

DOI: 10.20103/j.stxb.202405151101

王博, 杨雪清, 蒋春颖, 赖光辉, 陈锋, 刘晓东. 北京山区森林火灾蔓延风险评估. 生态学报, 2025, 45(2): 813-821.

Wang B, Yang X Q, Jiang C Y, Lai G H, Chen F, Liu X D. Assessment of forest fire spread risk in the Mountainous District, Beijing. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(2): 813-821.

北京山区森林火灾蔓延风险评估

王 博^{1,2}, 杨雪清³, 蒋春颖³, 赖光辉⁴, 陈 锋², 刘晓东^{2,*}

1 华北科技学院应急技术与管理学院, 廊坊 065201

2 森林草原火灾风险防控应急管理部重点实验室, 北京 100083

3 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714

4 北京市园林绿化规划和资源监测中心(北京市林业碳汇与国际合作事务中心), 北京 100029

摘要: 森林火灾蔓延风险(建筑物)是指林火蔓延及其对建筑物造成破坏损失的可能性, 可以明确林火容易蔓延且对建筑物造成破坏损失严重的区域。科学评估森林火灾蔓延风险(建筑物), 可以为森林火灾精准化防控提供科学依据, 具有重要的理论和应用价值。以北京山区(房山、门头沟、昌平、延庆、怀柔、密云、平谷)为研究对象, 基于“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架, 开展北京山区多尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)评估。应用层次分析法和熵权法相结合的主客观赋权法确定指标权重, 加权综合评价法和面积加权平均法计算多尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数。通过自然断点分级法划分等级, 空间自相关分析探讨森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的空间关联模式。研究结果表明: (1) 建筑物暴露度的综合权重达到 0.5123, 是影响森林火灾蔓延风险(建筑物)的主要因素。(2) 北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)评估结果显示, 高风险区域在小班、乡镇、区级尺度上分别占比 3.82%、13.30%、17.95%。(3) 北京山区小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数空间异质性显著, 表现出集聚分布的规律, 高-高集聚型小班 16641 个。研究结果发现北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)高风险小班以侧柏、油松、灌木林为主, 建议有针对性地加强建筑物密集区、森林-城镇交界域的森林可燃物管理工作。

关键词: 北京山区; 森林火灾蔓延风险(建筑物); 暴露度; 脆弱性; 多尺度

Assessment of forest fire spread risk in the Mountainous District, Beijing

WANG Bo^{1,2}, YANG Xueqing³, JIANG Chunying³, LAI Guanghui⁴, CHEN Feng², LIU Xiaodong^{2,*}

1 School of Emergency Technology and Management, North China Institute of Science and Technology, Langfang 065201, China

2 Key Laboratory of Forest and Grassland Fire Risk Prevention Ministry of Emergency Management, Beijing 100083, China

3 Academy of Forestry and Grassland Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China

4 Beijing Municipal Forestry and Parks Planning and Resource Monitoring Center, Beijing Municipal Forestry Carbon Sinks and International Cooperation Affairs Center, Beijing 100029, China

Abstract: Forest fire spread risk (buildings) refers to the possibility of forest fire spreading and causing damage and loss to buildings. It can identify areas where forest fire is prone to spread and cause serious damage and loss to buildings. Scientific assessment of forest fire spread risk (buildings) can provide scientific basis for accurate prevention and control of forest fires, and can bring important theoretical and application value. The mountainous districts of Beijing (Fangshan, Mentougou, Changping, Yanqing, Huairou, Miyun, Pinggu) were used as the research object. The multi-scale forest fire spread risk (buildings) assessment in the mountainous districts of Beijing was carried out based on the risk assessment framework of “hazard-exposure-vulnerability”. The subjective and objective weighting method of AHP and entropy weight method were used to determine the index weight, and the weighted comprehensive evaluation method and the area weighted

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3006804); 中央高校基本科研业务费资助(3142024007)

收稿日期: 2024-05-15; **网络出版日期:** 2024-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xd_liu@bjfu.edu.cn

average method were used to calculate the multi-scale forest fire spread risk (buildings) index. The natural breakpoint grading method was used to classify levels, and the spatial autocorrelation analysis method was used to explore the spatial correlation pattern of the forest fire spread risk (buildings) index. The research results show that: (1) The comprehensive weight of building exposure reaches 0.5123, which is the main factor affecting the forest fire spread risk (buildings). (2) The assessment results of forest fire spread risk (buildings) in Beijing Mountainous District showed that the high risk areas accounted for 3.82%, 13.30%, and 17.95% at the subcompartment, township, and district scales, respectively. (3) The spatial heterogeneity of forest fire spread risk (buildings) index at the subcompartment scale in the mountainous districts of Beijing was significant, showing the law of agglomeration distribution, with 16, 641 HH (high-high) cluster subcompartments. The results showed that the high-risk subcompartments of forest fire spread risk (buildings) were mainly *Platycladus orientalis*, *Pinus tabulaeformis* and shrubbery in the mountainous districts of Beijing. It is suggested to strengthen the forest fuel management in the built-up areas and the border areas between the field and the city.

