DOI: 10.20103/j.stxb.202310242319

莫凡,郭慧,裴顺祥,吴迪,吴莎,辛学兵.野外-城市界域森林火险时空演变趋势及火险等级划分.生态学报,2024,44(14):6232-6242. Mo F, Guo H, Pei S X, Wu D, Wu S, Xin X B.Temporal and spatial evolution of forest fire risk and classification of fire risk levels in wildland-urban interface areas .Acta Ecologica Sinica,2024,44(14):6232-6242.

野外-城市界域森林火险时空演变趋势及火险等级 划分

莫 凡,郭 慧,裴顺祥,吴 迪,吴 莎,辛学兵*

中国林业科学研究院华北林业实验中心,北京九龙山暖温带森林国家长期科研基地,北京 102300

摘要:野外-城市界域(WUI)人类活动密集,火灾风险极大,在该区域进行森林火险的合理性评价和时空演变趋势分析,对保护 区域生态环境和社会经济可持续发展具有重要意义。以北京近郊九龙山林场为研究对象,基于相关火险驱动因子指标数据,运 用层次分析法评估研究区 2004、2009、2014、2019 年森林火险指数,通过 Theil-Sen Median 趋势分析、全局莫兰指数和局部莫兰指 数分析探究森林火险指数的变化趋势及空间聚集性,并基于历史火情数据和地理探测器模型验证火险区划的合理性和准确性。 结果表明:(1)九龙山林场内火险指数整体的集聚特征变化较大,61.58%的区域火险指数不显著增加,5.62%的区域微显著增 加,32.80%区域为不显著减少和微显著减少。(2)森林火险指数空间上呈正相关,森林火险高值聚集区域分布于东部低海拔 地区,在研究时间段内面积减少 4.89%,低值聚集区域分布于西部高海拔地区,面积减少 2.19%。(3)森林火险区划结果显示, 九龙山林场森林高火险区域面积占比最小,主要分布于研究区中部,由于人类活动的影响,高火险区覆盖范围扩大。(4)区划 合理性验证结果显示,研究区森林火险等级空间分异性较好,与实际火点分布具有高度一致性。研究结果较好的反应了研究区 森林火险时空格局变化,为九龙山林场进一步合理规划防火设施布局,加强火险管控力度,完善防火应急能力奠定数据基础,提 示管理部门应加强防火宣传,以最大限度发挥九龙山的生态环境效益,保障林区周边人民生命财产安全。 关键词:森林火险指数;空间相关性;时空演变趋势;火险区划;合理性评价

Temporal and spatial evolution of forest fire risk and classification of fire risk levels in wildland-urban interface areas

MO Fan, GUO Hui, PEI Shunxiang, WU Di, WU Sha, XIN Xuebing*

Beijing Jiulong Mountain National Long-term Scientific Research Base of Warm Temperate Forests, Experimental Center of Forestry in North China, Chinese Academy of Forestry, Beijing 102300, China

Abstract: The wildland-urban interface (WUI) is characterized by dense human activities and high fire risk. It is crucial to assess forest fire risk systematically, analyzing its temporal and spatial changes for the protection of the ecological environment and the promotion of sustainable social and economic development in this area. We conducted an evaluation of the forest fire risk index in 2004, 2009, 2014, and 2019 using the analytic hierarchy process. The evaluation utilized data on relevant factors influencing forest fire risk in Jiulong Mountains Forest Farm, situated in the suburbs of Beijing. The changing trends and spatial clustering of the forest fire risk index were explored through Theil-Sen Median trend analysis, global Moran's I index, and local Moran's I index analysis methods. To validate the categorization of forest fire levels, we conducted an analysis using historical fire incidents and the Geodetector model. The results showed that: (1) The overall aggregation characteristics of the fire risk index within Jiulong Mountains Forest Farm exhibit significant variability.

收稿日期:2023-10-24; 网络出版日期:2024-05-11

基金项目:中国林业科学研究院基本科研业务费专项资助 (CAFYBB2019ZB00305)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xinxb01@163.com

Specifically, 61.58% of the area did not show a significant increase, 5.62% of the area experienced a slight increase, and 32.80% of the area did not exhibit a significant reduction or slightly decreased. (2) The forest fire risk index demonstrated positively spatial correlation, with high-value aggregation area distributed in the low-altitude eastern regions, where the forest fire risk is high. During the study period, the area of high-value aggregation decreased by 4.89%. In contrast, low-value aggregation area are distributed in the high-altitude western regions, where the forest fire risk is low, and the area decreased by 2.19%. (3) Forest fire risk zoning results indicated that the high-risk area in Jiulong Mountains Forest Farm had the smallest proportion, primarily located in the central region. However, due to human activities, the coverage of high-risk areas has expanded. (4) The validation results of zoning rationality indicate that the spatial differentiation of forest fire risk levels in the study area was good, displaying a high level of consistency with the actual distribution of fire points. This study effectively captures the temporal and spatial changes in forest fire risk in the study area, laying a data foundation for fire prevention facility layout planning, increasing intensity of fire risk management, and the enhancement of emergency response capabilities. It is advisable for management authorities to boost fire prevention awareness, thereby maximizing the ecological benefits of Jiulong Mountains and ensuring the safety of life and property for the people in the surrounding regions.

