

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20240305003

基于N-K和SNA的高层住宅火灾事故风险因素分析及控制

武乾, 杨建宏, 徐树文

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 高层住宅火灾安全防控是一个复杂系统问题, 从系统层面确定其风险耦合形式及关键风险因素对提升我国高层住宅消防安全水平具有重要意义。为分析高层住宅火灾事故风险因素并提出防控策略, 通过收集2015~2023年我国发生的162起高层住宅火灾较大事故案例, 结合专家访谈和已有的事故致因分类模型, 将高层住宅火灾事故风险因素分为5类一级风险因素和26个二级风险因素; 基于N-K模型求解出风险因素耦合值, 将风险耦合形式量化并进行耦合致险性评价; 利用社会网络分析(Social Network Analysis, SNA)可视化风险因素间的作用关系, 分析其中心度和可达性, 挖掘出风险因素的发展态势和诱发其他风险因素出现的可能性; 结合N-K和SNA对各风险节点的出度进行修正, 确定高层住宅火灾事故的关键风险因素。结果表明: 多风险因素耦合导致事故发生的概率较大; 火灾事故的起因在较大程度上是居民方的原因, 开发商、物业、社区、监管单位四方的风险易使灾情扩大、程度升级; 防控开发商-监管单位两风险因素耦合可有效避免事故发生; 开发商、社区、监管单位风险因素的出现易连通各风险节点, 引发耦合效应; 从开发商、物业、社区及监管单位角度出发进行防控是重点。

关键词: 安全工程; 高层住宅; 火灾事故; N-K模型; 社会网络分析; 风险耦合

中图分类号: G301; X928.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)01-0128-09

Risk Factors Analysis and Control of Fire Accidents in High-Rise Residential Buildings Based on N-K and SNA

WU Qian, YANG Jianhong, XU Shuwen

(College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Fire safety and prevention in high-rise residential buildings is a complex system issue. Identifying risk coupling forms and key risk factors at the system level is crucial for improving fire safety standards in China's high-rise residential buildings. To analyze the risk factors of fire accidents in high-rise residential buildings and propose prevention and control strategies, 162 major accident cases that occurred in China's high-rise residential buildings from 2015 to 2023 were collected. Using expert interviews and an existing accident causality classification model, the risk factors of these fire accidents were categorized into 5 primary risk factors and 26 secondary risk factors. Using the N-K model, the risk factor coupling values were calculated, the risk coupling forms were quantified, and a coupling

* 收稿日期: 2024-03-05; 修回日期: 2024-06-27

作者简介: 武乾(1965—), 男, 教授, 博士。主要从事土木工程建造与管理、安全管理等方面的研究。

E-mail: wqian1983@126.com

通信作者: 杨建宏(1991—), 男, 硕士研究生。主要从事土木工程建造与管理、安全管理等方面的研究。

E-mail: 17339902350@163.com

hazard evaluation was conducted. Social Network Analysis (SNA) was employed to visualize the relationships between risk factors, analyzing their centrality and accessibility. This revealed the development trends of the risk factors and assessed the probability of one risk factor triggering the occurrence of others. By integrating N-K and SNA, the out-degree of each risk node was corrected, leading to the identification of the key risk factors for fire accidents in high-rise residential buildings. The results indicated that the coupling of multiple risk factors significantly increased the probability of accidents. The primary cause of fire accidents was largely attributed to residents, while risks associated with developers, property management, communities, and regulatory bodies tended to exacerbate the severity of accidents. Preventing the coupling of risk factors related to developers and regulatory bodies could effectively avoid accidents. Risks from developers, communities, and regulatory bodies tended to connect various risk nodes, triggering a coupling effect. Therefore, prevention and control efforts should focus on developers, property management, communities, and regulatory bodies.

Keywords: safety engineering; high-rise residential buildings; fire accidents; N-K model; social network analysis; risk coupling

0 引言

随着我国城市化进程的加速深化和人口规模的扩张,用地紧张的现象促使居民住宅往往以高层建筑的形式出现,我国《民用建筑设计统一标准》(GB 50352—2019)^[1]中对房屋建筑进行了分类,其中住宅高度27.0~100.0 m的住宅均属于高层住宅。高层住宅以其特有的建筑形式导致其消防安全问题不容忽视,突发火灾事故会造成更多的人员伤亡、财产损失。根据国家消防救援局公布的数据^[2],2023年上半年由于新冠疫情实行乙类乙管,经济社会秩序逐渐恢复常态,与疫情严控期间相比,诱发火灾的各类风险也逐渐增多,火灾总量整体上升19.9%,居住场所火灾16.7万起、死亡682人,起数占总数的30.3%,但死亡人数占总数的69%。因此,对居住场所火灾事故的防控是很有必要的,而高层住宅火灾事故是居住场所火灾事故中的防控重点。值得注意的是,高层住宅火灾安全防控是一个复杂系统问题,居民、开发商、物业等相关方内部或之间的风险耦合都会导致火灾事故的发生。

目前关于高层住宅火灾事故的研究主要涉及紧急疏散^[3-6]、风险等级评估^[7]、温升概率^[8]、危险源分析^[9]、易损性分析^[10]、灾中结构构件力学性能模拟及破坏模式研究等^[11-12]方面,从风险耦合这一角度考量高层住宅火灾事故的相关研究较少。从高层住宅火灾事故的突发性、可防控性出发,对其风险进行评估和分析耦合关系,可以在一定程度上量化