Key Words: Beijing Mountainous District; forest fire spread risk (buildings); exposure; vulnerability; multi-scale

受全球气候变化和土地用途变化影响,森林火灾发生的频率和强度明显增加^[1-2]。林火造成的财产损失主要发生在建筑物密集区、森林-城镇交界域,当一个燃烧的建筑物余烬点燃邻近的建筑物时,火灾就会加速蔓延,成为林火管理面临的挑战^[3-4]。森林火灾蔓延风险(建筑物)是指林火蔓延及其对建筑物造成破坏损失的可能性,是林火蔓延可能性及蔓延对建筑物产生影响的综合度量(本研究所指蔓延对建筑物的影响假定100%损失,不考虑部分烧毁的情况)^[5-8]。森林火灾蔓延风险(建筑物)评估可以明确林火容易蔓延且对建筑物造成破坏损失严重的区域,有助于指导林火灾害的科学防控,具有重要的理论和应用价值。

“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架评价内容清晰全面,可操作性强,被广泛应用于自然灾害风险评估^[9-10]。温旭敏等基于中国气象、人口和经济资料,从危险性、暴露度和脆弱性三个维度构建了高温风险评估指标体系,揭示中国高温风险空间格局^[11]。Yang 等从林火风险致灾因素、承灾体暴露度、承灾体脆弱性三个方面选取了9个二级指标,构建森林火灾风险评估模型,对我国珠海市林火风险进行科学评价,为森林消防站的布局选址提供依据^[12]。这些研究结果表明,在研究灾害风险的过程中,不仅要考虑致灾因子,还要考虑社会经济系统对致灾因子的暴露度和脆弱性。

运用模型模拟林火行为,可以预测林火蔓延的速度、方向和范围,为林火风险评估提供基础信息,对于林火管理和应急资源分配具有重要意义^[13-15]。陶长森等在深入了解不同针叶林中各层可燃物空间分布的基础上,计算了北京山区主要针叶林在不同梯度燃烧条件下发生树冠火的概率和冠层潜在火行为特征,并利用树冠火蔓延临界指标模型建立了主要针叶林冠层危险指数模型^[16]。宗学政等基于森林燃烧概率、潜在火行为和火影响等因素,利用层次分析法构建林分尺度森林火灾风险评估体系,科学评估北京市九龙山林场的林火风险^[17]。Rodrigues 等结合林火发生、初发火控制成功率、林火传播的模拟结果,将林火管理区域划分为综合管理、人为火源管理、可燃物管理、科学用火四种类型,为地中海地区林火管理提供依据^[14]。

北京山区是首都生态涵养区、绿色生态安全屏障和饮用水源保护地,是保障首都可持续发展的关键区域。近年来,北京积极开展森林进城、森林环城和森林乡村建设,绿色生态空间大幅拓展,由于与森林植被接近的建筑物密度增加,林火蔓延造成建筑物破坏损失的可能性不断增加,为首都林火风险管理带来严峻挑战。本研究以北京山区(房山、门头沟、昌平、延庆、怀柔、密云、平谷)为研究对象,基于“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架,运用地理信息系统(GIS)空间分析技术开展北京山区多尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)评估,并通过空间自相关分析探讨森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的空间关联模式,研究结果可以为森林火灾精准化防控提供依据。

1 研究区概况

北京市(北纬 39°28'—41°05',东经 115°25'—117°30')位于华北平原北部,东南与天津接壤,其余边界均

与河北省毗邻,总面积 16410km²,其中山地面积约 10072km²,占总面积的 61.4%。根据《全国森林防火规划(2016—2025 年)》,北京市森林防火重点区域无高危区,共有 7 个高风险区,即为 7 个山区区(房山、门头沟、昌平、延庆、怀柔、密云、平谷)。北京山区地理位置和生态区位极为重要,自然条件优越,海拔 1000—1500m,最高海拔为东灵山 2303m,地带性土壤为褐土。气候类型是暖温带半湿润大陆性季风气候,春季冬季干燥多风,昼夜温差大,植被含水率低,风向主要为西北风,容易引发森林火灾。山区森林资源丰富,森林覆盖率达到 59%,具有明显的垂直分布规律,主要优势树种有油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、桦树(*Betula* spp.)、栎类(*Quercus* spp.)、山杨(*Populus davidiana*)等。

2 研究方法

2.1 数据来源

2019 年森林资源二类调查小班数据来自北京市园林绿化规划和资源监测中心,属性指标包括地类、面积、优势树种(组)、起源、龄组。

建筑物格网数据来自北京市第一次全国自然灾害综合风险普查领导小组办公室,包括房屋建筑栋数合计、砌体结构/砖石结构建筑面积百分比、木结构建筑面积百分比、其他结构建筑面积百分比。

2.2 基于“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架的森林火灾蔓延风险(建筑物)评估

暴露度是指受森林火灾影响的承灾体暴露情况,脆弱性是指致灾因子导致承灾体的损失程度。本研究将建筑物作为承灾体进行研究,基于森林火灾蔓延危险、建筑物暴露度、建筑物脆弱性三个因子评估森林火灾蔓延风险(建筑物)(表 1)。

