

中文引用格式:颜龙,李琪,郑佳欣,等.森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力评估[J].中国安全科学学报,2024,34(9):234-240.
英文引用格式:YAN Long, LI Qi, ZHENG Jiixin, et al. Assessment of firefighting and rescue capacity in concentrated area of built heritage in forest environments[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(9): 234-240.

森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力评估*

颜龙¹副教授,李琪¹,郑佳欣¹,徐志胜¹教授,刘顶立^{**2}副教授

(1 中南大学 土木工程学院,湖南长沙 410075;2 长沙理工大学 交通运输工程学院,湖南长沙 410114)

中图分类号:X928.7 文献标志码:A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.09.0103

基金项目:国家自然科学基金资助(52276143,52204202);湖南省重点研发计划项目(2021SK2054)。

【摘要】针对森林环境文物建筑集中区域环境复杂,难以准确评估区域灭火救援能力等问题,基于层次分析法(AHP),提出耦合森林因素的单体文物建筑灭火救援能力评估方法,涵盖建筑材料、森林防火隔离带、消防水源等19个二级指标;在单体评估基础上,从区域视角建立一种基于变权法的森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力评估模型;并引入惩罚占主导的混合型变权函数,设置评价策略,确定惩罚与激励区间,区分文物建筑保护等级,提出风险等级划分方法;通过实地调研和数据收集,结合定权法和变权法评价森林环境文物建筑集中区域(岳麓山风景名胜区)的灭火救援能力。结果表明:单体文物建筑评级为优、良、中、次、差的数量占比分别为12%、20%、32%、20%、16%。区域定权法得分为75.27(Ⅲ级,不需采取提升措施),变权法得分为69.97(Ⅳ级,需采取提升措施);建议采取增设电气火灾预警系统、增加森林防火隔离带等措施来提升灭火救援能力。

【关键词】森林火灾;文物建筑;集中区域;灭火救援;能力评估;变权

Assessment of firefighting and rescue capacity in concentrated area of built heritage in forest environments

YAN Long¹, LI Qi¹, ZHENG Jiixin¹, XU Zhisheng¹, LIU Dingli²

(1 School of Civil Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China;

2 School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha Hunan 410114, China)

Abstract: Aiming at the problem that the regional environment of cultural relic buildings in a forest environment is complex, and it is difficult to accurately evaluate the regional firefighting and rescue ability, an evaluation method of firefighting and rescue ability of a single cultural relic building coupled with forest factors was constructed based on Analytic Hierarchy Process (AHP), which covered 19 secondary indicators such as building materials, forest fire separation zones, and fire water sources. Based on single-unit assessment, a firefighting and rescue capacity assessment model based on the variable-rights method was established from the regional perspective for the centralized area of cultural relics buildings in the forest environment. A mixed-type variable-rights function dominated by penalties was introduced. The model was established by setting up the evaluation strategy, determining the penalties and incentives

* 文章编号:1003-3033(2024)09-0234-07; 收稿日期:2024-02-20; 修稿日期:2024-05-25

** 通信作者:刘顶立(1990—),男,湖南长沙人,工学博士,副教授,博士生导师,主要从事公共安全规划及火灾风险防控研究。E-mail: liudingli@csust.edu.cn。

intervals, differentiating the protection level of cultural relics buildings, and putting forward the risk level division method. The firefighting and rescue capacity of the forest environment heritage building concentration area (Yuelu mountain scenic spot) was evaluated by combining the fixed-rights method and variable-rights method through field research and data collection. The results show that the number of individual heritage buildings rated as 'excellent, good, moderate, substandard, poor' accounted for '12%, 20%, 32%, 20% and 16%'. For the centralized area, the fixed-rights method scored 75.27 (Level III, no need to take upgrading measures), while the variable-rights method scored 69.97 (Level IV, need to take upgrading measures). Therefore, it is recommended that measures such as installing additional electrical fire warning systems and increasing forest fire breaks be taken to enhance firefighting and rescue capabilities.

