风险指标,对事前预防人群聚集场所拥挤踩踏事故,提高风险管理水平具有实际参考意义。

表 10 梨泰院拥挤踩踏风险事故风险评分表

分类	风险指标	权重	赋值
风险脆弱性	人群密度	0.167	100
	异常人员及行为	0.120	100
	运动行为	0.127	100
	心理特征	0.098	100
	人群管理	0.166	100
风险承受力	人群构成	0.050	0
	人工环境	0.055	100
	自然环境	0.055	0
	设施设备	0.051	0
	安全出口状态	0.031	0
风险控制力	疏散通道及标识	0.038	100
	信息沟通	0.026	100
	应急管理	0.019	100
拥挤踩踏风险值 $RI = 81.60$		一级	

3.3 案例分析

上海市杨浦区五角场环岛下沉式广场集交通、商业、办公及娱乐等于一体,以五条地下通道与万达广场、百联又一城、东方商厦(现为迈悦生活广场)、苏宁易购和合生汇五大商场相连,同时连通地面出入口与周边道路,相当于一座“下沉式天桥”,承担市民的交通通行和分流功能,是上海市副中心五角场地区步行系统的重要枢纽。据历史人流量数据统计,在五角场环岛区域,工作日约 15 万人次,周末约 20 万人次,节假日约 25 ~ 30 万人次,重大节日人流量可突破 60 万人次,高峰小时人流量更是突破 56 250 人次。

1) 工作日常态客流情景。假设平时的工作日,以 15 万人次计算。平峰时间,人群平均密度小于 0.71 人/m²,人群心理较为稳定,运动的对冲和交叉较少。目前,五角场下沉式广场的管理方案和应急预案较为完备,安保人员基本充足,有定期的人员培训以及开展应急演练,电子大屏、宣传广播等信息传递渠道良好。假设常规天气条件下,没有设备故障情况下,运用本研究所提模型计算五角场下沉式广场人群拥挤踩踏风险值以确定风险级别,结果如表 11 所示。

表 11 五角场下沉式广场拥挤踩踏风险评分表

分类	风险指标	权重	赋值
风险脆弱性	人群密度	0.167	0
	异常人员及行为	0.120	0
	运动行为	0.127	50
	心理特征	0.098	0
	人群管理	0.166	0
风险承受力	人群构成	0.050	100
	人工环境	0.055	100
	自然环境	0.055	0
	设施设备	0.051	0
	安全出口状态	0.031	0
风险控制力	疏散通道及标识	0.038	0
	信息沟通	0.026	0
	应急管理	0.019	0
拥挤踩踏风险值 $RI = 16.850$		四级	

2) 下雨天的节假日客流场景。假设节假日,以 30 万人次计算,地下通道、环廊等处人群平均密度为 2 人/m²,人群心理较为稳定,人群存在一定的对向流和交叉流。该场景运用本研究所提模型计算五角场下沉式广场人群拥挤踩踏风险值为 $RI = 32.067$,其风险等级为三级。

3) 有展出活动的特殊节假日客流场景。假设在国庆“黄金周”等特殊节假日,适逢五角场下沉式广场有展出活动,客流以 60 万人次计算,地下通道、环廊等处人群密度超过 2.17 人/m²,人流会存在较强的对冲和交叉,假设不存在异常行为及人员,人群心理较为稳定。如果没有调配额外警力和安保人员,特殊节假日现场的安保力量会不足,且如果对人员缺乏特殊节假日客流应对处置的培训教育,现场应对经验会显不足。该场景运用本研究所提模型计算五角场下沉式广场人群拥挤踩踏风险值为 $RI = 58.52$,其风险等级上升为二级。

3.4 人群聚集场所风险管控措施

首先在人群聚集场所的日常管理中要注意检查出入口以及照明、广播等电子屏等设施设备的状态,排除楼梯桥梁等高危节点处的安全隐患,从而提高场所的风险承受力。

其次要尤其关注安全出口和疏散通道的状态,并辅之以清晰、醒目的指示标志。尤其在恶劣天气、有路演等特殊活动、特殊节假日前,应配备由LED灯或反光材料组成的安全标识,及时清理道路阻塞物、清理积水等,防止楼梯、坡道等湿滑造成的事故。在聚集活动前应该进行安全演练,制定应急预案,提高对风险的控制力。

最后人群聚集场所的现场管理是降低踩踏风险的关键,要合理设定人流容量,及时关注场所内滞留人员数量,管控人群秩序。当场所内人群密度过高时,可采取限流措施,控制进出人员数量,或采取单向流动等人群管控方式,尽量避免高密度人流的对冲和交叉。并通过视频监控关注人群的运动行为和心理特征,监测识别异常行为,有突发事件时紧急疏散人群。从根源上降低场所的风险脆弱性,降低场所的拥挤踩踏风险。