表 1 森林火灾蔓延风险(建筑物)评估指标

Table 1 The assessment index of forest fire spread risk (buildings)

评估对象 Evaluation object	评估指标 Evaluation index	计算方式 Calculation
致灾因子危险性 Hazard of disaster causing factors	森林火灾蔓延危险指数	依据文献 ^[18] ,基于森林可燃物、气象因子、地形因子、火行为 4 个方面的 13 个二级指标评估得到。
承灾体暴露度 Exposure of disaster bearing bodies	建筑物数量	基于建筑物格网数据,利用小班内格网建筑物数量的面积加权平均计算小班建筑物数量,单位为栋。
承灾体脆弱性 Vulnerability of disaster bearing bodies	易燃建筑面积占比	基于建筑物格网数据,利用小班内格网易燃建筑面积比例的面积加权平均计算小班的易燃建筑面积比例,单位为%。

2.3 评估指标标准化

为了消除评估指标之间的量纲影响,对建筑物暴露度采用离差标准化法进行正向标准化处理^[19],森林火灾蔓延危险和建筑物脆弱性的计算值分布在[0,1]区间范围内,不再进行标准化处理。

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \min(X_{ij})}{\max(X_{ij}) - \min(X_{ij})} \quad (\text{正向标准化}) \quad (1)$$

式中, X'_{ij} 为第 j 个因子第 i 个指标值的归一化值; X_{ij} 为第 j 个因子第 i 个指标值; $\min(X_{ij})$ 为第 i 个指标值中的最小值; $\max(X_{ij})$ 为第 i 个指标值中的最大值。

2.4 评估指标权重的确定

本研究综合应用层次分析法、熵权法相结合的主客观赋权法确定评估指标权重^[5,20]。首先采用层次分析法计算指标的主观权重,再结合小班尺度的统计数据,利用熵权法确定指标的客观权重,最后将主观权重与客观权重进行等权融合得到综合权重值,作为评估指标的权重值。熵权法的计算公式如下:

$$P_{ij} = \frac{X'_{ij}}{\sum_{i=1}^m X'_{ij}} \quad (2)$$

$$g_i = 1 - (-k \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij}) \quad (3)$$

$$w_i = \frac{g_i}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad (4)$$

式中, P_{ij} 为第 j 个指标在第 i 项目的指标值比重; g_i 为第 i 项指标的差异性系数; w_i 为第 i 个指标的权重; m 为评价区域的小班数量; $k = 1/\ln m$ 。

2.5 森林火灾蔓延风险(建筑物)指数计算

基于“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架,根据公式(5)计算小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数,利用面积加权平均法计算乡镇和区级尺度的森林火灾蔓延风险(建筑物)指数^[21]。

$$R = w_1 H + w_2 E + w_3 V \quad (5)$$

式中, R 是森林火灾蔓延风险(建筑物)指数, H 是森林火灾蔓延危险指数, E 是承灾体暴露度指数, V 是承灾体脆弱性指数, w_1 是森林火灾蔓延危险指数的权重, w_2 是承灾体暴露度指数的权重, w_3 是承灾体脆弱性指数的权重。

2.6 森林火灾蔓延风险(建筑物)等级划分

自然断点分级法通过不断迭代将数据集中不连续的地方作为分级依据,强调自然断点和分组,人为干预较少,可以减少同一级中的差异、增加不同级间的差异^[22]。利用自然断点分级法将森林火灾蔓延风险(建筑物)等级分为高、中高、中、中低、低 5 个等级。

2.7 空间自相关分析

空间自相关分析是指空间中某一单元与其周围单元的某个属性值的相关程度分析,可以揭示空间单元的统计性分布规律和空间单元相互之间的作用机理,是空间范围内集聚程度的度量^[23-24]。

空间自相关分析包括全局空间自相关和局部空间自相关。全局空间自相关能够反映整个研究区域内指定属性值的整体关联程度及显著性,局部空间自相关能够反映某一现象在局部区域的空间聚集性和分异性。

本研究选用莫兰指数(Moran's I)作为空间自相关指数,使用 ArcGIS 10.2 软件,分析北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的自相关程度和空间分布规律,并进行显著性检验。

$$\text{Global Moran } I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \quad (6)$$

式中, n 为区域单元个数; x_i 和 x_j 为区域 i 和 j 的观测值; $\bar{x}$ 为平均值; S^2 为样本的方差; w_{ij} 为空间权重矩阵。

$$\text{Local Moran } I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S_i^2 \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})} \quad (7)$$

