

DOI: 10.20103/j.stxb.202410212567

关如泓,焦珂伟,常禹,吕秋爽,李凯莉,郭文华,周思羽,刘志华.黑龙江省森林-城镇交界域火灾分布格局及高发区域时空动态辨识.生态学报, 2025, 45(13): - .

Guan R H, Jiao K W, Chang Y, Lü Q S, Li K L, Guo W H, Zhou S Y, Liu Z H. Spatio-temporal dynamics of Wildland-Urban Interface distribution patterns and high fire occurrence areas in Heilongjiang Province. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(13): - .

黑龙江省森林-城镇交界域火灾分布格局及高发区域时空动态辨识

关如泓^{1,2}, 焦珂伟¹, 常禹¹, 吕秋爽^{1,2}, 李凯莉^{1,2}, 郭文华^{1,2}, 周思羽^{1,2}, 刘志华^{1,*}

1 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 人口增加和城市扩张导致森林-城镇交界域的范围不断扩大, 独特的火源条件、可燃物结构及气候变暖导致交界域内的火灾风险急剧上升, 严重破坏生态环境, 威胁人民生命财产安全, 研究交界域内火灾发生的空间分布及其驱动因子, 能够满足交界域火灾管理和预防策略制定的实际需求。基于黑龙江省 1980—2009 年的森林火灾数据, 采用点格局分析方法, 构建交界域内人为火、雷击火的空间分布与驱动因子之间的关系, 识别火灾高发区域, 分析火灾发生密度的时空动态变化。结果表明: 黑龙江省交界域平均林火发生密度为 $0.0028 \text{ km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 气候、植被和地形因子对人为火和雷击火的发生均具有较强的驱动作用; 人为火和雷击火的发生具有明显的时空异质性, 主要集中于大兴安岭、小兴安岭及黑龙江省东南部。火灾高发区域主要位于北部和东北部的森林地带, 近年来并未显著扩张。本研究发展的森林-城镇交界域火灾分布格局及高发区域时空动态辨识方法可有效评估交界域火灾发生风险, 为火灾预防和管理提供科学依据。

关键词: 森林-城镇交界域; 空间点格局分析; 林火; 时空动态; 高发区域

Spatio-temporal dynamics of Wildland-Urban Interface distribution patterns and high fire occurrence areas in Heilongjiang Province

GUAN Ruhong^{1,2}, JIAO Kewei¹, CHANG Yu¹, LÜ Qiushuang^{1,2}, LI Kaili^{1,2}, GUO Wenhua^{1,2}, ZHOU Siyu^{1,2}, LIU Zhihua^{1,*}

1 Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Population growth and urban expansion have led to a continuous increase in the extent of Wildland-Urban Interface (WUI). The combined influence of unique ignition sources, fuel structures, and climate warming has heightened the risk of wildfires in these regions, posing significant threats to the ecological environment and endangering human lives and property. The WUI areas are influenced by both natural ecosystems and human activities, their unique ignition sources, fuel structures, and the increasingly significant trend of climate warming have substantially elevated the risk of wildfires in WUI. This not only severely damages the local ecological environment but also threatens the safety of residents and their property. Investigating the spatial distribution of wildfires and their driving factors within the WUI is crucial for developing effective fire management and prevention strategies. Based on wildfire data from Heilongjiang Province from 1980 to 2009, this study applies spatial point pattern analysis to examine the spatial distribution characteristics of human-caused fires and

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3003101); 辽宁省科技计划联合基金项目(2023-MSBA-138)

收稿日期: 2024-10-21; **网络出版日期:** 2025-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuzh@iae.ac.cn

lightning-caused fires within the WUI. The Akaike Information Criterion (AIC) is used to identify the key factors that significantly influence wildfire occurrences and to further assess their relative contributions. Additionally, by analyzing the interannual variations of different climatic factors, the study applies spatial point pattern analysis to explore the spatio-temporal dynamics of human-caused fires lightning-caused fires, and total wildfires occurrence density within the WUI. This study analyzes the spatial patterns of these fire types and identifies high fire occurrence areas within the WUI of Heilongjiang Province. The results indicate that WUI areas in Heilongjiang Province are primarily distributed in the central, southeastern, and northwestern parts. The average wildfire occurrence density within the WUI is $0.0028 \text{ incidents km}^{-2} \text{ a}^{-1}$. Climate, vegetation, and topographic factors play significant roles in driving both human-caused fires and lightning-caused fires. The occurrence of wildfire has obvious spatial and temporal heterogeneity, mainly in the Greater Khingan Mountains, Lesser Khingan Mountains, and southeastern Heilongjiang Province. High fire occurrence areas are mainly located in the northern and northeastern forest regions, and their overall distribution has not expanded significantly in recent years. Among the identified high fire occurrence areas, WUI areas account for 27.5%, while the majority of high fire occurrence areas are located outside the WUI. The wildfire distribution pattern analysis and high fire occurrence areas spatio-temporal identification method developed in this study provide an effective approach for assessing wildfire risk in WUI. The findings offer a scientific basis for wildfire management within the WUI and contribute to wildfire prevention efforts. By improving wildfire control strategies, these efforts can enhance wildfire prevention and management capabilities in WUI, ultimately reducing the impact of wildfires on ecological environments and socioeconomic systems.

Key Words: Wildland-Urban Interface (WUI); spatial point pattern analysis; wildfires; spatio-temporal dynamic; high fire occurrence area

工业革命以来,人口增长和城市化进程使人类活动逐渐由郊区向城市转移,导致城市不断向森林区域扩张,城镇边缘地带增加^[1-2],形成森林-城镇交界域^[3-4](Wildland-Urban Interface, WUI)。森林-城镇交界域兼具森林和城市用地的特点,随着城市化的发展,WUI的规模逐渐增加。WUI是房屋建筑与森林植被交汇或混杂的区域,分为交汇型(Interface WUI)和混杂型(Intermix WUI)两类^[5],交汇型交界域的特点是建筑与可燃物植被之间有明确的分界线,混杂型交界域则是建筑与可燃物相互交织,无明确的界限。WUI的人类活动频繁,土地利用方式独特,可燃物分布复杂且火源充足,是火灾与人类之间交互影响最为剧烈的区域。生产、生活等人为用火为WUI火灾的发生提供了引燃条件,加之可燃物连续分布,使WUI极易发生大规模火灾,交界域火灾常常呈现向森林大火或大规模建筑火灾蔓延的趋势^[6-8]。极端天气事件,尤其是气候变化,进一步加剧了交界域的火灾风险^[3]。据美国国家跨部门消防中心(National Interagency Fire Center)统计,3%的交界域火灾导致95%的火灾代价,对人类生命财产构成极大的威胁^[9]。当前,国内外对于森林火灾的研究多集中于火灾风险评估、火灾蔓延模型的构建、气候变化的影响、火灾管理与措施等方面^[10]。因此,开展交界域内火灾发生的时空动态规律、火灾风险预测以及防控措施的研究,具有重要意义。

