

中文引用格式:赵鹏霞,李铁,佟瑞鹏,等. 社区火灾风险因素耦合机制分析与防控策略研究[J]. 中国安全科学学报,2025,35(8): 205-212.

英文引用格式:ZHAO Pengxia, LI Tie, TONG Ruipeng, et al. Analysis of coupling mechanisms and prevention strategies for community fire risk factors [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(8): 205-212.

社区火灾风险因素耦合机制分析与防控策略研究*

赵鹏霞^{1,2} 副研究员, 李铁^{**1} 教授, 佟瑞鹏³ 教授, 代宝乾² 研究员

(1 北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083; 2 北京市科学技术研究院城市安全与环境科学研究所, 北京 100054; 3 中国矿业大学(北京) 应急管理与安全工程学院, 北京 100083)

中图分类号: X956

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.08.0376

资助项目: 北京市科技新星计划资助(20230484402)。

【摘要】 为建立有效且契合社区风险特征的火灾防控体系,以105起社区火灾案例为样本,将风险因素归纳为人的不安全行为、物的不安全状态和不良环境条件及管理缺陷,构建社会网络分析(SNA)/N-K模型,通过计算风险耦合值与网络中心性指标,以耦合值修正亲近中心性的出度值,识别关键风险因素。研究结果表明:管理缺陷风险因素是驱动风险耦合的主导维度;耦合因素数量增多会显著影响社区火灾风险水平;排名前3的关键风险因素依次为:未按要求开展社区火灾隐患排查,居民安全意识、知识与素养薄弱,没有定期向居民普及消防知识。基于此提出的“3维4阶”社区火灾防控模型,可从制度优化、技术赋能与行为干预3个维度,构建涵盖预防、预警、处置、恢复全周期的社区火灾风险耦合断链策略。

【关键词】 社区火灾; 风险因素; 社会网络分析/N-K(SNA/N-K)模型; 风险耦合; 火灾防控

Analysis of coupling mechanisms and prevention strategies for community fire risk factors

ZHAO Pengxia^{1,2}, LI Tie¹, TONG Ruipeng³, DAI Baoqian²

(1 School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Institute of Urban Safety and Environmental Science, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100054, China; 3 School of Emergency Management and Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Community fires exhibit high incidence rates and interconnected risk factors. To establish an effective fire prevention and control system aligned with community risk profiles, a hybrid SNA/N-K model was constructed to calculate risk coupling values and network centrality metrics. By adjusting the out-degree values of closeness centrality using coupling values, critical risk factors were identified, providing evidence-based decision-making insights for community fire prevention. Key findings reveal that management deficiencies dominate risk coupling dynamics. An increase coupling factors significantly

* 文章编号:1003-3033(2025)08-0205-08; 收稿日期:2025-04-12; 修稿日期:2025-06-15

** 通信作者:李铁(1961—),男,天津人,博士,教授,主要从事安全科学与工程方面的研究。E-mail: 836123967@qq.com。

elevates community fire risk levels. The top three critical risk factors are failure to investigate fire hazards as required, inadequate safety awareness and knowledge of residents and absence of regular fire safety education. Based on this research, a "three-dimensional four-stage" community fire safety management model is proposed. From the dimensions of institutional optimization, technological empowerment and behavioral intervention, a comprehensive strategy is formulated to decouple and interrupt risk coupling chains in community fire prevention and control, encompassing the full cycle of prevention, early warning, response, and recovery. This study contributes a theoretical framework and empirical intervention pathways for community fire risk mitigation, offering actionable guidance for policymakers and practitioners.

Keywords: community fire; risk factors; social network analysis/N-K (SNA/N-K) model; coupling; fire prevention and control

0 引言

随着城市化进程加快,城市社区人口密度激增与聚集效应凸显,加之电气线路老化、用火不慎等风险因素叠加,导致社区火灾事故呈高发态势。我国应急管理部消防救援局数据显示,2023 年上半年,住宅火灾接报 16.7 万起,死亡 682 人,占火灾死亡人数的 69%^[1]。因此,有必要构建契合社区风险特征的有效火灾防控体系。