式中, n 为区域单元个数; x_i 为区域 i 的观测值; $\bar{x}$ 为平均值; S_i^2 为样本的方差; w_{ij} 为空间权重矩阵。

3 结果与分析

3.1 建筑物暴露度和建筑物脆弱性指标分布规律

将建筑物暴露度和建筑物脆弱性指标进行标准化和掩膜处理,北京山区建筑物暴露度和建筑物脆弱性指标分布图见图 1。

由图 1 可知,建筑物暴露度高值主要分布在延庆张山营、昌平崔村、房山大石窝、密云西田各庄、房山韩村河、密云河南寨等乡镇。建筑物暴露度高值小班的的地类以经济灌木林地、阔叶林地、混交林地、针叶林地为主,面积占比分别为 33.29%、30.27%、15.23%、10.32%,建筑物暴露度高值的乔木林小班以杨树人工林、侧柏人工

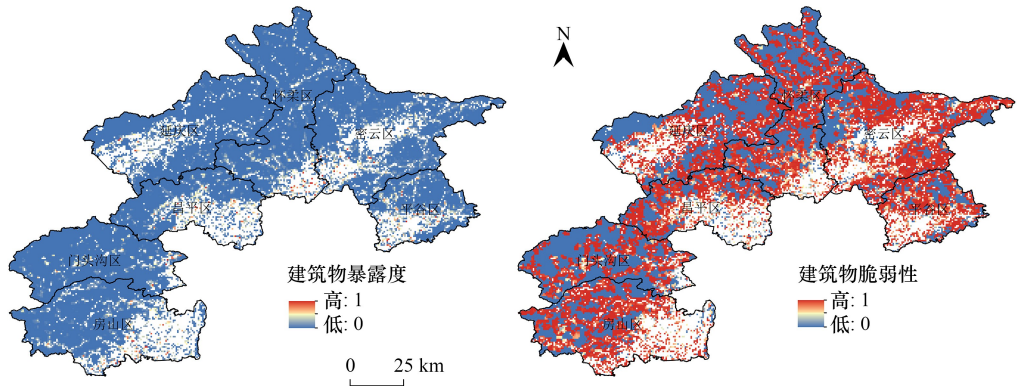


图1 北京山区建筑物暴露度和建筑物脆弱性指标分布图

Fig.1 Distribution map of building exposure and building vulnerability index in the Mountainous District, Beijing

林、油松人工林为主,面积占比分别为 24.22%、13.50%、10.34%。

建筑物脆弱性高值主要分布在昌平流村、密云冯家峪、延庆千家店、怀柔琉璃庙、门头沟清水、怀柔宝山、怀柔长哨营等乡镇。易燃建筑面积占比达到 100%的小班面积占比为 28.49%,达到 80%的小班面积占比为 52.08%。建筑物脆弱性高值小班的地类以阔叶林地、针叶林地、混交林地、一般灌木林地、经济灌木林地为主,面积占比分别为 23.28%、22.36%、18.08%、17.14%、15.36%,建筑物脆弱性高值的乔木林小班以侧柏人工林、油松人工林、蒙古栎天然林为主,面积占比分别为 24.55%、18.07%、10.47%。

3.2 森林火灾蔓延风险(建筑物)指标权重的确定

综合主观评价的层次分析 AHP 法和客观评价的熵权法来确定森林火灾蔓延风险(建筑物)的评估指标权重,见表 2。

表 2 森林火灾蔓延风险(建筑物)评估指标权重

Table 2 The assessment index weight of forest fire spread risk (buildings)

评估指标 Evaluation index	层次分析权重 Chromatography analysis weight	熵权重 Entropy weight	综合权重 Comprehensive weight
森林火灾蔓延危险 Forest fire spread hazard	0.3334	0.0940	0.2137
建筑物暴露度 Building exposure	0.3333	0.6913	0.5123
建筑物脆弱性 Building vulnerability	0.3333	0.2147	0.2740

由表 2 可知,建筑物暴露度的综合权重达到 0.5123,建筑物脆弱性和森林火灾蔓延危险的综合权重仅为 0.2740 和 0.2137。由此可见,建筑物暴露度是影响森林火灾蔓延风险(建筑物)的主要因素。

3.3 多尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)评估

对蔓延危险、建筑物暴露度、建筑物脆弱性指标进行小班尺度加权综合计算,并利用面积加权平均法计算乡镇尺度和区级尺度的森林火灾蔓延风险(建筑物)指数,划分等级,小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)等级图见图 2,乡镇和区级尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)等级图见图 3。

小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)评估结果显示,高、中高、中、中低、低等级的森林火灾蔓延风险(建筑物)面积分别占比 3.82%、34.15%、18.37%、31.06%、12.60%。

高风险小班的地类以针叶林地、一般灌木林地、混交林地、阔叶林地、经济灌木林地为主,面积占比分别为 37.37%、23.33%、19.81%、11.66%、6.28%,主要分布在昌平流村、房山史家营、房山霞云岭、门头沟雁翅、门头沟斋堂、昌平南口、门头沟妙峰山、房山蒲洼、延庆千家店、密云冯家峪、房山周口店等乡镇。高风险乔木林小班的优势树种以侧柏和油松为主,面积占比分别为 47.51%和 22.91%,高风险侧柏林以人工幼龄林和人工中龄林为主,面积占比分别为 81.24%和 9.29%,高风险油松林以人工近熟林、人工幼龄林、人工成熟林、人工中