Keywords: forest fire; cultural relics and buildings; concentrated area; firefighting and rescue capability; capacity assessment; variable-rights

0 引言

截至2023年,我国(不含港澳台地区)现有文物建筑26万余处。受自然和社会因素影响,文物建筑集中分布在海拔低、坡度缓、文化强、战乱少的区域^[1-2]。低山森林环境是文物建筑免受战乱破坏的天然屏障,我国现存许多森林环境文物建筑集中区域^[3-5]。湖南岳麓山文物建筑多为木结构和砖木结构且呈连续区域分布,火灾危险性高、极易受森林火灾影响,灭火救援装备难以抵近、消防设施不完备,森林环境文物建筑集中区域的消防工作必须与文物建筑保护工作和森林火灾风险评估相结合^[6-7]。

国内外学者对文物建筑的消防安全评估做了大量研究。IBRAHIM等^[8]采用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, AHP)建立了文物建筑火灾风险评估指标体系;XIN Jing等^[9]定性评估了文物建筑;NETO等^[10]使用火灾风险指数(Fire Risk Index, FRI)评估了269座古建筑火灾风险,借助理信息系统工具提出了针对性消防安全改善措施;HU Jun等^[11]提出了一种基于火灾风险指标和贝叶斯网络的建筑物半定量评价方法;付强等^[12]从消防中队的灭火救援能力评估出发分析了消防救援力量对建筑火灾风险的影响;赵永昌等^[13]基于火灾风险指数法等方法,提出了一种基于防火性能多因素耦合的古建筑(群)火灾风险评估方法。徐志胜等^[14]提出了基于AHP的古建筑火灾风险评估方法,将其应用于凤凰古城某典型家庭旅馆。在研究对象方面,大部分研究重点关注了火灾风险评估,忽视了自身消防救援力量和外部消防救援力量对区域消防安全的影响,鲜有关于区域灭火救援能力评估方面的研究;在研究方法方面,多是在定性分析与定量评价的基础

上运用熵权、AHP等静态赋权测算,缺乏对体系的动态性评价,无法将指标权重伴随指标状态值的变化而变化的特点表现出来。

森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力在森林火灾等区域整体影响因素作用下较单体平均水平存在较大差异。为提升森林环境集中文物建筑灭火救援能力,笔者拟通过实地调研和专家评价,从区域视角,提出森林环境集中文物建筑灭火救援能力评估方法,根据单体建筑灭火救援能力得分,运用变权法惩罚或激励其在区域中的权重,以期更加准确地判断评估森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力等级,并根据评估结果制定灭火救援能力提升措施。

1 区域灭火救援能力评估方法

1.1 单体文物评估方法

1.1.1 指标体系建立和权重确定

基于AHP法建立耦合建筑结构、森林火灾、自身及外部灭火救援能力等因素的森林环境文物建筑灭火救援能力评估模型^[15-16],指标体系共有4个中间层($A_1 \sim A_4$),19个二级指标($B_1 \sim B_{19}$),邀请相关领域4类共10名专家确定指标体系的权重,专家类别及权重系数见表1,其中, k_n 为第 n 类专家打分($n=1,2,3,4$)的权重系数。

表1 专家类别及权重系数

类别编号	领域	人数	权重系数 k_n
1	消防救援	3	$k_1 = 0.4$
2	高校科研	5	$k_2 = 0.3$
3	建筑设计	1	$k_3 = 0.2$
4	建筑管理	1	$k_4 = 0.1$

指标 B_i 的累计权重 ω_{B_i} 可表示为:

$$\omega_{B_i} = k_1 \frac{\sum_{j=1}^3 \omega_{1j}}{3} + k_2 \frac{\sum_{j=1}^5 \omega_{2j}}{5} + k_3 \omega_3 + k_4 \omega_4 \quad (1)$$

式中： ω_{1j} 为第 j 个 1 类专家评估的指标 B_i 的权重； ω_{2j} 为第 j 个 2 类专家评估的指标 B_i 的权重； ω_3 为 3 类专家评估的指标 B_i 的权重； ω_4 为 4 类专家评估的指标 B_i 的权重。

专家运用 1~9 标度法对各层指标开展两两比较, 获得各个指标的判断矩阵, 利用方根法计算各元素的相对权重^[17-18], 并通过一致性检验, 其中, 未通过一致性检验的专家意见不予采纳, 最后按照评分细则评分, 得到评价结果。计算出中间层和二级指标的权重系数见表 2。