Key Words: forest fire risk index; spatial correlation; temporal and spatial trend; fire risk zoning; rational assessment

森林火灾是全球范围内对生态系统和人类生活环境影响巨大的自然灾害之一^[1],尤其在野外-城市交界 域(Wildland-urban interface,WUI),森林火灾在对生态环境造成巨大破坏的同时^[2],还严重威胁着人类的生命 财产安全^[3-5]。当前我国的森林火险研究多集中在大兴安岭^[6]、横断山脉^[7]、云贵高原^[8]等大型林区,针对 WUI的研究相对较少^[9]。随着社会经济的发展和人们对精神文化生活需求越来越高,WUI的林区成为周边 居民休闲和城市人口短期旅行的目的地。因此,在WUI地区开展森林火险研究对加强区域生态安全、降低森 林火灾风险和保障人民生命财产安全具有重要意义^[10]。

国内外学者针对森林火险评估开展了大量的研究工作,已有的森林火险区划方法多基于回归模型、机器 学习和基于地理信息系统(GIS)的多准则决策分析(Multi-criteria decision analysis, MCDA)进行森林火险建 模。其中回归模型包括逻辑斯蒂回归模型^[11]、Gompit 回归^[12]、负二项回归模型^[13]等;机器学习模型包括神 经网络[14]、随机森林算法[15]、贝叶斯网络[16]等,这些方法常用于较大空间尺度森林火险等级评估,对森林火 险区划较为客观,能够阐明在研究时间段内林火的发生概率变化,但建模结果受到历史火点数量和火点空间 格局均匀性的限制。GIS-MCDA方法中的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)是林业领域应用最为 广泛的多准则方法之一,该方法可以有效地解决存在多约束条件的空间问题,利用火险因子之间的关联信息, 以专家知识为参考,结合历史数据对森林火险进行区划^[17-18],受历史火点数量影响较小。因此,在历史火情 较少的小空间尺度上,根据区域特点并结合历史数据,利用 AHP 进行森林火险区划较为合理。针对森林火险 区划的合理性和准确性评估,主要利用 ROC 检验、AIC 检验、似然比检验和 Wald 检验等方法^[19]验证,但是上 述方法多基于回归模型和机器学习模型展开,受到历史火点数量和分布均匀度的限制。当历史火点数量较少 时,考虑采用火点分布精度结合区划空间分异性效果的角度分析森林火险区划的合理性^[20]。当前在较小空 间尺度范围内的森林火险区划多以小时、天、月或火险期的时间跨度进行研究[21-22],区划结果的时效性较短, 对于防火瞭望塔和防火隔离带等永久性防火设施布局指导意义较小。因此,综合考虑森林火险区划的合理性 及准确性,从多时间尺度上采用 AHP 研究森林火险发生概率和空间格局的变化对指导林区防火规划工作、降 低林火风险有重要意义。

九龙山林场作为北京市西部的重要生态屏障,处于门头沟区主城区与远郊区的过渡区域,属于典型的 WUI。林场内以人工林为主,易燃树种面积占到了全区面积的 84.73%左右。随着林场周边居民点增加和林 场内防火道路的完善,区内人流量大幅增加,防火任务逐年加重,对九龙山林场开展森林火险时空演变趋势分 析、完善森林火险区划迫在眉睫。本文以九龙山林场为研究区域,基于相关火险驱动因子指标数据,运用 AHP评估研究区2004、2009、2014、2019年森林火险指数,采用空间相关性分析探究森林火险指数的变化趋势 及空间聚集性,并通过历史火情数据和地理探测器模型(Geodetector)验证火险区划的合理性和准确性,为九 龙山林场森林火险的防控工作和森林经营方案的制定提供决策参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

九龙山林场(115°59′—116°06′E,39°54′—39°57′N)位于北京市门头沟区东部,地处主城区周边,总面积约1546hm²。九龙山呈"<"型,南北宽约6km,东西长约10km,海拔100—990m,属太行山北端余脉。九龙山为大陆性东岸季风气候,夏季多降雨空气温度较高,冬季干燥少降水气温极低,年平均气温11.7℃,全年平均降水650.4mm左右。林场内以人工林为主,主要乔木树种有油松(Pinus tabuliformis)、侧柏(Platycladus orientalis)、栓皮栎(Quercus variabilis)、华北落叶松(Larix principis-rupprechtii)和黄栌(Cotinus coggygria)等。自1981年以来,林场内共发生有记载森林火灾4次,发生火警14次(图1)。



