

# 基于元胞自动机模拟的历史聚落火灾蔓延及其价值损失分析方法

——以中国历史文化名村南京漆桥村为例

## Analysis Method of Fire Spread and Value Loss in Historic Settlements based on Cellular Automata Simulation:

A Case Study of the Famous Village of Chinese History and Culture, Qiqiao Historic Village in Nanjing

文 / 乐志 李新建  
Yue Zhi Li Xinjian

### 作者简介

乐志 南京林业大学风景园林学院 副教授  
李新建 东南大学建筑学院 副教授  
城市与建筑遗产保护教育部重点实验室

### 基金项目

国家自然科学基金面上项目“整合传统与现代技术的密集型历史聚落火灾蔓延仿真模拟及性能化防控设计方法”  
(项目编号: 51678129);  
江苏省文物局科研课题“建筑遗产预防性保护的国内经验和江苏省工作路径研究”(项目编号: 2019SK03)

### ABSTRACT

文章以中国历史文化名村——南京市高淳区漆桥为例,运用元胞自动机和 netlog 软件,对历史聚落的火灾蔓延进行数值模拟,分析火灾蔓延的时间空间关系、延烧发展路径和速度以及在此过程中的历史文化价值损失速度和构成,不仅为漆桥村消防规划建设提供了具体建议,也为其他历史聚落的火灾蔓延防控提供了新的研究方法借鉴。

Taking Qiqiao, a Chinese famous historical and cultural village in Nanjing as an example, this paper uses cellular automata and netlog software to simulate the fire spread of historic settlements, and analyzes the temporal and spatial relationship of fire spread, the development path and speed of burning, as well as the loss speed and composition of historical and cultural value in the process. It not only gives specific strategies for the fire prevention planning and construction of Qiqiao village, but also provides a new methodological reference for other historic settlements.

### KEY WORDS

历史聚落; 火灾蔓延; 元胞自动机模拟; 价值损失; 漆桥村  
historic settlements; fire spread; cellular automata simulation; value loss; Qiqiao Village

### DOI

10.19875/j.cnki.jzywh.2021.01.037

### 引言

历史聚落内有大量古老而密集の木结构建筑需要保护,它们既有较高的文化价值,也存在较高的延烧风险。近年来,我国历史聚落的消防技术和管理取得了实质性的进步,相关研究成果不断涌现,但对火灾蔓延时间空间规律的研究仍处于起步阶段,且未能对火灾中历史聚落特有的文化遗产价值损失进行研究和探讨。

价值评估是所有遗产保护工作的基础<sup>[1]</sup>,历史聚落和历史建筑的消防也应首先评估历史要素、空间和特征的保护优先权<sup>[2]</sup>。在我国现行的历史文化名城、名镇、名村和历史文化街区等历史聚落的保护规划中,价值评估已经得到了充分的重视,通过历史研究和现状调查,评估街区整体及其中每一栋建筑的历史、艺术、技术和社会价值,根据价值高低划分文物建筑、历史建筑、传统风貌建筑和其他一般性建筑等四个等级,进而针对不同等级的建筑提出相应的保护和整治要求<sup>[3]</sup>。

但在现阶段,我国历史聚落的消防规划和管理缺乏与保护规划和价值评估的有效衔接。消防规划主要依据条文式规范要求,通过配备各类消防车、消火栓和喷淋、水幕,构建均匀覆盖整个聚落的水灭火系统,而未能建立基于

价值评估的性能化消防规划<sup>[4]</sup>。在管理上,已将县级以上文物保护单位作为消防重点单位,但对历史建筑、传统风貌建筑没有专门要求。灾后损失的统计也仅限于人员伤亡和直接经济损失。虽然将文物建筑重建费列入了直接经济损失,但并未考虑文物建筑不可再生的历史文化价值损失,也没有对历史建筑和传统风貌建筑价值损失的统计<sup>[5]</sup>。