表 2 单体建筑评估模型指标权重系数

Table 2 Weighting factors coefficients for single building assessment models

一级指标	权重系数/%	二级指标	权重系数/%
自身影响因素 A_1	20.81	建筑材料 B_1	2.77
		用火情况 B_2	4.17
		用电情况 B_3	2.73
		避雷设施 B_4	1.41
		堆积可燃物 B_5	4.24
		防火间距 B_6	2.65
		消防车道 B_7	2.84
森林影响因素 A_2	27.46	森林防火隔离带 B_8	8.04
		植被类型 B_9	5.16
		气候条件 B_{10}	5.76
		枯叶堆积 B_{11}	8.49
自身灭火救援力量 A_3	33.79	灭火设施 B_{12}	9.11
		微型消防站 B_{13}	6.56
		内部消防水源 B_{14}	4.72
		人员灭火救援能力 B_{15}	13.41
外部消防救援力量 A_4	17.94	人员到达时间 B_{16}	3.91
		装备到达时间 B_{17}	5.50
		室外消火栓 B_{18}	5.02
		外部消防水源 B_{19}	3.50

1.1.2 评估指标打分标准确定

单体文物建筑灭火救援能力评估分值 s 表示为:

$$s = \sum_{i=1}^{19} \omega_{B_i} \frac{\sum_{j=1}^{10} s(B_i, j)}{10} \quad (2)$$

式中： ω_{B_i} 为指标 B_i 的累计权重, 取值(0, 1); $s(B_i, j)$ 为第 j 个专家对指标 B_i 的评价分值, 取值[0, 100]。

以 B_8 为例, 设防火隔离带宽度 d 满足规范要求目标为 30 m, 得分为 100; 基本满足要求目标为 15 m, 得分为 60; 完全不满足要求目标为 0 m, 得分为 0。其他宽度运用插值法取值, 故 $s(B_8)$ 得分为:

$$s(B_8) = \begin{cases} 4d & 0 \leq d \leq 15 \\ \frac{8}{3}d + 2 & 15 < d \leq 30 \\ 100 & 30 < d \end{cases} \quad (3)$$

以 B_{17} 为例, 综合考虑应急救援与经济效益 2 个方面, 设有效覆盖目标对应行程时间 t 为 240 s, 得分为 100; 可覆盖目标对应 t 为 840 s, 得分为 60; 完全不可覆盖目标对应 t 为 1 740 s, 得分为 0。其他行程时间运用插值法取值, 故 $s(B_{17})$ 得分为:

$$s(B_{17}) = \begin{cases} 100 & 0 \leq t \leq 240 \\ -\frac{1}{15}t + 116 & 240 < t \leq 1740 \\ 0 & 1740 < t \end{cases} \quad (4)$$

类似地, 制订其他二级指标 ($B_3 \sim B_{19}$) 的评分标准。

1.2 文物建筑集中区域评估方法

1.2.1 文物建筑集中区域影响因素

风景名胜区的森林环境文物建筑集中区域由数个单体文物建筑组成, 区域评估在考虑单体文物建筑灭火救援能力的基础上, 还需要考虑区域整体影响因素^[15-16]。典型的影响因素有: 森林环境增加森林火灾的概率和火灾后果严重度; 复杂的地形和高差增加外部消防救援力量的抵近时间; 大量的游客增加火灾风险不确定性和灭火救援难度。

在定权的评价模型中, 指标值随时间不断变化, 但静态的权重始终固定不变, 区域或系统的评估结果往往是各评估单元的简单加权平均, 这对于风景区这种开放的动态的研究对象来说, 往往是不适宜的^[19]。区域灭火救援能力的实际状态具有木桶效应, 区域灭火救援能力取决于评估状态较差的单体。经过实地调研发现, 文物建筑消防管理水平与其保护等级呈正相关, 不同保护等级文物消防管理水平差异较大, 显著影响灭火救援能力水平。应用变权综合理论, 引入局部惩罚-激励机制, 计算目标区域的灭火救援能力得分系数, 克服定权评价体系不能准确反应动态目标状态的不足, 综合评价区域灭火救援能力的准确状态^[20]。