火灾发生通常受到气候、植被、地形和人类活动四方面因素的影响^[11-12]。温暖湿润的气候条件促进森林生长,积累更多的有机物,为林火的发生提供充足的燃料^[3]。气候变化通过影响可燃物含水量和空气相对湿度,进而影响其可燃物载量和水分含量,决定了林火发生的难易程度^[13]。研究表明,干旱、高温和强风是导致WUI火灾发生和蔓延的主要气象因素^[14]。植被是林火发生的关键因素,决定了林火发生的物质基础(如可燃物载量、分布及连续性)^[15],不同的植被类型具有不同的火行为特征,例如森林火灾的特征通常与树种、树木密度和地表覆盖物密切相关,交界域内植被的高覆盖度、低湿度燃料以及植被的垂直结构和水平分布等决定了火灾的蔓延与扩张速度。此外,WUI内地形因素通过改变植被组成和燃料的空间分布来影响林火的发生,从而构成不同的火灾易发环境^[10],一般来说,海拔越高气温越低,不易发生火灾;坡度越大,可燃物含水量低,从而增加火灾风险^[9]。Schoennagede等^[16]指出,人类活动是影响WUI火灾的重要因素,尤其是人口密集、

经济发达的地区,交界域正在快速扩张。防火措施不完善、伐木、放牧行为等容易导致燃料积累,增加生态系统的脆弱性,WUI 内房屋密度较低的区域由于可燃物负荷更大且分布连续,火灾风险也更高^[17-18]。

本研究基于空间点格局分析(spatial point pattern, spp),揭示黑龙江省 WUI 林火发生的空间格局,构建 WUI 林火空间分布与驱动因子(气候、植被、地形和人类活动)之间的泊松分布模型,从而分析 WUI 内的林火空间格局及其影响因素。研究目标包括:(1)预测 WUI 内不同火灾类型(人为火、雷击火)发生密度的空间分布,明确火灾发生的主要驱动因子;(2)形成 WUI 火灾高发区域时空动态识别方法,探究 WUI 火灾高发区域的空间分布及时间动态。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

黑龙江省森林覆盖率为 44.47%,主要森林类型为针叶林、落叶阔叶林、针阔混交林。其中落叶阔叶林分布最广,占森林总面积的 66.86%(1198.22 万 hm^2),主要集中在长白山和小兴安岭大部分地区;落叶针叶林面积为 394.87 万 hm^2 ,占森林总面积的 22.03%,主要分布在大兴安岭北部;混交林面积为 115.13 万 hm^2 ,主要分布于小兴安岭中部和东部山地^[19]。黑龙江省森林资源丰富且分布广泛,是我国森林火灾高发地区,过火面积和火灾次数均居前列^[20]。据统计,1980—2009 年黑龙江省总过火面积达到 $6.75 \times 10^6 \text{hm}^2$,造成了巨大的森林资源损失,并严重影响人民生命安全和经济利益。

本研究使用 Google Earth Engine,基于人口密度数据(Gridded Population of the World, GPWv411)、不透水面数据(Global Artificial Impervious Areas, GAIA)、MODIS 土地覆盖类型产品(MCD12Q1)以及 MODIS 植被覆盖数据产品(MOD44B.006)进行 WUI 制图。根据美国联邦公报(Federal Register)^[5]定义的 WUI 标准,在植被和房屋边界的 2.4 km 缓冲区内,将房屋密度 >6.18 个/ km^2 且植被覆盖率 $>50\%$ 的区域识别为混杂型 WUI,将房屋密度 >6.18 个/ km^2 且植被覆盖率 $<50\%$ 的区域识别为交汇型 WUI,最后将两种类型 WUI 区域合并,生成 10 km 的缓冲区,得到黑龙江省 WUI 的空间分布图(图 1)。WUI 的分布主要集中在黑龙江省中部、东南部以及西北部分,实际面积约 2.5 万 km^2 ,占比黑龙江省面积的 5.5%,其中东部山地区域和中部地区是构成 WUI 的主要区域。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 森林火灾数据与影响因子数据

本研究基于中国林业科学数据中心提供的黑龙江省 1980—2009 年森林火灾统计数据,包括过火面积、起火原因、起火地点、时间等信息,数据共记录了 2164 起火灾事件,其中由于部分火灾缺少起火原因或数据位置存在不准确的情况,这些火灾事件未纳入分析,最终保留了 1723 起火灾事件用于分析。根据起火原因,火灾类型分为人为火和雷击火两类,其中人为火 1432 起,集中发生在大兴安岭地区,雷击火发生 291 起,主要发生在黑龙江省西北部(图 2),自 1983 年以来,森林火灾的发生次数呈波动上升趋势,并在 2002—2003 年间达到峰值,其中人为火发生次数高达 169 次,雷击火发生 70 次(图 2)。选取林火发生驱动因子作为自变量,包括气候、人为活动、地形和植被因子等共 16 个,每个自变量的具体信息详见表 1。

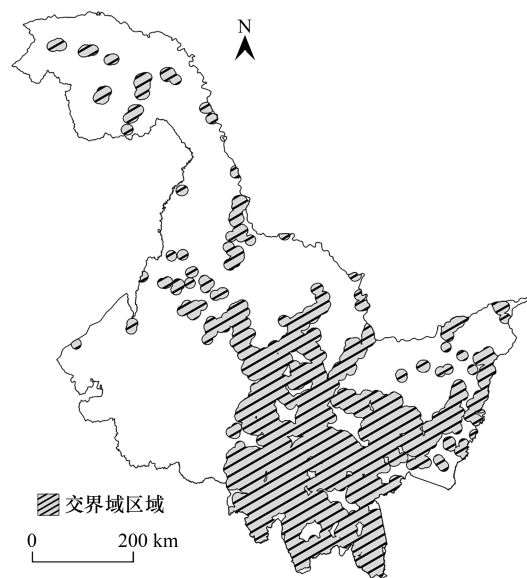


图 1 黑龙江省交界域空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of WUI and boundary of Heilongjiang Province