龄林为主,面积占比分别为 34.17%、29.44%、18.79%、13.17%。

中高风险小班的地类以针叶林地、阔叶林地、一般灌木林地、混交林地为主,面积占比分别为 26.38%、24.21%、22.95%、20.28%,主要分布在密云冯家峪、怀柔长哨营、延庆千家店、怀柔宝山、门头沟清水、昌平流村、怀柔汤河口等乡镇。中高风险乔木林小班的优势树种以侧柏、油松、蒙古栎为主,面积占比分别为 30.79%、19.64%、13.18%,中高风险侧柏林以人工幼龄林、天然幼龄林、人工中龄林为主,面积占比分别为 77.01%、8.97%、7.36%,中高风险油松林以人工成熟林、人工近熟林、人工幼龄林、人工中龄林为主,面积占比分别为 45.33%、24.20%、15.88%、7.94%,中高风险蒙古栎林以天然幼龄林、天然中龄林为主,面积占比分别为 66.66%、28.43%。

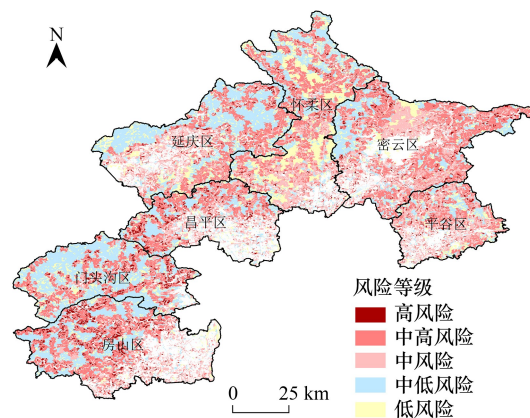


图2 北京山区小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)等级图

Fig.2 Forest fire spread risk (buildings) level map at the subcompartment scale in the Mountainous District, Beijing

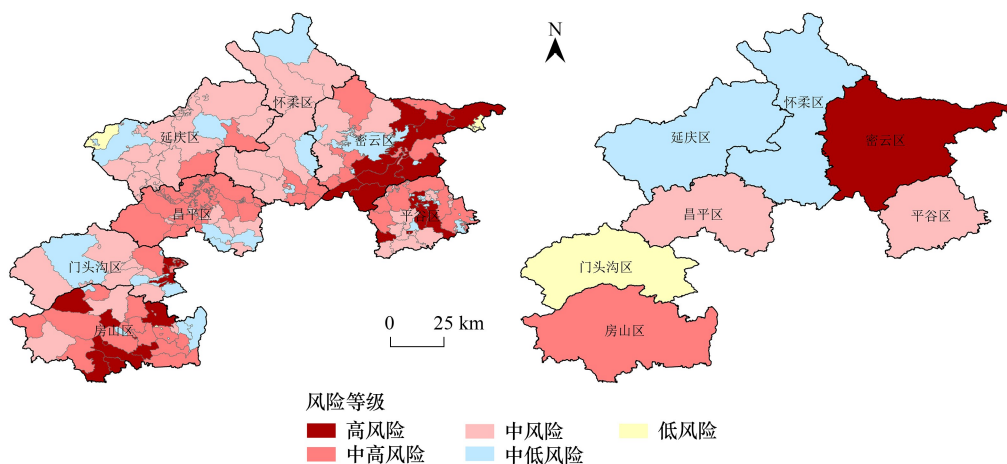


图3 北京山区乡镇尺度和区级尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)等级图

Fig.3 Forest fire spread risk (buildings) level map at the township and district scales in the Mountainous District, Beijing

乡镇尺度上,高、中高、中、中低、低等级的森林火灾蔓延风险(建筑物)面积分别占比 13.30%、27.93%、44.65%、13.13%、0.99%。北京山区共有 24 个高风险乡镇。区级尺度上,高、中高、中、中低、低等级的森林火灾蔓延风险(建筑物)面积分别占比 17.95%、14.45%、16.89%、36.59%、14.12%。高风险区是密云区,中高风险区是房山区,中风险区是昌平区和平谷区,中低风险区是怀柔区和延庆区,低风险区是门头沟区。

3.4 森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的空间自相关性

北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的全局空间自相关分析结果见表 3,局部空间自相关分析结果见图 4。

由表 3 可知,北京山区小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的全局空间自相关指数 Moran's I 值为正值, Z 检验结果呈极显著,表明其空间分布存在正向的空间自相关关系,表现出集聚分布的规律。

由图 4 可知,北京山区小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数空间异质性显著。高-高集聚型小班 16641 个,包括极显著集聚小班 9059 个($P < 0.01$)和显著集聚小班 7582 个($P < 0.05$)。低-低集聚型小班 17248 个,包括极显著集聚小班 9867 个($P < 0.01$)和显著集聚小班 7381 个($P < 0.05$)。HL(高-低)集聚型小班

2872 个,包括极显著集聚小班 1261 个($P<0.01$)和显著集聚小班 1611 个($P<0.05$)。LH(低-高)集聚型小班 4096 个,包括极显著集聚小班 1806 个($P<0.01$)和显著集聚小班 2290 个($P<0.05$)。

