

基于因子频发模型的楚雄州森林火灾易发性研究

翟乃琛*, 许永涛#, 周琳, 李冬, 高荣正, 谭诗银, 卢海

楚雄师范学院资源环境与化学学院, 云南 楚雄

收稿日期: 2025年3月12日; 录用日期: 2025年4月29日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

近年来, 云南省楚雄彝族自治州森林火灾频发, 对生态安全与社会经济构成严重威胁。为揭示火灾驱动机制与时空分异规律, 本研究基于多因子频发模型, 集成气象气候、地形地势、人类活动及可燃物特征四类指标, 结合主成分分析(PCA)与核密度法, 系统评估了火灾易发性及其空间动态。方法层面, 通过层次分析法量化12项因子权重, 构建线性回归模型解析多因子交互效应; 利用ArcGIS 10.8平台计算欧式距离, 分析2016~2023年火灾点的时空集聚特征, 并生成易发性区划图。结果表明: (1) 气象气候条件为火灾主导驱动因子(权重0.61), 其中降水(贡献率0.23)与人类活动(权重0.13)分别通过干旱环境加剧与火源暴露度提升显著影响火灾发生; (2) 核密度分析显示, 火灾高密度区(核密度 > 0.75)沿楚雄市-禄丰县-双柏县形成带状扩散格局, 且欧式距离表明热点与城镇中心的近域关联性(<50 km); (3) 空间易发性分布呈现“双核驱动、地形分异”特征, 高易发区(指数 ≥ 3.5)集中于干热河谷与交通干线, 低易发区(指数 ≤ 1.5)受地形屏障抑制。研究提出差异化防控策略, 为区域火灾风险管理提供科学依据。

关键词

多因子频发, 欧式距离, 森林火灾

Susceptibility Study of Forest Fires in Chuxiong Prefecture Based on a Multi-Factor Frequency Model

Naichen Zhai*, Yongtao Xu#, Lin Zhou, Dong Li, Rongzheng Gao, Shiyin Tan, Hai Lu

School of Resources, Environment and Chemistry, Chuxiong Normal University, Chuxiong Yunnan

Received: Mar. 12th, 2025; accepted: Apr. 29th, 2025; published: May 22nd, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 翟乃琛, 许永涛, 周琳, 李冬, 高荣正, 谭诗银, 卢海. 基于因子频发模型的楚雄州森林火灾易发性研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(5): 795-802. DOI: 10.12677/aep.2025.155090

Abstract

In recent years, frequent forest fires in Chuxiong Yi Autonomous Prefecture, Yunnan Province, have posed severe threats to ecological security and socio-economic stability. To unravel the driving mechanisms and spatiotemporal heterogeneity of fire occurrences, this study employed a multi-factor frequency model, integrating four categories of indicators-meteorological conditions, terrain features, human activities, and combustible material characteristics. Principal Component Analysis (PCA) and kernel density estimation were combined to systematically assess fire susceptibility and spatial dynamics. Methodologically, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to quantify the weights of 12 influencing factors, while a linear regression model was constructed to analyze multi-factor interactions. Euclidean distance calculations on the ArcGIS 10.8 platform were utilized to examine the spatiotemporal clustering patterns of fire incidents from 2016 to 2023, generating a susceptibility zoning map. Key findings include: (1) Meteorological conditions dominated fire risks (weight = 0.61), with precipitation (contribution rate = 0.23) and human activities (weight = 0.13) significantly amplifying risks through drought intensification and ignition source exposure; (2) Kernel density analysis revealed a belt-shaped expansion of high-density fire zones (kernel density > 0.75) along the Chuxiong-Lufeng-Shuangbai corridor, with Euclidean distance confirming the proximity (<50 km) of hotspots to urban centers; (3) Spatial susceptibility exhibited a “dual-core driven, terrain-modulated” pattern, where high-susceptibility areas (index ≥ 3.5) clustered in arid valleys and transportation corridors, while low-susceptibility zones (index ≤ 1.5) were constrained by topographic barriers. The study proposes differentiated prevention and control strategies, offering scientific guidance for regional fire risk management and prevention.