国外学者对社区火灾风险研究主要聚焦于社区与野火的交互作用,涵盖综合性城市火灾蔓延模型的开发^[2]、社区参与森林火灾管理实践路径的探讨^[3]和可持续火灾治理协作范式的探索^[4]等方面。CVETKOVIĆ 等^[5]验证了塞尔维亚人口统计学因素对消防安全认知的影响,SHOKOUI 等^[6]揭示伊朗社区火灾风险的社会经济驱动因子,MAEZUMI 等^[7]揭示了社区火灾的传播机制。协调机制、宣教体系与战略规划对提升疏散效率至关重要^[8],个人应急准备程度、信息传播效能及社区参与水平是强化社区火灾韧性的核心要素^[9]。国内学者也开展了建筑受林火威胁方面的研究^[10],但主要集中于火灾的控制策略^[11]和疏散模拟^[12]。武乾等^[13]从开发商-物业-社区-监管单位的角度分析高层火灾风险因素。现有研究成果已取得显著进展,但多采用事故链分析等单维研究范式,未能揭示多重致灾因子间的复杂交互效应。学者们尝试用解释结构模型、耦合度模型、贝叶斯网络及决策实验室分析法 (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL) 等模型进行风险耦合^[14-15]研究。然而,解释结构模型的主观性较强,且面临序参量阈值标定的技术瓶颈;贝叶斯网络对数据完备性要求较高;DEMATEL 难以精准量化非线性关联。现有方法中,N-K 模型在分析多要素交互的风险耦合强度量

化方面表现优异^[16],但识别关键管控要素存在局限性。社会网络分析 (Social Network Analysis, SNA) 模型可通过可视化风险因子关联网络识别关键节点,有效弥补 N-K 模型的不足,但未能有效量化各因素的耦合累积效应,制约了在复杂系统中的适用性^[17]。2 个模型在风险分析的可解释性和致险性间具有互补的优点^[13],融合后的 SNA/N-K 模型可以应对模型所带来的偏差。

基于此,笔者拟建立社区火灾关键风险耦合 SNA/N-K 模型,通过计算风险耦合值、亲近中心度和中介中心度,确定社区火灾关键风险因素,有针对性地实施火灾防控措施。

1 社区火灾风险因素与耦合机制分析

1.1 社区火灾风险因素

系统梳理 2011—2023 年我国 (不含港、澳、台地区) 应急管理部、各省 (直辖市) 应急管理厅 (局) 官方网站公布的社区火灾事故信息^[18-20]和学术数据库^[21-23]获取的事故信息,对数据缺失部分辅以现场调查和专家咨询;评估数据完整性,排除关键参数缺失或证据矛盾的案例;比对各渠道信息,确保一致性,最终收集 105 起社区火灾案例。表 1 为分析 105 起案例得到的 2 级^[24-25]社区火灾风险因素。

表 1 社区火灾风险因素

Table 1 Risk factors of community fire accidents		
一级风险因素	二级风险因素	编号
人为因素: 不安全行为	居民安全意识、知识与素养薄弱	R_1
	居民缺乏灭火救援能力、逃生疏散能力	R_2
	居民生活用火不慎	R_3
	居民电气安装或使用不当	R_4
	儿童玩火	R_5

续表 1

一级风险因素	二级风险因素	编号
物理因素: 不安全状态	可燃物堆积过量,易燃物充足	R_6
	建筑物耐火、防火设计不合理	R_7
	缺乏必要的消防设施设备	R_8
	缺乏应急救援装备	R_9
	通信设备失效	R_{10}
	安全出口少,且疏散通道不畅	R_{11}
	电气线路老化、破损、短路等	R_{12}
	燃气管网及管道破损	R_{13}
	火灾探测、报警装置失效	R_{14}
环境因素: 不利环境条件	雷击、高温等气象因素	R_{15}
	外部火灾蔓延引发	R_{16}
管理因素: 管理缺陷	应急指挥机制不健全	R_{17}
	未制定应急预案或预案不合规	R_{18}
	未定期开展消防演练或演练不充分	R_{19}
	没有定期向居民普及消防知识	R_{20}
	未定期维护、检修及更新社区安全设备与装置	R_{21}
	未按要求开展社区火灾隐患巡查	R_{22}
	缺乏合理的防火管理制度体系	R_{23}

火灾风险因素的作用路径为风险源→事前风险条件→后果严重度。

1) 风险源。作为直接引发火灾的因素,包括 R_3 、 R_4 、 R_5 、 R_{12} 、 R_{13} 、 R_{15} 、 R_{16} 。各风险因素的敏感性存在差异, R_{15} 具有气候依赖性,而 R_3 、 R_4 、 R_5 与居民行为高度相关。针对性安全教育(R_{19} 、 R_{20})可有效降低行为驱动型风险。

2) 事前风险条件。环境与管理缺陷可能提升火灾发生概率,风险因素涵盖 R_1 、 R_6 、 R_7 、 R_{14} 、 R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23} 。此类因素通过协同效应加剧火灾风险。例如 R_6 与 R_7 ,通过增强燃料连续性 with 削弱阻燃能力形成高危场景。系统性管理缺陷(R_{21} 、 R_{22} 、 R_{23})导致风险累积,而 R_{14} 延误预警时效。

