

基于文本挖掘的 WUI 火灾致灾因子网络构建及特征分析^①



袁 惠¹, 钟少波², 靳 薇³

¹(北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

²(北京市科学技术研究院 城市系统工程研究所, 北京 100089)

³(北京市新技术应用研究有限公司, 北京 100094)

通信作者: 靳 薇, E-mail: jinwei201002@163.com

摘 要: 为预防和减少 WUI 火灾的发生, 挖掘 WUI 火灾关键致灾因子, 厘清致灾因子间的作用机制. 本文首先基于文本挖掘技术从 WUI 火灾事故案例中得到致灾因子, 使用 Apriori 算法得到致灾因子之间的关联规则. 然后使用复杂网络理论构建 WUI 火灾致灾因子网络, 计算网络拓扑特征参数, 探析 WUI 火灾致灾因子网络特征. 最后引入 WUI 火灾致灾链风险度指标, 挖掘出高风险连边, 并提出断链措施. 结果表明: WUI 火灾致灾因子网络具有小世界特性, 高温、强风、干旱等对其他致灾因子影响较大. 燃烧废弃物、植物起火、应急响应速度、人为纵火、强风在不同致灾因子转换中具有重要作用, 应加强管控. 网络中风险度最高的边是燃烧废弃物→植物起火, 通过颁布禁止擅自燃烧废弃物等规定, 即可切断该风险链, 实现对 WUI 火灾的预防和主动控制.

关键词: WUI 火灾; 致灾因子; 文本挖掘; 复杂网络; 拓扑特征; 风险度

引用格式: 袁惠, 钟少波, 靳薇. 基于文本挖掘的 WUI 火灾致灾因子网络构建及特征分析. 计算机系统应用. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/9527.html>

Construction and Characterisation of WUI Fire Causal Factor Network Based on Text Mining

YUAN Hui¹, ZHONG Shao-Bo², JIN Wei³

¹(School of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

²(Institute of Urban Systems Engineering, Beijing Academy of Science and Technology, Beijing 100089, China)

³(Beijing Institute of New Technology Application, Beijing 100094, China)

Abstract: To prevent and reduce the occurrence of WUI fires, this study mines the key causal factors of WUI fires and clarifies the action mechanism between the causal factors. First, this study obtains the causal factors from WUI fire accident cases based on the proposed mining technology and uses the Apriori algorithm to obtain association rules between the causal factors. Then it uses the complex network theory to construct the WUI fire causal factor network, calculate the topological parameters of the network, and analyze the characteristics of the WUI fire causal network. Finally, the study introduces the risk index of the WUI fire causal chain, mines the high-risk connecting edges, and proposes the chain breaking measures. The results show that the WUI fire causal factor network has a small-world characteristic, and high temperature, strong wind, and drought have a greater influence on other causal factors. Burning waste, plant fire, emergency response speed, human arson, and strong wind have important roles in the conversion of different causal factors, which should be controlled better. The most risky side of the network is burning waste → plant fire, and the risk chain can be cut off by enacting regulations such as the prohibition of unauthorized burning waste, to achieve the prevention and active control of WUI fires.

Key words: WUI fire; causal factor; text mining; complex network; topological feature; risk degree

^① 基金项目: 国家自然科学基金 (72174031)

收稿时间: 2023-12-21; 修改时间: 2024-01-23; 采用时间: 2024-01-29; csa 在线出版时间: 2024-04-19

WUI (wildland-urban interface, WUI) 是指城市周边地区, 野外和城市之间的交界处。随着全球气候变化的不断加剧以及城镇化发展和森林城市建设, 城镇森林交界区域不断扩大, 城镇森林交界区域火灾逐渐成为一个严重的环境问题。WUI 火灾指的是发生在 WUI 区域的火灾事件, 这些火灾不仅对人类生命和财产造成巨大威胁, 还对生态系统和环境产生长期的负面影响。因为交界域内同时具有丰富的森林可燃物和密集的建筑与人群, 使得火灾发生的概率大大增加, 同时 WUI 火灾一旦发生后产生的危害相比于传统的森林火灾或城市火灾也显著提升, 扑救难度也更大。因此, 对 WUI 火灾的致灾因子及其关系进行梳理, 及时预防火灾发生就显得尤为重要。

WUI 火灾的成因是一个复杂的问题, 涉及多个因素的相互作用。Rodriguez-Jimenez 等^[1]基于区域案例研究了 WUI 地区森林火灾规模和严重程度的驱动因素和趋势。Liu 等^[2]基于 2004–2020 年京津冀地区的山火数据研究了山火的影响因素, 并对山火与 WUI 区域进行了相关性分析。Li 等^[3]基于泉州市清源山西南角的遥感数据、气象数据和植被信息, 将火灾风险影响因素数字化, 并通过层次分析法和燃烧概率计算, 对城镇森林交界域进行了火灾风险划分。Zhang 等^[4]基于火灾数据, 使用 SPSS 软件对火灾要素进行相关性分析, 建立线性回归分析模型, 分析东北地区森林火灾的影响要素。上述研究皆从整体视角使用数值分析方法研究火灾在各种情景下的影响因素, 但并未考虑各影响因素之间的关系。