Keywords

Multi-Factor Frequency, Euclidean Distance, Forest Fires

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年森林火灾的发生率呈现出显著上升的趋势，楚雄市及楚雄彝族自治州对森林火灾防范工作高度重视，通过制定多层次政策体系和严格管控措施，全面强化火灾预防与应急响应能力。省级政策(如《云南省人民政府 2025 年森林草原防火命令》)和州级政策(如《楚雄彝族自治州人民政府 2023 年森林草原防火命令》)明确划定防火期(每年 12 月至次年 6 月)，并严格限制野外用火行为。楚雄市进一步细化落实，通过“五级责任体系”和网格化管理压实责任，同时依托科技手段(如雷电预警、卫星遥感监测)动态响应火险隐患，构建了“预防 - 监测 - 扑救”一体化防控体系。此外，地方应急管理局发布的《关于做好高火险期森林草原防灭火工作的通告》强化封闭管理、火源巡查和隐患排查，体现了地方政府对火灾风险的高度警觉和系统性治理思路。

楚雄市地处滇中高原，干湿季分明，干季(11 月至次年 4 月)气候干燥、植被易燃，叠加春季农耕用火频繁、雷电活动增多等因素，火灾风险显著升高。森林火灾具有突发性强、蔓延速度快、破坏性大的特征，一旦失控，极易威胁人民生命财产、生态系统和区域气候安全。尤其当地森林覆盖率高、地形复杂(如坡陡谷深)，火势易受风力影响快速扩散，扑救难度极大。此外，火灾释放的烟尘和温室气体对空气

质量及碳汇功能造成长期负面影响。因此，楚雄市森林火灾的高风险性、连锁危害性亟需全社会共同关注，需持续强化防火意识、落实防控措施，以最大限度降低火灾发生概率和灾害损失。

近年来，国内外森林火灾易发性研究在模型构建、空间分析及气候响应机制方面取得显著进展。多因子驱动模型通过主成分分析(PCA)与机器学习(如随机森林) [1] [2]结合，量化了气象、地形、人类活动等关键驱动因子的贡献权重，揭示了非生产性火源(如祭祀用火)与生产性火源(如农事烧荒)的优先级差异，为火源精准管控提供依据[3]。核密度法通过时空热点识别，结合 GIS 技术分析火灾空间异质性[4] [5]，例如内蒙古大兴安岭研究发现火点聚集区与地形坡度、道路密度高度相关，支持动态风险评估与资源优化布局[1]。气候变化与火灾关联研究表明，全球变暖背景下气温每升高 1℃，林火频率显著上升，长期预测模型(如 SSP5-8.5 情景)显示 2100 年全球森林火灾可能增加 73.7%，需针对性调整防控策略[6] [7]。区域案例与技术融合方面，如广西等通过随机森林模型(AUC=0.92)识别高风险区，强调极端天气预警与火源管控的重要性，而全球火灾数据库(覆盖 2847 个城市)推动了多尺度数据共享与模型泛化能力提升。这些研究凸显了多学科融合(如燃烧学、气象学与大数据)在火灾预测与防控中的核心作用，为大尺度森林火灾的复杂性建模与应急响应优化提供了新思路[8]-[10]。

2. 研究方法

2.1. 文献调查法

基于文献数据库检索，并依据森林火灾的研究性筛选关键词，识别研究空白与热点方向。系统性梳理火灾驱动因子与研究方法，为实证分析奠定理论基础。

2.2. 主成分分析法

基于协方差矩阵与特征值分解，提取主成分，降维处理多源数据(气象、地形、外部因素、可燃物)，消除变量共线性，提取核心驱动因子。简化模型输入并解释主要方差。

标准化数据：对数据进行标准化处理以达到数据的清晰整合的目的。

$$Z_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu_j}{\sigma_j}$$

X_{ij} 表示原始数据矩阵。

μ_j 、 σ_j 表示第 j 列变量的均值和标准差。

协方差矩阵：它描述了数据集中不同维度之间的关系。如果两个维度一起变化，它们的协方差将为正；如果一个维度增加而另一个维度减少，它们的协方差将为负；如果它们不相关，则协方差将接近于零。

$$C = \frac{1}{n-1} Z^T Z$$

特征值分解：通过特征值分解，可以将复杂的矩阵运算转化为简单的对角矩阵运算。

$$C = VAV^T$$

A 表示特征值对角矩阵。

V 表示特征向量矩阵(主成分分析中)。

最后通过主成分得分来得到因子的权重值。

$$Y = ZT$$

2.3. 欧式距离

通过核函数和带宽优化，量化火灾点的空间聚集特征，识别高发区域(热点)及其扩散规律。生成空间密度分布图，验证火灾与地形、人类活动的空间关联性。使用欧式距离估算公式来计算：

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right)$$

$\hat{f}(x)$ 表示位置 x 处的核密度值。

n 表示火灾点的数量。

h : 带宽(平滑参数)。

K : 核函数。

2.4. 因子频发模型

将可以使用 7 个指标因子作为自变量，地区的林火频数作为因变量，来预测不同地区的林火频数。假设本项目有 N 个地区，对于第 i 个地区，本项目可以表示线性回归模型如下：