WUI: 森林-城镇交界域 Wildland-Urban Interface

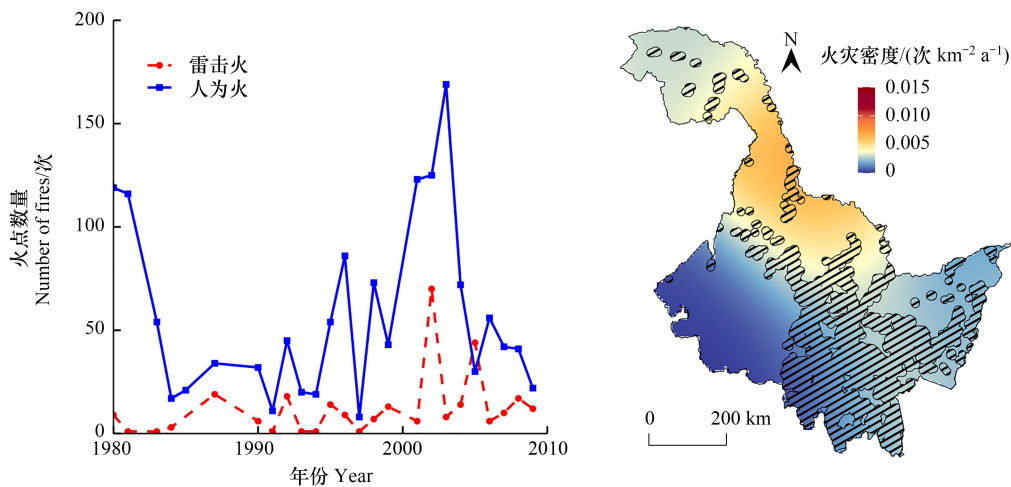


图2 黑龙江省 1980—2009 年森林火灾发生情况
Fig.2 Distribution of wildfires in Heilongjiang Province from 1980 to 2009

表 1 林火发生驱动因子

Table 1 Independent variables of wildfires

自变量组 Variable group	自变量 Variable	分辨率 Resolution	单位 Unit	来源 Source
气候因子 Climatic factors	年降水	逐月,4 km	cm	Terra climate;http://www.climatologylab.org/terraclimate.html
	年均温度		℃	
	PDSI			
地形因子 Topographic factors	高程	1 km	m	SRTM digital elevation data; https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/
	坡度		(°)	
	坡向			
植被因子 Vegetation factors	NDVI	2019—2021 年,1km		Landsat Collection 2; https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products
	森林比例	0.5°	%	MCD12Q1 v061; https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v061/
	落叶针叶林比例			
	落叶阔叶林比例			
	混交林比例			
	森林覆盖率	2000 年,30 m	%	Hansen Global Forest Change v1.10;https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change
人为因子 Anthropogenic factors	人口密度	2010 年,30"	人/km ²	Gridded Population of the World, Version 4;https://sedac.ciesin.columbia.edu/data/set/gpw-v4-population-density-rev11
	道路密度	5´	m/km ²	GRIP global roads database;https://www.globio.info/download-grip-dataset
	距离道路最近距离	1 km	km	
其他 Other	火点距离交界域的距离	1 km	km	

NDVI: 归一化植被指数 Normalized difference vegetation index; PDSI: 帕默尔干旱指数 Palmer drought severity index

1.2.2 变量选择及依据

林火发生是复杂的过程, 受到自然和人为因素的共同影响。明确林火发生的关键驱动因子是构建林火发生高精度模型的关键^[21]。基于已有的研究结果, 本研究选择气候、地形、植被和人为活动因子为关键变量构

建林火发生密度模型^[22-23]。

(1) 气候:气候是影响林火发生的重要因子,高温、干旱和大风等极端林火天气下,植被的含水量显著下降,可燃物干燥并易于点燃,导致林火发生的风险增加。统计数据表明,森林火灾的发生概率与气候干旱之间存在直接关联^[24]。

(2) 地形:地形条件影响局部风向、水分平衡和传热等微气候条件,改变植被组成和燃料分布情况,与林火的发生和蔓延关系密切。一般来说,高海拔地区气温相对较低,不易发生森林火灾。而坡度较大的地区可燃物水分含量较低,从而为林火提供了发生环境^[10]。

(3) 植被:植被的类型、覆盖度等因素反映了可燃物的分布、载量和连续性。本研究考虑了落叶针叶林、落叶阔叶林及混交林三个类型,并计算不同森林类型在 0.5°像元中的比例。同时计算出研究时段内 NDVI 的均值,NDVI 的值越大表明植被覆盖度越高。

(4) 人为活动:人为活动是林火的发生及蔓延的主要因子。一方面,人类活动是林火发生的主要原因,因此人类活动对于林火的发生具有促进作用。另一方面,灭火等防火措施对林火的蔓延具有抑制作用^[1],人为活动可改变森林景观及可燃物连接性,进一步影响林火的发生和蔓延。本研究选取人口密度、道路密度、距离道路最近距离和火点距离交界域的距离 4 个因子来反映人类活动对林火发生的影响。

1.3 点格局分析

1.3.1 点格局分析的原理

点格局分析是根据地理实体或事件的空间位置研究其分布模式的方法。通常使用 Ripley's K 函数来分析空间点位置随邻域大小变化,分析其空间聚集或扩散的变化过程,可用于确定不同空间尺度下火点分布是否聚集^[25],定义为

$$K(r) = \lambda^{-1} E[\cdot]$$

式中, $E[\cdot]$:在以任意一点为圆心、 r 为半径的圆内点数的期望值,不包括圆心; λ 为样方单位面积的平均点数,即样方内点密度^[26-27]。 $K(r) < \pi r^2$ 说明空间点是孤立的, $K(r) > \pi r^2$ 说明空间点是聚集分布, $K(r) = \pi r^2$ 则表示空间点是完全随机点(CSR)。

点格局分析作为空间格局分析的常用方法^[26,28],用于分析不同林火发生条件下的林火空间格局,比如人为火^[29]、雷击火^[30-31]的空间分布,探讨林火与其影响因素之间的关系等,在相关研究中得到广泛应用。

1.3.2 模型构建与点格局分析流程

本文选取气候、人为活动、植被因子、地形等影响因素,共计 16 个驱动因子作为点格局分析中的自变量。首先将火点数据作为空间随机点进行模拟,利用潜变量作图筛选出可作为潜在变量的因子。然后使用 RStudio 中的“Spatstat”包进行空间点格局分析^[32],构建林火发生与各驱动因子之间的关系模型。最后采用赤池信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)选择最佳模型,从而确定对林火发生具有显著影响的因子,并评估各因子的贡献。

