

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211004042

## 基于节点删除法的村寨建筑群火灾蔓延 危险建筑确定\*

郑飞扬<sup>1</sup>, 卢婷<sup>2</sup>, 宋志刚<sup>1</sup>, 张健<sup>1</sup>, 左林阳<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500; 2. 云南省消防救援总队技术处, 云南昆明 650500)

**摘要:** 在火灾蔓延分析的基础上, 采取低干预的建筑改造措施对村寨建筑群的火灾蔓延防控具有重要意义。通过对建筑间火灾蔓延路径的判定, 建立建筑群火灾蔓延网络的邻接矩阵和蔓延矩阵以确定火灾蔓延风险, 进一步结合节点删除法确定改造不同建筑后建筑群的火灾蔓延风险下降率, 在此基础上分析了建筑改造的优先级序列并确定了危险建筑。最后将该方法应用于云南某杆栏式村寨建筑群火灾蔓延危险建筑的确定, 结果表明: 该方法可以有效找出建筑群中对火灾蔓延影响大的危险建筑, 且在仅改造少量建筑的情况下, 建筑群的火灾蔓延风险便能有可观的下降。

**关键词:** 村寨建筑群; 火灾; 蔓延; 网络; 风险; 危险建筑; 节点删除法

**中图分类号:** TU366; X932   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0819-07

### Determination of Fire Spread Hazardous Buildings in Village Building Complex based on Node Deletion Method

ZHENG Feiyang<sup>1</sup>, LU Ting<sup>2</sup>, SONG Zhigang<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, ZUO Linyang<sup>1</sup>

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Provincial Fire and Rescue Corps Technical Division, Kunming 650500, China)

**Abstract:** The low-intervention building renovation measures based on fire spread analysis are meaningful for fire spread prevention and control of the village building complex. By determining the fire spread paths among buildings, the adjacency matrix and spread matrix of the fire spread network of the building complex are first established to determine the fire spread risk, and further, the node deletion method is adopted to determine the fire spread risk reduction rate of the building complex after retrofitting different buildings. Then the priority sequence of building retrofitting is analyzed and the dangerous buildings are identified. Finally, the method is applied to determine the fire spread risk of buildings in a stilt-style village complex in Yunnan. The results show that the presented method can effectively identify the hazardous buildings which have a great impact on fire spread in the complex, and the fire spread risk of the complex can be reduced considerably when only a small number of buildings are renovated.

**Keywords:** village building complex; fire; spread; network; risk; hazardous building; node deletion method

\* 收稿日期: 2021-10-04; 修回日期: 2021-11-23

基金项目: 云南省重点研发计划项目(202003AC100001)、丽江市科技计划项目(2020LJSFK005)资助

作者简介: 郑飞扬(1995—), 男, 硕士研究生。主要从事建筑火灾方面的研究。E-mail: 852317175@qq.com

## 引言

截至2019年,我国共计有6 819个村落入选“中国传统村落名录”<sup>[1]</sup>,这些村落多采用木材作为主要建筑材料,耐火等级低且一旦发生火灾,往往会出现大范围的火灾蔓延现象,识别火灾蔓延路径、提出高效的消防改造措施已成为村寨建筑群火灾防控的重要内容<sup>[2]</sup>。

国内外先后对火灾蔓延进行了大量研究,形成很多建筑间火灾蔓延的分析方法。例如NFPA 914<sup>[3]</sup>在同时考虑建筑内部、外部火灾蔓延路径和风貌保护的前提下对历史建筑提出了防火安全保护要求;NFPA 80A<sup>[4]</sup>给出了确定建筑间最小安全距离的基本方法,为建筑间火灾蔓延路径的确定提供了依据;保野健治郎等<sup>[5-7]</sup>提出的经验模型、物理模型、半经验半物理模型等多种火灾蔓延分析模型描述了火灾蔓延的动态过程。通过上述方法可确定建筑间火灾蔓延路径,从而为火灾蔓延的防控提供基础,与此同时,通过切断火灾蔓延路径减少火灾蔓延风险是一个古老而长新的话题。早在春秋战国时期便有“火所未至,撤小屋,涂大屋”的火灾扑救思想,到了明末清初,著名学者毛奇龄更是提出了“北土南砖,俱作御火”的火灾防控主张<sup>[8]</sup>,现如今也有很多学者从单体建筑的防火构造层面进行火灾防控<sup>[9-12]</sup>,其基本思想均是通过切断火灾蔓延路径来控制火灾蔓延。对大量既有的村寨建筑群,考虑到改造成本和建筑群传统风貌的保护,小范围、低干预的改造具有重要意义,如何最小限度的对建筑群进行消防改造并获得可观的改造效果,值得进一步研究。