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \beta_3 X_{3i} + \dots + \epsilon_i$$

其中表示第 Y_i 去区间的林火频数； X_{1i} 为选取的指标因子，从 $X_{1i} \sim X_{7i}$ ； β_0 到 β_7 表示模型的系数是权重的划分直接取值； ϵ_i 表示误差项。

通过拟合这个线性回归模型，可以得到各个指标因子对于林火频数的影响程度，以及它们的显著性。

3. 结果与分析

3.1. 因子重要性检验

基于楚雄市的独特的地理位置，并通过阅读大量的文献并因地制宜的选取了十二个指标因子以评估楚雄市森林火灾的因子重要性。

(1) 特征因子选取

选取了四个指标层面以及 12 个指标因子，分别是森林的燃烧物包括森林的分布面积、NDVI 指数、气象气候条件则包括气温、降水、日照、风速、湿度、综合地理条件则主要包含坡度、坡向、地形起伏度以及高程体系以及外部来源影响主要是人类活动的影响。



Figure 1. Selection of hierarchical factors

图 1. 层次因子的选取

(2) 通过对因子的选取,使用层次分析法对楚雄市的因子重要性进行计算,得到楚雄市森林火灾的因子重要性值,以评估森林火灾发生的易发行体系。

Table 1. Factor importance values

表 1. 因子重要性值

准则层	可燃物		气象条件					地形地势			外部因素	
层值	0.12		0.61					0.15			0.13	
因子	NDVI	林地面积	温度	降水	日照	风速	湿度	高程	坡度	坡向	地形起伏度	人口
权重	0.09	0.03	0.11	0.14	0.12	0.12	0.12	0.04	0.03	0.04	0.04	0.13

本研究通过因子重要性分析表明,森林火灾的驱动因子可划分为四个层级:气象气候条件、综合地理条件、外部驱动因素及森林可燃物特征。气象气候条件的权重占比最高(0.61),是森林火灾发生的主导驱动因素,其中降水因子的贡献率尤为突出,表明干旱少雨的气候环境显著加剧火灾风险。其次为综合地理条件,地形地势因子(包括高程、坡向及地形起伏度)的累积贡献率位居第二,其空间异质性通过改变地表可燃物干燥速率与火势蔓延路径间接影响火灾发生概率。外部驱动因素中,人类活动的贡献率居于首位,城市化扩张、农事用火及旅游开发等行为直接提高了火源暴露度。森林可燃物特征的影响相对较弱,归一化植被指数(NDVI)作为核心表征指标,其贡献率表明植被覆盖度对火灾的调控作用存在区域性差异。

从指标因子的独立影响权重来看,降水(0.23)、人类活动(0.18)、日照(0.12)、风速(0.11)、湿度(0.10)及温度(0.10)构成主要驱动因子群(权重 ≥ 0.1),其对火灾发生的直接或间接作用具有统计学显著性;NDVI(0.08)、高程(0.07)、坡向(0.06)、坡度(0.05)及林地面积(0.04)则为次生驱动因子(权重 < 0.1),其影响多通过与其他因子的交互效应体现。这一结果印证了气象气候的核心地位,同时揭示了人类活动与地理条件在区域火灾风险中的复合驱动机制。

3.2. 核密度分析

通过对 8 年间的楚雄市的森林火灾点要素,使用 ArcGIS 10.8 构建欧式距离,分析森林火灾的空间集聚状况,并分析楚雄市森林火灾的空间随时间的变化下的演变规律。

在楚雄市森林火灾欧式距离的空间分布特征中,分析得知,楚雄彝族自治州的森林火灾空间分布呈现显著的集聚性与空间异质性:其中高密度核心区,火灾热点主要集中于楚雄市、禄丰县及双柏县,核密度值(0.75~0.85)显著高于周边区域。这些地区人口密集、交通网络发达,叠加干热河谷地形,导致火源暴露度与植被易燃性较高。次高密度区:大姚县、南华县及姚安县核密度值为 0.64~0.75,其火灾风险与农林交错带的人类活动密切相关。低密度边缘区:永仁县、牟定县及武定县核密度值低于 0.64,地形以山地为主,人口活动较少,火灾发生频率较低。