反思 2014 年云南独克宗古城火灾等重大事故,历史聚落的火灾风险不可能完全消除,如偶发火灾,或遭遇难以预测的地震、严寒、强风等自然灾害或人为失误,水消防系统很可能因供水不足、通道受阻、设备故障而失效,极易发展成大规模延烧的恶性火灾。历史聚落以逃生疏散较为便利的木构低层建筑为主,火灾中一般没有人员伤亡,但大面积延烧不仅会造成高额的直接经济损失,更会导致大量建筑遗产毁于一旦,历史文化价值受到无法挽回的重大损失,令社会各界痛心不已。

针对上述问题,本文以中国历史文化名村——南京市高淳区漆桥为例,在《漆桥历史文化名村保护规划(2014—2030)》<sup>[6]</sup>确定的价值评估和保护规划总图(图 1)等相关内容的基础上,补充现状调查,输入聚落格局、建筑体量

及其耐火性能和价值评估信息,运用元胞自动机进行模拟分析,总结火灾蔓延的时间空间发展和历史文化价值损失规律,对漆桥村火灾蔓延防控提出建议,也为其他历史聚落火灾蔓延防控提供了一种新的、可供借鉴的研究方法。

### 1 研究方法

#### 1.1 研究目标和技术路线

利用元胞自动机研究区域火灾较早见于日本学者 HIMOTO 等的研究,国内相关研究又在此基础上有针对性地作出了改进。2008 年,《基于元胞自动机的城市区域火灾蔓延概率模型探讨》补充了建筑室内外火灾扩散的区分影响<sup>[7]</sup>,《城市区域地震次生火灾风险评估及火灾蔓延模拟》补充了飞火的影响<sup>[8]</sup>,《村镇建筑群火灾蔓延模拟与案例》补充了温度辐射影响<sup>[9]</sup>。通过上述针对不同规模城区和村镇的火灾模拟研究,证实这是一种与实际情况接近、适用于较大区域火灾模拟的研究方法。但之前的研究主要针对城市尺度,其分析网格精度为 5m,这一尺度很难反映历史聚落的建筑尺度和火灾相关的物理特征。此外,火灾模拟中一直缺少文化遗产价值损失的相关参数。

本研究在借鉴上述研究成果的基础上,应用



图1 漆桥历史文化名村保护规划总平面图 [图片来源: 东南大学城市规划设计研究院有限公司, 南京漆桥历史文化名村保护规划(2016—2030)]

ABM 软件 netlog 建立了 1m 精度的分析网格, 可以模拟街巷宽度和建筑外墙及其材料和开口对火灾蔓延的影响, 并根据保护规划评估确定的价值等级, 首次将不同建筑烧毁后的价值损失纳入研究, 进而讨论如下三个对漆桥历史文化名村消防至关重要的基本问题: (1) 在主导风向作用下, 在不同的灭火时限内, 始于村庄边缘的火灾能否蔓延至重要文物建筑; (2) 火灾蔓延的路径和范围特征; (3) 火灾蔓延到火情扑灭之间的价值损失。具体技术路线如图 2 所示。

## 1.2 模拟方案及参数设定

在元胞自动机模拟研究方法中, 一般通过多个概率函数, 模拟建筑起火和火势的蔓延。本研究采用的主要参数包括建筑本身是否耐火、建筑

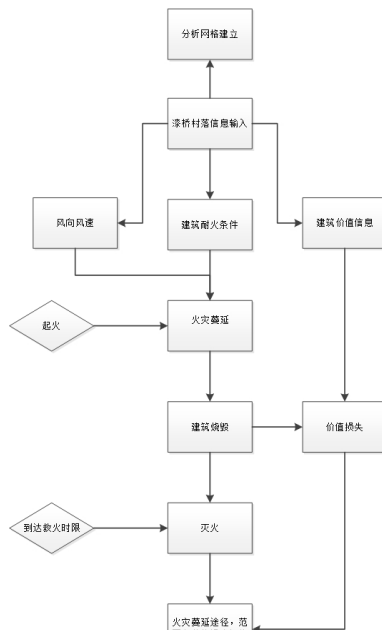


图2 火灾蔓延及价值评估技术路线图 [图片来源: 作者自绘]

的可燃载荷、建筑开窗比例的影响、气温和干燥度的影响、建筑坍塌影响和风向风速对火势传播的影响。各参数设定方法如下:

(1) 结构可燃系数: 主要考虑建筑结构是否可燃, 可燃的建筑结构不但会增加自身的火灾负荷, 还较易着火并帮助火灾扩散。漆桥历史文化名村中现状建筑只有木、砖木和砖混三种结构形式, 考虑到木结构和砖木结构建筑均采用相似的木屋架, 将其可燃概率均设为 1。砖混结构的耐火性能较好, 将其可燃概率系数设为 0.6。对于道路和空地, 本研究假设管理良好, 不存在大量可燃物堆积, 将可燃概率系数设为 0.1。将水面的可燃概率系数设为 0。

(2) 洞口助燃系数: 火灾中, 门窗开口较多的建筑更容易燃烧并通过洞口向外蔓延。鉴于

本文为聚落整体的区域消防研究, 不可能完全细化所有现状建筑的门窗尺寸, 故将其简化为两种类型。外墙门窗洞口面积占比大于等于 1/3 的, 助燃系数设为 1, 占比小于 1/3 的设为 0.6。

(3) 破坏助燃及坍塌系数: 木结构或砖木结构起火后, 可能随着建筑的破坏, 开口增加进而助燃。在燃烧的最后阶段, 木结构会倒塌进而阻止供氧, 减缓燃烧。参考已有研究, 本文将砖木和木结构中破坏时的助燃系数设为 1.1, 木结构破坏前夕的助燃系数设为 0.9。

(4) 气候系数和风向参数: 较高的气温和干燥的天气容易引发火灾并助长火势蔓延, 而主导风向会影响建筑外部火势蔓延趋势。本文选取了温度较高的夏季为研究时间, 气温及干燥助燃系数设为 1。根据漆桥地区气象资料, 取当地常年主导风向, 设置风向角度 300° (以正北为 0°, 顺时针为正)。

(5) 可燃物负荷和最大燃烧时间: 建筑着火后不会无限燃烧, 当建筑物的可燃物负荷燃烧完毕后, 建筑会完全烧毁并停止燃烧。根据已有研究, 木结构建筑的平均火灾载荷为 150kg/m<sup>2</sup>, 其他建筑为 50 kg/m<sup>2</sup>, 随后按照公式 1 推算其最大可燃时间, 到达最大可燃时间则自动熄灭<sup>[8]</sup> (式中  $W$  为火灾负荷,  $Aw$  为建筑开口面积,  $Af$  为占地面积,  $H$  为建筑高度)。

$$t = \frac{w/5.5}{Aw\sqrt{H}/Af}$$

公式 1 (公式来源: 参考文献 8)

(6) 无风状态下火灾蔓延概率: 理论上, 可燃物在周边热辐射影响下达到起燃温度就会起火, 但是现实中, 火灾载荷的空间分布和燃点类型具有随机性。故在元胞自动机研究中, 常使用火灾蔓延概率来平衡温度上升和可燃物随机性的关系。根据已有研究, 本文采用如公式 2 的 Moore neighbor 来模拟已有起火点对周边火灾蔓延的影响<sup>[7]</sup>。其中起火点为中心格, 木结构



图3 火灾扩散范围模拟图 [图片来源: 作者自绘]



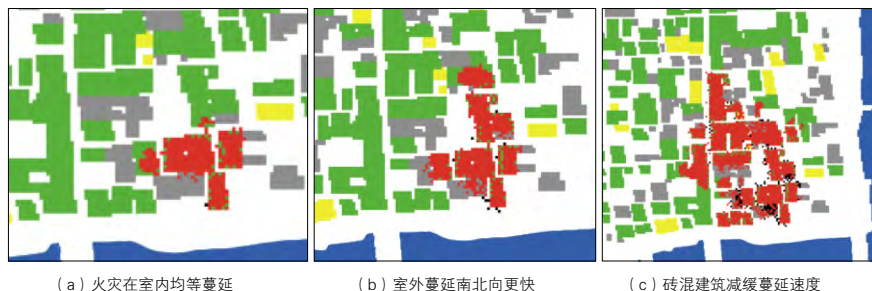


图4 火灾扩散路径模拟图 (图片来源: 作者自绘)