针对上述问题,本文在获得了火灾蔓延路径的基础上,提出了一种基于节点删除法的村寨建筑群火灾蔓延危险建筑的确定方法,该方法通过确定火灾蔓延路径来建立火灾蔓延网络模型,并以此分析建筑群的火灾蔓延风险,在此基础上结合节点删除法获得建筑改造的优先级序列并确定需要改造的危险建筑。

## 1 建筑群火灾蔓延网络模型

### 1.1 火灾蔓延路径评估

如上文所述,目前有大量的方法可以确定火灾蔓延路径,以NFPA 80A<sup>[4]</sup>提出的方法为例,建筑间的火灾蔓延可以根据其布置特征进行确定:

(1)当两个相邻建筑直接贴临或相互之间有可燃物直接相连时,若建筑间没有防火墙分隔,可认为建筑间能够相互引燃,存在双向蔓延路径。

(2)当两个相邻建筑间隔布置,中间无可燃物连接时,建筑间的火灾蔓延路径可按照NFPA 80A<sup>[4]</sup>中计算最小防火间距的方法确定。

结合NFPA 80A<sup>[4]</sup>可以识别出给定建筑与周边建筑之间的火灾蔓延路径,逐一评价村落中每个建筑与周边建筑之间的蔓延关系,便可以构建完整的火灾蔓延网络。

### 1.2 火灾蔓延有向图模型

在获得各单体建筑与周边建筑的蔓延路径后,可采用网络模型对整个建筑群的火灾蔓延关系进行表征。具体方法是将单体建筑视为网络中的节点,建筑间的火灾蔓延关系视为节点之间的边,从而建立建筑群火灾蔓延的有向图模型,在此基础上分别使用邻接矩阵和蔓延矩阵描述各节点间的直接引燃关系和火灾蔓延范围。

上文确定相邻建筑间火灾蔓延路径的过程实际上是确定起火节点 $v_i$ 和相邻节点引燃关系的过程,对于一个有 $M$ 个单体建筑的建筑群,共计 $M$ 个节点,节点 $v_i$ 和相邻节点之间的直接引燃关系可用邻接向量 $a(i,j)$ ( $i=1,2,\dots,M;j=1,2,\dots,M$ )来表示, $a(i,j)$ 的取值为:

$$a(i,j)=\begin{cases} 1, & i \neq j, (v_i, v_j)=1 \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

式中, $(v_i, v_j)=1$ 表示有边由 $v_i$ 指向 $v_j$ ; $a(i,j)=1$ 表示存在一条蔓延路径由第 $i$ 个单体建筑指向第 $j$ 个单体建筑,若蔓延路径不存在,则 $a(i,j)=0$ 。

以图1所示包含5个节点网络的引燃关系为例,整个邻接矩阵的建立过程包括两个步骤:(1)逐一评估每个节点与周边节点的蔓延路径,获得各个节点的邻接向量;(2)组合节点邻接向量,获得邻接矩阵,通过邻接矩阵,确定整个网络的蔓延关系。