4 结论

1)综合对比国内外踩踏因素的研究,以“人物环管”为分析框架归纳出人群密度、人群构成、人群运动行为、人群心理特征、异常人员及行为、安全出口状态、设施设备异常、疏散通道及标识、人工环境、自然环境、人群管控不善、信息沟通不畅、应急管理不当13个风险因素,收集了2000—2022年的200起踩踏事件,对其引发和发展过程进行概念编码,统计其聚集人数和伤亡人数从而构建历史踩踏事故数据集。

2)采用因子分析法进行量化研究,由因子分析的结果搭建起“风险脆弱性—风险承受力—风险控制力”的分析框架,风险脆弱性包含的二级指标是引起踩踏事故的直接因素,权重最高;风险承受力的相关因素影响踩踏事故后果的严重程度;风险控制力的相关因素不会直接引起踩踏事故,但能避免或减少潜在损失。

3)借助因子分析的得分系列矩阵用Thomson回归法计算二级指标权重,建立人群聚集场所的风险评估指标体系,引入风险指标的判别标准,计算其拥挤踩踏风险指数。通过对“韩国梨泰院”踩踏事故的个案评估对模型进行验证,将其运用到五角场环岛下沉式广场的拥挤踩踏风险分析。最后对人群聚集场所的日常管理和现场管理提出若干措施建议。

4)本研究提出的风险评估模型在一定程度上解构了诱发踩踏风险的诸多因素,能为人群聚集场所的日常管理和应急管控提供决策参考。诚然,本研究仍然存在不足之处,比如风险因素的细化仍有提升空间,风险因素判别值的取值办法仍值得研究,如此将会获得更为科学和更具说服力的研究结论。

参考文献:

- [1] 胡成,李俊伟,李强,等.考虑人群聚集时空分布的安全容量计算方法:以北京什刹海景区为例[J].中国安全科学学报,2021,31(6):136-143.
- [2] 佟瑞鹏,李春旭,郑毛景,等.拥挤踩踏事故风险定量评价模型及其优化分析[J].中国安全科学学报,2013,23(12):90-94.
- [3] 刘晓芳,吝涛,郑千惠,等.城市街巷型公共空间人群聚集安全风险量化评估[J].中国安全科学学报,2016,26(12):134-139.
- [4] 叶瑞克,陈佳巍,倪维铭,等.城市人群聚集区域公共安全风险评估[J].城市问题,2020(6):97-103.
- [5] 刘泽熙,杨帆,黄杰.大型公共活动踩踏事故模糊风险评估应用研究:以上海“12·31”踩踏事件为例[J].南京航空航天大学学报(社会科学版),2015,17(2):33-38.
- [6] NIU L, GUAN H. The Mechanism of Crowd Stampede Based on Case Statistics through SNA Method [J]. Tehni? ki vjesnik, 2021, 28(2): 548-555.
- [7] 王起全,郑乐.大型活动拥挤踩踏事故BP神经网络安全评估方法应用分析[J].中国安全科学学报,2009,19(4):127-133.
- [8] 刘艳,汪彤,丁辉,等.地铁站拥挤踩踏事故风险评价DEA模型研究[J].中国安全科学学报,2013,23(10):100-104.
- [9] 角志达,宋瑞,刘星材.城市轨道交通车站拥挤踩踏事故风险评估[J].交通信息与安全,2015,33(2):86-91.
- [10] 王起全.基于赋权关联度算法的地铁拥挤踩踏事故风险研究[J].中国安全科学学报,2013,23(5):94-100.
- [11] 霍宇芒,宋守信,顾一波.基于组合权重的地铁站拥挤踩踏事故风险评估[J].安全与环境工程,2016,23(5):139-143,169.
- [12] 张青松,刘金兰,赵国敏.人群拥挤踩踏事故后果微观建模及模拟分析[J].安全与环境学报,2008,8(4):164-168.
- [13] LU Y, QIU L, LYU X, et al. Human stampede causative factors and cluster risk: A multi-dimensional analysis based on ISODATA and Fuzzy Theory[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021, 66: 102581.
- [14] HU X, ZHAO H, BAI Y, et al. Risk analysis of stampede in sporting venues based on catastrophe theory and Bayesian network [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2022, 78: 103111.
- [15] HELBING D, MUKERJI P. Crowd disasters as systemic failures: analysis of the Love Parade disaster [J]. EPJ Data Science, 2012, 1(1): 1-40.
- [16] 白锐,梁力达,田宏.人群聚集场所拥挤踩踏事故原因分析与对策[J].工业安全与环保,2009,35(2):47-49.
- [17] ILLIYAS F T, MANI S K, PRADEEPKUMAR A P, et al. Human stampedes during religious festivals: A comparative review of mass gathering emergencies in India[J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2013, 5: 10-18.
- [18] 周晓冰,张永领.大型社会活动拥挤踩踏事故机理分析及应对策略研究[J].灾害学,2015,30(4):156-162,172.
- [19] YASSER A, ALDAWAS A D, ALIJERIAN N A, et al. The impact of crowd control measures on the occurrence of stampedes during Mass Gatherings: the Hajj experience [J]. Travel medicine and infectious disease, 2017, 15: 67-70.
- [20] QANTA A, MEMISH Z A. From the “Madding Crowd” to mass gatherings - religion, sport, culture and public health [J]. Travel medicine and infectious disease, 2019, 28: 91-97.
- [21] ZHANG Y, ZHOU X. The occurrence laws of campus stampede accidents in China and its prevention and control measures [J]. Natural hazards, 2017, 87(2): 659-673.
- [22] 尹晓庆,叶厚元.大型活动拥挤踩踏事件的事故树分析及其防控措施[J].安全与环境工程,2017,24(2):126-131.
- [23] 李华,李琳倩,益朋.景区密集人群踩踏事故情景分析[J].中国安全科学学报,2020,30(4):108-113.
- [24] HSIEH Y H, NGAI K M, BURKLE F M Jr, et al. Epidemiological characteristics of human stampedes [J]. Disaster Medicine and Public Health Preparedness, 2009, 3(4): 217-223.
- [25] 薛伟,蔡超.基于多层次因子分析法的我国高质量发展综合评价[J].统计与决策,2022,38(18):22-25.
- [26] 孙贵磊,颜峻,孟燕华,等.人员密集场所拥挤踩踏事故风险分级模型及预防对策[J].安全,2020,41(5):26-33.