1.3.3 火灾高发区域时空动态模型构建与验证

基于 Terra climate 数据中气候因子(降水、年均温、干旱指数 PDSI),获得 2000—2023 年不同气候因子的年际变化;进而通过点格局分析方法,得到交界域内人为火、雷击火以及总火灾发生密度的时空动态变化,计算并绘制交界域内人为火、雷击火的火灾发生密度均值、标准差以及火灾发生密度变化趋势的空间分布图,其中火灾发生密度的变化趋势是通过计算 2000—2011 年和 2012—2023 年火灾发生密度的均值,并基于这两个时期的均值来绘制线性趋势图。

首先对火灾发生密度的预测结果进行提取,使用 R 软件中的 quantile() 函数,确定预测结果中百分位数为 30%,50%,60%,70%,80%,90% 分别对应的火灾发生密度,选取百分位数为 70% 所对应的火灾发生密度作为火灾高发的阈值,选定火灾密度大于阈值的区域并做 10 km 的缓冲区,确定为火灾高发区域。通过计算交界域内实际火灾发生和预测火灾发生密度结果的皮尔逊相关系数(Pearson correlation coefficient),来表示的

模型精度。同时,通过统计不同火灾发生密度区间内的火灾次数以及火点的核密度,验证模型的对火灾高发区制图的效果。本研究设置 5 个火灾发生密度的区间,分别为 0—0.003、0—0.006、0—0.009、0—0.012 以及 0—0.015 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$,统计火点的核密度以及 5 个区间内火灾发生累计分布的次数。

2 结果与分析

2.1 交界域火灾密度空间分布制图

2.1.1 交界域火灾发生密度空间分布

火灾发生密度的点格局模型及制图结果表明,黑龙江省林火发生集中在大兴安岭以及小兴安岭东北部地区,交界域平均火灾密度为 0.0028 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$ (图 3)。人为火和雷击火的空间分布差异明显,人为火主要集中于大兴安岭、小兴安岭以及黑龙江省东南部地区,火灾发生密度为 0—0.016 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$;雷击火则主要集中在西北地区,火灾发生密度为 0—0.007 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$,明显低于人为火。在交界域内,人为火的发生密度在 0.002 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 左右,而雷击火仅 0.0001 次 $\text{km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 左右,这表明交界域内人为火的影响远大于雷击火。

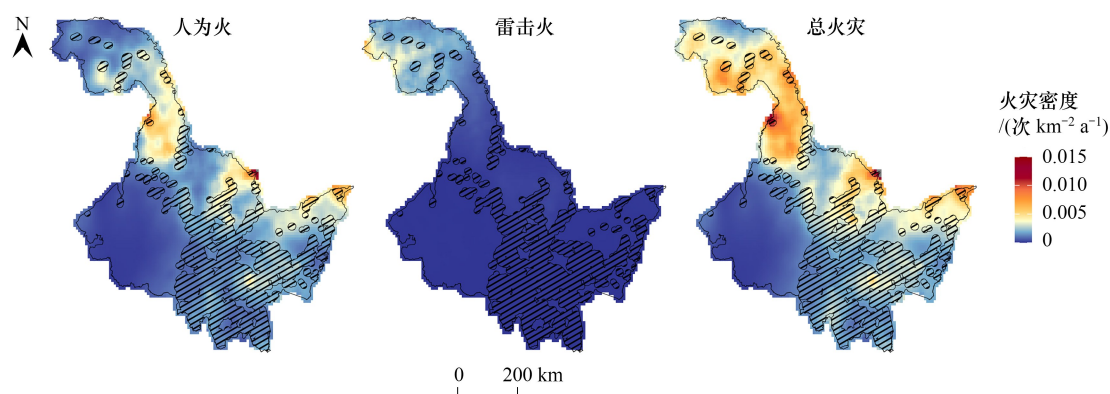


图3 交界域火灾发生密度均值的空间分布

Fig.3 Spatial distribution of average fire occurrence density in WUI

WUI: 森林-城镇交界域 Wildland-Urban Interface

2.1.2 模型拟合结果

潜变量作图(图 4)的结果表明,交界域和非交界域中火点发生密度的影响因素和效果存在显著差异。在海拔位于 0—650 m 范围内人为火的发生概率较高,在距离道路 100—200 m 的范围内,累积皮尔逊残差波动较大,且两种类型的火灾发生概率均较低,这可能与该区域内频繁的人类活动有关,林火发生后更容易被发现和扑灭。与海拔因素相比,地形因素中坡度对林火发生密度的影响相对较小,对于人为火,坡度在 2° — 3° 之间的林火发生概率较高,而对于雷击火,坡度对交界域和非交界域区域的影响效果存在差异,未呈现一致性。此外,对于两种火灾类型,火点距离交界域 0—250 m 时,人为火、雷击火的发生概率明显大于远离交界域的区域。相比之下,在非交界域区域,火点与交界域的距离为 0—200 m 时,累积皮尔逊残差急剧下降,与交界域内的火灾发生表现出相反的效果。

AIC 结果表明,本研究选择的驱动因子对火灾的发生均有重要作用。人为火的发生主要取决于气候因子中气温和降水量的共同影响。根据模型拟合结果(表 2),气温和降水量与人为火之间均存在负相关关系,其中降水量的影响强于气温,而研究结果也表明气温和降水并不是引发雷击火的主要因素。此外,不同驱动因子对人为火和雷击火的作用存在差异。植被因子中,混交林比例是导致人为火和雷击火发生的主要因素,其他的植被因子的影响相对较弱。同时,落叶阔叶林比例也对人为火的发生有显著影响。从林火类型的角度看,人为火在距离道路近和靠近交界域时更容易发生,这与人类活动的可达性密切相关,在人类活动易到达的范围内更容易发生林火,而雷击火的发生与距离道路最近距离和距离交界域的距离这两个因子没有明显关系。