3) 后果严重度。影响火势蔓延速度、应急响应效能及伤亡风险的关键要素,主要包括 R_2 、 R_8 、 R_9 、 R_{10} 、 R_{11} 、 R_{17} 、 R_{18} 、 R_{19} 、 R_{20} 。此类要素的失效将加剧火灾后果。消防设施或救援装备缺失(R_8 、 R_9)可能导致火灾升级。 R_{10} 延缓响应速度, R_{11} 增加伤亡风险。应急协调能力不足(R_{17} 、 R_{18} 、 R_{19})易引发处置程序混乱。

4) 风险关联机制。火灾风险因素存在复杂的交互作用。 R_1 强化行为风险(R_3 、 R_4 、 R_5),提升火灾发生概率; R_7 加速火势蔓延,加剧火灾严重度;

R_{21} 导致设备缺陷(R_8 、 R_{14}),增加火灾发生概率与影响强度。

1.2 社区火灾风险耦合机制分析

耦合是复杂系统内部相互作用的核心表征。在社区火灾风险系统中,耦合具体表现为人的不安全行为、物的不安全状态、环境不利条件及管理缺陷之间的非线性关联与协同演化机制。

1) 系统性风险传导机制。风险要素间的耦合效应突破了单一子系统失效的孤立性,其传导路径可能呈现跨层级、多向度的网络化特征。例如: R_4 的人为疏忽,触发 R_{12} 的物理隐患,进一步放大 R_{15} 的环境威胁,与 R_{21} 的管理漏洞风险叠加,导致应急响应迟滞与火灾后果的幂律放大。

2) 非线性协同放大效应。耦合作用打破了传统线性叠加,其风险强化效应高于单风险的代数和。当 R_{18} 的管理缺陷与 R_{15} 环境威胁共存,火灾概率远超二者独立作用的简单相加。多要素耦合更易形成低概率-高损失的极端情景。

3) 风险形态的动态演化。耦合机制驱动风险由单一事件向复合灾害转化,并衍生超越传统预测范围的次生灾害链。如电路老化短路与燃气泄漏耦合,诱发爆炸。此类级联失效本研究暂未纳入。

4) 阈值与临界点的动态性。耦合系统的崩溃阈值受协同减灾策略调控。如优化 R_{11} 与强化 R_{20} 可延缓风险累积进程;而管理缺陷的中心性地位则决定了其作为系统崩溃触发点的敏感性。

5) 正向反馈强化路径。风险要素间存在自增强循环机制。夏季 R_{15} 直接加剧 R_{12} 物理隐患,诱发 R_4 与 R_{21} ,形成“环-人-管”的闭环强化路径。此类正反馈机制是复合型火灾风险高发的重要动因。

2 构建社区火灾关键风险分析模型

2.1 基本流程

社区火灾关键风险分析的 SNA/N-K 模型基本流程如图 1 所示。

1) 通过事故致因链确定风险耦合发生频次,采用信息熵方程计算不同风险组合的耦合度 T ,量化风险要素间的交互强度,识别关键耦合关系。

2) 运用 SNA 框架分析社区火灾风险因素网络结构特征,辨识关键节点,分析节点可达性,揭示风险因素在网络结构中的交互作用与传播路径。

3) 量化风险因素间 T 的数值,并修正亲近中心度出度,确保中心性测度能反映节点的拓扑重要性

和功能显著性,精确识别导致社区火灾发生的关键风险因素。

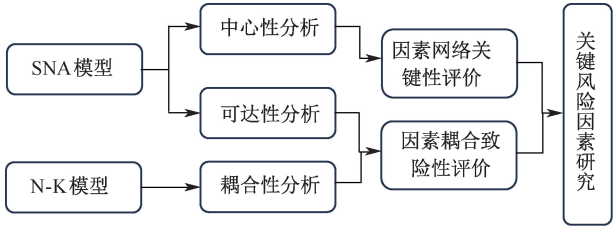


图1 基本流程

Fig.1 Basic flowchart

2.2 构造功能函数

1) 社区火灾风险耦合度 T 。

4 因素 T 的表达式为:

$$T(a,b,c,d) = \sum_{h=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 P_{hijk} \times \log_2 \left[\frac{P_{hijk}}{P_h \cdots P_i \cdots P_j \cdots P_k} \right] \quad (1)$$

式中: $a、b、c、d$ 分别为 4 个一级风险因素; P_h 为因素 a 在 h 状态下发生的概率; P_i 为因素 b 在 i 状态下发生的概率; P_j 为因素 c 在 j 状态下发生的概率; P_k 为因素 d 在 k 状态下发生的概率; P_{hijk} 为因素 a 在 h 状态、因素 b 在 i 状态、因素 c 在 j 状态、因素 d 在 k 状态下 4 种风险因素耦合发生的概率。

3 因素 T 的表达式为:

$$T_{31}(a,b,c) = \sum_{h=0}^1 \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 P_{hij} \times \log_2 \left[\frac{P_{hij}}{(P_h P_i P_j)} \right] \quad (2)$$