(下转第157页)

- [25] 牛丽云. 公共卫生地方应急法制体系及其完善研究: 以青海省新冠肺炎疫情防控实践为例[J]. 青海社会科学, 2022(6): 71–83.
- [26] 朱芸, 陆杰华. 中国特色公共卫生应急联动体系的支撑条件与实践路径[J]. 上海行政学院学报, 2021, 22(2): 4–14.
- [27] 刘蕾, 赵雅琼. 城市安全应急联动合作网络: 网络结构与主体角色: 以寿光洪灾事件为例[J]. 城市发展研究, 2020, 27(3): 91–99.
- [28] 南通市应急管理局. 南通市自然灾害灾情会商制度(试行)[Z]. 南通: 南通市应急管理局, 2021–02–23.
- [29] GRECKHAMER T, FURNARI S, FISS P C, et al. Studying configurations with qualitative comparative analysis: best practices in strategy and organization research [J]. *Strategic Organization*, 2018, 16(4): 482–495.

Research on the Efficiency Improvement Path of Meteorological Disaster Emergency Linkage Mechanism from the Perspective of Configuration

GU Xiang¹, ZHOU Ling^{2,3,4}

(1. *Emergency Management College, Research Institute of Climatic and Environmental Governance, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*; 2. *School of Law and Public Affairs, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing City Jiangsu Province, Nanjing 210044, China*; 3. *Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*; 4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: Meteorological disaster management often involves multi-department emergency response, and the current governance environment is complex and changeable, so how to improve the efficiency of meteorological disaster emergency response mechanism has become an urgent key issue. Based on the qualitative research on the efficiency improvement of meteorological disaster emergency response mechanism, we use fuzzy set qualitative comparative analysis to analyze the configuration of 21 cases from 2008 to 2022 in China. The results show that: ① the single condition does not constitute the necessary condition for improving the efficiency of meteorological disaster emergency response mechanism; ② The efficiency improvement path of high-level meteorological disaster emergency response mechanism can be summarized into three types: “legal-resource-driven dual”, “legal-subject-driven comprehensive” and “legal-resource-driven comprehensive”; ③ Under specific objective endowment conditions, the conditional configuration composed of information sharing and subject coordination can improve the efficiency of the meteorological disaster emergency linkage mechanism through equivalent substitution with the conditional configuration composed of event impact and subject coordination.

Keywords: meteorological disaster; emergency linkage; qualitative comparison analysis of fuzzy sets; Configuration perspective

(上接第 151 页)

Risk Assessment of Stampede Accident in Crowd Gathering Place

WANG Weili, XUE Xue

(*Logistics Research Center, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China*)

Abstract: In order to prevent more accurately the occurrence of stampede accidents, 13 risk factors of stampede accidents are selected firstly, based on the relevant research on the influencing factors of stampede accidents at home and abroad. Then, through the conceptual coding of 200 stampede accidents worldwide from 2000 to 2022, the frequencies of various risk factors are counted. Lastly, risk levels are quantitatively evaluated by the factor analysis method. The risk factors can be characterized by three dimensions: risk vulnerability, risk tolerance and risk controlment. It is found that the model can be used to calculate and classify the risk level of crowded places through the validation of the Itaewon Stampede in South Korea. Taking Shanghai Wujiaochang square as an example, we construct several typical situations, calculate the risk level of crowding and stampede, and put forward suggestions on risk controlment. This model can provide important references for daily management and prevention of crowding and stampede accidents in crowded places.

Keywords: crowding and trampling; statistical analysis of accidents; risk factors; risk assessment; factor analysis