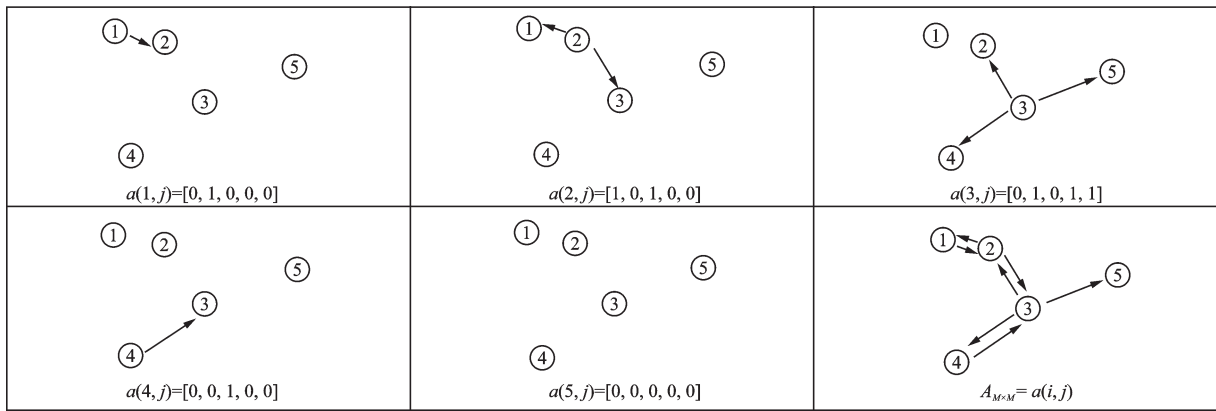


图1 邻接向量和邻接矩阵

Fig.1 Adjacency vector and adjacency matrix

### 1.3 火灾蔓延场景确定

通过上述方法建立邻接矩阵以后,可以进一步建立蔓延矩阵来描述每个火灾蔓延场景的最大引燃范围。对于具有 $M$ 个单体建筑的建筑群,当考虑同时有 $m$ 个建筑起火的情况下,可以确定 $C_M^m$ 个火灾蔓延场景,在仅考虑1个初始起火节点的情况下,共有 $M$ 个火灾蔓延场景。起火节点 $v_i$ 与其他节点的引燃关系可通过节点遍历算法进行确定<sup>[13]</sup>,基于 $v_i$ 出发的节点遍历算法可以获得当 $i$ 建筑起火后所能引燃的节点的集合 $V_i$ ,在得到节点的集合 $V_i$ 的情况下,蔓延矩阵 $S$ 第 $i$ 行元素可表示为:

$$S(i,j) = \begin{cases} 1, & j \in V_i \\ 1, & i = j \\ 0, & j \notin V_i \end{cases} \quad (2)$$

式中,蔓延矩阵 $S$ 的第 $i$ 行取值为1的列,表示节点 $i$ 起火后被直接或间接引燃的节点;第 $j$ 列表示第 $j$ 个节点在不同火灾场景中引燃的情况。

### 1.4 火灾蔓延风险分析

确定建筑群火灾蔓延风险的过程实际上就是确定多场景下建筑群火灾蔓延损失期望的过程,具体步骤如下:(1)分析各蔓延场景出现的概率和各蔓延场景可能带来的最大损失;(2)将二者相乘求出各场景下的损失期望值;(3)各蔓延场景损失期望求和,得到建筑群的火灾蔓延损失期望并用其去度量建筑群的火灾蔓延风险。建筑群的火灾蔓延损失期望可以描述建筑群在发生一次火灾的前提下,建筑群抵御火灾蔓延的能力,损失期望越大,说明建筑群抵御火灾蔓延的能力越弱,火灾风险越

大。对于一个有 $M$ 个单体建筑的建筑群来说,建筑群火灾蔓延损失期望 $R$ 可表示为:

$$R = \sum E(L)_i = \sum_{i=1}^M L_i P_i \quad (3)$$

式中, $E(L)_i$ 为 $i$ 场景下的损失期望; $P_i$ 为建筑群发生一次火灾前提下的蔓延场景 $i$ 出现的概率,在假定每个起火场景出现概率相同的情况下, $P_i=1/M$ ; $L_i$ 为蔓延场景 $i$ 的最大损失,这里考虑为节点 $i$ 起火后能够直接或间接引燃的节点数量,若要用蔓延建筑的面积表示损失,则可用引燃建筑 $j$ 的面积替代式(2)中的取值1,某一建筑节点 $i$ 起火后出现蔓延场景 $i$ 的最大损失可由式(4)确定:

$$L_i = \sum_{j=1}^M S(i,j) \quad (4)$$

## 2 基于节点删除法的节点重要性评价

### 2.1 节点重要性指标

在建立了建筑群的火灾蔓延网络模型的基础上,可以采用适当的网络节点重要性排序方法对危险建筑进行筛选。根据复杂网络中普遍存在桥节点且删除某些节点能在很大程度上影响网络连通度的特征<sup>[14]</sup>,本文采用节点删除法来确定对村寨建筑群火灾蔓延有重要影响的危险建筑,该方法利用节点被删除后对网络的破坏性来度量节点的重要性,破坏程度越大说明节点越重要<sup>[15]</sup>。节点删除法最大的特点是在节点重要性的计算过程中,网络的结构是动态变化的。

对于火灾蔓延网络,删除某个节点对网络存在

两个方面的影响:(1)被删除节点与网络中其他节点间的直接火灾蔓延路径被切断;(2)利用被删除节点作为中转节点的间接火灾蔓延路径被切断。总而言之,就是建筑群部分蔓延场景的损失期望有所下降,相应的建筑群的火灾蔓延风险也随之下降。删除节点后整个网络的火灾蔓延风险下降幅度越大,说明该节点越重要。因此,可以将删除节点后,整个网络的火灾蔓延风险下降率作为评价节点重要性的指标,某一节点 $v_i$ 的重要性指标 $D(i)$ 可表示为:

$$D(i) = \frac{R - R_i}{R} \quad (5)$$

式中, $R$ 为删除节点前建筑群的火灾蔓延损失期望; $R_i$ 为删除节点 $v_i$ 后建筑群的火灾蔓延损失期望。

## 2.2 节点重要性排序

基于火灾蔓延节点删除法的节点重要性排序是指以火灾蔓延风险下降率 $D(i)$ 为指标,求出 $D(i)$ 最大值节点,删除该节点后修正邻接矩阵,再次计算剩余节点的 $D(i)$ 值,直到所有节点均被删除为止。节点被删除的前后顺序即反映该节点在网络中的重要程度,第一次被删除的节点就是网络中对火灾蔓延影响最大的节点。对于一个有 $M$ 个节点的火灾蔓延网络,节点删除法可按如下步骤实现:

(1)建立邻接矩阵 $A$ ,结合节点遍历算法计算矩阵 $A$ 的蔓延矩阵 $S$ ,并求出此时网络的损失期望 $R$ ;

(2)建立辅助矩阵 $B$ ,并令其等于邻接矩阵 $A$ ;

(3)删除节点 $v_i$ ,即将矩阵 $B$ 第 $i$ 行、 $i$ 列中的元素置为0,并令 $B_i = B$ (初始 $i=1$ );

(4)结合节点遍历算法计算此时矩阵 $B_i$ 所确定的蔓延矩阵 $S_i$ ,计算蔓延矩阵 $S_i$ 的损失期望 $R_i$ ;

(5) $i=i+1$ ,返回步骤(3),直到 $i>M$ 时执行步骤(6);

(6)计算所有节点 $v_i$ 的 $D(i)$ ,得到 $D(i)$ 最大值节点,并将该节点的重要度排序记为 $N$ ,初始 $N=1$ ;

(7)删除 $D(i)$ 最大值节点 $v_i$ ,即将邻接矩阵 $A$ 第 $i$ 行、 $i$ 列中的元素置为0,令 $N=N+1$ 后返回步骤(2),直到 $N>M$ 时算法结束。

按照上述算法,根据节点 $v_i$ 被删除的先后顺序对所有节点进行排序,便能得到该网络下的重要节点序列,以图1所示的5节点网络为例,得到的重要节点序列见表1。

由节点删除法得到的重要节点性序列就是建

表1 节点重要度排序

Table 1 Node importance ranking

节点重要性排序	节点编号	$D(i)/\%$
1	3	67
2	2	10
3	1	0
4	4	0
5	5	0

筑的改造优先级序列,考虑到对村寨建筑群风貌的保护和建筑的改造成本,可用依次改造多个节点后建筑群的火灾蔓延风险下降率 $TD(k)$ 来评价改造效果,见式(6):

$$TD(k) = \sum D(i) \quad (6)$$

式中, $k$ 表示改造的节点个数。

需要注意的是,式(6)中 $D(i)$ 的累加是按照节点排序进行的。以图1为例,改造3号节点的火灾蔓延风险下降率 $TD(1)$ 为67%;改造3、2号节点的 $TD(2)$ 为77%;改造3、2、1三个节点后的 $TD(3)$ 为77%,与改造两个节点相比火灾蔓延风险不再下降;同时,在改造两个节点的情况下,网络的火灾蔓延风险并没有比改造一个节点的情况有可观下降,因此可仅将3号节点作为危险节点进行消防改造。