2 因素 T 的表达式为:

$$T_{21}(a,b) = \sum_{h=0}^1 \sum_{i=0}^1 P_{hi} \times \log_2 \left[\frac{P_{hi}}{(P_h \cdots P_i)} \right] \cdots \quad (3)$$

T 用于量化火灾风险因素间相互作用的强度,高 T 揭示了关键薄弱环节,负 T 表示抑制性。

2) 社区火灾风险 SNA 模型中心性指标。中介中心度 C_B 反映节点风险因素与上游诱因和下游后果的连接能力;亲近中心度入度 C_C^1 反映风险因素受其他节点影响的程度,值越高,越易受外部因素触发;亲近中心度出度 C_C^0 表示风险因素在网络中传播能力,值越高,引发下游失效的诱导性越强,是识别关键风险因素最可靠的指标。 $C_B、C_C^1、C_C^0$ 及修正亲近中心度 $C_C^{0'}$ 分别表示为:

$$C_B(i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{jk}(i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}$$

$$i \neq j \neq k, j < k \quad (4)$$

$$C_C^1(i)^{-1} = \sum_{j=1}^n d_{ij}(i) \quad i \neq j \quad (5)$$

$$C_C^0(i)^{-1} = \sum_{j=1}^n d_{ij}(i) \quad i \neq j \quad (6)$$

$$C_C^{0'} = C_C^0 \times T \quad (7)$$

式中: $b_{jk}(i)$ 为网络中间节点 i 处于节点 j 和 k 之间的最短路径上的可能性; g_{jk} 为节点 j 到节点 k 的最短路径数量; $g_{jk}(i)$ 为节点 j 到节点 k 的最短路径中经过节点 i 的数量; d_{ij} 为节点 i 到节点 j 的网络距离。

3 社区火灾关键风险分析模型应用

3.1 社区火灾风险因素耦合分析结果

1) 不同风险因素耦合模式发生的频率特征。对 105 起社区火灾案例进行事故致因链分析,识别不同风险耦合模式的发生次数与概率,见表 2。可以看出,风险因素以正向耦合为主(占比为 92.3%);负向抑制作用仅存在于局部环节,如 R_{11} 可抑制 R_{15} 与 R_3 的耦合结果,呈风险耦合的非对称性。管理子系统耦合发生概率最高,为 43.6%,对系统风险具有显著放大作用。人-物-管耦合 P_{1101} 发生概率(19.0%)为 3 因素之首,表明社区火灾风险多源于人的不安全行为、物的不安全状态及管理缺陷的复合作用。

表 2 不同因素耦合模式发生的次数和频率

Table 2 Numbers and frequencies of coupling modes of different factors

耦合类型	涉及因素	耦合模式	发生次数	发生概率
单因素	人	P_{1000}	1	0.010
	物	P_{0100}	1	0.010
	环	P_{0010}	2	0.019
	管	P_{0001}	3	0.029
双因素	人-物	P_{1100}	1	0.010
	人-环	P_{1010}	1	0.010
	人-管	P_{1001}	31	0.295
	物-环	P_{0110}	2	0.019
	物-管	P_{0101}	23	0.219
	环-管	P_{0011}	2	0.019
多因素	人-物-环	P_{1110}	2	0.019
	人-物-管	P_{1101}	20	0.190
	人-环-管	P_{1011}	3	0.029
	物-环-管	P_{0111}	9	0.086
	人-物-环-管	P_{1111}	4	0.038

注:耦合模式 P 的角标从左到右分别代表人、物、环、管 4 种耦合因素的状态,角标 1 表示参与耦合,0 表示未参与耦合。

2) 不同风险因素耦合模式下 T 的特征。表 3 为不同耦合模式下 T 的计算结果。可以看出, T 差异较大, 风险因素间相互作用强度与影响程度不同。人-物-管组合 $T_{32}(a, b, d)$ 的 T 最高, 占比 28. 4%, 为主导传播链, 人-物-环耦合 $T_{31}(a, b, c)$ 的 T 最低, 说明无管理因素参与, 单纯环境因素不会显著增加火灾风险。4 因素耦合 $T_{41}(a, b, c, d)$ 的 T 最高, 说明多因素耦合的主导性, 耦合风险因素种类越多, 对社区火灾风险影响越大。

表 3 不同风险因素耦合模式下的 T

Table 3 T under different risk factor coupling modes			
耦合类型	耦合因素	风险耦合值	
双因素耦合	人-物	$T_{21}(a, b)$	0. 122 73
	人-环	$T_{22}(a, c)$	0. 033 56
	人-管	$T_{23}(a, d)$	-0. 000 05
	物-环	$T_{24}(b, c)$	0. 004 50
	物-管	$T_{25}(b, d)$	-0. 002 87
	环-管	$T_{26}(c, d)$	0. 070 00
多因素耦合	人-物-环	$T_{31}(a, b, c)$	-0. 075 08
	人-物-管	$T_{32}(a, b, d)$	0. 135 64
	人-环-管	$T_{33}(a, c, d)$	0. 103 61
	物-环-管	$T_{34}(b, c, d)$	0. 079 00
	人-物-环-管	$T_{41}(a, b, c, d)$	0. 197 80