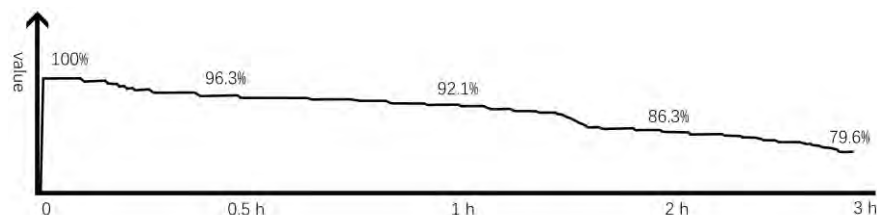


图5 价值损失曲线图 (图片来源: 作者自绘)

建筑中火灾蔓延的平均速度为0.48m/min, 故起火点直接相邻边(1m距离)在2min后的起火概率为1, 对角相邻为0.8。同时, 起火后会以辐射热的形态导致较远网格温度上升, 增加其起火概率, 故较远距离相邻起火概率0.2, 较远对角起火概率0.1。

$$\begin{pmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.8 & 1 & 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 1 & 1 & 1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 & 1 & 0.8 & 0.2 \\ 0.1 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \end{pmatrix}$$

公式2 (公式来源: 参考文献8)

(7) 有风状态下火灾室外蔓延: 风的存在会影响室外和建筑室内外界面的火灾蔓延趋势, 顺风向火灾蔓延速度增加, 相同时间内起火概率增加, 垂直风向火灾蔓延衰减, 而逆风向火灾难以传播。本文根据已有研究<sup>[9]</sup>, 在公式2的基础上, 作如下补充规定: ①顺风向的正、斜风向起火概率不变, 逆风向正、斜风向起火概率减少0.6, 垂直风向减少0.4; ②较远距离相邻单元, 顺风正向0.6, 顺风30°向0.2, 45°斜向0, 60°向0, 垂直风向减0.1, 逆风向减0.2, 逆风30°减0.2, 45°减0.1, 60°减0.2。最终, 起火概率为上述概率乘积, 当概率大于等于1, 必然起火, 当概率小于1, 根据概率随机起火。

(8) 起火点和灭火时限: 本文考虑主导风下火势可能蔓延范围最大的情况, 将起火点设为村庄东南角建筑。综合国内公开报道的近10年多起历史聚落火灾资料, 从发现火情到消防车到达并有效组织灭火的时间多为2~3h, 故本研究取3h为灭火时限。

## 2 模拟分析

### 2.1 火灾蔓延时间和范围

通过模拟计算, 可以得到0.5h、1h、2h和3h的火灾蔓延范围, 如图3所示。从扩散范围可以看出, 在1h之内离街道较远、价值较低的一般建筑受蔓延起火(图中红色表示起火); 此后蔓延范围迅速扩大, 至2h已有部分价值极高

的沿街文物建筑起火; 到3h, 村庄南侧沿街几乎完全起火, 大量价值极高的明清建筑被点燃, 且东南角已经彻底烧毁(图中黑色表示彻底烧毁)。由此可见, 在夏季主导风作用下, 即使起火点在距离主街较远的边缘位置, 火灾蔓延至主街及其沿街重要文物和历史建筑的时限在1.5h左右。如果因各种原因导致水灭火系统失效, 3h后, 延烧范围将占到历史文化名村主街的40%左右。

### 2.2 延烧发展路径和速度

对火灾蔓延的发展速度和具体延烧路径进行分析(图4), 可以发现如下规律:

(1) 火灾蔓延受主导风向和空间格局的双重影响。火灾在建筑室内一般各向均等蔓延(图4a)。在室外受到风向影响, 总体趋势往下风向的西北发展, 但具体路径受到建筑空间格局的影响, 南北方向的延烧范围远高于东西方向(图4b)。这是由于漆桥村建筑主要面朝南北走向的主街布局, 东西方向的建筑间距往往大于南北方向, 更宽的院落或街巷距离减缓了热辐射导致的火灾蔓延, 与已有研究一致<sup>[10]</sup>。