复杂网络是理解实际世界中复杂系统的一种有效抽象模型。在这个模型中, 系统内的各个实体被概念化为网络的节点, 而实体间的交互关系则通过连接线来表示。2000 年以来, 复杂网络研究迅速应用到计算机网络^[5–7]、生物网络^[8–10]、技术网络^[11–13]、大脑网络^[14–16]、气候网络^[17–19]和社会网络^[20–22]等实践领域。近年来, 基于复杂网络的研究方法在灾害研究领域得到了广泛应用, 为我们深入理解灾害的成因提供了新的视角。如 Xu 等^[23]在其研究中将风险元素视作网络的节点, 并把风险之间的演化关系视为网络中的链条, 基于复杂网络理论, 构建了一个包含 422 条风险链的数据集, 专注于分析城市轨道交通运营中的风险及其演化过程。刘洪良等^[24]基于复杂网络理论, 将灾害事件作为网络节点, 事件关联关系为网络连接边, 构建了深圳市台风灾

害复杂网络, 进而识别台风灾害网络中的重要环节, 得到风险较高的灾害演化链条, 为防灾减灾提供参考。吴书强等^[25]以高校火灾案例为研究数据建立了高校火灾灾害链网络拓扑结构和风险评价模型, 计算其灾害链风险度, 提高高校火灾灾害应急处置能力和决策水平, 为其防灾减灾策略的制定提供参考。宋英华等^[26]灾害链和复杂网络理论, 构建了 WUI 火灾灾害链演化模型, 为火灾防控提供科学依据。上述研究虽然开拓了复杂网络在灾害领域的研究视角, 但在实际网络构建过程中, 对于网络中节点和边的定义具有较强的主观性, 需要一种科学的方法定义网络节点和节点之间的联系, 从而构建出科学合理的复杂网络模型。文本挖掘是一种从文本数据中获取有价值信息和知识的一种方法, 具有从大规模文本集中发现新关系的特点^[27,28], 晋良海等^[29]使用文本挖掘技术从建筑工程施工安全生产事故调查报告中提取出了工程事故的主要致因要素。Qiu 等^[30]运用文本挖掘技术和卡方统计提取了煤矿事故的致因要素, 并基于 Apriori 算法确定了各致因要素之间的关联规则。陈芳等^[31]使用潜在狄利克雷分配模型 (LDA) 从空中危险接近事故案例文本中提取了致因主题和关键词, 并基于全局词向量模型 (GloVe) 分析了各主题和关键词之间的潜在关系。

综上所述, 文本挖掘已经在交通、矿山、建筑工程等领域得到广泛应用, 但鲜见于 WUI 火灾事故的分析, 并且现有应用普遍缺乏对挖掘信息深入的关联分析。本文拟采用文本挖掘技术从 WUI 火灾案例事故中提取出 WUI 火灾致灾因子, 并使用 Apriori 算法确定致灾因子间的关联规则, 再基于复杂网络理论, 以致灾因子为节点, 关联规则为边构建 WUI 火灾致灾因子网络模型, 从多个角度揭示其网络特征, 更好地理解 WUI 火灾的致因机制, 并为火灾预防和管理提供科学依据。这将有助于制定更有效的政策和措施, 减少 WUI 火灾的发生和蔓延, 保护人类生命和财产, 维护生态平衡和环境可持续发展。

1 WUI 火灾事故的文本挖掘

1.1 数据来源

本文通过网络爬虫, 收集整理了 2010–2022 年近 300 起全球范围内的 WUI 火灾事故的数据, 包括由于长期高温干旱, 导致过火面积 25 万亩, 33 人死亡, 经济损失 1 000 亿澳元的澳大利亚 WUI 火灾; 以及人为纵

火导致的过火面积 885 万亩, 8.8 万人疏散的加拿大 WUI 火灾; 还有建筑物失火导致 89 人死亡的阿尔及利亚 WUI 火灾等典型 WUI 火灾事故. 特别值得注意的是, 其中有 22 起被分类为特别重大事故, 还包括 38 起重大事故、56 起较大事故和 93 起一般事故, 其余 111 起事故未发生人员死亡.

1.2 文本挖掘

以 300 个 WUI 火灾事故案例为数据基础, 对其进行文本挖掘, 文本的挖掘流程包括文本预处理、数据分析、结果可视化 3 个部分, 如图 1 所示.



图 1 文本挖掘流程

1.3 致灾因子及词云图

运用文本挖掘技术从收集到的 300 份事故案例中得到了 WUI 火灾事故得致灾因子, 主要包括高温、强风、干旱、祭祀失火、燃烧废弃物等共 17 个致灾因子, 记 $G_i = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_{17}\}$ 为致灾因子集, 具体如表 1 所示. 据此绘制的词云图如图 2 所示, 词云字体的大小表征 WUI 火灾致灾因子出现的频次, 其中植物起火、建筑起火、高温、干旱、人为纵火出现较多, 是 WUI 火灾的主要致灾因子.