风险,进而达到精准防控的目的。N. D. Hansen等^[13]利用火灾风险评估模型(FRM)评估了居住者的风险水平和作为建筑特征、高度和消防安全特征函数的财产风险水平。陈星霖等^[14]根据国家标准和文献整理出了用来评估火灾风险的能力和评估指标,建立了评估指标体系,并结合模糊理论与贝叶斯网络构建了超高层建筑火灾风险评估模型。

在对系统耦合作用进行研究时,通常采用耦合度模型,风险传递耦合模型,系统动力学模型以及N-K模型等^[15]。S. Kauffman^[16]在1993年首次提出N-K模型,后来逐渐成为求解复杂系统问题的主流模式,其重点是研究系统的全局适应能力和内在因素间的联系。该模型以已发生事故的客观数据为基础,可以降低主观偏见,在交通、电力等领域较受欢迎。肖国清等^[17]基于火灾事故改进和优化了FRAME模型,探讨了建筑消防安全管理水平对建筑物火灾风险、人员风险、建筑内活动风险的影响。总结现有研究发现,由于N-K模型研究对象的特征和限制,其分析的重点为一级安全风险因素,对一级因素内部的可解释性较差。

社会网络分析方法(SNA)是基于数学图论分析复杂系统的一种方法,已被广泛地应用于社会、经济和组织管理等诸多领域。L. Niu等^[18]基于“行人—设备—环境—管理”框架,对78起典型踩踏事件的指标案例进行了梳理和分析,对踩踏事件的17个影响因素进行了模糊处理,基于社会网络分析(SNA)方法计算了各影响因素的度中心性、中间中心性及各自权重,得出了各因素的影响程度,确定

了风险在系统网络中的传播机制。武乾等^[19]利用社会网络分析(SNA)结构属性、关联程度、控制能力、连接枢纽细化指标块模型、点度中心度等确定了旧工业厂房绿色再生项目治理网络中居于核心地位的关键性风险。总结之前的研究发现,社会网络分析(SNA)的关注点在各节点间的关系,一定程度上忽视了节点组合对系统的影响。

综上所述,N-K模型和社会网络分析(SNA)具有优势互补的特点,本文将二者结合,对高层住宅火灾事故风险因素进行了定性和定量、主观和客观的综合分析。以收集到的案例数据为基础,通过事故原因分析和专家访谈,对高层住宅火灾事故风险因素进行识别;用N-K模型求解高层住宅火灾事故风险耦合值,基于计算的耦合值将风险耦合形式量化;通过SNA构建可视化多源风险因素网络,辨识风险传导路径与发展态势,明确关键风险因素,以期为我国高层住宅消防安全管理和控制提供科学依据。

1 高层住宅火灾事故风险因素

为从定量化角度分析高层住宅火灾事故案例,本文按照以下流程收集与整理相关案例:(1)以2015~2023年我国发生的高层住宅火灾较大事故为案例数据收集的指引信息(从国家消防救援局和各省市消防安全相关官方网站查找整理);(2)对于事故过程及原因不明确、难以查找案例数据的,通过查找历史新闻报道及文献、调研、线上沟通等方法作以补充分析;(3)剔除根据上述流程处理后仍事故原因不明,数据不足或不可靠的案例。最终,收集了国内162起高层住宅事故案例。与普通起火原因相比,高层住宅火灾事故的致因往往难以从单方面进行推定,故收集的事故案例的类型宜从风险因素及其耦合进行分类。

影响高层住宅火灾的风险因素众多,通过对162起事故案例的分析,结合专家访谈和已有的事故致因分类模型^[20],将高层住宅火灾事故的一级风险因素从事故相关方的角度进行分析,分为居民、开发商、物业、社区、监管部门五类(分别用 $abcde$ 代替),其中开发商的因素包含前期施工过程中部分对运营期消防安全产生影响的因素,监管单位包含前期施工过程中的监理单位、消防检查及后期监管部门,同时整理出26个二级风险因素(表1)。

表1 高层住宅火灾事故风险因素

Table 1 Risk factors of fire accidents in high-rise residential buildings

一级风险因素	二级风险因素
居民的因素(a)	堆积易燃物品 R1
	用火不当 R2
	对儿童缺乏防火教育 R3
	装修材料易燃 R4
	家用线路故障 R5
	电器操作不当 R6
	燃气灶故障 R7
	消防安全知识缺乏 R8
开发商的因素(b)	建筑材料防火性能差 R9
	电缆施工不符合标准 R10
	不符合建设程序 R11
	未安装防火门 R12
	未规划或未合理规划停车位 R13
	商住一体,消防安全责任模糊 R14
小区物业的因素(c)	日常管理缺乏 R15
	防烟系统未使用或操作不当 R16
	绿化占用消防登高地 R17
	雇佣不合格维检人员 R18
	常闭式防火门长期开启 R19
社区的因素(d)	消防安全检查及整改不到位 R20
	消防控制室管理不当 R21
	消防制度宣传不到位 R22
监管单位的因素(e)	材料监管不力 R23
	不满足交付标准而擅自交付 R24
	对小区物业监管不力 R25
	消防工作职责落实不到位 R26