Fig.1 Location map of the study area and historical fire distribution

1.2 数据收集及处理

林分因素数据来自中国林业科学研究院华北林业实验中心 2004、2009、2014、2019 年的森林资源清查数据。参照《全国森林火险区划等级》^[23]将林分类型进行划分为难燃、可燃和易燃 3 类,其中难燃类包括刺槐、黄栌、白蜡、榆树、阔叶混交(优势不明显);可燃类包括落叶松、椴树、软阔(枫杨、柳树、槭树、椴树等);易燃类包括柏木、栎(含槲树等)、油松、灌木林。数字高程模型(DEM)数据(空间分辨率 12.5m)使用 ALOS-PALSAR数据集产品,来源于美国的地球科学数据系统平台(https://www.earthdata.nasa.gov/),通过 DEM 影像数据提取研究区的坡向、坡度以及海拔数据;道路、居民点数据来源于 Google Earth Pro,通过 2004、2009、2014、2019年4期研究区地面影像数据提取研究区内道路和居民点,按照不同的距离标准对道路和居民点划定缓冲区,越靠近城镇内居民点和道路中心位置的火险等级越高^[24];历史火点及火警点数据来源于中国林业科学研究院华北林业实验中心防火平台。森林火险影响因素等级划分见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 森林火险影响因子的赋值及权重确定

采用专业打分法确定主要指标的等级值。通过层次分析法对主要指标进行综合评判[25],根据各指标的

等级值建立判断矩阵,利用随机性指标(CR)对判断矩阵进行一致性检验,直至CR<0.1时,满足检验要求,最后通过矩阵最大特征值对应的归一化特征向量确定主要指标的权重(表1)。

分类	主要指标	类别	等级值	火险程度
Classification	Primary indicators	Category	Rank values	Degree of hazard
林分因素	林分类型(0.18)	难燃	1	低
Forest factors(0.30)		可燃	5	中
		易燃	9	南
	林龄(0.08)	近熟林	3	较低
		中龄林	5	中
		成熟林	7	较高
		幼龄林;过熟林	9	南
	林分郁闭度(0.04)	0-0.2	1	低
		0.2-0.4	3	较低
		0.4—0.6	5	中
		0.6-0.8	7	较高
		0.8—1.0	9	高
也形因素	海拔(0.05)	800—1000m	1	低
Topographical factors(0.16)		600—800m	3	较低
		400—600m	5	中
		200—400m	7	较高
		0—200m	9	声
	坡度(0.06)	0° — 5°	1	低
		6°—15°	3	较低
		16°—25°	5	中
		26°—35°	7	较高
		>35°	9	高
	坡向(0.05)	北	1	低
		东北;西北	3	较低
		东;西	5	中
		东南;西南;无	7	较高
		南	9	高
人为因素	距道路距离(0.36)	>200m	1	低
Human factors(0.54)		150—200m	3	较低
		100—150m	5	中
		50—100m	7	较高
		0—50m	9	高
	距居民点距离(0.18)	>2000m	1	低
		1500—2000m	3	较低
		1000—1500m	5	中
		500—1000m	7	较高
		0—500m	9	南

|--|

()里为权重值

1.3.2 森林火险综合评估

森林火险指数计算公式如下:

$$FFR = \sum_{i=1}^{n} W_i X_i \tag{1}$$

式中,FFR 为森林火险指数, X_i 为森林火险影响因素, W_i 为各因素权重, n 为森林火险影响因素个数。采用等间距法将研究区的森林火险等级划分为低火险、较低火险、中火险、较高火险、高火险 5 个等级,其中较高和高

火险是需要加强监控等森林火险管理的区域。

1.3.3 森林火险指数变化趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法^[26],适用于分析长时间序列数据变 化趋势。计算公式如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \qquad \forall j > i \tag{2}$$

式中, β 是森林火险指数变化趋势,Median()代表取中值, x_i 和 x_i 分别为i和j年的森林火险指数。若 β 大于 0,则表示为森林火险指数为增长趋势,反之为下降趋势。

Mann-Kendall 检验是一种评估趋势显著性的非参数统计检验方法^[27],用于检验时间序列数据的趋势显 著性。它不需要样本服从一定的分布,也不受少数异常值的干扰。计算公式如下:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \operatorname{sgn}(x_j - x_i)$$
(3)

$$\operatorname{sgn}(x_{j} - x_{i}) = \begin{cases} 1, x_{j} - x_{i} > 0\\ 0, x_{j} - x_{i} = 0\\ -1, x_{j} - x_{i} < 0 \end{cases}$$
(4)

$$Z = \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, S > 0$$

$$Z = 0, S = 0$$

$$Z = \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, S < 0$$
(5)