表 1 致灾因子及编号

编号	致灾因子	编号	致灾因子	编号	致灾因子
G_1	高温	G_7	农事用火	G_{13}	野外施工
G_2	强风	G_8	人为纵火	G_{14}	电器火灾
G_3	干旱	G_9	雷击	G_{15}	建筑起火
G_4	祭祀失火	G_{10}	植物起火	G_{16}	燃料起火
G_5	未熄灭烟头	G_{11}	电路故障	G_{17}	燃放爆竹
G_6	燃烧废弃物	G_{12}	应急响应速度	—	—



图 2 WUI 火灾致灾因子词云图

1.4 致灾关联分析

(1) 关联规则

在分析事故致灾因子之间的关联性时, 关联规则^[32]通常应用 3 个关键指标: 支持度、置信度和提升度, 这些指标能够有效地揭示各致灾因子间的相互关系和依赖程度^[33]. 其常用的蕴含式为 $I \Rightarrow J$, 本文将 WUI 火灾致灾因子集设为项目集合 $G = \{G_1, G_2, G_3, \dots, G_{17}\}$, $I, J \in G$ 且 $I \cap J = \emptyset$, I, J 为项集, 项集 I 为关联规则的先导, 项集 J 为关联规则的后继, 在本文中, I, J 分别为不同的 WUI 火灾事故中出现的致灾因子集合. Apriori 算法主要包含挖掘所有频繁项集和产生关联规则这两部分内容^[34-36]. 具体运算过程如下.

1) 初始数据库扫描: 对数据库进行扫描以确定初始的候选 1 项集.

2) 支持度计算与筛选: 计算候选 1 项集的支持度, 并移除那些低于最小支持度阈值的项集, 从而得到频繁 1 项集.

3) 候选项集生成与剪枝: 将频繁 1 项集相互结合, 生成候选 2 项集, 并进行剪枝处理以排除非潜在频繁项集.

4) 进一步筛选: 计算候选 2 项集的支持度, 并剔除那些低于最小支持度阈值的项集, 得到频繁 2 项集.

5) 迭代循环: 重复步骤 2)–4), 直至无法生成新的频繁项集, 此时所有频繁项集已被找出.

6) 强关联规则挖掘: 对所有频繁项集计算置信度, 并删除低于最小置信度阈值的项集, 以得到强关联规则.

(2) 致灾因子关联规则挖掘

关联规则的挖掘结果受最小支持度和最小置信度的影响, 本文分别选取 0.1 为最小支持度, 0.3 为最小置信度, 最终共产生 122 条关联规则, 去除提升度小于 1, 置信度小于 0.5 的关联规则, 得到 103 条关联明显且有意义的关联规则, 部分关联规则见表 2.

表 2 致灾因子关联规则 (部分)

序号	关联规则	支持度	置信度	提升度
1	人为纵火 $\Rightarrow$ 植物起火	0.22	0.92	1.15
2	高温 $\Rightarrow$ 植物起火	0.30	0.88	1.10
3	雷击/植物失火 $\Rightarrow$ 建筑起火	0.10	0.83	1.60
...	...	...	...	...
50	燃烧废弃物 $\Rightarrow$ 建筑起火/植物起火	0.12	0.6	1.15
51	祭祀失火/植物起火 $\Rightarrow$ 建筑起火	0.10	0.71	1.37
...	...	...	...	...
102	人为纵火/植物起火 $\Rightarrow$ 建筑起火	0.14	0.64	1.22
103	燃料起火/建筑起火 $\Rightarrow$ 电器起火	0.10	0.71	3.97

关联规则的支持度反映了规则两端的致灾因子同时出现的概率,而置信度表示关联规则的先导发生时,后继发生的概率,如表2中的关联规则1,人为纵火和植物起火在WUI火灾事故中同时出现的概率高达22%,在人为纵火发生的前提下,植物起火的概率有91%。因此,在日常的WUI火灾事故防范中,要做好防火安全教育,以及在发生人为纵火情况时,及时制造隔离带,防止火情通过植物燃烧进一步扩大。

2 WUI火灾致灾因子网络构建及分析方法

2.1 网络构建

本文基于复杂网络理论,将导致WUI火灾的各种因素抽象为网络节点,并将因素之间的关联规则分析结果抽象为网络的边,形成了一个WUI火灾致灾因子复杂网络模型。复杂网络模型作为典型的复杂系统,研究复杂系统中个体间的相互作用及整体网络的拓扑结构,对于揭示复杂系统的性质和功能具有重要意义。基于前文得到的致灾因子和关联规则,使用Ucinet软件构建WUI火灾致灾因子网络模型。