1.2.2 变权综合理论

在变权综合理论中, 因素权重并不只依赖于其评价本身的变化而变化, 而是依赖于因素状态值

的变化而变化^[21-22]。变权重 $W(x_i)$ 可表示为:

$$W(x_i) = \frac{W_{x_i}^{(0)} f(x_i)}{\sum_{i=1}^n W_{x_i}^{(0)} f(x_i)} \quad (5)$$

式中: $W_{x_i}^{(0)}$ 为评估单元 x_i 的定权重; $f(x_i)$ 为惩罚占主导的混合型变权函数; n 为评估单元数。

惩罚占主导的混合型变权函数 $f(x_i)$ 可表示为:

$$f(x_i) = \begin{cases} \frac{c_2 - c_1}{\lambda - \mu} \ln \frac{\mu}{x_i} + c_2 & 0 < x_i < \mu \\ -\frac{c_2 - c_1}{\lambda - \mu} x_i + \frac{c_2 \lambda - c_1 \mu}{\lambda - \mu} & \mu \leq x_i < \lambda \\ C + \frac{(c_2 - c_1)(\alpha - x_i)^2}{2(\lambda - \mu)(\alpha - \lambda)} & \lambda \leq x_i < \alpha \\ C & \alpha \leq x_i < \beta \\ K(1 - \beta) \ln \frac{1 - \beta}{1 - x_i} + C & \beta \leq x_i < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: C 为常规评价策略; c_1, c_2 为特征评价策略; μ 为特强惩罚上限; λ 为强惩罚上限; α 为惩罚水平; β 为激励水平; K 为调整系数。

函数 $f(x_i)$ 在区间 $(0, 1)$ 光滑连续可导, 且 $0 < \mu < \lambda < \alpha < \beta < 1, 0 < C < c_1 < c_2 < 1$, 该变权函数中 $(0, \alpha)$ 为惩罚区间, $(0, \mu)$ 为特强惩罚区间, $[\mu, \lambda]$ 为强惩罚区间, $[\lambda, \alpha]$ 为初惩罚区间; $[\alpha, \beta]$ 为合格区间; $[\beta, 1)$ 为激励区间。

1.2.3 评价模型

当单体灭火救援能力得分 s 的取值小于 60 时, 火灾难以在初期火灾的黄金救援期被扑灭, 造成较严重后果的概率明显增加, 需设置函数惩罚幅度远大于激励幅度。此处设置该变权函数的特强惩罚阶段为 $(0, 0.6)$, 强惩罚阶段为 $[0.6, 0.7)$, 初惩罚阶段为 $[0.7, 0.8)$, 常规阶段为 $[0.8, 0.9)$, 激励阶段为 $[0.9, 1)$ 。故函数各参数取值分别为 $\mu = 0.6, \lambda = 0.7, \alpha = 0.8, \beta = 0.9, C = 0.6, c_1 = 0.7, c_2 = 0.9, K = 2, x_i = s_i/100$ 。 s_i 为第 i 个单体得分。

由式(6)可得状态变权函数:

$$f(x_i) = \begin{cases} 2 \ln \frac{0.6}{x_i} + 0.9 & 0 < x_i < 0.6 \\ -2x_i + 2.1 & 0.6 \leq x_i < 0.7 \\ 0.6 + 10(0.8 - x_i)^2 & 0.7 \leq x_i < 0.8 \\ 0.6 & 0.8 \leq x_i < 0.9 \\ 0.2 \ln \frac{0.1}{1 - x_i} + 0.6 & 0.9 \leq x_i < 1 \end{cases} \quad (7)$$

区分单体文物建筑的保护等级, 可分为全国重点文物保护单位、省级文物保护单位、市级文物保护单位。实地调研发现, 全国重点文物保护单位消防管理制度完善, 消防管理水平显著高于省级文物保护单位, 市级文物保护单位消防管理水平存在较大隐患。在区域评估模型中, 对单体得分引入补偿系数 h , 更加准确地反映区域灭火救援能力水平。系数的确定与前述 AHP 中指标权重的确定采用同样的方法:

$$s'_i = h s_i \frac{\sum_{i=1}^n s_i}{\sum_{i=1}^n h s_i} \quad (8)$$

式中: s'_i 为第 i 个单体补偿后得分, 单体全国重点文物保护单位 $h = 1.3$, 湖南省文物保护单位 $h = 1.1$, 长沙市文物保护单位 $h = 0.9$ 。