## 3 案例分析

### 3.1 勐卡老寨火灾蔓延网络模型

勐卡老寨位于云南省临沧市沧源佤族自治县勐角乡,村域面积约0.65 km<sup>2</sup>。村中共有单体建筑93个,建筑风格为典型的传统傣族干栏式民居,结构除屋面材料采用10 mm厚硅酸钙板外,其余梁、板、柱、外墙、隔墙均采用木材或竹材。根据勘测资料,勐卡老寨的建筑布局及编号如图2所示。根据建筑间的相对位置关系,结合NFPA 80A<sup>[4]</sup>判断建筑间的蔓延路径,获得各节点的蔓延邻接向量并将其组合成火灾蔓延邻接矩阵,由此构建勐卡老寨的火灾蔓延网络如图3所示。利用火灾蔓延邻接矩阵结合节点遍历算法得到蔓延矩阵,进一步由式(3)、(4)得到93个蔓延场景的损失期望如图4所示。从图4可以看出,27号场景火灾蔓延损失期望最大,为0.24栋,整个勐卡老寨的火灾蔓延损失期望为8.63栋。



图2 勐卡老寨建筑布局及编号

Fig.2 Architectural layout and number of Mengka Village



图3 勐卡老寨火灾蔓延网络

Fig.3 Fire spread network of Mengka Village

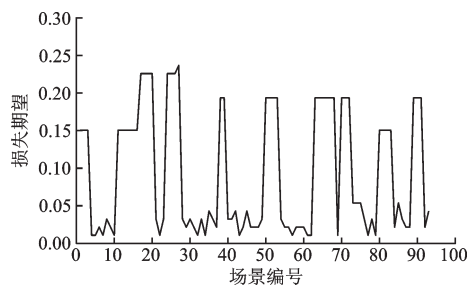


图4 勐卡老寨各场景损失期望

Fig.4 Loss expectation of each scene in Mengka village

### 3.2 勐卡老寨危险建筑确定

在获得勐卡老寨蔓延网络模型的基础上,根据本文所给出的节点重要性指标,结合节点删除法求得改造各节点的火灾蔓延风险下降率 $D(i)$ 如图5所

示,根据图5可以得到勐卡老寨蔓延网络的重要节点序列,由于篇幅限制,本文仅展示重要性前10的节点,见表2。由图5、表2可以看出,67、18、51、2、12这5个节点的 $D(i)$ 指标远高于其他节点,其中67号节点的 $D(i)$ 最高,为19.2%。

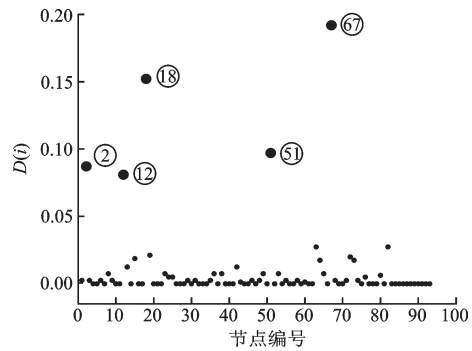


图5 勐卡老寨各节点 $D(i)$ 指标

Fig.5  $D(i)$  of each node in Mengka Village

表2 勐卡老寨节点重要性排序

Table 2 Node importance ranking of Mengka village

节点重要性排序	节点编号	$D(i)/\%$	节点重要性排序	节点编号	$D(i)/\%$
1	67	19.2	6	63	2.7
2	18	15.2	7	82	2.7
3	51	9.7	8	19	2.1
4	2	8.7	9	72	2.0
5	12	8.1	10	15	1.9