2.2 分析方法

本文从网络整体特征、个体特征、断链减灾措施、致因链风险度4个方面对WUI火灾致灾因子网络进行特征分析,涉及指标如下。

(1) 节点度

节点度是复杂网络的一个重要统计量,也叫度数中心度,定义为节点的邻边数。一个节点的度可记为 k_i ,其中 a_{ij} 为邻接矩阵的矩阵元,当节点 i 与 j 存在关系时 $a_{ij}=a_{ji}=1$,否则为0。其计算方法如式(1)所示:

$$k_i = \sum_{j \in n} a_{ij} \quad (1)$$

其中, n 为网络中的节点数。

(2) 网络密度

网络密度是指网络中实际存在的边数与可能存在的边数之间的比例,可表示为式(2):

$$\rho = \frac{2m}{n(n-1)} \quad (2)$$

其中, $n(n-1)$ 表示网络中可能存在的最大关系数量, m 代表网络中实际存在的边数。

(3) 集聚系数

集聚系数能够衡量整个网络的连接密集程度。在本文构建的WUI火灾致灾因子网络中,集聚系数能刻

画出各致灾因子间的关联性强弱。因此,本文将集聚系数作为评估断链分析效果的重要指标,帮助理解和减缓灾害的影响。节点 i 的集聚系数方法如式(3)所示:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (3)$$

其中, E_i 为节点 i 的邻居节点间存在的连边数。

进一步的,整体网络的集聚系数计算方法如式(4)所示:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

(4) 平均路径长度

平均路径长度描述了网络中节点间路径长度的平均值,用于衡量在网络中传播信息或资源的效率。平均路径长度,在本文的WUI致灾因子网络中,平均路径长度值可用于衡量任意两个致灾因子之间的转换步骤是多少。可由式(5)计算:

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

其中, d_{ij} 为节点 i 和 j 之间的距离。

(5) 节点介数

节点介数也叫介数中心度,用来衡量网络中节点的平均影响力或者重要性,其计算方法如式(6)所示:

$$B_i = \sum_{j \neq l} \frac{N_{jl}(i)}{N_{jl}} \quad (6)$$

其中, N_{jl} 为节点 j 和节点 l 之间的最短路径条数, $N_{jl}(i)$ 为节点 j 和节点 l 之间的最短路径中,路过节点 i 的路径数量。

网络的平均介数中心度计算方法如式(7)所示:

$$B = \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} B_i \quad (7)$$

(6) 边介数

边介数是网络中通过该边的最短路径数目,边介数越大,则该边对网络抗毁性影响也越大,边介数的计算方法如式(8)所示^[37]:

$$B_{ij} = \sum_{l \neq p, \{l,p\} \neq \{i,j\}} \frac{N_{lp}(e_{ij})}{N_{lp}} \quad (8)$$

其中, N_{lp} 为节点 l 和节点 p 之间的最短路径条数, $N_{lp}(e_{ij})$ 为节点 l 和节点 p 之间最短路径路过边 e_{ij} 的条数。

(7) 致灾链风险度

本文为更深入考虑 WUI 火灾致灾因子间的影响关系,引入风险度指标^[38,39]进一步度量实际火灾发生中各致灾因子导致的火灾频率,其计算方法如式 (9) 所示:

$$R_{ij} = P_{ij}Q_jV_{ij} \tag{9}$$

其中, P_{ij} 为边 ij 的致灾率; Q_j 为 j 所引起的损失, 本文取 j 的度数中心度; V_{ij} 为边 ij 的脆弱度.

本文使用 Jaccard 指数来计算连边 ij 的致灾率 P , 如式 (10) 所示:

$$P_{ij} = \frac{C_{ij}}{C_i + C_j - C_{ij}} \tag{10}$$

其中, C_{ij} 为致灾因子 i 导致致灾因子 j 发生的频数, 即因子 i 对因子 j 影响的次数; C_i 和 C_j 分别表示因子 i 和 j 单独出现的频数.

网络中任意边的脆弱度计算方法如式 (11) 所示:

$$V_{ij} = \frac{B_{ij}L_{ij}}{H_{ij}} \tag{11}$$

其中, B_{ij} 为边 ij 的介数; L_{ij} 为移除边 ij 后网络的平均路径长度; H_{ij} 为移除边 ij 后网络的连通度.

网络连通度的计算方法见式 (12):

$$H_{ij} = \frac{n_{ij}}{n} \tag{12}$$

其中, n_{ij} 移除边 ij 后能够连通的节点数; n 为原始网络的总节点数.

3 WUI 火灾致灾因子网络特征分析

3.1 整体特征分析

在本文中,为了度量 WUI 火灾致灾因子网络的整体特征,选取了一系列致灾因子网络指标,这些指标的详细数据和分析结果如表 3 所示.