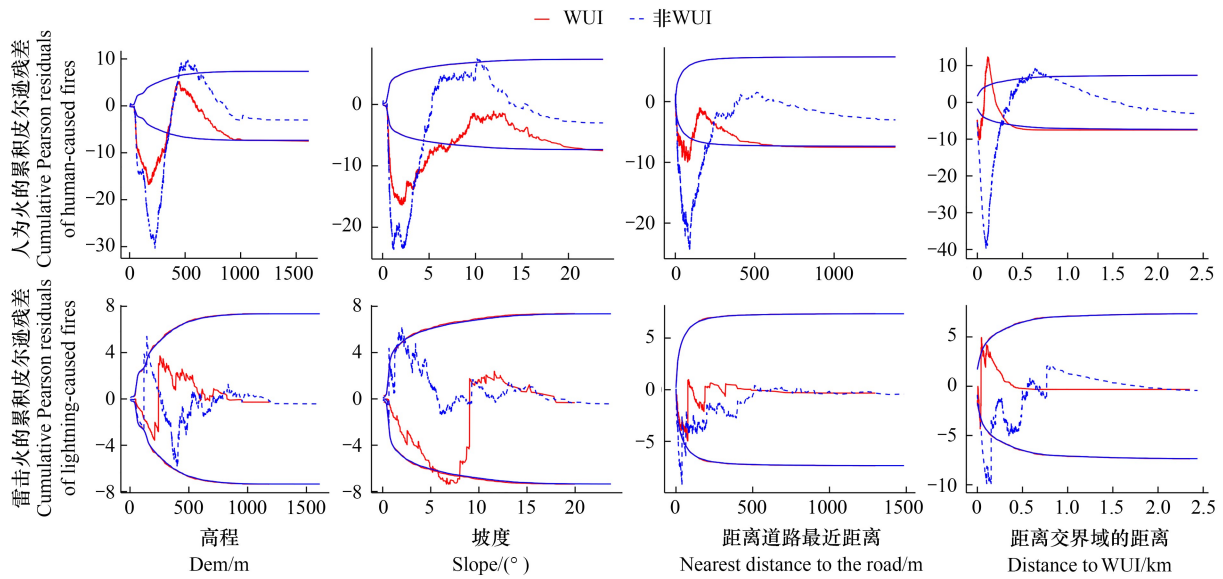


图 4 人为火和雷击火发生密度影响因素

Fig.4 Factors influencing the occurrence density of human-caused fire and lightning-caused fire

WUI: 森林-城镇交界域 Wildland-Urban Interface

表 2 根据 AIC 标准选择的模型参数及其系数

Table 2 Selected predictor variables and coefficients based on AIC

人为火参数变量 Variable of human-caused fire	人为火拟合系数 Fitted coefficient of human-caused fire	雷击火参数变量 Variable of lightning- caused fire	雷击火拟合系数 Fitted coefficient of lightning-caused fire
截距 Intercept	6.646	截距	-7.941
年降水 Annual precipitation	-0.440	NDVI	5.500
年均温度 Annual mean temperature	-2.444	PDSI	-1.813
NDVI	-1.488	混交林比例	-69.338
PDSI	-2.376	高程	0.102
混交林比例 Proportion of mixed forest	-64.213	人口密度	-0.356
落叶阔叶林比例 Proportion of deciduous broadleaf forest	36.716		
坡向 Aspect	0.076		
距离道路最近距离 Nearest distance to the road	-1.663		
坡度 Slope	0.184		
距离交界域的距离 Distance to WUI	-1.133		

AIC: 赤池信息准则 Akaike information criterion; WUI: 森林-城镇交界域 Wildland-Urban Interface

2.2 火灾高发区域时空动态分析

2.2.1 火灾高发区域识别与验证

本研究选取火点发生预测结果中百分位数为 70% 所对应的火灾发生密度($0.0034 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)作为火灾高发区域的密度阈值,从而识别出火灾高发区域(图 5),主要集中在黑龙江省的北部和东北部,即大兴安岭、小兴安岭以及三江平原区域。

验证结果表明,1980—2009 年黑龙江省交界域内实际火灾发生密度与预测结果的皮尔逊相关系数为 0.956,因此本研究中模型的验证精度为 95.6%。随后计算了火点的核密度估计,并在 5 个区间内统计火灾发生累计分布的次数,验证火灾高发区域的预测结果(图 6)。验证结果发现,火灾发生的累计次数在火灾密度为 $0-0.009 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 范围内有明显的提升,随后趋于缓慢增加。火点的核密度估计结果表明,在火灾发生密度为 $0.007-0.0075 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 区间内,火灾发生的次数最多。

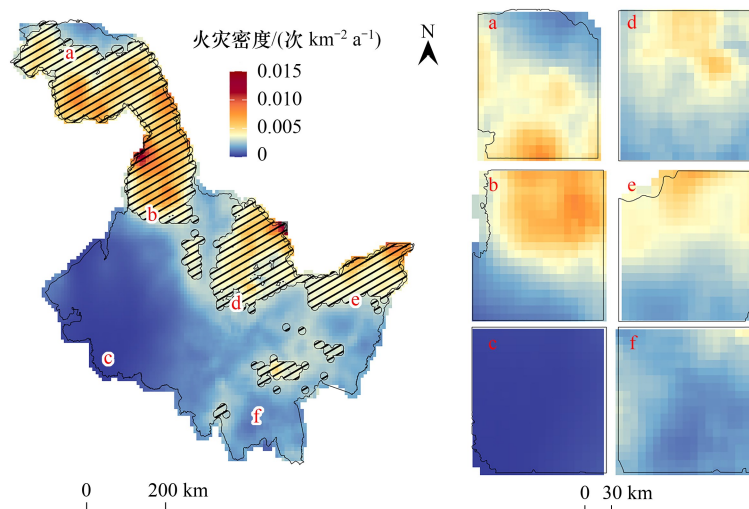


图5 黑龙江省火灾高发区域

Fig.5 High fire occurrence areas in Heilongjiang Province

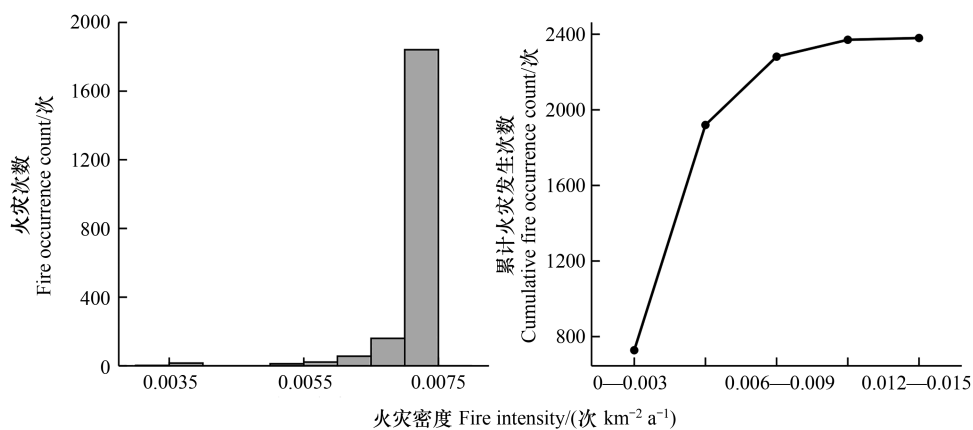


图6 火灾发生密度的火灾次数及火点核密度估计

Fig.6 Fire occurrence density estimation of fire number and ignition core density