式中,Z 是服从于标准正态分布的参数,Var(S) = n(n-1)(2n+5)/18, n 为序列中数据个数。

Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相 结合用于长时间序列森林火险指数变化显著性判断。_ 其中|Z|大于1.65、1.96、2.58时,分别表示趋势分别通 过置信度 90%、95% 和 99% 的显著性检验^[28]。变化趋 势显著性判断结果如表2所示。

1.3.4 森林火险指数空间相关性分析

采用全局莫兰指数 (Moran's I) 和局部莫兰指数 (LISA)对研究区森林火险的空间相关性进行分析^[29]。 利用 Moran's I 指数描述森林火险指数全局空间自相关 β表示森林火险变化趋势;Z:表示假设检验统计量 特征,解释区域内森林火险指数聚集和离散程度。计算公式如下:

表 2 趋势显著性判断 Table ? Trend significance judgmen

Table 2	Trenu significance ju	iginent
森林火险变化趋势 Trend of forest fire risk	检验统计量 Test statistic	趋势特征 Trend characteristics
<i>β</i> >0	$1.65 < Z \le 1.96$	微显著增加
	$ Z \leq 1.65$	不显著增加
$\beta = 0$	Z	无变化
$\beta < 0$	$ Z \leq 1.65$	不显著增加
	$1.65{<}\left Z\right {\leq}1.96$	微显著增加

$$I = \frac{n}{W} \frac{\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \omega_{i,j} (x_i - \bar{x}) (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2}$$
(6)

式中,*n*为研究区小班总数, $\omega_{i,i}$ 是特征*i*和*j*之间的空间权重,W是所有 $\omega_{i,i}$ 的总和,*x*是相关变量, \bar{x} 是*x*的平 均值。I的取值在[-1,1]之间,当I为正值的时候,表明研究单元的观测值趋于空间聚集,空间正相关;当I取 值为负的时候表明空间呈离散状态,空间负相关;1为0时,表明空间不相关。

LISA 指数探究森林火险指数在研究区内不同区域栅格与相邻区域栅格之间的差异程度和显著性。计算 公式如下:

$$I_{i} = \frac{x_{i} - X}{S_{i}^{2}} \sum_{j=1, j \neq i}^{n} \omega_{i,j} (x_{i} - \bar{X})$$
(7)

$$S_{i}^{2} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^{n} \omega_{i,j} (x_{j} - \bar{X})^{2}}{n - 1} - \bar{X}^{2}$$
(8)

式中, x_i 是i的一个属性,是对应属性的均值, S_i^2 为统计量的方差。 I_i 为正值时表示一个观测值高(低)的区域 被一个高(低)观测值的区域包围,即高-高(低-低)聚集; I_i 为负值时,表示一个观测值高(低)的区域被一个低 (高)观测值的区域包围,即高-低(低-高)聚集; I_i 为0时表示观测区域与相邻区域无关联,即不显著。

1.3.5 森林火险区划合理性评估

区划结果的合理性通常采用2种方法进行评估^[6-7,30]:第一种方法,基于发生森林火情及火警的数据对 区划结果进行精度评估;第二种方法,通过空间异质性对区划结果的分区合理性进行分析。

(1)本研究通过分析历史火点与区划结果的一致性,构建总体区划精度,对九龙山森林火险等级区划结 果进行精度评估,总体森林火险区划精度为九龙山较高和高等级火险区划内历史火点和火警点数量与总火点 和火警点数量之比。

(2)等间距法是目前森林火险等级划分的常用方法^[8],但是火险等级分层数量尚未统一。目前常用的森林火险等级划分多为3层到5层不等^[31-32]。通过研究空间分层的分异性,对森林火险等级区划进行分析,空间分层分异性越高,空间分层越合理。本文通过地理探测器中空间分异性指数 q 值对森林火险区划的空间分层分异性效果进行分析,计算公式如下:

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2} \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2$$
(9)

式中, N_h 为层 h 的单元数,N 为全区的单元数, σ_h^2 为层 h 的 FFR 方差, σ^2 为全区的 FFR 方差, L 为空间分层总数。q 值越大则森林火险区划的空间分层分异性越高,区划结果越合理^[14, 33]。

2 结果与分析

2.1 森林火险指数时空变化

研究区 2004、2009、2014、2019 年的森林火险指数统计结果见表 3。2004 年到 2019 年,九龙山森林火险 整体升高了 17.59%。四期森林火险指数最高值相同,最低值逐年降低,标准差从 2004 年到 2019 年增加了 35.58%。森林火险均值从 2004 年到 2014 年增加了 17.84%,2014 年至 2019 年降低了 0.21%。九龙山森林火 险指数空间变异系数随着时间推移逐渐增加,从 2004 年到 2019 年增加了 15.38%。