表 3 致灾因子网络拓扑性指标

指标名称	指标值	指标名称	指标值
节点个数	17	集聚系数	0.732
连边数	99	网络直径	4
平均度	5.824	网络密度	0.364
平均路径长度	1.764	连通性	0.827

根据表 3 数据可知: 本文构建的 WUI 火灾致灾因子网络直径为 4, 表明网络中任意两个节点之间的最大距离不会超过 4, 且连通性为 0.827 (取值范围 0-1), 网络连通性较高, 这意味着 WUI 火灾致灾因子

之间的距离较小, 相互间的联系也很紧密^[40]. 此外, 网络的集聚系数为 0.732 (取值范围 0-1), 网络集聚系数大而平均距离小, 表明该网络具有小世界特征^[41], 属于小世界网络, 在这种网络中, 不同的致灾因子之间的平均转换次数仅为 1.764 次, 意味着 WUI 火灾的致灾路径相对较短.

3.2 个体特征分析

WUI 火灾致灾因子网络中各节点的个体特征计算结果如图 3 所示, 根据图 3 的分析结果, 在本文构建的致灾因子网络中, 具有较高连出度和较低连入度的致灾因子包括高温、强风、干旱、雷击和野外施工, 这些因子对其他致灾因子具有显著影响. 而那些具有较高连入度和较低连出度的致灾因子, 如燃烧废弃物、电器起火、建筑起火和燃料起火, 则更易受到其他因子的影响.

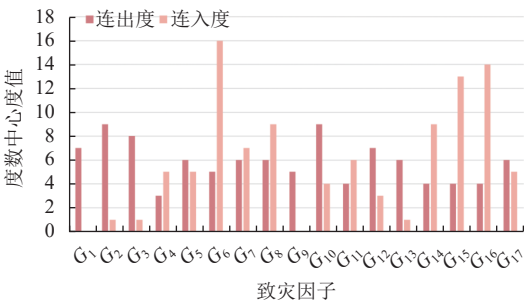


图 3 致灾因子的度中心度

根据图 4 的数据, WUI 火灾致灾因子网络中, 不同致灾因子的介数值存在明显差异. 网络节点的平均介数为 10.118, 而排名前 5 的致灾因子分别是燃烧废弃物、植物起火、应急响应速度、人为纵火和强风, 并且它们的介数远大于平均介数值, 说明这些致灾因子在与其他致灾因子之间的转换过程中发挥着非常重要的过渡作用, 因此在火灾管控中应重点关注这些因子.

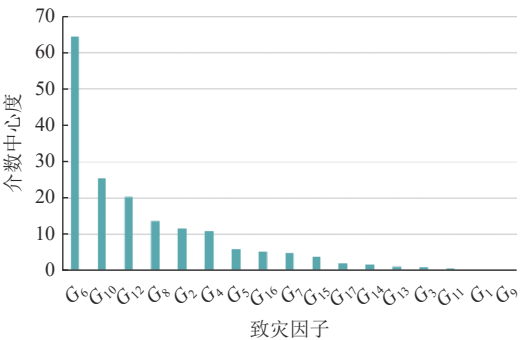


图 4 致灾因子的介数

3.3 断链减灾措施分析

本文构件的 WUI 火灾致灾因子网络共包含 99 条边,所有边的介数值的取值范围在 0-33.238 1 之间,其中,边界数值最大的边是“燃烧废弃物”与“植物起火”之间的连线.为了深入理解网络的拓扑结构,本文对边介数值排名前 20 的边进行了排序,在网络中从介数值排名第 1 的边开始依次去除,每去除一条边就计算一次整体网络的网络密度、聚类系数和平均介数中心度,结果如图 5 所示.

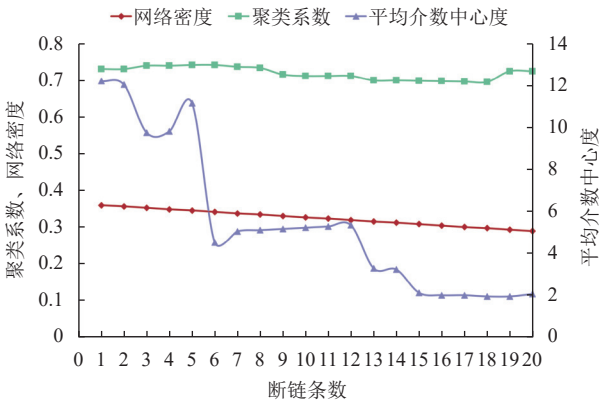


图 5 网络密度、平均介数中心度和聚类系数变化

由图 5 的折线图可以看出,随着断链条数从 1 增加至 20, WUI 火灾致灾因子网络的平均聚类系数、紧密度系数和平均介数中心度均呈现出下降的趋势.这表明通过切断关键的致灾因子连线(即断链行为),可以有效减弱 WUI 火灾中各致灾因子间的相互影响作用,进而达到预防灾害和减轻灾害影响的目的.

3.4 断链减灾措施分析

本文对 WUI 致灾因子网络中所有边的风险度进行了计算并排序,如表 4 所示. (S_i, S_j) 表示节点 S_i 与节点 S_j 所在的边,所有边的风险度平均值为 13.30,其中燃烧废弃物→植物起火为风险度值最高的边,为 187.65,其次是应急响应速度→植物起火,为 80.42.关于风险度最高的 10 条连边及其断链方式的详细信息则列在了表 5 中.