由式(5)和式(8)得变权后区域灭火救援能力得分:

$$s_t = \sum_{i=1}^n s'_i W(x_i) \quad (9)$$

式中 s_t 为区域变权得分。

2 分级判定方法

为使评估结果更具区分性^[23], 根据评估专家意见, 将单体灭火救援能力评估所得分值与定性评价的灭火救援能力水平的对应关系划分为 5 种, 见表 3。各二级指标所得分值与定性评价的灭火救援能力水平的对应关系及区域评估所得分值与定性评价的灭火救援能力水平的对应关系均采用与单体文物建筑相同的分级判定方法。当单体文物建筑或区域评级低于Ⅲ级(不含本级)时, 需要采取相应消防管理措施以提高灭火救援能力。

表 3 文物古建筑灭火救援能力评估等级划分

Table 3 Cultural relics and buildings fire-fighting and rescue capability assessment level division

等级	得分	灭火救援能力评价
I	[90, 100]	优
II	[80, 90)	良
III	[70, 80)	中
IV	[60, 70)	次
V	[0, 60)	差

3 区域灭火救援能力评估实例

3.1 研究区域概况

岳麓山风景名胜区(简称岳麓山)位于湖南省

长沙市,植被丰富,以亚热带常绿阔叶林和亚热带暖性针叶林为主^[24]。基于笔者提出的方法评估森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力,采用资料收集和现场调研2种手段采集所需数据,确定了36个调研对象,见表4。

表4 岳麓山风景区文物清单

Table 4 List of cultural relics in Yuelu mountain scenic area

类别	名称
全国重点文物保护单位(5处)	岳麓书院、爱晚亭、禹王碑、黄兴墓、蔡锷墓
湖南省文物保护单位(15处)	麓山寺、麓山忠烈祠、麓山寺碑、长沙会战碑、北伐纪念塔、庞人铨墓、半山亭、刘道一墓、焦达峰墓、陈作新墓、禹之谟墓、姚宏业墓、谭振墓、肖伟墓、谢晋墓
长沙市文物保护单位(16处)	云麓宫、湖南省会警察纪念堂、穿石坡湖、印心石屋石刻、二南石刻、笑啼岩石刻、刘崑涛墓、胡子靖墓、白鹤泉、丁文江墓、仰云亭、齐学启墓、易本羲墓、辛亥援鄂阵亡将士公墓、中山纪念林碑、舍利塔

3.2 灭火救援能力评估

通过实地调研获取19个二级指标($B_1 \sim B_{19}$)数据,根据单体文物建筑灭火救援能力评估方法,计算得各单体灭火救援能力得分。计算区域得分时,穿石坡湖作为外部消防水源不计入,排除建筑主体为不燃材料的墓碑等数据,确定评估单体总数为25,对25个单体评估结果进行变权,结果见表5。

表5 区域灭火救援能力评估变权结果

Table 5 Weighted results of the regional firefighting and rescue capacity assessment

序号	s_i	h	s_i'	W^0	$f(x_i)$	$W(x_i)$	单体评级
1	95.23	1.30	116.58	0.040 0	0.748 0	0.039 1	优
2	93.54	1.30	114.51	0.040 0	0.687 4	0.036 0	优
3	93.19	1.30	114.08	0.040 0	0.676 8	0.035 4	优
4	89.85	1.10	93.07	0.040 0	0.600 0	0.031 4	良
5	89.56	1.10	92.77	0.040 0	0.600 0	0.031 4	良
6	89.54	1.10	92.75	0.040 0	0.600 0	0.031 4	良
7	88.57	0.90	75.06	0.040 0	0.600 0	0.031 4	良
8	86.72	1.30	106.16	0.040 0	0.600 0	0.031 4	良
9	79.78	1.10	82.64	0.040 0	0.600 0	0.031 4	中
10	79.32	1.30	97.10	0.040 0	0.600 5	0.031 4	中
11	78.83	1.10	81.65	0.040 0	0.601 4	0.031 5	中
12	78.12	1.10	80.92	0.040 0	0.603 5	0.031 6	中
13	77.51	0.90	65.69	0.040 0	0.606 2	0.031 7	中
14	77.32	0.90	65.53	0.040 0	0.607 2	0.031 8	中
15	77.15	0.90	65.38	0.040 0	0.608 1	0.031 8	中