2 基于N-K模型和SNA的关键风险因素分析方法

2.1 N-K风险耦合模型构建

N-K模型分别由Kauffman提出和Levinthal扩充,研究领域从生物学拓展到了组织管理研究领域^[21]。N-K模型包含 N 和 K 两个参数,这里的 N 指的是特定研究系统中所包含要素的个数,而每个要素若具有对研究目标产生影响的 n 种状态,则研究系统整体有 n^N 种状态^[22]。 K 是研究系统中 N 个要素之间具有相互依赖关系的要素个数, K 的取值范围为 $[0, N-1]$, $K=0$ 时,组成研究系统的 N 个要素

的特质决定其状态; $K > 0$ 时, 组成研究系统的 N 个要素的特质和其之间的耦合效应决定系统状态; 对于高层住宅火灾事故这类复杂系统, 在其要素之间耦合度的表达这一方面, 一种比较理想的方法是采用信息理论中的交互信息 T 来研究。在高层住宅火灾事故风险耦合研究中, 同时考虑居民因素、开发商因素、物业因素、社区因素及监管单位因素的交互信息 T 的计算公式为:

$$T_{(a,b,c,d,e)} = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L P_{hijkl} \cdot \log_2 \left(\frac{P_{hijkl}}{P_{h\dots} \cdot P_{i\dots} \cdot P_{j\dots} \cdot P_{k\dots} \cdot P_{l\dots}} \right) \quad (1)$$

式中, a, b, c, d, e 分别代表居民的因素、开发商的因素、物业的因素、社区的因素及监管单位的因素; P_{hijkl} 表示上述五种因素分别处于 h 状态、 i 状态、 j 状态、 k 状态、 l 状态下 5 种风险因素发生耦合效应的概率; $P_{h\dots}, P_{i\dots}, P_{j\dots}, P_{k\dots}, P_{l\dots}$ 分别表示上述五种因素分别处于 h 状态、 i 状态、 j 状态、 k 状态、 l 状态下的概率。根据公式求得的 T 值是对因素间耦合度的表达, 其数值的大小反映了特定组合导致风险事故发生的难易程度。

本文将高层住宅火灾事故风险因素分为 5 类, 5 类因素之间存在 4 种耦合。当高层住宅火灾事故 5 类风险因素间两两发生耦合时, 存在 10 种风险因素耦合组合, 即居民(a)-开发商(b)、居民(a)-物业(c)、居民(a)-社区(d)、居民(a)-监管单位(e)、开发商(b)-物业(c)、开发商(b)-社区(d)、开发商(b)-监管单位(e)、物业(c)-社区(d)、物业(c)-监管单位(e)、社区(d)-监管单位(e), 耦合值分别用 $T_{21}, T_{22}, \dots, T_{29}, T_{210}$ 表示, 以 T_{21} 为例, 其计算公式为:

$$T_{21}(a, b) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I P_{hi\dots} \cdot \log_2 \left(\frac{P_{hi\dots}}{P_{h\dots} \cdot P_{i\dots}} \right) \quad (2)$$

当高层住宅火灾事故风险因素间发生三因素耦合时, 也存在 10 种风险因素耦合组合, 即 $a-b-c, a-b-d, a-b-e, a-c-d, a-c-e, a-d-e, b-c-d, b-c-e, b-d-e, c-d-e$, 耦合值分别用 $T_{31}, T_{32}, \dots, T_{39}, T_{310}$ 表示, 以 T_{31} 为例, 其计算公式为:

$$T_{31}(a, b, c) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J P_{hij\dots} \cdot \log_2 \left(\frac{P_{hij\dots}}{P_{h\dots} \cdot P_{i\dots} \cdot P_{j\dots}} \right) \quad (3)$$

当高层住宅火灾事故风险因素间发生四因素耦合时, 存在 5 种风险因素耦合组合, 即 $a-b-c-d, a-b-c-e, a-b-d-e, a-c-d-e, b-c-d-e$, 耦合值分别用 $T_{41},$

\dots, T_{45} 表示, 以 T_{41} 为例, 其计算公式为:

$$T_{41}(a, b, c, d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K P_{hijk} \cdot \log_2 \left(\frac{P_{hijk}}{P_{h\dots} \cdot P_{i\dots} \cdot P_{j\dots} \cdot P_{k\dots}} \right) \quad (4)$$

当高层住宅火灾事故风险因素间发生五因素耦合全耦合时($a-b-c-d-e$), 可以由公式(1)得出其耦合值, 数量化评估了高层住宅火灾事故系统网络^[23]。当 T_{51} 值较大时, 表明该研究系统中各要素间的关联程度较高, 对该系统进行管理的难度较大^[22]。

2.2 SNA 模型构建

本文构建 SNA 模型的邻接矩阵是基于事故致因分析和专家访谈而得来的, 通过分析总结专家访谈提出的意见, 对研究系统各风险因素之间的关系进行修正, 进一步明确风险因素。将经过完善的邻接矩阵导入 Ucinet6.0 中, 利用其插件 NetDraw 构建风险因素网络图, 将风险因素间的关系可视化(图 1)。图 1 是有向复杂网络, 用箭线来表示风险因素之间的关系, 用箭头来表示风险诱导结果。