4 结论

针对 WUI 火灾致灾因子提取和深度关联分析,本文基于本文挖掘技术从 WUI 火灾事故案例中得到致灾因子,使用 Apriori 算法得到致灾因子之间的关联规则;然后基于复杂网络理论探析了 WUI 火灾致灾因子

网络特征;最后引入 WUI 火灾致因链风险度指标,计算不同边的风险度,挖掘出高风险连边,并提出断链措施.本文主要研究结论如下.

表 4 边的介数及风险度

边	B_{ij}	R_{ij}	边	B_{ij}	R_{ij}	边	B_{ij}	R_{ij}
(6, 10)	33.24	187.65	(13, 5)	3.50	10.37	(15, 16)	1.00	5.13
(12, 10)	16.58	80.42	(12, 11)	3.11	10.28	(2, 4)	5.00	5.03
(15, 6)	10.00	74.09	(2, 6)	2.00	10.00	(10, 16)	1.39	4.88
(2, 6)	27.58	69.88	(8, 4)	10.92	9.95	(3, 6)	2.20	4.72
(6, 8)	11.85	38.51	(5, 12)	6.00	9.26	(11, 15)	1.14	4.45
(10, 15)	1.56	34.58	(2, 16)	1.17	8.98	(17, 16)	1.48	4.37
(11, 6)	10.00	32.81	(2, 5)	5.25	8.82	(7, 14)	2.51	4.10
(8, 17)	6.83	32.48	(15, 11)	3.75	8.59	(12, 7)	2.52	3.90
(1, 10)	3.08	30.62	(16, 11)	4.75	8.49	(17, 14)	1.94	3.85
(9, 6)	10.00	27.02	(2, 15)	1.17	8.48	(2, 8)	1.17	3.74
(16, 6)	10.00	27.02	(16, 14)	2.26	8.38	(11, 16)	1.14	3.67
(14, 6)	10.00	25.52	(10, 7)	4.50	8.16	(8, 14)	2.63	3.66
(7, 6)	3.00	25.40	(5, 6)	2.50	8.04	(13, 14)	1.57	3.64
(12, 13)	17.02	19.87	(1, 6)	2.17	7.80	(7, 15)	1.64	3.62
(12, 10)	3.02	18.46	(10, 17)	3.33	7.47	(7, 16)	1.48	3.55
(12, 6)	2.29	18.16	(7, 4)	6.92	7.45	(7, 8)	2.20	3.54
(4, 12)	13.76	17.62	(5, 7)	3.32	7.12	(3, 16)	1.70	3.45
(10, 6)	2.00	17.15	(8, 15)	1.64	7.03	(14, 15)	1.00	3.41
(17, 8)	2.62	16.79	(5, 16)	2.15	6.91	(8, 16)	1.48	2.99
(12, 17)	3.02	16.46	(3, 5)	2.20	6.90	(10, 14)	2.26	2.67
(14, 11)	2.58	15.07	(17, 7)	3.42	6.82	(5, 15)	2.15	2.61
(6, 15)	2.46	14.45	(8, 6)	3.00	6.45	(9, 16)	1.00	2.57
(1, 3)	1.83	13.49	(13, 8)	3.00	6.45	(3, 17)	1.73	2.40
(1, 16)	2.42	12.72	(2, 7)	4.17	6.44	(2, 11)	1.50	2.29
(17, 6)	4.17	12.54	(9, 15)	1.00	6.27	(1, 8)	1.75	2.01
(3, 10)	2.07	12.03	(3, 15)	1.87	5.82	(3, 7)	1.40	1.95
(12, 8)	2.36	11.94	(5, 8)	2.85	5.72	(13, 15)	1.48	1.85
(4, 5)	5.95	11.76	(16, 15)	1.17	5.66	(9, 11)	1.00	1.78
(10, 8)	1.70	11.42	(10, 5)	5.08	5.58	(9, 14)	1.00	1.74
(4, 6)	4.12	10.91	(15, 14)	2.01	5.24	(17, 15)	1.48	1.73
(11, 14)	1.40	10.65	(6, 16)	2.30	5.20	(1, 4)	2.33	1.66
(2, 17)	3.17	10.64	(13, 16)	1.48	5.17	(1, 7)	1.42	1.58
(13, 6)	3.00	10.42	(14, 16)	1.00	5.13	(3, 4)	1.67	1.50

表 5 风险度较大边及断链措施

边	断链措施
(6, 10) 燃烧废弃物→植物起火	颁布禁止擅自燃烧废弃物等规定
(10, 12) 应急响应速度→植物起火	加强火灾监控,经常开展防火演练
(15, 6) 建筑起火→燃烧废弃物	禁止废弃物堆积在建筑物周围
(2, 6) 强风→燃烧废弃物	对废弃物及时处理,禁止废弃物长期堆积
(6, 8) 燃烧废弃物→人为纵火	加强居民防火教育,对纵火罪
(10, 15) 植物起火→建筑起火	增加建筑周边与森林的距离
(11, 6) 电路故障→燃烧废弃物	废弃物处理站远离电线电路位置
(8, 17) 人为纵火→燃放烟花爆竹	禁止燃放烟花爆竹
(1, 10) 高温天气→植物起火	重视高温天气下的日常巡视
(9, 6) 雷击→燃烧废弃物	对废弃物及时处理,不允许废弃物长期堆积