2.2.2 交界域火灾高发区域时空动态变化

通过比较 2000—2023 年火灾发生密度均值(图 7)和标准差(图 8)的时空分布图,发现人为火的发生主要集中于小兴安岭以及三江平原,雷击火的发生主要集中于大兴安岭西北部,2000—2023 年间在黑龙江省东部和西北部森林资源丰富且人口相对多的地区,人为火年际变化较大,而雷击火火灾发生密度几乎没有明显波动,其变化相对不明显。图 9 展示了 2000—2023 年火灾发生密度的变化趋势的时空分布情况,黑龙江省中部和东南部地区增加的火灾发生密度高至 $0.001 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,东部和西北部大兴安岭地区的人为火发生密度呈减少趋势。总体来看,2000—2023 年黑龙江省火灾发生呈现出一定的时空异质性。交界域平均林火发生密度在 $0.0028 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 左右波动变化。火灾高发区域的总体分布在黑龙江省西北部以及东北部,并未出现明显的扩张。

3 讨论

黑龙江省林火的发生主要集中在大兴安岭、小兴安岭地区以及东南部地区,而西部、西南部以及东北部这

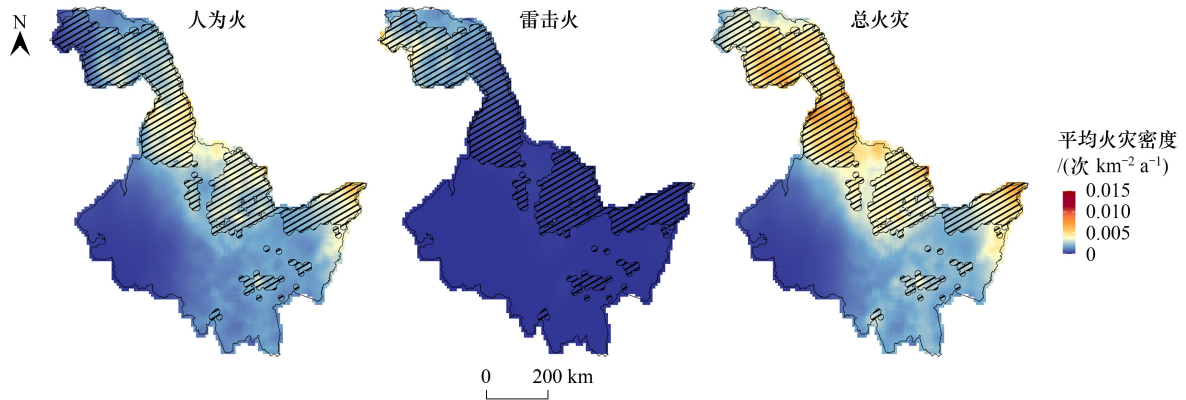


图7 2000—2023 年火灾发生密度均值时空分布图

Fig.7 Spatial and temporal distribution of average fire occurrence density from 2000 to 2023

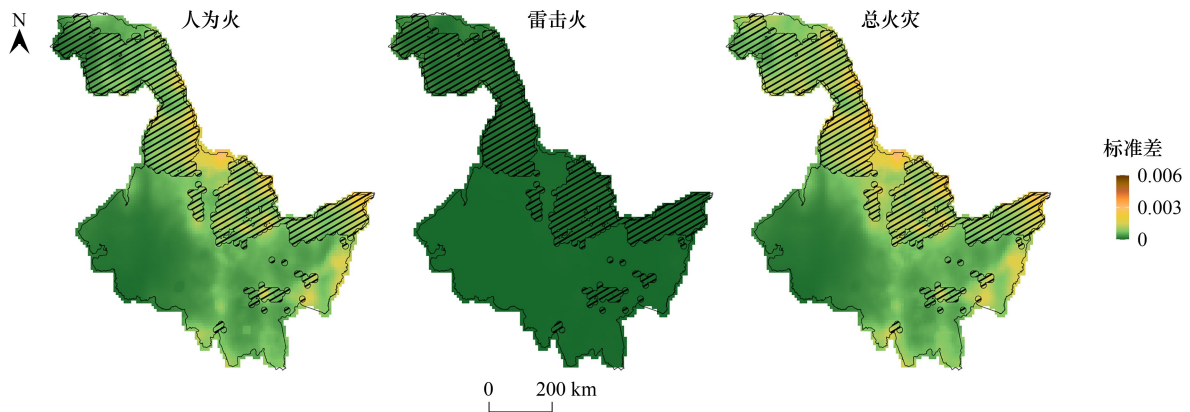


图8 2000—2023 年火灾发生密度标准差时空分布图

Fig.8 Spatial and temporal distribution of standard deviation of fire occurrence density from 2000 to 2023

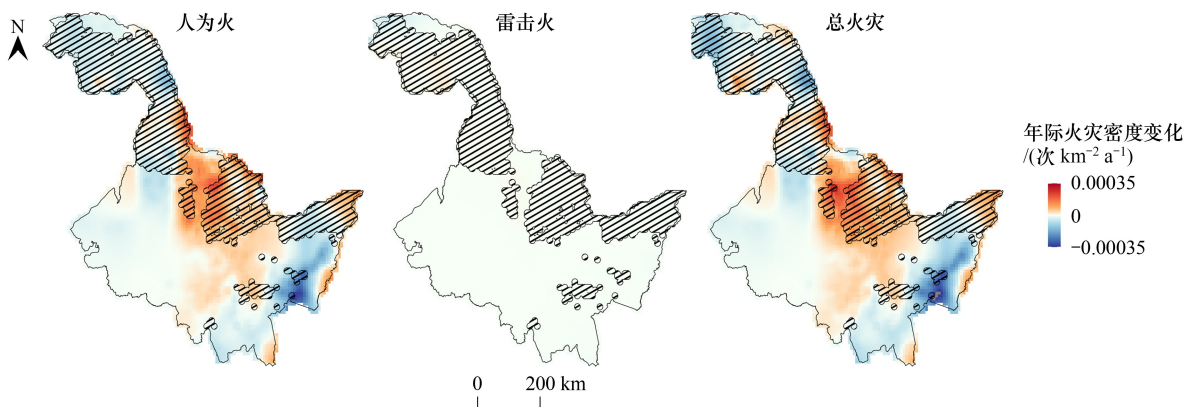


图9 2000—2023 年火灾发生密度的变化趋势

Fig.9 Spatial and temporal distribution of change in fire occurrence density from 2000 to 2023