双因素耦合中, 人-物耦合 $T_{21}(a, b)$ 的数值最高, 是驱动社区火灾的核心二元关系, 人的不安全行为与物的不安全状态的耦合显著提升风险。人-环耦合 $T_{22}(a, c)$ 与环-管耦合 $T_{26}(c, d)$ 的值居中, 表明异常环境条件可能诱发不安全行为并超出应急管理系统承载力, 此类交互作用在应急准备不足时会显著增大火灾风险。

3.2 社区火灾风险因素网络结构分析结果

图 2 为运用 SNA 分析工具 Ucinet 6. 0^[26] 生成的社区火灾事故风险因素网络拓扑图, 节点表示单一风险因素, 有向边表示因素间的影响关系或因果传导路径。可以看出, 社区火灾风险网络呈现高度互联特征, 部分节点表现出显著的中心性与连接度优势, 说明火灾风险是多重风险要素复杂交互的结果。

由式(4)一式(6)计算 C_C^1 、 C_C^0 及 C_B , 结果见表 4。可以看出, C_C^1 排名前 4 的风险因素为 R_2 、 R_{10} 、 R_{12} 、 R_{13} , 主要为物的不安全状态, 说明物理基础设施的脆弱性, 与人因失误或管理缺陷耦合时, 常成为火势蔓延的传导载体。 C_C^0 排名前 4 的风险因素均为 R_{22} 、 R_1 、 R_{20} 和 R_{19} , 说明管理缺陷风险因素削弱了预防措施效力与应急准备能力。 C_B 排名前 4

的关键风险因素为 R_1 、 R_2 、 R_{19} 、 R_{22} , 表明人因与管理类因素在连接其他风险因素中起核心作用, 是风险传播的关键枢纽。

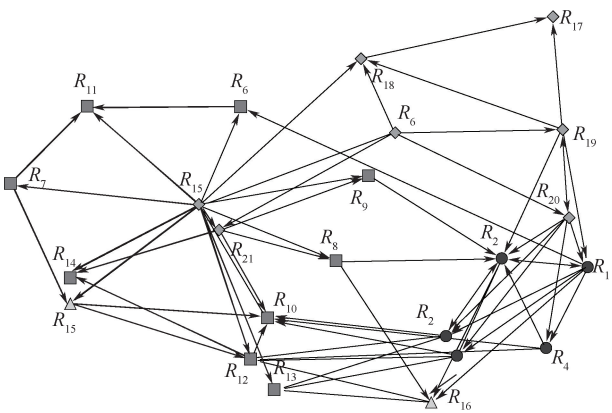


图 2 社区火灾事故风险因素网络拓扑
Fig. 2 Network topology of community fire risk factors

表 4 风险因素节点的标准化中心度
Table 4 Normalized centrality of risk factor nodes
%

风险因素	亲近中心度		C_B
	C_C^1	C_C^0	
R_1	13. 6	31. 8	15. 44
R_2	36. 4	9. 1	15. 10
R_3	9. 1	18. 2	0. 94
R_4	9. 1	13. 6	0. 69
R_5	9. 1	18. 2	0. 94
R_6	9. 1	4. 5	1. 95
R_7	4. 5	9. 1	0. 00
R_8	9. 1	9. 1	2. 02
R_9	9. 1	4. 5	1. 52
R_{10}	31. 8	0. 0	0. 00
R_{11}	13. 6	0. 0	0. 00
R_{12}	27. 3	9. 1	3. 14
R_{13}	18. 2	0. 0	0. 00
R_{14}	13. 6	0. 0	0. 00
R_{15}	9. 1	9. 1	0. 65
R_{16}	13. 6	9. 1	2. 85
R_{17}	9. 1	0. 0	0. 00
R_{18}	13. 6	4. 5	0. 54
R_{19}	13. 6	22. 7	5. 81
R_{20}	9. 1	27. 3	1. 61
R_{21}	9. 1	22. 7	0. 47
R_{22}	9. 1	54. 5	3. 50
R_{23}	0. 0	22. 7	0. 00

表 5 为社区火灾风险因素节点可达性映射到一级风险因素的结果。可以看出, 人的不安全行为风险可独立触发跨维度的多因素耦合; 管理缺陷风险因素引发多因素耦合的概率为 71%; 物的不安全状