表 3 北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的全局空间自相关指数

Table 3 Global spatial autocorrelation index of forest fire spread risk (buildings) index in the Mountainous District, Beijing			
指标 Index	Moran's <i>I</i> 指数 Moran's <i>I</i> index	<i>Z</i>	<i>P</i>
小班尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数 Forest fire spread risk (buildings) index at the subcompartment scale	0.2827	216.8355	0.0000
乡镇尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数 Forest fire spread risk (buildings) index at the township scale	0.0793	1.7668	0.0773

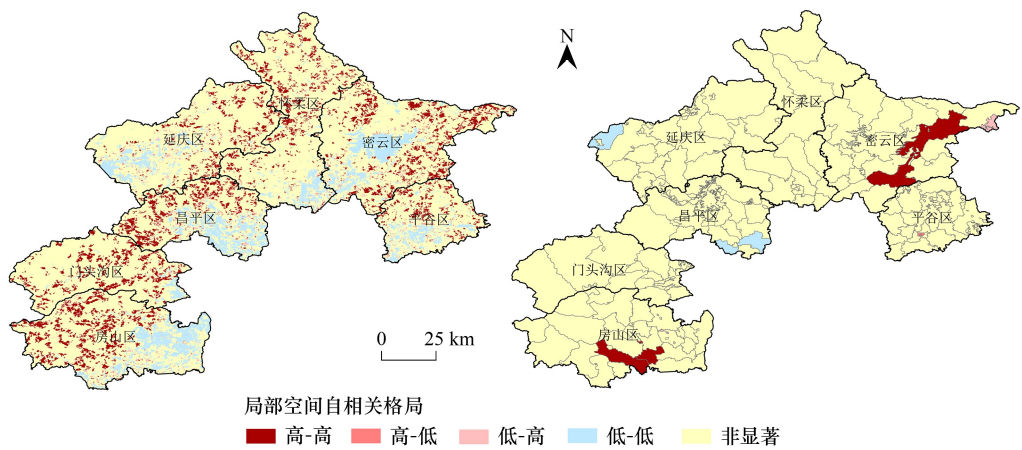


图 4 北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的局部空间自相关格局

Fig.4 Local spatial autocorrelation pattern of forest fire spread risk (buildings) index in the Mountainous District, Beijing

北京山区乡镇尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)指数空间异质性显著。高-高集聚型包括 5 个乡镇,极显著的仅有密云太师屯镇($P<0.01$),显著的有房山周口店林场和房山韩村河、房山石楼、密云巨各庄等乡镇($P<0.05$)。低-低集聚型包括 3 个乡镇,极显著的有延庆松山林场和昌平回龙观街道($P<0.01$),显著的仅有昌平北七家镇($P<0.05$)。HL(高-低)集聚型仅有 1 个显著集聚乡镇($P<0.05$),为平谷滨河街道。LH(低-高)集聚型包括 3 个极显著集聚乡镇($P<0.01$),分别为房山新镇、密云荆子峪苗圃、密云雾灵山林场。

4 讨论

多尺度风险评估可以为林火管理提供科学依据,其中,乡镇和区级尺度评估可以掌握区域风险总体规律,小班尺度评估与林业经营管理基本单元相契合,可以精准确定重要风险点,为森林火灾精准化防控提供依据^[5]。研究发现,北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)高风险小班以侧柏、油松、灌木林为主,建议有针对性地加强建筑物密集区、森林-城镇交界域的森林可燃物管理工作。风险指数的空间分布格局也是开展风险管理的重要依据,高-高集聚区域是高风险集中连片分布区域,对该类区域采取超常规管理措施,可以降低林火蔓延对建筑物造成破坏损失的可能性^[6]。

在建筑物暴露度评估中,基于建筑物数量进行计算,与李维伟等在评估密云区森林火灾危险性时计算野外火源的方法相同^[25],与第一次全国自然灾害综合风险普查中采取的单位面积数量(单位面积建筑物数)的指标计算方法不同^[26],主要是考虑到结合林火管理实际情况,相同数量的建筑物数,在山区的暴露度会大于在平原区的暴露度,利用单位面积数量的计算方法会对林地面积大的山区的暴露度计算结果产生一定的“稀

释”作用,降低一些林地面积大的山区的暴露度值,进而低估这些山区的风险指数值。此外,林区和林缘的建筑物、集中分布和零散分布的建筑物的暴露程度也存在差异^[5],建议在今后的研究中,进一步完善暴露度评估方法,对不同建筑物的保护等级进行分级,提高一些重点保护的建筑物的暴露度值,降低一些重要性偏低、甚至废弃的建筑物的暴露度值^[27]。