Table 3 Table of forest fire risk index distribution						
年份 Year	森林火险指数均值 Average forest fire risk index	森林火险指数分布范围 Distribution range of forest fire risk index	标准差 Standard deviation	空间变异系数 Spatial coefficient of variation		
2004	3.98	2.12-8.64	1.04	0.26		
2009	4.15	1.58—8.64	1.18	0.28		
2014	4.69	1.52—8.64	1.36	0.29		
2019	4.68	1.52—8.64	1.41	0.30		

表 3 森林火险指数分布状况表

运用 Theil-Sen Median 趋势法分析和 Mann-Kendall 检验 2004—2019 年九龙山森林火险指数变化趋势的 空间分布特征可知,九龙山内森林火险指数变化幅度较小,未达到极显著和显著变化的标准,不显著增加是区 内森林火险指数的主要变化趋势,占林场总面积的61.58%,主要分布在北部、西部、西南部和东南部。九龙山 森林火险指数微显著增加的区域主要分布在西北部,占九龙山总面积的 5.62%;不显著减少的区域面积占 29.22%,主要分布在东北部、中部和东部区域;微显著 减少的区域面积最小,仅占林场面积的1.91%,主要分 布在东北部局部区域(图2)。

2.2 森林火险空间关联性

研究区 2004、2009、2014 和 2019 年 4 期森林火险 指数的 Moran's I 指数均为正值, Z 值和 P 值在置信区 间内显著,可见九龙山森林火险指数在空间上呈显著正 相关,聚集模式主要呈现为"高-高"聚集特征和"低-低"聚集特征(图3)。2004年到2014年九龙山森林火 险指数相关性减弱, 2014 年至 2019 年 Moran's I 指数略 Fig.2 Distribution of significant changes in forest fire risk index 有增加。





通过 LISA 聚类地图分析可知,九龙山森林火险指数高值聚集区域分布于东部低海拔与城镇居民点距离 较近区域,低值聚集区分布于西部高海拔、距离城镇居民点距离较远区域,除2014年外,低值聚集区面积占比 高于高值聚集区(图4)。高值聚集区和低值聚集区面积比例先下降后上升,但总体呈下降趋势。从2004年 至 2019 年,森林火险指数高值集聚区面积减少 4.89%,低值集聚区面积减少 2.19%(表 4)。





Fig.3 Correlation between forest fire risk index in different periods

	ibutions						
等级	空间集聚区域占比 The proportion of spatial agglomeration area/%						
Rank	2004 年	王 2009 年 2014 年 2019 年					
不显著 Not significant	59.19	60.99	70.85	65.20			
高-高 High-high	19.10	13.64	17.55	14.21			
低-高 Low-high	0	0.56	1.07	1.07			
低-低 Low-low	21.71	24.81	10.53	19.52			

表 4 空间聚集性分布占比表



2.3 九龙山森林火险区划结果

九龙山森林火险区划结果见表 5、图 5。九龙山森林高火险区域面积占比最小,但是从 2004 年到 2014 年 呈上升趋势,面积增加了 102.51hm²,主要分布于研究区中部,由低火险等级转变而来。较高火险区面积从 2004 年到 2009 年有显著下降,空间位置也发生明显的转变,主要由于东北部区域的森林火险等级降低,东南 部区域的较高火险区转变为高火险区,中部区域的森林火险等级由较低火险区转变为较高火险区。从 2009 年到 2019 年,较高火险区面积不断扩张。研究区中火险、较低火险区面积比例最高,无明显变化趋势。低火 险区从 2004 年到 2019 年面积不断减少,降低 8.4%。

表 5 火险等级分布表

Table 5 Fire hazard class distribution table								
火险等级	2004 年		2009 年		2014 年		2019 年	
Fire risk rating(FFR)	面积/hm ²	占比/%						
低火险(1≤FFR<2.6)	334.79	21.66	334.79	21.61	208.89	13.51	205.05	13.26
较低火险(2.6≤FFR<4.2)	540.70	34.97	641.84	41.52	506.65	32.77	619.20	40.05
中火险(4.2≤FFR<5.8)	436.11	28.21	395.09	25.56	440.73	28.51	335.40	21.69
较高火险(5.8≤FFR<7.4)	188.75	12.21	121.14	7.84	241.56	15.63	256.84	16.61
高火险(7.4≤FFR≤9)	45.65	2.95	53.80	3.48	148.16	9.58	129.52	8.38

2.4 森林火险区划的合理性评价

九龙山总体森林火险区划结果精度为 78%,说明九龙山森林火险区划结果与实际森林火灾风险区域在 对应时间点内的空间上基本保持一致,区划结果较为合理。本研究划分的 5 层类的森林火险区划结果 q 值最高,其空间分异性优于 3 层类和 4 层类的森林火险区划(表 6)。