态因素单独引发多因素耦合的概率仅为 22%,表明物理脆弱性需与人因失误或管理失效相耦合方可升级火灾风险。

表 5 风险因素节点的可达性分析

风险因素	人	物	环	管	潜在耦合形式
R_1	1	1	1	1	人-物-环-管
R_2	1	1	1	1	人-物-环-管
R_3	1	1	1	1	人-物-环-管
R_4	1	1	1	1	人-物-环-管
R_5	1	1	1	1	人-物-环-管
R_6	0	1	0	0	物
R_7	0	1	1	0	物-环
R_8	1	1	1	1	人-物-环-管
R_9	1	1	1	1	人-物-环-管
R_{10}	0	0	0	0	物
R_{11}	0	0	0	0	物
R_{12}	0	1	0	0	物
R_{13}	0	1	0	0	物
R_{14}	0	0	0	0	物
R_{15}	0	1	0	0	物-环
R_{16}	0	1	0	0	物-环
R_{17}	0	0	0	1	管
R_{18}	0	0	0	1	管
R_{19}	1	1	1	1	人-物-环-管
R_{20}	1	1	1	1	人-物-环-管
R_{21}	1	1	1	1	人-物-环-管
R_{22}	1	1	1	1	人-物-环-管
R_{23}	1	1	1	1	人-物-环-管

3.3 社区火灾关键风险分析与控制

C_c^0 和 $C_c^{0'}$ 对比如图 3 所示,从中可以看出,社区火灾风险传播中起主导作用的关键节点,排序前 6 位的分别是 R_{22} 、 R_1 、 R_{20} 、 R_{19} 、 R_{21} 、 R_{23} ,说明管理类因素的亲近中心度出度显著高于其他类别,因此,针对性干预策略应优先识别并管控管理类风险, R_{22} 因在风险传播中的核心地位需作为火灾防控的首要对象。

4 社区火灾风险防控策略

图 4 为涵盖预防、预警、处置、恢复全周期的“3 维 4 阶”社区火灾防控模型。

4.1 制度维度:构建全周期的韧性治理体系

1) 完善双重预防机制。针对 R_{22} 与 R_{23} 等问题,建立风险管控与隐患排查双闭环管理体系。以风险分级管控为先导,通过智能巡检软件等与管控措施比对,判断是否构成隐患,结合区块链技术确保

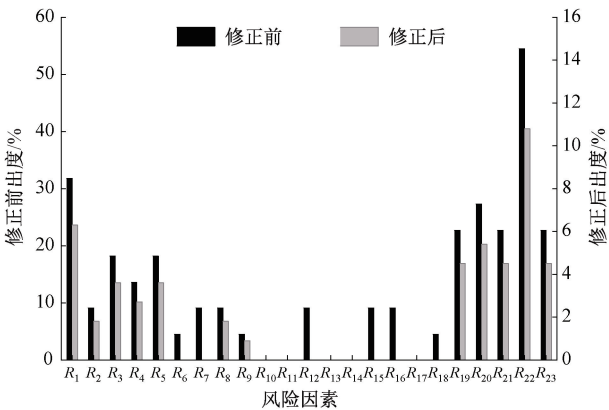


图 3 修正前后的亲近中心度出度对比
Fig. 3 Out-degree comparison of closeness centrality before and after correction

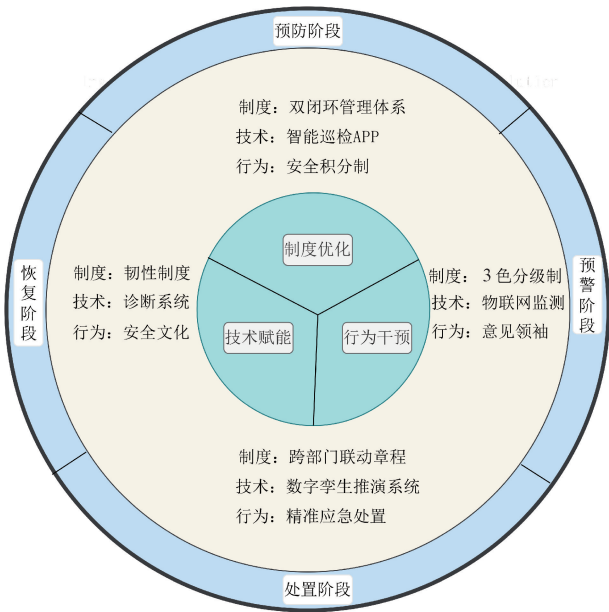


图 4 社区火灾防控模型

Fig. 4 Community fire prevention and control framework

数据不可篡改,做到隐患识别、评估、整改、验证的全流程管理,实现风险与隐患的双重预防。

2) 创新标准化管理制度。开发涵盖设施完好率、教育覆盖率等二级指标的社区消防安全指数,实施红黄蓝 3 色分级管理制度,对高风险社区实施专项督导,降低管理缺陷的放大效应。