些以农田和沼泽地为主的地区,林火发生密度较低。在大兴安岭地区,人为火和雷击火的发生密度相近,其中雷击火主要集中在大兴安岭西北部的半干旱区^[33],在气候变化呈现“暖干化”特征的背景下,雷击火的发生

频率相对较高。总体来看,黑龙江省的林火分布具有明显的空间异质性,林火的发生由西北向东南方向延伸。交界域的分布集中在中部、东南部以及西北部分地区,与人为火的发生区域基本重合。

气候、植被和地形因子对人为火和雷击火发生均有重要影响。研究表明,气温、降水和湿度与森林火灾的发生显著相关^[34]。本研究通过 AIC 标准选择出最优模型,模型参数显示年均温、年均降水和干旱指数对林火的发生有重要作用,其中干旱指数综合考虑了温度、降水等要素,气候越干旱雷击火发生的概率越大。一般来说,温度是影响林火的最重要因素,与林火发生呈正相关^[35],而本研究结果表明气温和降水对人为火的发生均呈现负相关,这可能是因为较高的温度会增强植被的蒸腾作用,导致土壤和植被的干燥程度增加^[36],而降水量的增加则会在一定程度上抵消升温带来的负面影响。

此外,植被类型也影响着火灾的发生。从模型模拟结果来看,落叶阔叶林和混交林比其它类型的森林更易发生火灾。落叶阔叶林在黑龙江省森林类型中占比最大、分布最广^[19],而混交林通常分布在人类活动频繁的地区,存在大量的枯枝落叶等可燃物。本研究表明,人为火和雷击火的发生均受地形因子的影响,通常在坡度较小、海拔较低的区域,林火更容易发生^[6,22]。在高程为 0—600 m 的范围内人为火的发生概率大于其他区域,这与吴志伟等人^[29]对大兴安岭人为火的研究结果一致,同时坡度和坡向也显著影响人为火的发生。而地形因子对雷击火发生的驱动作用与人为火不同,进一步说明了结合气候因素进行综合分析的重要性。已有研究结果指出,距离道路的距离是发生人为火的重要驱动因子^[27],但本研究的结果表明,火点距离道路 100—200 m 的范围内人为火和雷击火的发生概率均低于其他区域,这可能是由于在人类活动频繁的区域,火灾能够及时发现和扑灭,从而降低火灾发生的概率。火灾的发生是一个复杂的过程,不仅需要单独考虑每个因素的影响,还要关注不同因子之间的相互作用和综合效应,从而制定更为有效的火灾管理和预防策略^[37]。

本研究所识别出的黑龙江省火灾高发区域处于森林的主要分布地区,火灾高发区域中交界域区域的占比为 27.5%,大部分的火灾高发区域处于非交界域区域。在黑龙江省东部地区,人口密度相对较大且分布着混交林,是构成交界域的主要区域,而非交界域区域(例如大兴安岭的大部分区域)内森林的分布更为密集广泛,因此交界域内的火灾高发的可能性低于非交界域。

从火灾发生密度分布图可见,黑龙江省人为火的发生密度要远高于雷击火,在交界域内人为火的发生密度呈现出明显的增加趋势和空间波动。这是因为交界域内可燃物的负荷量高、含水率低且连续分布,致使火灾不断向城镇蔓延^[38]。交界域内火行为具有特殊性,近年来城市化进程加快,交界域的范围不断扩展,受人类活动和房屋建筑分布的影响,林火发生后可能会迅速蔓延并加大扑救难度。这不仅造成森林资源的严重损失,更会威胁人类生命和财产安全。

4 结论

本研究综合考虑了气候、地形、人为、植被四大类因子对火灾发生的影响,分析了黑龙江省交界域内人为火、雷击火的空间格局。研究结果表明,黑龙江省交界域的平均林火发生密度 $0.0028 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$,其中人为火发生密度在黑龙江省东部和西北部的年际变化较大,而雷击火的时空动态变化相对较小。2020 年黑龙江省交界域面积约为 2.5 万 km^2 ,占全省总面积的 5.5%,主要分布在黑龙江省中部、东南部以及西北部分。通过泊松模型计算得到火灾发生密度分布图,将火灾发生密度大于 $0.0034 \text{ 次 km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 的区域识别为火灾高发区域,结果显示火灾高发区域主要集中在黑龙江省的北部和东北部,大部分的火灾高发区域处于非交界域区域。本研究识别出黑龙江省火灾高发区域的时空动态,能够有效地评估交界域火灾发生风险,为制定交界域火灾预防和措施提供参考。但研究仍存在一定的局限性,由于火灾数据和自变量数据获取的限制,本研究仅使用了 1980—2009 年的森林火灾数据,除气候因子外,其他数据均采用 2000—2023 年的数据均值进行火灾的时空分布制图,未来研究需结合更精准的数据开展动态研究,以提高交界域火灾发生密度的准确性。

参考文献 (References):

- [1] Guo F T, Su Z W, Wang G Y, Sun L, Tigabu M, Yang X J, Hu H Q. Understanding fire drivers and relative impacts in different Chinese forest