森林火灾蔓延风险(建筑物)评估中发现,风险指数值相同或相近的区域,风险形成原因也会有所差异,采取的林火管理措施各异,因此,需要对评估结果进行深入解读分析。例如,森林-城镇交界域(高风险、高建筑物暴露度、低建筑物脆弱性)和山区(高风险、低建筑物暴露度、高建筑物脆弱性),风险指数值相同或相近的情况,森林-城镇交界域需要加强森林可燃物管理和林火阻隔系统建设,细化应急处置预案,一旦发生火灾后,如何保护好密集分布的建筑物^[28-29],山区更需要投入经费提升建筑物抗灾能力,加强建筑物周围的野外火源和易燃可燃物管理^[30]。对于一些危险性、暴露度、脆弱性中某一个或某两个因子极低的区域,加权综合评价会高估这些区域的风险指数值,在第一次全国自然灾害综合风险普查中,利用三因子相乘开立方的方法进行了优化调整。建议在风险评估结果解读的过程中,将相同风险等级的区域进一步分类,并结合每种类型提出针对性林火防控建议,提高森林火灾精准化防控水平^[6]。例如某些偏僻山区废弃房屋多,危险性高,暴露度低,脆弱性高,但是可以当做低风险处理,发生火灾后可以放弃这些房屋。

在乡镇和区级尺度的森林火灾蔓延风险(建筑物)评估中,本研究主要采取面积加权平均法,整体反映这个区域的风险水平,但无法体现区域尺度上的一些规律。在第一次全国自然灾害综合风险普查评估区划中的乡镇尺度指数计算中,引入乡镇林地面积转换系数、历史火灾发生频率等调整参数,使得评估结果更符合实际情况^[26]。本研究评估过程中发现,山区乡镇和平原乡镇的风险存在显著差异,是否有山地,是影响风险极重要的因素,例如昌平东南部城区乡镇(平原)和密云密云镇(城市面山),前者基本不会发生大的火灾,后者可能会发生类似2020年“3·30”西昌泸山火灾的情况,风险明显高于前者,但通过已有评估指标计算的风险指数结果相近,需要引入一定参数进行调整完善^[6]。

本研究主要是从自然因素评估分析风险,实际上,人为因素(减灾能力)也会对森林火灾蔓延风险(建筑物)产生重要影响,包括森林火情早期处理能力、大火巨灾应急能力、森林火灾应急物资储备能力、林火阻隔能力等^[31-32]。但减灾能力评估受到诸多因素影响,不同区域的减灾能力需求不同(例如山区和平原的减灾需求不同、同样面积的山区重点林和平原新造林的减灾需求不同),不同区域的减灾特点各异(例如相同数量的护林员,受巡护装备、保障待遇、专职兼职类型等因素影响,能够发挥的减灾效果不同),建立统一的评估标准体系难度大,减灾能力基础数据获取难度大^[6]。建议未来在分析区域减灾能力需求和区域减灾能力特点的基础上,对森林火灾减灾能力进行深入评估,在基于自然因素的森林火灾蔓延风险(建筑物)评估结果的基础上,结合减灾能力评估结果,进一步分析林火防控薄弱环节,更加有针对性的采取林火防控措施。

5 结论

本研究基于“危险性-暴露度-脆弱性”风险评估框架,开展北京山区多尺度森林火灾蔓延风险(建筑物)评估,并通过空间自相关分析探讨森林火灾蔓延风险(建筑物)指数的空间关联模式,为森林火灾精准化防控提供科学依据。研究表明,北京山区森林火灾蔓延风险(建筑物)高风险小班以侧柏、油松、灌木林为主,建议有针对性加强建筑物密集区、森林-城镇交界域的森林可燃物管理工作。受基础数据获取难度、评估指标计算方法等因素影响,评估结果仍存在一定不确定性,降低了研究结果的广泛适用性。建议在今后的研究中,进一步优化评估方法,不断提高评估结果的可靠性和针对性。

参考文献(References):

- [1] United Nations Environment Programme. Spreading like Wildfire-The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi. 2022.
- [2] 吴月圆,舒立福,王明玉,张慧,司莉青. 近年世界森林火灾综述. 温带林业研究, 2022, 5(4): 49-54.