4.2 技术维度:赋能预警-处置智能闭环

1) 部署物联网监测系统。针对 R_{21} ,构建“端-边-云”物联监测体系,通过智能烟感、电气火灾监控等终端设备实时采集数据,快速识别火灾特征,增强预警精准性。

2) 数字孪生技术应用。建立社区火灾数字孪生模型,集成建筑 BIM 数据与人员流动热力图,实

现风险动态模拟,优化火灾防控方案。

4.3 行为维度:实施精准化教育与文化培育

1) 差异化培训体系。针对 R_1 、 R_{20} 、 R_{19} 等,开发分类培训方案,采用虚拟现实技术的沉浸式演练、案例教学法、游戏化学习等方法,提高居民的安全意识和应急处置技能。

2) 安全文化培育。建立消防安全积分制,将居民参与演练、隐患上报等行为纳入信用评价体系,建立正向激励和负向约束机制。

4.4 协同响应:构建多元共治格局

1) 跨部门联动平台建设。搭建政府-物业-居民3方协同的防火安全联盟,制定权责清晰的合作章程。通过定期联席会议与演练,提升联动效果。

2) 市场化保障机制创新。推行消防安全责任保险制度,将风险管理水平与保费浮动挂钩。设立社区安全韧性基金,通过政府购买服务引入专业第

三方评估机构,提供技术支持和专业服务。

5 结 论

1) 社区火灾风险的管理缺陷具有更强的诱导性,是驱动风险耦合的主导维度;不安全人因行为与物的危险状态交叉大幅提升了事故风险;耦合因素数量增多会显著增加社区火灾风险。

2) 排名前3的火灾风险关键因素依次为:未按要求开展社区火灾隐患排查,居民安全意识、知识与素养薄弱,没有定期向居民普及消防知识。未定期开展消防演练或演练不充分,未定期维护、检修及更新社区安全设备与装置,缺乏合理的防火管理制度体系等也是高风险因素。

3) 社区火灾防控应从制度优化、技术赋能与行为干预3个维度,预防、预警、处置、恢复4个阶段熔断干预风险耦合链。

参 考 文 献

- [1] 国家消防救援局. 2023年上半年全国日均火灾超3000起[EB/OL]. (2023-07-17). <https://www.119.gov.cn/qmxfkg/sjtj/2023/38420.shtml>.
 - [2] MASOUDVAZIRI N, BARDALES F S, KESKIN O K, et al. Streamlined wildland-urban interface fire tracing (SWUIFT): modeling wildfire spread in communities [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 143: DOI: 10.1016/j.envsoft.2021.105097.
 - [3] ANSARI M H, BIJANI M, ABBASI E, et al. Determinants of local community participation in forest fire management in the northern Iran [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 107: DOI: 10.1016/j.ijdr.2024.104478.
 - [4] STEPHENS K K, POWERS C J, ROBERTSON B W, et al. Building more resilient communities with a wildfire preparedness drill in the US: individual and community influences and communication practices [J]. *Journal of Contingencies and Crisis Management*, 2023, 31(1):26-38.
 - [5] CVETKOVIĆ V M, DRAGAŠEVIĆ A, PROTIĆ D, et al. Fire safety behavior model for residential buildings: implications for disaster risk reduction [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 76: DOI:10.1016/j.ijdr.2022.102981.
 - [6] SHOKOUI M, KHORASANI-ZAVAREH D, REZAPUR-SHAHKOLAI F, et al. Safety concept of fire related injuries in inhabitants of residential buildings in Iran: a qualitative study [J]. *Injury*, 2020, 51(8):1 817-1 822.
 - [7] MAEZUMI S Y, FLETCHER M-S, SAFFORD H, et al. Fighting with fire: historical ecology and community-based approaches to fire management, stewardship, and ecosystem resilience [J]. *One Earth*, 2024, 7(6): DOI:10.1016/j.oneear.2024.05.016.
 - [8] ZIKELOGLOU I, LEKKAS E, LOZIOS S, et al. Community's evacuation planning and response for the 2021-2022 fire seasons in Greece [J]. *Safety Science*, 2024, 172: DOI:10.1016/j.ssci.2024.106434.
 - [9] BROWN G D, LARGEY A, MCMULLAN C, et al. Fire safety protection motivation and preparedness in Irish apartments: a Post-Grenfell analysis [J]. *Safety Science*, 2022, 148: DOI:10.1016/j.ssci.2021.105630.
 - [10] 李梦醒,王紫微,周魁斌. 森林城镇交界域内建筑受林火威胁风险的模型构建和应用举例[J]. *林业科学*, 2024, 60(11):119-127.
 - [11] 韦泽,李子建,张培红. 细水雾控制高层住宅烟道火灾的有效性及其参数优化[J]. *消防科学与技术*, 2022, 41(4): 505-509, 519.
- WEI Ze, LI Zijian, ZHANG Peihong. Effectiveness and parameter optimization of water mist control system for exhaust duct fire in high-rise residential [J]. *Fire Science and Technology*, 2022, 41(4):505-509, 519.