续表5

序号	s_i	h	s_i'	W^0	$f(x_i)$	$W(x_i)$	单体评级
16	76.88	1.10	79.63	0.040 0	0.609 7	0.031 9	中
17	69.42	0.90	58.83	0.040 0	0.711 6	0.037 2	次
18	68.37	0.90	57.94	0.040 0	0.732 6	0.038 3	次
19	67.52	0.90	57.22	0.040 0	0.749 6	0.039 2	次
20	67.45	0.90	57.16	0.040 0	0.751 0	0.039 3	次
21	67.32	0.90	57.05	0.040 0	0.753 6	0.039 4	次
22	51.15	0.90	43.35	0.040 0	1.219 2	0.063 8	差
23	50.44	0.90	42.75	0.040 0	1.247 1	0.065 2	差
24	45.12	1.10	46.74	0.040 0	1.470 0	0.076 9	差
25	43.78	0.90	37.10	0.040 0	1.530 3	0.080 1	差

根据表5中权重值,由式(9)计算区域灭火救援能力变权评估得分,并与定权评估结果比较。岳麓山森林环境文物建筑集中区域灭火救援能力定权法得分为75.27,等级为Ⅲ级(不需采取提升措施),变权法得分为69.97,等级为Ⅳ级(需采取提升措施)。岳麓山风景区文物建筑集中区域评价结果如图1所示。

由表5可知:岳麓山风景区25个评估单体中,评估结果为优的有3个(12%),评估结果为良的有5个(20%),评估结果为中的有8个(32%),评估结果为次的有5个(20%),评估结果为差的有4个(16%)。评估等级为中的占比最大,可能的原因是高植被覆盖率的森林环境和复杂的地形。以岳麓书院为例,评估结果为优的占比最小,可能的原因是:①岳麓书院为全国重点文物保护单位,消防管理水平较高;②岳麓书院位于海拔较低处,外部救援力量抵达较快;③岳麓书院周围消防车道、疏散通道较为完善,便于救援疏散展开。

从表4还得到,区域灭火救援能力定权评价结果为75.27分,分级评价为Ⅲ级(中),但区域中评价结果为中的单体占比最多,且存在4处评价结果为差,隐患较大的单体,会导致区域整体的消防安全风险增大。若采用常权法则评分偏高,不能充分体现区域灭火救援能力真实情况,而采用变权法的评价结果69.97分,分级评价为Ⅳ级(次),更接近区域灭火救援能力实际情况。

为提高单体文物建筑灭火救援能力水平,建议采用增设电气火灾预警系统、减少可燃物堆积和提高消防设施维护频率等措施。为提高区域灭火救援能力水平,建议采用增加森林隔离带、清理堆积落叶枯枝,加强消火栓、消防管道等消防基础设施建设和道路建设,在区域内部,开发天然的消防水源,节约大高差消

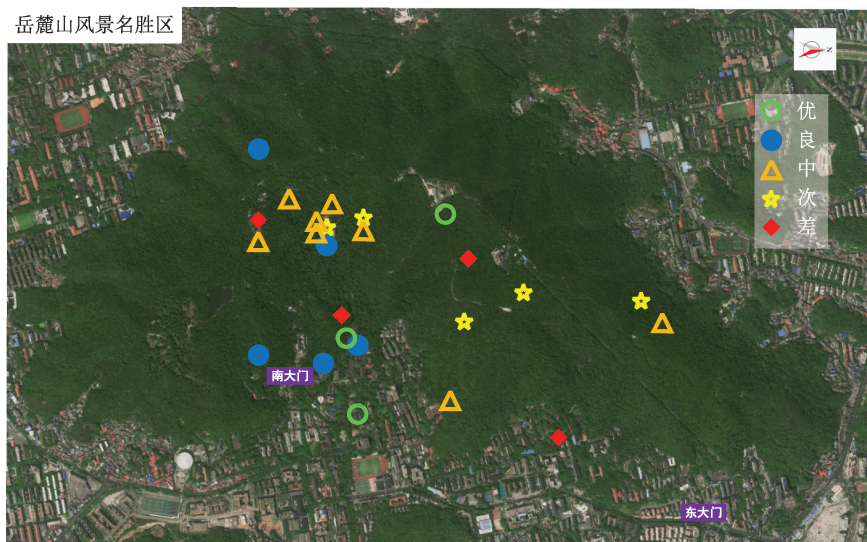


图1 岳麓山风景区文物建筑集中区域评价结果

Fig.1 Cultural relics buildings concentrated area evaluation result diagrams of Yuelu Mountain