3 讨论

3.1 WUI 森林火险的时空变化及分布

九龙山林场近15年森林火险指数均值升高17.59%,以不显著增加为主,空间变异系数升高15.38%。该

44 卷



结果说明九龙山林场森林火险相对稳定,但森林火险指数的空间差异增大,可能是由于局部区域道路长度的 迅速增加所致。研究区内防火道路总长度在研究时间段内共增加 24.45km,大量道路修建导致林区的可及区 域扩大,进而导致局部区域存在明显的火险升高迹象,该结果与 Guo 等^[34]研究结果基本一致。马振宇等^[35] 研究显示道路两侧由于植被密度低于林区,因而导致森林火险相对较低,该结果与本研究结果存在差异,原因 在于本研究中的道路主要用于防火工作,道路两侧林分密度与主林区基本一致。

Table 6 q-value tables with different equal-spaced classifications						
等间距分层类 Equal spacing classification	2004 年	2009 年	2014 年	2019 年		
3 层类 Class 3	0.783	0.758	0.838	0.800		
4 层类 Class 4	0.863	0.855	0.877	0.884		
5 层类 Class 5	0.894	0.904	0.917	0.926		

表 6 3 种等间距分层类 q 值表 *a*-value tables with different equal-spaced classification

研究区森林火险等级东高西低,火险热点区域主要位于东南部,呈升高趋势,冷点区域主要分布于西部, 基本保持稳定。该结果与高开通等^[36]研究结果基本保持一致,但与宗学政等^[37]研究结果存在差异。主要原 因为宗学政等人的研究侧重于可燃物的燃烧性和火行为,而研究区西北部和南部海拔相对较高区域林分长势 较好、密度大,可燃物载量高,东部海拔相对较低区域林分密度和可燃物载量均低于西北部和南部地区,在不 考虑人为干扰的情况下,西北和南部地区森林火险高于东部地区。本研究通过调查统计,研究区 72%的历史 火情是人为活动引起,所以在研究中将人为有关的火险驱动因子赋予更高的权重设定,使区划结果更符合研 究区特点^[38]。因此,在进行森林火险研究工作中,火险驱动因子要根据不同研究区的特点和主要研究目的进 行相应调整。由于研究区地处门头沟区城市边缘,随着社会经济的不断发展,周边居民点和研究区内道路等 相关因素不断增加^[39],九龙山森林火灾风险整体仍呈微上升趋势,所以管理部门应该进一步完善防火管理工 作以及加强周边防火宣传。

3.2 基于总体精度和地理探测器模型的森林火险区划合理性分析

历史火点验证森林火险区划精度是目前区划评价的常用方法[7-8,37]。本研究结果显示研究区总体森林

火险区划精度达到 78%,其中 1 个历史火点和 3 个火警点分布于较低火险区域,与实际区划结果存在误差。 由于 4 个位置点均发生在 20 世纪 80 年代和 90 年代,早于研究时间段,研究区内及周边环境可能发生了较大 变化,同时,4 个位置点均分布于研究区边界,受到研究区外的干扰较为严重,尤其区外的道路使人为活动的 不确定性增加,进而导致研究区域内边缘区域的火险等级准确性降低。在今后的研究中,针对林分尺度上的 森林火险区划要考虑增加研究区边界缓冲区域,以减少边界外部距离较近的范围内的相关因素对研究区内边 缘区域所产生的影响,保证森林火险区划的合理性。

本研究区内历史火点数量较少,且分布不均匀,结合地理探测器从空间分异性效果的角度对森林火险区 划的合理性进行分析可以进一步完善WUI森林火险区划的合理性评价。区域性火险区划所采用的划分方法 多为自然间断法、等间隔法,且划分等级数大多参考《全国森林火险区划等级》将火险区划分类为 3—5 层 类^[23,40]。空间分层数量影响空间分层的分异性结果,同时分层数量与空间分层分异性效果并不一定成正比, 因此,本文采用地理探测器对比分析 3 种区划分层数的结果表明不同时间段均为 5 层的森林火险区划效果最 优。由于本研究仅针对等间隔法的 3 种分层结果进行了评估,不同区划分层方法获得的区划结果可能与本研 究存在一定差异,所以在今后的研究中,可考虑对多种划分方法进行评估,以获取最佳的森林火险区划结果。 3.3 WUI 森林火险减缓措施

WUI 区域的林火管理涉及到复杂的人与自然的交互作用^[41],由于北京市的城市人口不断增长,门头沟区 主城区向西部林区扩张增加了休闲活动的机会和 WUI 面积,同时也增加了当地人口、建筑和基础设施暴露于 野火的风险,火险管理与居民对森林服务需求之间存在一定冲突。九龙山林场在制定针对性森林火险防控措 施时要充分了解该区域及周边紧邻城区的地形、人口密度、道路密度、社会应急能力和潜在火行为等特征。针 对林区内部区域森林火险指数的热点区域进行可燃物清理,减少地表枯死可燃物载量,东部环城市周边高火 险区域栽种防火树种和修建防火隔离带,对林场周边居民和游客要加强火灾预防教育,提高防火意识,同时在 林场的发展建设中,要基于降低火险的原则对土地利用进行有效规划。