基于接近中心度、中介中心度两指标的特性, 本文借助社会网络分析法对高层住宅火灾事故风险因素进行分析。接近中心度是反映网络中某一风险节点处于网络中心程度的指标, 其数值越大, 越接近其他节点, 具有较高效率传递信息的能力。接近中心度 C_c 是点与网络中其他点的捷径距离总和的反函数^[24], 其公式为:

$$C_c(n_i) = \left[\sum_{j=1}^n d(n_i, n_j) \right]^{-1}, (i \neq j) \quad (5)$$

式中, $d(n_i, n_j)$ 表示网路中连接点 i 和点 j 的最少箭线数量(捷径)。

中介中心度是反映网络中某一节点控制整个研究系统网络资源的程度。也就是说, 如果某一节点处在许多两点之间的捷径上, 该点就具有较高的中介中心度^[24], 其公式为:

$$C_B(i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n b_{jk}(i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}, i \neq j \neq k, j < k \quad (6)$$

式中, b_{jk} 表示网络中中间节点 i 处于点对 j, k 之间的捷径上的可能性; g_{jk} 表示节点 j 到节点 k 之间的最少箭线数量; $g_{jk}(i)$ 表示 g_{jk} 中经过节点 i 的捷径数量。

本文基于接近中心度和中介中心度两指标的

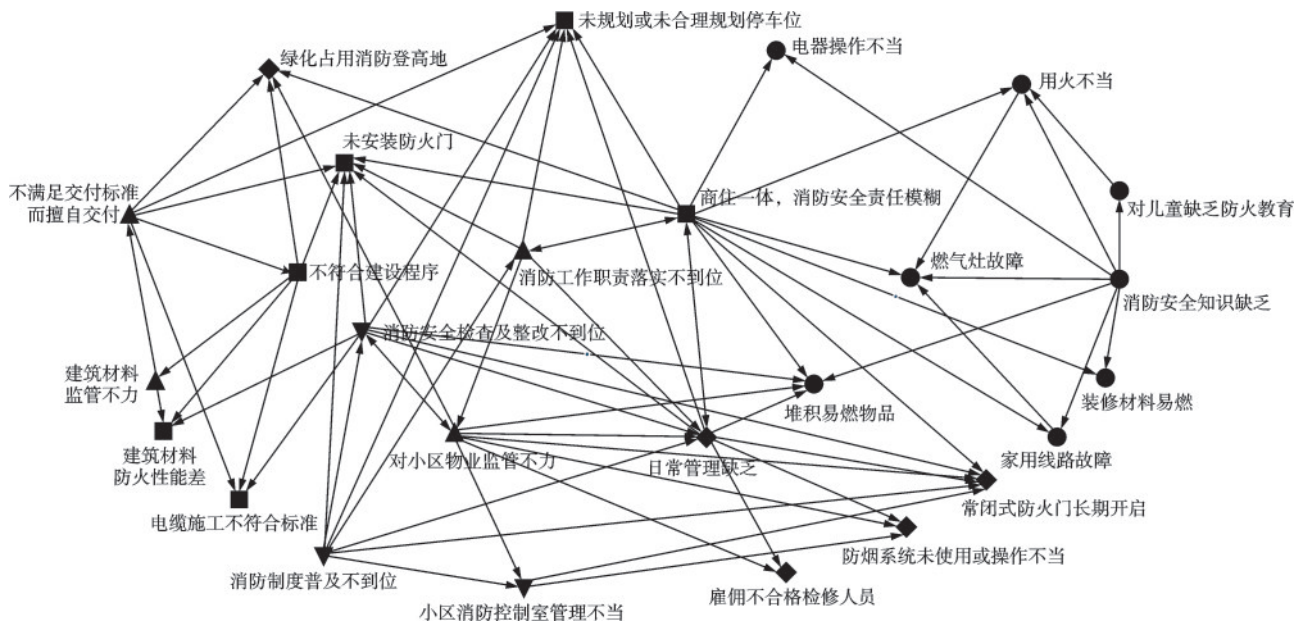


图1 高层住宅火灾事故风险因素关联网络图

Fig.1 Correlation network diagram of risk factors of fire accidents in high-rise residential buildings

特性,确定高层住宅火灾事故风险网络中的关键风险因素。同时,借助复杂社会网络模型中的可达性指标,分析研究系统网络中各风险节点之间传导风险的可能性,明确潜在风险耦合的形式,将其对应到一级风险中,为高层住宅火灾事故风险因素的耦合评估提供基础。

3 高层住宅火灾事故关键风险因素分析

3.1 N-K模型计算结果分析

在N-K模型中,0和1分别表示不利因素未发生和发生的情况。本文居民、开发商、物业、社区及监管单位5类一级风险因素可以构成26种风险耦合情况。根据收集到的162起高层住宅火灾较大事故案例,通过整理和分析得出风险耦合发生的次数和频率(表2)。