防供水的经济成本和提高消防管理水平等措施。

4 结论

1) 耦合森林因素的单体文物建筑灭火救援能力评估因素包含建筑材料、森林防火隔离带、消防水源等 19 个二级指标,单体文物建筑的灭火救援能力评估结果为优、良、中、次、差的数量占比分别为 12%、

20%、32%、20%和 16%。

2) 岳麓山风景名胜区森林区域灭火救援能力评价结果表明:定权法得分为 75.27(Ⅲ级,不需采取提升措施),变权法得分为 69.97(Ⅳ级,需采取提升措施)。建议采取在建筑内增设电气火灾预警系统、在森林中增加森林防火隔离带、加强景区道路建筑等措施来提升单体文物建筑及区域灭火救援能力。

参考文献

- [1] 陈君子,周勇,刘大均. 中国古建筑遗产时空分布特征及成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 194-200.
CHEN Junzi, ZHOU Yong, LIU Dajun. Analysis of spatio temporal distribution characteristics of ancient architecture heritage in China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 194-200.
- [2] 韩瑛,贾林雨,张成莉,等. 山西省古建筑文化旅游资源空间分布特征及影响因素研究[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(1): 196-202.
HAN Ying, JIA Linyu, ZHANG Chengli, et al. Spatial distribution characteristics of ancient architecture cultural tourism resources in Shanxi[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(1): 196-202.
- [3] 刘晓,张曼曼,刘玉超. 空间规划体系中风景名胜整合与边界优化路径研究:以庐山风景名胜为例[J]. 中国园林, 2023, 39(10): 69-75.
LIU Xiao, ZHANG Manman, LIU Yuchao. Research on the path of integration and boundary optimization of scenic and historic area in the spatial planning system: taking Lushan scenic area as an example [J]. Chinese Landscape Architecture, 2023, 39(10): 69-75.
- [4] 刘智兴,马耀峰,高楠,等. 山岳型旅游目的地形象感知研究:以五台山风景名胜区为例[J]. 山地学报, 2013, 31(3): 370-376.
LIU Zhixing, MA Yaofeng, GAO Nan, et al. A research on tourism destination image perception of mountain resorts: a case study of mountain Wutai scenery area in China[J]. Journal of Mountain Science, 2013, 31(3): 370-376.
- [5] 兰虹. 青城山道教资源的保护与开发[J]. 西南民族大学学报:人文社科版, 2007, 28(12): 99-101.
- [6] 周恩毅,谭露,胡金荣. 城市建筑物消防安全评估[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(3): 179-185.
ZHOU Enyi, TAN Lu, HU Jinrong. Fire safety assessment of urban building[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(3): 179-185.
- [7] 蒋琴,钟少波,朱伟. 京津冀地区森林火灾综合风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(10): 119-125.
JIANG Qin, ZHONG Shaobo, ZHU Wei. Research on comprehensive risk assessment of forest fire in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(10): 119-125.
- [8] IBRAHIM M N, ABDUL-HAMID K, IBRAHIM M S, et al. The development of fire risk assessment method for heritage building[J]. Procedia Engineering, 2011, 20: 317-324.