4 结论

本文基于层次分析法以 2004—2019 年北京九龙山为例,对典型 WUI 区域的森林火险进行评估,利用 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 检验相结合和 Moran's *I* 指数分析探究了研究区森林火险时空变 化趋势及空间聚集性,并利用历史火点、火警位置数据和地理探测器模型验证森林火险区划的合理性和准确 性。研究结果表明:

(1)九龙山森林火险时空变化趋势显示,研究区内森林火险指数的集聚特征变化较大,森林火险指数整体增加17.59%,空间变异系数增加15.38%。九龙山内61.58%的区域火险指数不显著增加,5.62%的区域微显著增加,32.80%区域为不显著减少和微显著减少。

(2) 区内森林火险指数的 Moran's I 指数均为正值,高值聚集区面积占比整体低于低值聚集区,面积减少 比例是低值聚集区的 2.2 倍。

(3)森林火险区划结果显示,九龙山林场森林高火险区域面积占比最小,分布于研究区中部,覆盖区域呈 扩大趋势,主要由低火险等级转变而来。较高火险区面积从 2004 年到 2009 年显著下降,2009 年到 2019 年不 断扩张,空间位置发生明显转变,主要由于局部区域火险指数升高。中火险、较低火险区域面积比例最高,无 明显变化趋势。低火险区在研究时间段内面积不断减少。

(4) 区划的合理性评价结果显示,森林火险等级区划与实际火情分布保持高度的空间一致性,区划分层 效果较好。由于 WUI 区域的特殊性,研究区内存在误差的火点(或火警点)主要是人为因素干扰导致,因此, 需进一步完善研究区内监控设施的布局,加强对当地民众的防火宣传教育,提高防火宣传力度。

参考文献(References):

^[1] Stephens S L, Burrows N, Buyantuyev A, Gray R W, Keane R E, Kubian R, Liu S R, Seijo F, Shu L F, Tolhurst K G, van Wagtendonk J W.