计算各种形式风险耦合的T值,首先得计算单因素、双因素、三因素及四因素条件下事故发生的概率,分别以 $P_{0\dots}$, $P_{00\dots}$, $P_{000\dots}$, $P_{0000\dots}$ 为例,其计算过程如式(7)~式(10)所示。按照式(1)~式(4),能够求出不同风险因素之间的耦合值T,计算结果如表3。对耦合值T进行排序有: $T_{51}(a,b,c,d,e) > T_{45}(b,c,d,e) > T_{41}(a,b,c,d) > T_{42}(a,b,c,e) > T_{43}(a,b,d,e) > T_{39}(b,d,e) > T_{31}(a,b,c) > T_{27}(b,e) > T_{26}(b,d) >$

表2 高层住宅火灾事故风险耦合的发生次数及概率(2015-2023年)

Table 2 Frequency and probability of risk factor coupling in fire accidents in high-rise residential buildings (2015-2023)

耦合方式	变量	事故次数及概率
单因素	事故次数	$n_{00000}=0, n_{10000}=8, n_{01000}=2,$ $n_{00100}=0, n_{00010}=0, n_{00001}=0$
	概率	$P_{00000}=0, P_{10000}=0.049, P_{01000}=0.012,$ $P_{00100}=0, P_{00010}=0, P_{00001}=0$
双因素	事故次数	$n_{11000}=15, n_{10100}=10, n_{10010}=2, n_{10001}=0,$ $n_{01100}=4, n_{01010}=1, n_{01001}=8, n_{01011}=5,$ $n_{00101}=0, n_{00011}=0$
	概率	$P_{11000}=0.093, P_{10100}=0.062,$ $P_{10010}=0.012, P_{10001}=0, P_{01100}=0.025,$ $P_{01010}=0.006, P_{01001}=0.049,$ $P_{00110}=0.031, P_{00101}=0, P_{00011}=0$
多因素	事故次数	$n_{11100}=20, n_{11010}=2, n_{11001}=3, n_{10110}=5,$ $n_{10101}=0, n_{10011}=0, n_{01110}=5, n_{01101}=0,$ $n_{01011}=0, n_{00111}=0, n_{11110}=30, n_{11101}=0,$ $n_{11011}=2, n_{10111}=7, n_{01111}=3, n_{11111}=30$
	概率	$P_{11100}=0.123, P_{11010}=0.012,$ $P_{11001}=0.019, P_{10110}=0.031, P_{10101}=0,$ $P_{10011}=0, P_{01110}=0.031, P_{01101}=0,$ $P_{01011}=0, P_{00111}=0, P_{11110}=0.185,$ $P_{11101}=0, P_{11011}=0.012, P_{10111}=0.043,$ $P_{01111}=0.019, P_{11111}=0.185$

表3 不同火灾事故风险因素耦合作用下的风险耦合值 T
Table 3 Risk coupling values T under different risk factor coupling effects for fire accidents

耦合因素	风险耦合变量	风险耦合值
$a-b$	T_{21}	0.501
$a-c$	T_{22}	0.012
$a-d$	T_{23}	0.003
$a-e$	T_{24}	0.004
$b-c$	T_{25}	0.499
$b-d$	T_{26}	0.501
$b-e$	T_{27}	0.519
$c-d$	T_{28}	0
$c-e$	T_{29}	0.002
$d-e$	T_{210}	0.077
$a-b-c$	T_{31}	0.543
$a-b-d$	T_{32}	0.211
$a-b-e$	T_{33}	0.164
$a-c-d$	T_{34}	0
$a-c-e$	T_{35}	0.079
$a-d-e$	T_{36}	0.141
$b-c-d$	T_{37}	0
$b-c-e$	T_{38}	0.479
$b-d-e$	T_{39}	0.614
$c-d-e$	T_{310}	0.132
$a-b-c-d$	T_{41}	0.763
$a-b-c-e$	T_{42}	0.754
$a-b-d-e$	T_{43}	0.729
$a-c-d-e$	T_{44}	0.446
$b-c-d-e$	T_{45}	0.885
$a-b-c-d-e$	T_{51}	1.044

$$T_{21}(a,b) > T_{25}(b,c) > T_{38}(b,c,e) > T_{44}(a,c,d,e) > T_{32}(a,b,d) > T_{33}(a,b,e) > T_{36}(a,d,e) > T_{310}(c,d,e) > T_{35}(a,c,e) > T_{210}(d,e) > T_{22}(a,c) > T_{24}(a,e) > T_{23}(a,d) > T_{29}(c,e) > T_{28}(c,d) = T_{34}(a,c,d) = T_{37}(b,c,d)。$$

$$P_{0\dots} = P_{00000} + P_{01000} + P_{00100} + P_{00010} + P_{00001} + P_{01100} + P_{01010} + P_{01001} + P_{00110} + P_{00101} + P_{00011} + P_{01110} + P_{01101} + P_{01011} + P_{00111} + P_{01111} = 0.173 \quad (7)$$

$$P_{00\dots} = P_{00000} + P_{00100} + P_{00010} + P_{00110} + P_{00101} + P_{00011} + P_{00111} = 0.031 \quad (8)$$

$$P_{000\dots} = P_{00000} + P_{00010} + P_{00001} + P_{00011} = 0 \quad (9)$$

$$P_{0000\dots} = P_{00000} + P_{00001} = 0 \quad (10)$$

通过对比分析表3中不同风险因素之间的耦合值 T , 可以得出如下内容。

(1) 纵向分析耦合值 T , 其随着耦合因素的增多而变大, 表明后续高层住宅火灾事故防控工作所关注和采取措施的重点是控制多风险因素耦合的发生。

(2) 五因素风险耦合值 T_{51} 的值显著高于相关研究中机坪管制系统运行安全事故的0.735 3^[25]、施工塔吊安全事故0.349 1^[22]、建设项目总体安全事故的0.252 8^[15], 在一定程度上说明高层住宅火灾事故风险因素之间的关系更为复杂, 其管理难度更大。