- [3] 田晓瑞, 宗学政, 王明玉. 野外-城市交界域的火管理研究进展. 林业科学, 2023, 59(6): 149-158.
- [4] 郑文霞, 郭新彬, 郭林飞, 马远帆, 郭福涛. 美国野地-城市交界域火灾管理概述及对我国的启示. 生态学杂志, 2020, 39(1): 300-307.
- [5] 王博, 杨雪清, 蒋春颖, 刘冬, 陈锋, 白夜, 刘晓东. 基于 GIS 的北京市延庆区森林火灾蔓延风险. 林业科学, 2023, 59(8): 90-101.
- [6] 王博. 北京山区林火蔓延风险与安全格局评价研究[D]. 北京:北京林业大学, 2023.
- [7] 国志兴, 钟兴春, 方伟华, 曹鑫, 林伟. 野火蔓延灾害风险评估研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(7): 778-788.
- [8] Chuvieco E, Aguado I, Yebra M, Nieto H, Salas J, Martín M P, Vilar L, Martínez J, Martín S, Ibarra P, de la Riva J, Baeza J, Rodríguez F, Molina J R, Herrera M A, Zamora R. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 2010, 221(1): 46-58.
- [9] 罗晓玲, 杜尧东, 郑璟. 广东高温热浪致人体健康风险区划. 气候变化研究进展, 2016, 12(2): 139-146.
- [10] 赵佳琪, 张强, 朱秀迪, 申泽西, 余慧倩. 中国旱灾风险定量评估. 生态学报, 2021, 41(3): 1021-1031.
- [11] 温旭敏, 张鹏, 戴尔阜. 中国市级尺度的高温风险评估. *Journal of Resources and Ecology*, 2023, 14(2): 399-409.
- [12] Yang J T, Guo K, Dai Y Q, Tian S X, Wang W, Jiang Z B, Dai Z Y. Spatial layout siting method for fire stations based on comprehensive forest fire risk distribution. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 49: 103243.
- [13] Sá A C L, Aparicio B, Benali A, Bruni C, Salis M, Silva F, Marta-Almeida M, Pereira S, Rocha A, Pereira J. Coupling wildfire spread simulations and connectivity analysis for hazard assessment: a case study in Serra da Cabreira, Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, 22(12): 3917-3938.
- [14] Rodrigues M, Zúñiga-Antón M, Alcasena F, Gelabert P, Vega-Garcia C. Integrating geospatial wildfire models to delineate landscape management zones and inform decision-making in Mediterranean areas. *Safety Science*, 2022, 147: 105616.
- [15] Calkin D E, Ager A A, Gilbertson D J. Wildfire risk and hazard: procedures for the first approximation. General Technical Report RMRS-GTR-235. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 2010, 62.
- [16] 陶长森, 牛树奎, 陈锋, 李连强, 陈聆, 张鹏. 北京山区主要针叶林潜在火行为及冠层危险指数研究. 北京林业大学学报, 2018, 40(9): 55-62.
- [17] 宗学政, 田晓瑞, 刘畅. 林分尺度上的森林火灾风险评估方法及应用. 林业科学研究, 2021, 34(5): 69-78.
- [18] Wang B, Li W W, Lai G H, Chang N, Chen F, Bai Y, Liu X D. Forest fire spread hazard and landscape pattern characteristics in the mountainous district, Beijing. *Forests*, 2023, 14(11): 2139.
- [19] 龙腾腾, 殷继艳, 欧朝蓉, 杨强, 李勇, 王秋华. 云南省森林火灾风险综合评价及空间格局研究. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 167-173.
- [20] 孙朝锋, 吴立, 黄川容, 陈家金. 基于 GIS 的福建省塑料大棚风害风险评估与区划. 气象与环境科学, 2022, 45(4): 67-73.
- [21] 裴志方. 东北松嫩平原春玉米干旱灾害监测及风险评估研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- [22] 侯丽丽, 都瓦拉, 银山, 玉山. 基于牧户尺度的草原火灾风险评价——以东乌旗汗敖包嘎查为例. 生态学报, 2022, 42(3): 1059-1070.
- [23] 马骏, 马朋, 李昌晓, 彭月, 魏虹. 基于土地利用的三峡库区(重庆段)生态系统服务价值时空变化. 林业科学, 2014, 50(5): 17-26.
- [24] 王怡然, 王雅晖, 杨金霖, 赵田野, 寇林, 张大红. 黄河流域森林生态安全等级评价与时空演变分析. 生态学报, 2022, 42(6): 2112-2121.
- [25] 李维伟, 杨雪清, 张一鸣, 冯昕, 王博, 杜建华, 陈锋, 刘晓东. 基于小班尺度的北京市密云区森林火灾危险性评价. 北京林业大学学报, 2024, 46(2): 75-86.
- [26] 蒋春颖, 杨雪清, 张国丽, 孙志超, 蒋云安, 蒋爱军. 森林火灾风险评估技术体系探讨. 林业资源管理, 2023(2): 17-26.
- [27] 龙腾腾, 高仲亮, 刘岳峰, 黄铭栩, 王秋华. 基于 AHP-PCA 模型的安宁市森林火灾社会脆弱性评价. 西南林业大学学报: 自然科学, 2018, 38(2): 153-157.
- [28] 周静, 司莉青, 王成虎, 张笛, 高桂云, 王明玉. 交界域森林火灾预防与人群疏散措施. 自然保护地, 2022, 2(4): 109-115.
- [29] 韩永涛, 叶彪, 单保君, 王秋华, 陈启良, 李正祥. 昆明面山森林防火现状与对策研究——以云南森林自然中心为例. 森林防火, 2017(2): 20-23.
- [30] 王江波, 曾繁宇, 苟爱萍. 国外森林火灾韧性规划的经验与启示. 现代园艺, 2023, 46(7): 194-196.
- [31] 颜峻, 左哲. 自然灾害风险评估指标体系及方法研究. 中国安全科学学报, 2010, 20(11): 61-65.
- [32] 陈华泉. 福建省 1990—2009 年森林火灾灾害风险评估. 西南林业大学学报, 2013, 33(4): 72-76.