- [9] XIN Jing, HUANG Chongfu. Fire risk analysis of residential buildings based on fire statistics from China[J]. Fire Technology, 2014, 50(5): 1 147-1 161.
- [10] NETO J T, FERREIRA T M. Assessing and mitigating vulnerability and fire risk in historic centres: a cost-benefit analysis[J]. Journal of Cultural Heritage, 2020, 45: 279-290.
- [11] HU Jun, XIE Xuecai, SHU Xueming, et al. Fire risk assessments of informal settlements based on fire risk index and bayesian network[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19 (23): DOI: 10.3390/ijerph192315689.
- [12] 付强, 张和平, 熊永祥, 等. 基于层次分析法的消防中队灭火救援能力评估[J]. 安全与环境学报, 2008, 8(1): 156-159.
FU Qiang, ZHANG Heping, XIONG Yongxiang, et al. A renovated method for assessing the fire fighting and rescuing capability by taking the fire brigade as a unit[J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(1): 156-159.
- [13] 赵永昌, 闫怀林, 朱国庆. 基于防火性能多因素耦合文物建筑火灾风险评估方法及应用:以平遥古城为例[J]. 劳动保护, 2023(5): 87-90.
- [14] 徐志胜, 刘顶立, 曹欢欢, 等. 基于 AHP 的古建筑火灾风险评估方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(3): 690-694.
XU Zhisheng, LIU Dingli, CAO Huanhuan, et al. Study on fire risk assessment of historic buildings based on AHP[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(3): 690-694.
- [15] 颜峻, 左哲. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 61-65.
YAN Jun, ZUO Zhe. Research on natural disaster risk assessment index system and method[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(11): 61-65.
- [16] 刘启源, 刘金程. 自然灾害视角下区域韧性评价方法及影响因素[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(5): 174-181.
LIU Qiyuan, LIU Jincheng. Regional resilience evaluation methods and influencing factors from perspective of natural disasters[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(5): 174-181.
- [17] 闫子卉, 万杰. 基于组合赋权法的文物建筑火灾风险评估[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(5): 718-721.
YAN Zihui, WAN Jie. Cultural relic building fire risk assessment based on combination weighting approach[J]. Fire Science and Technology, 2019, 38(5): 718-721.
- [18] 王磊磊, 雷鹏奎, 邓军, 等. 区域性文物建筑消防安全评估方法研究[J]. 武警学院学报, 2021, 37(8): 20-23.
WANG Leilei, LEI Pengkui, DENG Jun, et al. Study on fire safety evaluation methods of regional historic buildings[J]. Journal of the Armed Police Academy, 2021, 37(8): 20-23.
- [19] 戚振彪, 郭晓雪, 寿宇铭, 等. 林区架空配电线路诱发森林火灾风险评估[J]. 消防科学与技术, 2023, 42(6): 829-834.
QI Zhenbiao, GUO Xiaoxue, SHOU Yuming, et al. Risk assessment of fire induced by overhead distribution lines across forest areas[J]. Fire Science and Technology, 2023, 42(6): 829-834.
- [20] 唐士润, 周涛, 张建军, 等. 基于惩罚型变权模型的高速公路路面性能评价[J]. 公路交通科技: 应用技术版, 2020, 16(8): 170-173.
- [21] 李春好, 孙永河, 贾艳辉, 等. 变权层次分析法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 723-731.
LI Chunhao, SUN Yonghe, JIA Yanhui, et al. Analytic hierarchy process based on variable weights[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2010, 30(4): 723-731.
- [22] 李坦, 陈天宇, 米锋, 等. 基于变权理论和 DPSIRM 的中国森林生态安全评价[J]. 中国环境科学, 2021, 41 (5): 2 411-2 422.
LI Tan, CHEN Tianyu, MI Feng, et al. Evaluation of China's forest ecological security based on variable weight theory and DPSIRM[J]. China Environmental Science, 2021, 41(5): 2 411-2 422.
- [23] 刘顶立, 徐志胜, 王飞跃. 基于后果概率估计的地铁集群火灾风险评估[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18 (3): 813-820.
LIU Dingli, XU Zhisheng, WANG Feiyue. Fire risk evaluation of subway group based on consequence probability estimation[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(3): 813-820.
- [24] 熊鹰, 杨雪白. 城市山岳型旅游地旅游资源空间承载力分析:以岳麓山风景区为例[J]. 中国人口资源与环境, 2014, 24(增 1): 301-304.
XIONG Ying, YANG Xuebai. Research on the carrying capacity of resources space of city-mountain resorts: a case study of Yuelu mountain[J]. China Population, Resources and Environment, 2014, 24(S1): 301-304.

作者简介: 颜龙 (1987—),男,四川乐山人,工学博士,副教授,博士生导师,主要从事防火阻燃及灭火技术研究。E-mail:yulong015@163.com。