(3) 四因素风险耦合中, 开发商-物业-社区-监管单位、居民-开发商-物业-社区、居民-开发商-物业-监管单位、居民-开发商-社区-监管单位的耦合值明显高于除了五因素风险耦合之外的其他耦合组合方式, 其中开发商-物业-社区-监管单位耦合值最大, 居民-物业-社区-监管单位耦合值最小, 表明高层住宅火灾事故与开发商-物业-社区-监管单位组成的子系统的联系较为紧密。现实中, 虽然高层住宅火灾的起火原因是居民因素的概率较大, 但是造成火灾灾情扩大及严重程度上升的责任仍然在于开发商、物业、社区及监管单位。

(4) 三因素风险耦合中, 开发商-社区-监管单位的耦合值最大, 相较于其他三因素风险耦合, 更容易导致事故的发生。其中 $T_{34}(a,c,d)$ 和 $T_{37}(b,c,d)$ 的耦合值为0, 将二者与 $T_{44}(a,c,d,e)$ 和 $T_{45}(b,c,d,e)$ 对比分析, 监管单位对开发商、物业、社区监管不到位将扩大耦合风险, 因为当监管单位监管不到位时, 居民方一旦出现不利因素, 则事故一触即发。

(5) 双因素风险耦合中, 开发商-监管单位的耦合值最大为0.519, 比其他双因素风险耦合形式要高, 这意味着更容易发生事故。在实际案例中, 建筑材料防火性能差、电缆施工不符合标准、未安装防火门、商住一体、材料监管不力等风险因素的出现很容易导致火灾事故的发生。

3.2 SNA 模型结果分析

3.2.1 研究系统网络风险因素中心度分析

借助 UCINET6.0 软件及风险因素邻接矩阵, 得到的风险因素网络中各节点的接近中心度及中介中心度(表4)。由于风险因素网络复杂有向, 所以表4中接近中心度有两个指标, 即出度和入度。入度表示该节点风险因素被诱发的难易程度。根据表4, 入度结果排名前5的有: 电器操作不当R6、未安装防火门R12、未规划或合理规划停车位R13、

绿化占用消防登高地 R17、建筑材料防火性能差 R9,可见物业和开发商的风险因素在一定程度上更容易被诱发。出度表示该节点风险因素能够诱发其他风险因素的程度。出度结果排名前5的有:消防制度宣传不到位 R22、商住一体,消防安全责任模糊 R14、消防工作职责落实不到位 R26、对小区物业监管不力 R25、消防安全检查及整改不到位 R20,可见社区和监管单位的不利因素容易诱发其他风险因素。中介中心度排名前5的有:商住一体,消防安全责任模糊 R14、日常管理缺乏 R15、对小区物业监管不力 R25、消防工作职责落实不到位 R26、消防安全检查及整改不到位 R20。可以看出,通过避免开发商、社区、监管单位风险因素的出现,可以阻断风险节点间的连通,避免系统风险的形成。

表4 风险因素的标准化接近中心度和中介中心度

Table 4 Standardized proximity centrality and intermediate centrality of risk factors 单位:%

风险因素	接近中心度		中介中心度
	入度	出度	
R1	5.241	3.846	0
R2	5.459	4.000	0.167
R3	4.000	4.160	0
R4	5.176	3.846	0
R5	5.176	4.000	0
R6	6.112	3.846	0
R7	5.176	3.846	0
R8	3.846	5.263	0
R9	5.734	3.846	0
R10	5.721	3.846	0
R11	4.160	5.230	0.167
R12	5.855	3.846	0
R13	5.828	3.846	0
R14	4.735	13.298	5.944
R15	4.762	12.626	4.153
R16	5.219	3.846	0
R17	5.800	3.846	0
R18	4.960	3.846	0
R19	5.252	3.846	0
R20	4.708	13.021	2.042
R21	4.931	4.167	0.083
R22	3.846	14.793	0
R23	4.160	5.208	0.333
R24	4.160	5.252	1
R25	4.726	13.021	2.944
R26	4.717	13.089	2.333

本文通过分析风险网络中的关键节点发现,出度排名较前的均是诱发事故发生的根本原因,因此以出度这一指标为参考,确定关键风险因素。

3.2.2 研究系统网络风险因素可达性分析

通过风险因素可达性分析,可以挖掘出风险因素的发展态势和诱发其他风险因素出现的可能性。为揭示风险因素间的潜在耦合形式,本文根据系统网络的可达性分析和N-K模型结果,将26个风险因素节点的可达性与5个一级风险因素对应(表5)。

由表5可知,潜在的耦合形式主要以五因素(系统)耦合和三因素耦合为主。其中,开发商、物业、社区、监管单位均可导致五因素耦合的发生,但监管单位引发的可能性更大,同时其引发三因素耦合的可能性也大于其他相关方。