(1) WUI 火灾致灾因子网络具有具有显著的小世界特性,不同致灾因子间的转换频率较低。高温、强风、干旱、雷击、野外施工在与其他致灾因子转换过程中扮演着重要角色,在 WUI 火灾防范中应当给予这些因子更多的关注。

(2) 边介数最大的边为燃烧废弃物、植物起火、应急响应速度、人为纵火、强风、祭祀失火,表明这些边在网络中的致灾因子转换过程中发挥着重要的作用,在防止 WUI 火灾扩散时应首先考虑这些因子。在对边介数较大的边采取断链措施后,整体的网络密度明显下降,表明断链行为能够很好地控制 WUI 火灾致灾因子之间的转换。

(3) 通过计算 WUI 火灾致灾因子网络中各条边的风险度,列出了风险度最高的前 10 条边,并给出了相应的断链措施。燃烧废弃物→植物起火是风险度最高的边,通过颁布禁止擅自燃烧废弃物等规定,即可切断该风险链,实现对 WUI 火灾的预防和主动控制。

参考文献

- 1 Rodriguez-Jimenez F, Fernandes PM, Fernández-Guisuraga JM, *et al.* Drivers and trends in the size and severity of forest fires endangering WUI areas: A regional case study. *Forests*, 2023, 14(12): 2366. [doi: [10.3390/f14122366](https://doi.org/10.3390/f14122366)]
- 2 Liu N, Zhu W, Zhong SB, *et al.* Spatial-temporal characteristics and influencing factors of wildfire occurrence and correlation with WUI presence in Beijing-Tianjin-Hebei region, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2023, 14(1): 2281246. [doi: [10.1080/19475705.2023.2281246](https://doi.org/10.1080/19475705.2023.2281246)]
- 3 Li JM, Zhu CB, Li Q. Application of AHP in WUI fire risk assessment. *ITM Web of Conferences*, 2022, 47: 03039. [doi: [10.1051/itmconf/20224703039](https://doi.org/10.1051/itmconf/20224703039)]
- 4 Zhang BX, Cai DY, Ai SZ, *et al.* Research on the influencing factors and prevention measures of long-term forest fire risk in Northeast China. *Ecological Indicators*, 2023, 155: 110965. [doi: [10.1016/j.ecolind.2023.110965](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110965)]
- 5 Gan CQ, Yang XF, Liu WP, *et al.* Propagation of computer virus both across the Internet and external computers: A complex-network approach. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2014, 19(8): 2785–2792. [doi: [10.1016/j.cnsns.2013.12.026](https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2013.12.026)]
- 6 Yang LX, Yang XF, Liu JM, *et al.* Epidemics of computer viruses: A complex-network approach. *Applied Mathematics and Computation*, 2013, 219(16): 8705–8717. [doi: [10.1016/j.amc.2013.02.031](https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.02.031)]
- 7 Liu ZM, Li S, He J, *et al.* Complex network security analysis based on attack graph model. *Proceedings of the 2nd International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*. Harbin: IEEE, 2012. 183–186.
- 8 胡子轩, 华静, 李医民. 湿地生态系统网络模型鲁棒性分析. *生态学杂志*, 2023, 42(1): 237–247.
- 9 刘闯, 舒胜利, 詹秀秀, 等. 基于复杂网络的合成致死预测方法研究综述. *计算机学报*, 2023, 46(8): 1670–1692.
- 10 陆言, 龚晓亮, 谢非, 等. 基于复杂网络的秀丽隐杆线虫神经系统性质研究进展. *中国医学物理学杂志*, 2022, 39(11): 1431–1440.
- 11 刘敏, 薛伟贤, 何黎松. “一带一路”跨国技术溢出网络空间演化与路径识别——加权复杂网络分析视角. *科技进步与对策*, 2020, 37(23): 46–53.
- 12 曹平, 陆松. 信息技术产业创新社群网络研究和模拟仿真. *管理现代化*, 2020, 40(4): 29–39.
- 13 Bassett DS, Sporns O. Network neuroscience. *Nature Neuroscience*, 2017, 20(3): 353–364. [doi: [10.1038/nn.4502](https://doi.org/10.1038/nn.4502)]
- 14 Saberi M, Khosrowabadi R, Khatibi A, *et al.* Topological impact of negative links on the stability of resting-state brain network. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2176. [doi: [10.1038/s41598-021-81767-7](https://doi.org/10.1038/s41598-021-81767-7)]
- 15 Rubinov M, Sporns O. Complex network measures of brain connectivity: Uses and interpretations. *NeuroImage*, 2010, 52(3): 1059–1069. [doi: [10.1016/j.neuroimage.2009.10.003](https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2009.10.003)]
- 16 Papo D, Buldú J, Boccaletti S, *et al.* Complex network theory and the brain. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2014, 369(1653): 20130520. [doi: [10.1098/rstb.2013.0520](https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0520)]
- 17 孙鑫, 李振华, 董军宇, 等. 面向海洋数据的复杂网络建模及可视化分析. *系统仿真学报*, 2018, 30(7): 2445–2452.
- 18 Donges JF, Zou Y, Marwan N, *et al.* The backbone of the climate network. *Europhysics Letters*, 2009, 87(4): 48007. [doi: [10.1209/0295-5075/87/48007](https://doi.org/10.1209/0295-5075/87/48007)]
- 19 胡恒儒, 龚志强, 王健, 等. ENSO 气温关联网络结构特征差异及成因分析. *物理学报*, 2021, 70(24): 249201.
- 20 翁克瑞, 沈卉, 侯俊东. 确定性社会影响力竞争扩散问题研究. *复杂系统与复杂性科学*, 2021, 18(4): 21–29.
- 21 李丹丹, 马静. 复杂社会网络上的谣言传播模型研究综述. *情报理论与实践*, 2016, 39(12): 130–134.
- 22 魏静, 贾宇广, 朱恒民, 等. 基于认知失调的动态网络下用户观点演化研究. *现代情报*, 2023, 43(5): 104–113.
- 23 Xu H, Deng NH, Li Y. Key risks of rail transit operation based on complex network. *Proceedings of the ICCREM 2021*. Beijing: American Society of Civil Engineers, 2021.