- [2] Abram N J, Henley B J, Sen Gupta A, Lippmann T J R, Clarke H, Dowdy A J, Sharples J J, Nolan R H, Zhang T R, Wooster M J, Wurtzel J B, Meissner K J, Pitman A J, Ukkola A M, Murphy B P, Tapper N J, Boer M M. Connections of climate change and variability to large and extreme forest fires in southeast Australia. Communications Earth & Environment, 2021, 2: 8.
- [3] Campos-Ruiz R, Parisien M A, Flannigan M. Temporal patterns of wildfire activity in areas of contrasting human influence in the Canadian boreal forest. Forests, 2018, 9(4): 159.
- [4] Flannigan M D, Stocks B J, Wotton B M. Climate change and forest fires. Science of the Total Environment, 2000, 262(3): 221-229.
- [5] 舒立福,田晓瑞,李红.世界森林火灾状况综述.世界林业研究,1998,(6):42-48.
- [6] 曲延浩. 红河-文山州与大兴安岭地区林火时空分布对比及火险因子研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [7] 安佳怡,冯仲科,马天天,高可可.基于 GIS 格网的重庆合川区森林火险等级区划.中南林业科技大学学报,2022,42(9);91-101.
- [8] 朱政,赵璠,王秋华,高仲亮,邓小凡,黄鹏桂.昆明市林火驱动因子及火险区划研究.浙江农林大学学报,2022,39(2):380-387.
- [9] 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.
- [10] 岳超, 罗彩访, 舒立福, 沈泽昊. 全球变化背景下野火研究进展. 生态学报, 2020, 40(2): 385-401.
- [11] Wang S, Li H L, Niu S K. Empirical research on climate warming risks for forest fires: a case study of grade I forest fire danger zone, Sichuan Province, China. Sustainability, 2021, 13(14): 7773.
- [12] 苏漳文,曾爱聪,蔡奇均,胡海清.基于 Gompit 回归模型的大兴安岭林火预测模型及驱动因子研究.林业工程学报,2019,4(4): 135-142.
- [13] 孙龙,尚喆超,胡海清. Poisson 回归模型和负二项回归模型在林火预测领域的应用. 林业科学, 2012, 48(5): 126-129.
- [14] Polinova M, Wittenberg L, Kutiel H, Brook A. Reconstructing pre-fire vegetation condition in the wildland urban interface (WUI) using artificial neural network. Journal of Environmental Management, 2019, 238; 224-234.
- [15] 侯晓静,明金科,秦荣水,朱霁平.基于随机森林模型的交界域火灾风险分析.林业科学,2019,55(8):194-200.
- [16] 白海峰,刘晓东,牛树奎,何亚东.基于贝叶斯模型平均法的森林火灾预测模型构建研究——以云南省大理州为例.北京林业大学学报, 2021,43(5):44-52.
- [17] Rivière M, Lenglet J, Noirault A, Pimont F, Dupuy J L. Mapping territorial vulnerability to wildfires: a participative multi-criteria analysis. Forest Ecology and Management, 2023, 539: 121014.
- [18] Sari F. Forest fire susceptibility mapping via multi-criteria decision analysis techniques for Mugla, Turkey: a comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. Forest Ecology and Management, 2021, 480: 118644.
- [19] 高超,林红蕾,胡海清,宋红.我国林火发生预测模型研究进展.应用生态学报,2020,31(9):3227-3240.
- [20] 宗学政,田晓瑞,马帅,刘畅.基于火模拟的森林火灾风险定量评估——以中国林业科学研究院亚热带林业实验中心为例.北京林业大学学报,2022,44(9):83-90.
- [21] 张运林,张恒,金森.季节和降雨对细小可燃物含水率预测模型精度的影响.中南林业科技大学学报,2015,35(8):5-12.
- [22] 满子源,胡海清,张运林,刘方策,李远.帽儿山地区典型地表可燃物含水率动态变化及预测模型.北京林业大学学报,2019,41(3): 49-57.
- [23] 国家林业局. 全国森林火险区划等级(LY/T 1063-2008). 北京: 中国林业出版社, 2008.
- [24] Zhang R P, Liang T G, Guo J, Xie H J, Feng Q S, Aimaiti Y. Grassland dynamics in response to climate change and human activities in Xinjiang from 2000 to 2014. Scientific Reports, 2018, 8: 2888.
- [25] 张衢, 贺桂珍, 吕永龙. 基于 AHP-DEA 的滨海湿地保护利用管理效率评价. 生态学报, 2020, 40(15): 5210-5219.
- [26] Ali, Kuriqi, Abubaker, Kisi. Long-term trends and seasonality detection of the observed flow in Yangtze River using Mann-Kendall and Sen's innovative trend method. Water, 2019, 11(9): 1855.
- [27] 曹永强,周姝含,杨雪婷.近 20 年辽宁省植被动态特征及其对气候变化的响应.生态学报, 2022, 42(14): 5966-5979.
- [28] 吕广斌,廖铁军,姚秋昇,邓薇. 基于 DPSIR— EES— TOPSIS 模型的重庆市土地生态安全评价及其时空分异.水土保持研究, 2019, 26 (6); 249-258, 266.
- [29] 任静, 沈才明, 刘芳, 叶燎原. 2011—2020 年云南西双版纳 MODIS 火点的时空动态特征. 生态学杂志, 2023, 42(8): 1953-1962.
- [30] 马文苑,冯仲科,成竺欣,王凤阁.山西省林火驱动因子及分布格局研究.中南林业科技大学学报,2020,40(9):57-69.
- [31] 马明, 孙亚珍, 任枫, 葛云, 贾东瑾, 杨林. 榆林北部地区草原火灾管理现状及分布优化. 自然灾害学报, 2021, 30(4): 117-125.
- [32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134.
- [33] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity. Ecological Indicators, 2016, 67: 250-256.
- [34] Guo F T, Zhang L J, Jin S, Tigabu M, Su Z W, Wang W H. Modeling anthropogenic fire occurrence in the boreal forest of China using logistic regression and random forests. Forests, 2016, 7(12): 250.
- [35] 马振宇,陈博伟,庞勇,廖声熙,覃先林,张怀清.基于林火特征分类模型的森林火情等级制图.国土资源遥感,2020,32(1):43-50.
- [36] 高开通,刘鹏举,唐小明.森林资源小班火险天气等级预报方法研究.北京林业大学学报,2013,35(4):61-66.
- [37] 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.
- [38] Liu M, Yang L Q. Human-caused fires release more carbon than lightning-caused fires in the conterminous United States. Environmental Research Letters, 2021, 16(1): 014013.
- [39] 谢绍锋,肖化顺,储蓉,付春风.基于泰森多边形的广州市林火空间分布规律研究.西北林学院学报,2018,33(3);178-185.
- [40] 吴明山,周汝良,张明莎,叶江霞.林分尺度上的森林火险动态评估.林业资源管理,2020(2):126-134.
- [41] Roos C I, Swetnam T W, Ferguson T J, Liebmann M J, Loehman R A, Welch J R, Margolis E Q, Guiterman C H, Hockaday W C, Aiuvalasit M J, Battillo J, Farella J, Kiahtipes C A. Native American fire management at an ancient wildland-urban interface in the Southwest United States. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2021, 118(4): e2018733118.