找到建筑群中危险建筑的目的在于以最小范围的消防改造来控制火灾蔓延范围,降低损失;对危险建筑的消防改造是指提高建筑的耐火等级或增加防火分隔等消防改造措施,使其断开与周边建筑的火灾蔓延路径。图6展示了改造勐卡老寨重要节点序列中前40个节点后整个建筑群的火灾蔓延风险下降率,由图6可以看出,改造5个节点后的 $TD(5)$ 为60.9%,改造10个节点后的 $TD(10)$ 为72.3%,改造40个节点后的 $TD(40)$ 为89.3%,因此在改造了5个节点之后,改造效果明显变差,需要对大量的建筑进行消防改造才能获得可观的改造效果,考虑到建筑改造的成本和对传统风貌的保护,仅改造前5个节点的收益最佳。因此可以将67、18、51、2、12号建筑作为勐卡老寨的危险建筑并依次进行消防改造。

为验证危险建筑选取的合理性,本文采用蒙特

卡罗模拟从勐卡老寨的蔓延网络中随机抽选5个节点组成随机序列,连续抽选出3个随机序列并依次对随机序列中的节点进行改造,然后将3个随机序列的改造效果与危险节点的改造效果进行比较,如表3、图7所示。由图7可以看出,经过节点删除法确定的5栋危险建筑,改造效果明显优于随机序列。

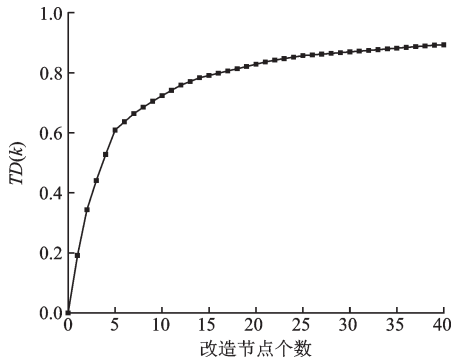


图6 改造不同数量节点的火灾蔓延风险下降率

Fig.6 Reduction rate of fire spread risk after renovating different number of nodes

表3 随机序列节点编号及改造效果

Table 3 Random sequence node number and transformation effect

危险节点序列		随机序列一		随机序列二		随机序列三	
节点编号	TD(k)/%	节点编号	TD(k)/%	节点编号	TD(k)/%	节点编号	TD(k)/%
67	19.18	1	4.1	28	0.50	63	12.45
18	34.37	16	8.0	14	4.61	42	13.70
51	44.08	64	14.2	19	13.08	59	16.94
2	52.80	70	30.3	72	24.78	13	21.05
12	60.90	52	38.5	36	25.53	73	22.79

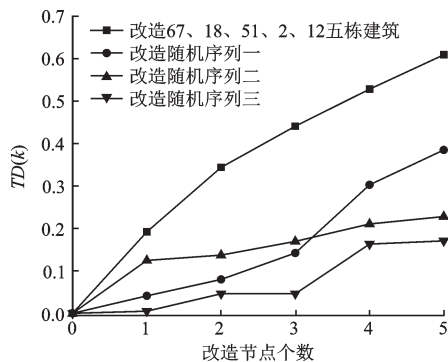


图7 改造效果比较

Fig.7 Comparison of renovation effects

## 4 结论

在获得建筑间火灾蔓延路径的基础上,提出一种基于节点删除法的村寨建筑群火灾蔓延危险建筑的确定方法,并应用于云南勐卡老寨的火灾蔓延危险建筑确定,得出以下结论:

(1) 通过对建筑间火灾蔓延路径的评估,建立火灾蔓延网络模型来分析建筑群的火灾蔓延风险,以火灾蔓延风险下降率为指标结合节点删除法得到重要节点序列,并通过改造不同数量的建筑节点评价改造效果,该方法可以在得到建筑改造的优先级序列的基础上,分析需要改造的危险建筑,避免了大规模改造带来的成本过高,传统风貌被破坏等问题。