表5 风险因素节点的可达性分析

Table 5 Accessibility analysis of risk factor nodes

风险因素	a	b	c	d	e	潜在耦合形式
R1	0	0	0	0	0	a
R2	1	0	0	0	0	a
R3	1	0	0	0	0	a
R4	0	0	0	0	0	a
R5	1	0	0	0	0	a
R6	0	0	0	0	0	a
R7	0	0	0	0	0	a
R8	1	0	0	0	0	a
R9	0	0	0	0	0	b
R10	0	0	0	0	0	b
R11	0	1	1	0	1	b-c-e
R12	0	0	0	0	0	b
R13	0	0	0	0	0	b
R14	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e
R15	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e
R16	0	0	0	0	0	c
R17	0	0	0	0	0	c
R18	0	0	0	0	0	c
R19	0	0	0	0	0	c
R20	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e
R21	0	0	0	1	0	c
R22	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e
R23	0	1	1	0	1	b-c-e
R24	0	1	1	0	1	b-c-e
R25	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e
R26	1	1	1	1	1	a-b-c-d-e

3.3 模型结果修正分析

由于SNA模型的邻接矩阵包含较大的主观性,其分析得出的结果可能与实际发生的事故存在一定的偏差,而N-K模型的分析结果是基于实际事故数据的,客观性较强。因此将二者结合,从定性与定量相结合、主观与客观相结合的角度对二者结果进行修正结合,以保证准确判断出事故风险的关键因素。本文结合表3和表5以获得修正系数 T_r ,对表4中风险因素接近中心度的出度进行修正(图2),将其作为判断关键风险因素的依据。图2(a)为修正前风险节点基于复杂网络接近中心度的出度,图2(b)为根据 T_r 修正后的风险节点接近中心度出度。

通过图2,排名较高的风险因素主要是监管单位、社区、开发商和物业的不利因素,主要有消防工作职责落实不到位 R_{26} 、对小区物业监管不力 R_{25} 、

消防制度宣传不到位 R_{22} 、消防安全检查及整改不到位 R_{20} 、商住一体,消防安全责任模糊 R_{14} 、日常管理缺乏 R_{15} ,这与修正前的结果一致,表明基于实际案例数据消除主观影响后得到的关键风险因素与社会网络分析结果相一致。其中,变化较大的是居民方的不利因素,这表明在实际中,火灾事故的起因在较大程度上是居民的原因,而造成灾情扩大、程度升级的主要在于剩余四方的不利因素。这就需要监管单位加强对社区、开发商、物业的监管,提高物业公司的准入条件,严防开发商违反建设程序、使用不合格材料、运营模式混乱等。

4 结论

本文以收集到的实际事故案例数据为基础,结合N-K模型和SNA模型,将其应用到高层住宅火灾安全领域,识别并分析高层住宅火灾事故的关键风险因素,得到如下结论:

(1) 基于N-K模型得出的结果,在高层住宅火灾安全中避免多因素耦合是防控事故发生的重要工作。灾情的扩大与开发商-物业-社区-监管单位联系更为紧密。

(2) 开发商-监管单位之间的耦合值在双因素耦合中最高,导致事故发生的可能性较大,应将其作为防范的重点。一是加强开发商在前期施工过程中的监管,主要在于建筑材料和建设程序方面;二是加强开发商在后期运营过程中的监管,重点在于运营模式、小区内部规划、消防安全设施的配备与使用情况;三是要防止监管单位将不满足交付标准的住宅擅自允许开发商交付。

(3) 基于SNA模型,发现商住一体,消防安全责任模糊、日常管理缺乏、对小区物业监管不力、消防工作职责落实不到位、消防安全检查及整改不到位等因素中介中心度较高,所以避免开发商、社区、监管单位风险因素的出现是阻断风险节点间连通的有效手段,能够防止系统风险的形成。

(4) 基于N-K和SNA,发现监管单位、社区、开发商和物业的不利因素容易引发多因素耦合效应,但监管单位引发的可能性更大。因此,需要监管单位高度自觉、尽职尽责,严守施工关、运营关和物业准入关。