- ecosystems. *Science of the Total Environment*, 2017, 605: 411-425.
- [2] 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.
- [3] 杜建华, 宫殷婷, 蒋丽伟. 中国森林火灾发生特征及其与主要气候因子的关系研究. *林业资源管理*, 2019, 2: 7-14.
- [4] Hu T Y, Zhou G S. Drivers of lightning- and human-caused fire regimes in the great Xing'an Mountains. *Forest Ecology and Management*, 2014, 329: 49-58.
- [5] USDA, USDI. Urban wildland interface communities within the vicinity of Federal lands that are at high risk from wildfire. *Federal Register*, 2001, 66: 751-777.
- [6] Flatley W T, Lafon C W, Grissino-Mayer H D. Climatic and topographic controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian Mountains, USA. *Landscape Ecology*, 2011, 26(2): 195-209.
- [7] Sturtevant B R, Cleland D T. Human and biophysical factors influencing modern fire disturbance in northern Wisconsin. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(4): 398.
- [8] Syphard A D, Radeloff V C, Keuler N S, Taylor R S, Hawbaker T J, Stewart S I, Clayton M K. Predicting spatial patterns of fire on a southern California landscape. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, 17(5): 602.
- [9] Rollins M G, Morgan P, Swetnam T. Landscape-scale controls over 20th century fire occurrence in two large Rocky Mountain (USA) wilderness areas. *Landscape Ecology*, 2002, 17(6): 539-557.
- [10] Su Z W, Tigabu M, Cao Q Q, Wang G Y, Hu H Q, Guo F T. Comparative analysis of spatial variation in forest fire drivers between boreal and subtropical ecosystems in China. *Forest Ecology and Management*, 2019, 454: 117669.
- [11] Lentile L B, Smith F W, Shepperd W D. Influence of topography and forest structure on patterns of mixed severity fire in ponderosa pine forests of the South Dakota Black Hills, USA. *International Journal of Wildland Fire*, 2006, 15(4): 557.
- [12] Oliveras I, Gracia M, Moré G, Retana J. Factors influencing the pattern of fire severities in a large wildfire under extreme meteorological conditions in the Mediterranean basin. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(7): 755-764.
- [13] Pereira M G, Trigo R M, da Camara C C, Pereira J M C, Leite S M. Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129(1/2): 11-25.
- [14] Gong D P, Sun L, Hu T X. Characterizing the occurrence of wildland-urban interface fires and their important factors in China. *Ecological Indicators*, 2024, 165: 112179.
- [15] Loudermilk E L, O'Brien J J, Goodrick S L, Linn R R, Skowronski N S, Hiers J K. Vegetation's influence on fire behavior goes beyond just being fuel. *Fire Ecology*, 2022, 18(1): 9.
- [16] Schoennagel T, Balch J K, Brenkert-Smith H, Dennison P E, Harvey B J, Krawchuk M A, Miettinen N, Morgan P, Moritz M A, Rasker R, Turner M G, Whitlock C. Adapt to more wildfire in western North American forests as climate changes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(18): 4582-4590.
- [17] Lampin-Maillet C, Jappiot M, Long M, Bouillon C, Morge D, Ferrier J P. Mapping wildland-urban interfaces at large scales integrating housing density and vegetation aggregation for fire prevention in the South of France. *Journal of Environmental Management*, 2010, 91(3): 732-741.
- [18] Syphard A D, Brennan T J, Keeley J E. The role of defensible space for residential structure protection during wildfires. *International Journal of Wildland Fire*, 2014, 23(8): 1165.
- [19] 袁玉娟, 尹文鹤, 戴尔阜, 刘荣高, 吴绍洪. 基于阈值分割的黑龙江省森林类型遥感识别. *地理科学进展*, 2016, 35(5): 655-663.
- [20] Chang Y, Zhu Z L, Bu R C, Chen H W, Li Y H, Hu Y M, Wang Z C. Predicting fire occurrence patterns with logistic regression in Heilongjiang Province, China. *Landscape Ecology*, 2013, 28(10): 1989-2004.
- [21] 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.
- [22] 魏书精, 罗斯生, 罗碧珍, 李小川, 王振师, 吴泽鹏, 周宇飞, 钟映霞, 李强. 气候变化背景下森林火灾发生规律研究. *林业与环境科学*, 2020, 36(2): 133-143.
- [23] Parvar Z, Saeidi S, Mirkarimi S. Integrating meteorological and geospatial data for forest fire risk assessment. *Journal of Environmental Management*, 2024, 358: 120925.
- [24] Calviño-Cancela M, Chas-Amil M L, García-Martínez E D, Touza J. Interacting effects of topography, vegetation, human activities and wildland-urban interfaces on wildfire ignition risk. *Forest Ecology and Management*, 2017, 397: 10-17.
- [25] 刘倩, 覃先林, 李晓彤, 侯亚男. 基于点模式法的四川省林火时空分布特征研究. *四川林业科技*, 2019, 40(6): 6-12, 18.
- [26] 马志波, 肖文发, 黄清麟, 庄崇洋. 生态学中的点格局研究概况及其在国内的应用. *生态学报*, 2017, 37(19): 6624-6632.
- [27] Illian J, Penttinen A, Stoyan H, Stoyan D. Statistical analysis and modelling of spatial point patterns. England: John Wiley & Sons, 2008: 214-215.
- [28] Wiegand T, Moloney K A. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 2004, 104(2): 209-229.
- [29] 李顺, 吴志伟, 梁宇, 贺红土. 大兴安岭人为火发生影响因素及气候变化下的趋势. *应用生态学报*, 2017, 28(1): 210-218.
- [30] 郭福涛, 胡海清, 马志海. 应用空间点模式方法研究大兴安岭雷击火空间分布格局. *生态学报*, 2009, 29(12): 6741-6747.
- [31] Guo F T, Hu H Q, Sun L, Ma Z H. Spatial patterns of lightning-ignited forest fires in Daxing'an Mountains, Heilongjiang Province, China, 1973-1997. *Advanced Materials Research*, 2011, 183/184/185: 2268-2274.
- [32] Baddeley A, Turner R. spatstat: An R Package for Analyzing Spatial Point Patterns. *Journal of Statistical Software*, 2005, 12(6): 1-42.
- [33] 张宇, 余振, 栾军伟, 王一, 叶晓丹, 刘世荣. 1982—2020 年东北森林带植被绿度时空变化特征. *生态学报*, 2023, 43(16): 6670-6681.
- [34] 郭福涛, 苏漳文, 马祥庆, 宋禹辉, 孙龙, 胡海清, 杨婷婷. 大兴安岭塔河地区雷击火发生驱动因子综合分析. *生态学报*, 2015, 35(19): 6439-6448.
- [35] Flannigan M D, Krawchuk M A, de Groot W J, Wotton B M, Gowman L M. Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 2009, 18(5): 483.
- [36] Keeley J E, Syphard A D. Climate change and future fire regimes: examples from California. *Geosciences*, 2016, 6(3): 37.
- [37] Moritz M A, Parisien M A, Battlori E, Krawchuk M A, Van Dorn J, Ganz D J, Hayhoe K. Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 2012, 3(6): 1-22.
- [38] 王秋华, 王劲, 李晓娜, 马诚, 洪瑞成, 曹恒茂, 高仲亮. 森林-城镇交界域火灾研究进展. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(5): 1-10.