(2) 通过勐卡老寨的案例说明,仅改造5个危险建筑就可以使整个建筑群的火灾蔓延风险下降60.9%,过多的进行改造不仅影响建筑风貌且改造效果并不理想,按照改造优先级排序,这5栋建筑的编号依次是67、18、51、2、12,是勐卡老寨的火灾防控中的重点关注对象。

## 参考文献:

- [1] 高楠, 郭超, 白凯, 等. 中国传统村落空间分异及影响因素[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 97-107.  
Gao N, Wu C, Bai K, et al. Spatial differentiation and influencing factors of Chinese traditional villages[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 97-107. (in Chinese)
- [2] 张健, 宋志刚, 李全旺, 等. 木结构建筑群火灾蔓延危险建筑的识别及防火改造效果评价[J]. 工程力学, 2020, 37(4): 60-69.  
Zhang J, Song Z G, Li Q W, et al. Identification and fire protection evaluation of critical buildings to prevent fire spread in densely built wood building areas. [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(4): 60-69. (in Chinese)
- [3] Code for fire protection of historic structures: NFPA914[S]. USA: National Fire Protection Association, 2015.
- [4] Recommended practice for protection of buildings from exterior fire exposures: NFPA 80A[S]. USA: National Fire Protection Association, 2012.
- [5] 保野健治郎, 高井広行, 难波义郎. ロジスティック曲線による建物火災の延焼速度式に関する基礎的研究[J]. 日

- 本建筑学会论文报告集,1982(311):137-144.  
Yasuno K, Takai H, Namba Y. A basic study on fire spread formula of houses used by logistic curve [J]. Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1982(311):137-144. (in Japanese)
- [6] Himoto K, Takara T. Development and validation of a physics-based urban fire spread model[J]. Fire Safety Journal, 2008,43: 477-494.
- [7] 赵思健,熊利亚,任爱珠.基于GIS的城市特大火灾蔓延模拟[J].火灾科学,2006,15(3):128-137.  
Zhao S J, Xiong L Y, Ren A Z. The GIS-based simulation of urban mass fire spread[J]. Fire Safety Science, 2006, 15(3): 128-137. (in Chinese)
- [8] 李采芹,王铭珍.中国古建筑与消防[M].上海:上海科学技术出版社,2009.  
Li C Q, Wang M Z. Ancient Chinese architecture and fire protection [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2009. (in Chinese)
- [9] 白子龙.木结构古建筑防火改造技术对策研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2017.  
Bai Z L. Research on technical countermeasures for fire protection renovation of ancient wooden buildings [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2017. (in Chinese)
- [10] 吴兴绍.木结构建筑火灾防控策略研究[D].昆明:昆明理工大学,2017.  
Wu X S. Research on fire prevention and control strategies of wood structure buildings [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [11] 李思禹.文物建筑火灾蔓延分析及抗火性能研究[D].北京:北京建筑大学,2019.  
Li S Y. Fire spread analysis and fire resistance research of cultural relic buildings[D]. Beijing: Beijing University of Architecture and Architecture, 2019. (in Chinese)
- [12] 王卫永,冉甜,逯鹏,等.钢结构梁柱节点抗火性能研究进展与展望[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):837-849.  
Wang W Y, Ran T, Lu P, et al. Research progress and prospect on fire resistance of steel beam-to-column connections[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021,41(4):837-849. (in Chinese)
- [13] 卓新建,苏永美.图论及其应用[M].北京:北京邮电大学出版社,2018.  
Zhuo X J, Su Y M. Graph theory with applications [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2018. (in Chinese)
- [14] 王魁,马宏,黄瑞阳.基于重要节点删除法的社会网络层次结构分析[J].计算机工程,2018,44(5):174-181,187.  
Wang K, Ma H, Huang R Y. Hierarchical structure analysis of social network based on important nodes removal method [J]. Computer Engineering, 2018, 44(5): 174-181, 187. (in Chinese)
- [15] 李鹏翔,任玉晴,席西民.网络节点(集)重要性的一种度量指标[J].系统工程,2004,22(4):13-20.  
Li P X, Ren Y Q, Xi Y M. An importance measure of actors (set) within a network [J]. Systems Engineering, 2004, 22(4): 13-20. (in Chinese)

(本文责编:池营营)