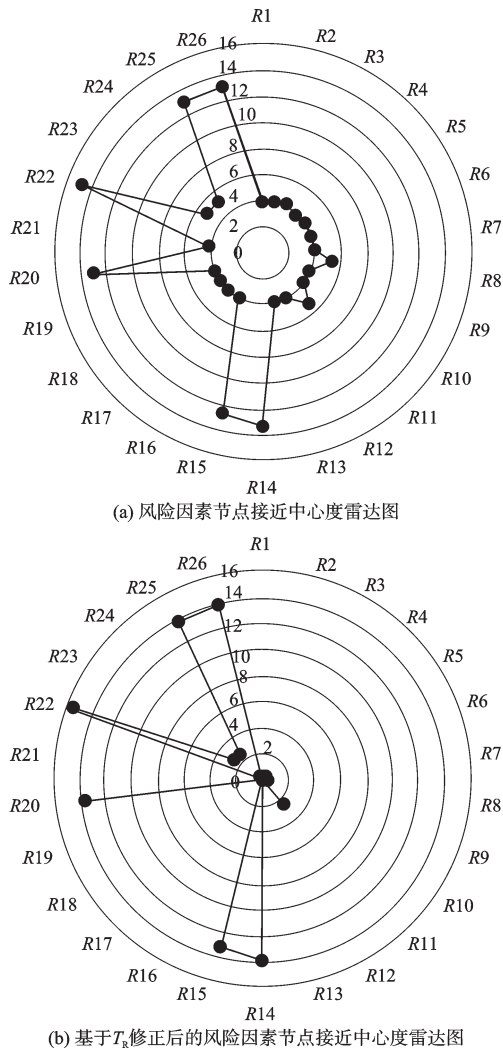


图2 风险因素接近中心度修正结果

Fig.2 Corrected results of proximity centrality for risk factors

(5) 社会对高层住宅火灾事故的关注不应仅局限于居民和地域,应拓展到住宅项目前期决策、施工过程、运营模式等方面,加强社会对相关监管单位、社区、物业、开发商的监督。

参考文献:

- [1] 民用建筑设计统一标准:GB 50352—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [2] 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) [2023-12-19]. <http://www.119.gov.cn/qmxfkg/sjtj/2023/38420.shtml>.
- [3] 张彤彤,曹笛.火灾环境下超高层建筑标准层人员疏散模拟与空间优化策略[J].建筑学报,2022(2):16-21.
Zhang T T, Cao D. Evacuation simulation and spatial optimization strategies of the standard floors of super high-rise buildings caught in fire[J]. Journal of Architecture, 2022(2): 16-21. (in Chinese)
- [4] Glauber G H. Factors influencing fire safety and evacuation preparedness among residential high-rise building occupants[D]. Hawaii: University of Hawaii at Manoa, 2018.
- [5] 刘诗瑶,赵利宏.国内外超高层公共建筑疏散路径对比研究[J].消防科学与技术,2019,38(1):95-98.
Liu S Y, Zhao L H. Comparative study on evacuation routes in super high-rise buildings in China and other countries[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(1): 95-98. (in Chinese)
- [6] 任文,赵金城,华莹.火灾下建筑结构抗火性能和人员疏散研究[J].防灾减灾工程学报,2018,38(1):168-177.
Ren W, Zhao J C, Hua Y. Study of fire resistance of building structures and evacuation under fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(1): 168-177. (in Chinese)
- [7] 刘晗,王健.基于Fine Kinney和Dematel理论的城市火灾风险评估[J].消防科学与技术,2018,37(12):1730-1734.
Liu H, Wang J. Urban fire risk assessment based on Fine Kinney and Dematel assessment theories[J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(12): 1730-1734. (in Chinese)
- [8] Yin J, Tang T, Zhang G, et al. A probabilistic model for fire temperature rise in high-rise residential buildings under the action of uncertain factors[J]. Fire, 2023, 6(4): 147.
- [9] 朱春玲,邱仓虎,李水生,等.超高层建筑施工期火灾危险源研究与防控措施[J].建筑科学,2020,36(11):145-149.
Zhu C L, Qiu C H, Li S S, et al. Research on fire hazard sources and prevention measures during construction process of super high-rise buildings[J]. Architectural Science, 2020, 36(11): 145-149. (in Chinese)
- [10] Jodi M M, Selamet S, Wang Y C. City-wide fire vulnerability map of high-rise residential buildings[J]. Fire Technology, 2023, 59(2): 401-428.
- [11] 李玉梅,王广勇,戴林.火灾后钢筋混凝土板力学性能评估方法[J].防灾减灾工程学报,2024,44(2):389-395.
Li Y M, Wang G Y, Dai L. Post-fire mechanical performance evaluation method of reinforced concrete slabs[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(2): 389-395. (in Chinese)
- [12] 王玉镗,邱昊,徐天贵,等.火灾中钢筋混凝土两端固结梁破坏模式变化规律[J].防灾减灾工程学报,2024,44(1):192-201.
Wang Y Z, Qiu H, Xu T G, et al. Change law of failure modes of reinforced concrete beams with fixed ends in fire[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(1): 192-201. (in Chinese)
- [13] Hansen N D, Steffensen F B, Valkvist M, et al. A fire risk assessment model for residential high-rises with a single stairwell [J]. Fire Safety Journal, 2018, 95: 160-169.
- [14] 陈星霖,林卫东,黄晓冬,等.基于模糊贝叶斯网络的超高层建筑火灾风险评估[J].安全与环境工程,2023,30(6):40-47.
Chen X L, Lin W D, Huang X D, et al. Fire risk assessment of super high-rise buildings based on fuzzy bayesian network [J]. Safety and Environment Engineering, 2023, 30(6): 40-47. (in Chinese)
- [15] 严小丽,胡兴俊,王银志.建设项目施工安全风险耦合及其应对——基于人因视角[J].安全与环境工程,2016,23(6):106-113.
Yan X L, Hu X J, Wang Y Z. Coupling mechanism of safety risk in construction projects and the countermeasures: from the perspective of construction workers[J]. Safety and Environment Engineering, 2016, 23(6): 106-113. (in Chinese)
- [16] Kauffman S. The origins of order: self-organization and selection in evolution[M]. New York: Oxford University Press, 1993.

(本文编辑:周小潭)

(下转第178页)