- 155–162.
- 24 刘洪良, 罗年学, 赵前胜. 基于灾害复杂网络的深圳台风灾害链风险分析. 灾害学, 2023, 38(4): 228–234.
- 25 吴书强, 邵必林, 边根庆, 等. 基于复杂网络的高校火灾灾害链分析及应急管理决策研究. 灾害学, 2022, 37(2): 156–161, 166.
- 26 宋英华, 张小莹, 吕伟. 城镇-森林交界域火灾灾害链网络模型构建及风险分析. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(5): 122–128.
- 27 湛志群, 张国焯. 文本挖掘与中文文本挖掘模型研究. 情报科学, 2007, 25(7): 1046–1051.
- 28 Brown DE. Text mining the contributors to rail accidents. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(2): 346–355. [doi: [10.1109/TITS.2015.2472580](https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2472580)]
- 29 晋良海, 王抒情, 邵波, 等. 建筑工程施工安全生产事故致因的共现特征分析. 安全与环境工程, 2023: 1–9. [doi: [10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20221671](https://doi.org/10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.20221671)]
- 30 Qiu ZX, Liu QL, Li XC, *et al.* Construction and analysis of a coal mine accident causation network based on text mining. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 153: 320–328. [doi: [10.1016/j.psep.2021.07.032](https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.07.032)]
- 31 陈芳, 沈芮宇. 基于文本挖掘的空中危险接近事件致因研究. 安全与环境学报, 2022, 22(6): 3280–3287.
- 32 Li HG, Ni Y. Intrusion detection technology research based on Apriori algorithm. Physics Procedia, 2012, 24: 1615–1620.
- 33 李晶, 罗泰晔. 基于文本挖掘的 5G 技术研究热点分析. 科技管理研究, 2020, 40(19): 153–158.
- 34 王亚坤. 基于文本挖掘的铁路事故致因分类识别及关联规则辨识方法研究 [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2021.
- 35 陈述, 习俊博, 王建平, 等. 水电工程施工安全隐患关联规则挖掘. 中国安全科学学报, 2021, 31(8): 75–82.
- 36 王兵, 黄丹, 李文璟. 基于支持度矩阵 Apriori 算法的钻井隐患关联挖掘. 西南石油大学学报 (自然科学版), 2022, 44(2): 113–122.
- 37 董瑜, 湛志群, 王荣波, 等. 维基百科人物关系知识网络的复杂性分析. 杭州电子科技大学学报 (自然科学版), 2015, 35(5): 84–89.
- 38 黄昕, 靳健, 林作忠, 等. 基于复杂网络的城市深部空间火灾灾害链分析及智慧减灾方法研究. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1280–1291.
- 39 杨应柳, 晋良海, 邵波, 等. 基于复杂网络的煤矿火灾爆炸致因研究. 中国安全科学学报, 2023, 33(1): 145–151.
- 40 陆菲菲, 谢向辉, 郭得科, 等. 一种构建超大规模数据中心的模块化网络结构. 软件学报, 2017, 28(8): 2196–2213. [doi: [10.13328/j.cnki.jos.005119](https://doi.org/10.13328/j.cnki.jos.005119)]
- 41 郑君君, 程翼, 马刚, 等. 基于数据爬虫与动态社会网络的公众环保行为演化研究. 系统工程理论与实践, 2020, 40(1): 219–229.
- (校对责编: 孙君艳)