(2) 砖木结构很难阻止火势扩散, 但砖混结构可减缓火势。火灾蔓延大多会沿最易燃的木结构蔓延, 虽然砖木结构比木结构更不易起火, 但是其在漆桥历史文化名村中的比例较低, 最终被已燃的木结构建筑包围, 温度迅速上升后起火(图4c)。

(3) 火灾蔓延跨越主街较慢, 但跨越后火势蔓延极快。较宽的主街虽然可以阻止火势快速蔓延, 但受辐射热影响, 最终仍然会发生跨越街道的火灾。此时由于街对面木结构和砖木结构建筑大量起火, 温度极高, 故火势一旦蔓延过街, 发展速度将进一步加剧。

(4) 起火建筑面积随时间呈1.5倍增长, 即火灾蔓延具有持续加速发展的特点。

上述分析说明, 火灾延烧方向受建筑间距差异、风向和主要建筑结构类型的影响, 漆桥

历史文化名村在主导风向下的火灾蔓延将呈现出南北方向快、木及砖木结构快、越来越快的“三快”趋势。

### 2.3 价值损失速度和构成

根据历史文化名村保护规划, 对所有现状建筑的价值评估分类, 本文将受到法定保护的文物建筑和历史建筑的价值分值赋为10分, 传统风貌建筑的价值赋为3分, 一般建筑赋1分, 在模拟火灾延烧过程的同时计算历史文化名村的整体价值损失, 可以得到如图5所示不同时间的价值损失曲线图。从图中可以看出, 除了开始的0.5h总体价值几乎不变外, 其余时间价值一直在均等下降, 而不是在1.5h后, 火灾蔓延至文物建筑和历史建筑时, 其整体价值才开始降低。最终, 3h火灾导致历史文化名村的总体价值大约降低了20%, 其中文物建筑和历史建筑的损失约占53%, 传统风貌建筑的价值损失占42%, 其他一般建筑的价值损失占比较低。

## 3 结论和建议

根据上述基于元胞自动机的模拟分析结论, 漆桥历史文化名村的火灾蔓延防控应注意以下三个问题: (1) 村内现有街巷尺度和少量砖混建筑均不能有效阻挡火灾蔓延, 即使是外围偶发火灾, 也完全有可能延烧核心保护范围内的重要文物建筑和历史建筑; (2) 火灾蔓延呈加速状态, 必须在起火后1.5h内尽早扑灭火情, 否则将带来大面积延烧; (3) 南北向火灾蔓延快于东西向火灾蔓延, 消防栓的南北向间距应适当加密, 重点改造无保护价值建筑的南北向立面以减缓整体延烧速度; (4) 在火灾大面积延烧后的整体损失中, 传统风貌建筑和文物建筑、历史建筑的占比基本相当, 因此消防保护的重点不应仅限于文物建筑。

### 参考文献:

- [1] 国际古迹遗址理事会中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则[R]. 国际古迹遗址理事会中国国家委员会, 2015.
- [2] National Fire Protection Association. Code for Fire Protection of Historic Structures(FPA914-2016)[EB/OL]. [2021-01-20]. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=914>.
- [3] GB/T 50357-2018, 历史文化名城保护规划标准[S]. 2018.
- [4] 李新建, 李岚. 从冲突, 适应到整合: 中国历史地段消防的发展历程与当前对策[J]. 中国文化遗产, 2020, 97(03): 16-22.
- [5] 中华人民共和国公安部. 中华人民共和国公共安全行业标准《火灾损失统计方法》: GA 185-2014[S]. [2014-01-20].
- [6] 东南大学城市规划设计研究院有限公司. 南京漆桥历史文化名村保护规划(2016-2030)[R]. 2016.
- [7] 孟晓静, 杨立中, 李健. 基于元胞自动机的城市区域火灾蔓延概率模型探讨[J]. 中国安全科学学报, 2008(2): 28.
- [8] 孟晓静. 城市区域地震次生火灾风险评估及火灾蔓延模拟[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2009.
- [9] 曾翔, 杨哲庵, 许镇, 等. 村镇建筑群火灾蔓延模拟与案例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2017, 057(012): 1331-1337.
- [10] 王雁楠, 邱洪兴. 基于FDS的古建群落火灾蔓延规律数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(06): 26-32.