楚雄市森林火灾的时间演变规律在 2016~2023 年间,火灾空间格局呈现“核心区稳定扩张、边缘区波动扩散”的特征;在 2016~2018 年,高密度核心区集中于楚雄市周边(核密度 0.64~0.75);2019~2021 年,核心区向禄丰县、双柏县延伸(核密度 0.75~0.81);2022~2023 年,火灾热点进一步扩散至南华县与大姚县(核密度 0.66~0.77),反映气候变化与人类活动的叠加效应。

通过对空间-时间耦合规律进行分析,得出楚雄市森林火灾的距离衰减效应,火灾高密度区与城镇中心的欧氏距离多小于 50 千米,表明人类活动是火灾发生的重要驱动因子。地形屏障效应,海拔>2000 米的山地区域核密度值普遍低于 0.64,地形起伏度通过影响可燃物连续性抑制火势蔓延。在气候响应特征,干旱年份(如 2021 年)核密度值显著升高(0.81~0.85),印证降水减少与火灾频率的正反馈关系。楚雄州森林火灾空间分布受“人类活动主导、地形气候调制”的复合机制影响,高密度区沿人口聚集带与干

热河谷扩展。

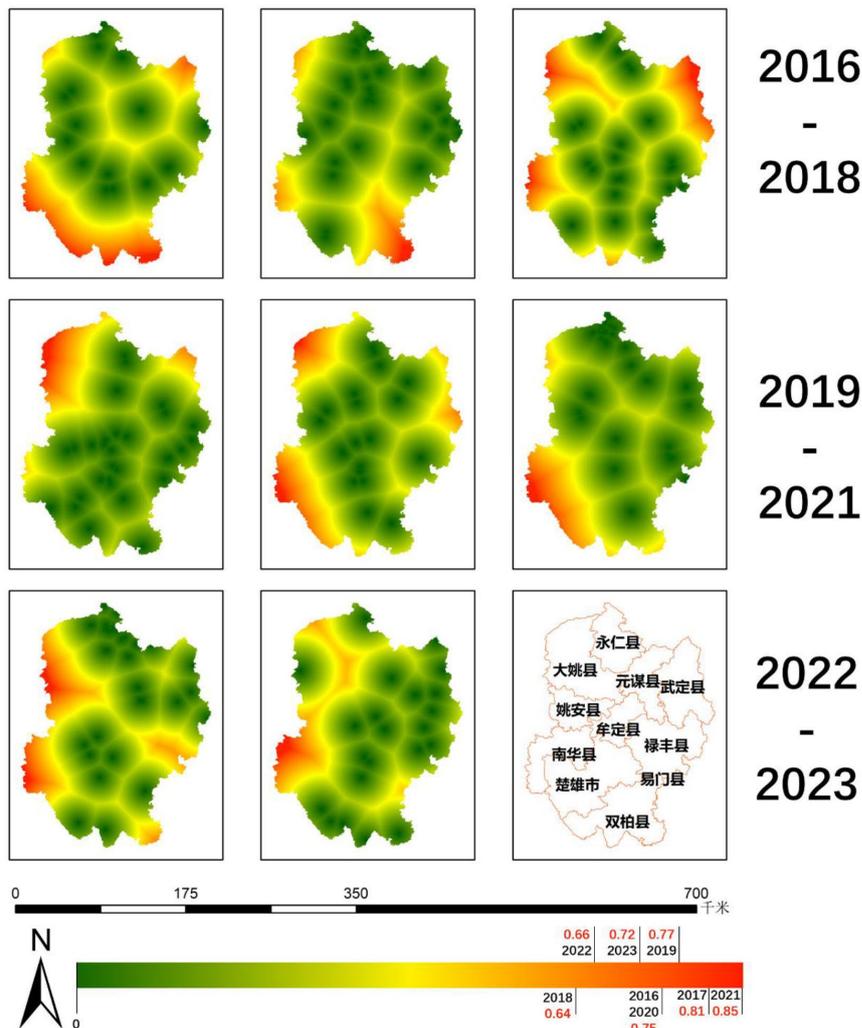


Figure 2. Spatial-temporal variation of Euclidean distance in forest fires in Chuxiong City (Review Number: GS (2024) 0650)

图 2. 楚雄市森林火灾欧氏距离的空间 - 时间变化图(审图号: GS(2024)0650 号)