- [12] 刘朝峰,许强,齐钦,等. 高层住宅建筑火灾应急疏散模拟与策略研究[J]. 灾害学,2022,37(2):174-181.
LIU Chaofeng, XU Qiang, QI Qin, et al. Study on simulation and strategy of fire emergency evacuation in high-rise residential building[J]. Journal of Catastrophology, 2022, 37(2):174-181.
- [13] 武乾,杨建宏,徐树文. 基于 N-K 和 SNA 的高层住宅火灾事故风险因素分析及控制[J]. 防灾减灾工程学报, 2025, 45(1): 128-136.
WU Qian, YANG Jianhong, XU Shuwen. Risk factors analysis and control of fire accidents in high-rise residential buildings based on N-K and SNA [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2025, 45(1): 128-136.
- [14] 鲁义,伍江乐,邵淑珍,等. 基于贝叶斯网络的危化品道路运输事故推理模型[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(3): 174-182.
LU Yi, WU Jiangle, SHAO Shuzhen, et al. Prediction model for road transport accidents of hazardous chemicals based on Bayesian network [J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(3):174-182.
- [15] CHANG Yuanjiang, ZHANG Changshuai, WU Xiangfei, et al. A Bayesian network model for risk analysis of deepwater drilling riser fracture failure [J]. Ocean Engineering, 2019, 181:1-12.
- [16] LIU Zengkai, MA Qiang, CAI Baoping, et al. Risk coupling analysis of subsea blowout accidents based on dynamic Bayesian network and NK model [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2022, 218: DOI: 10.1016/j.res.2021.108160.
- [17] 陈伟,杨主张,熊威,等. 装配式建筑工程施工安全风险传导 DEMATEL-BN 模型[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(7): 1-6.
CHEN Wei, YANG Zhuzhang, XIONG Wei, et al. Research on DEMATEL-BN model of construction risk transmission for prefabricated building [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(7):1-6.
- [18] 北京市应急管理局. 大兴区“11·18”重大事故调查报告.[EB/OL]. (2018-06-25). https://yjglj.beijing.gov.cn/art/2018/6/25/art_7466_354.html.
- [19] 国务院北京丰台长峰医院“4·18”火灾事故调查组. 北京丰台长峰医院“4·18”重大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2023-10-25). https://www.mem.gov.cn/xw/bndt/202310/t20231025_466750.shtml.
- [20] 国务院河南平顶山“5.25”特别重大火灾事故调查组. 河南平顶山“5·25”特别重大火灾事故调查报告[EB/OL]. (2015-10-14). https://www.mem.gov.cn/gk/sgcc/tbzdsgdcbg/2015/201510/t20151014_245219.shtml.
- [21] 张燕.“瓦片经济”考验城乡接合部人口治理[N]. 第一财经日报,2011-04-27(A4).
- [22] 谢朝阳,刘卫红,陈程. 加快建设特种职业信用管理体系:对北京长峰医院火灾事故的再思考[J]. 北方工业大学学报,2024,36(6):129-136.
XIE Zhaoyang, LIU Weihong, CHEN Cheng. Accelerate the establishment of a credit management system for special occupations: rethinking of the fire accident in Beijing Changfeng hospital [J]. Journal of North China University of Technology, 2024,36(6):129-136.
- [23] 邓李政. 基于事故树方法的养老院火灾事故分析及预防对策[J]. 安全,2016,37(9):18-20.
- [24] 佟瑞鹏,王露露,许素睿,等. 本质安全、行为安全、过程安全与功能安全的比较研究:基于安全管理范式转换[J]. 中国安全科学学报, 2025,35(1):7-15.
TONG Ruipeng, WANG Lulu, XU Surui, et al. Comparative study of inherent safety, behavior-based safety, process safety and functional safety based on safety management paradigm shift [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1): 7-15.
- [25] HU Jun, SHU Xueming, SHEN Shifei, et al. A method to improve the determination of ignition probability in buildings based on bayesian network[J]. Fire and Materials,2022,46(4): 666-676.
- [26] KIM H M, WON B K. Big data analysis of the women who score goal sports entertainment program: focusing on text mining and semantic network analysis[J]. The International Journal of Internet, Broadcasting and Communication, 2023, 15(1): 222-230.

作者简介: 赵鹏霞 (1984—),女,山西运城人,博士研究生,副研究员,研究方向为城市安全风险评估与韧性提升等。E-mail:zhaopengxia1984@126.com。