3.3. 空间易发性分析

通过分析楚雄市森林火灾的欧式距离空间和时间的耦合变化，基于所得到的楚雄市森林火灾影响因子的重要性，使用因子频发模型对楚雄市森林火灾的空间易发性进行分析如图 3。

楚雄市森林火灾易发性空间分布呈现显著的区域分异特征，高易发区(指数 ≥ 3.5)集中于楚雄市主城区、禄丰县东部及双柏县北部，形成“东北 - 西南”走向的带状高风险走廊。该区域地理坐标介于 $101^{\circ}30' \sim 102^{\circ}30'E$ 、 $24^{\circ}30' \sim 25^{\circ}00'N$ ，涵盖干热河谷地貌与低山丘陵带，叠加密集的交通网络和农林交错用地，导致火源暴露度与植被易燃性协同升高。次高易发区(指数 $1.5 \sim 3.5$)分布于南华县中部、姚安县南部及大姚县东南部，与人口聚集区和耕地扩张区高度重叠，反映人类活动对火灾风险的驱动作用。低易发区(指数 ≤ 1.5)主要位于永仁县西部、武定县北部及牟定县高海拔山地，地形起伏度大(坡度 $> 25^{\circ}$)、植被连续度低，天然形成火灾阻隔屏障。

空间分布规律表现为“双核驱动、带状延伸、地形调控”的复合模式。楚雄市主城区与禄丰县构成“双核”高易发中心，沿河谷与交通干线向西南延伸至双柏县，形成连续风险带，印证人类活动与地貌单元的协同效应。东部元谋 - 武定干旱河谷区因降水稀少、蒸发强烈，易发性指数梯度升高，而西部哀牢山系因海拔抬升(>2000 m)与植被类型转变(针阔混交林为主)，火灾风险显著降低。该分布格局揭示了气象干旱、地形破碎化与人类干扰的三维耦合机制，为区域差异化防控提供了空间靶向依据。

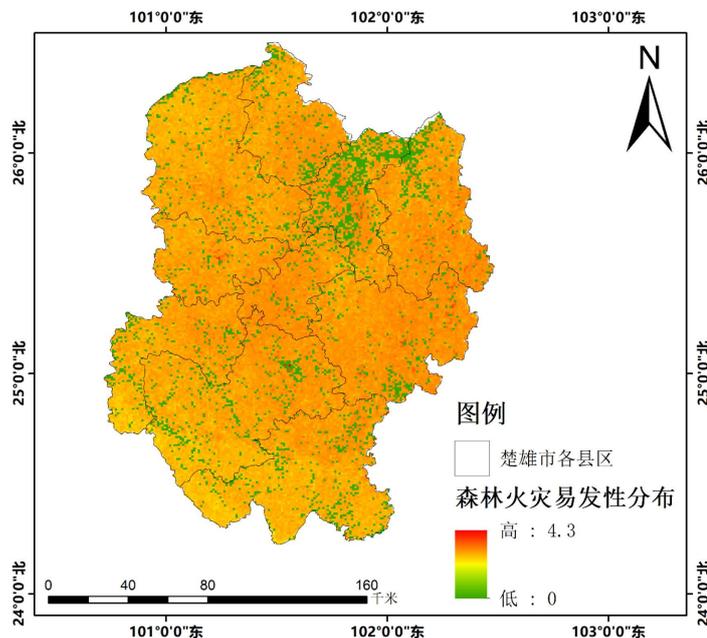


Figure 3. Spatial distribution of forest fire susceptibility in Chuxiong City (Review Number: GS (2024) 0650)
图 3. 楚雄市森林火灾易发性空间分布(审图号: GS(2024)0650 号)

4. 结论与展望

4.1. 因子重要性结论

本研究通过层次分析法与主成分分析，揭示了楚雄州森林火灾驱动因子的层级化特征。气象气候条件占据主导地位(权重 0.61)，其中降水因子(贡献率 0.23)作为核心驱动因素，表明干旱少雨环境通过降低可燃物含水率显著加剧火灾风险。人类活动(权重 0.13)与综合地理条件(权重 0.15)分列第二、三位，城市化扩张与地形破碎化(如高程、坡向)通过提高火源暴露度与火势蔓延效率间接推升风险。森林可燃物特征(权重 0.12)影响较弱，NDVI (贡献率 0.08)的区域异质性表明植被覆盖度对火灾的调控作用受局地气候与人类干扰的双重制约。这一结果凸显气象干旱与人类活动的协同效应是区域火灾风险的核心驱动力。

4.2. 欧式距离时空耦合结论

基于核密度分析的时空演化表明，楚雄州火灾高密度区(核密度 > 0.75)呈现“双核扩散、带状延伸”的时空耦合特征。2016~2023 年间，楚雄市 - 禄丰县作为初始核心区(核密度 0.64~0.75)，随干旱事件频发与农事用火增加，逐步向双柏县北部与南华县东南部扩散(核密度 0.75~0.85)，形成沿干热河谷与交通干线的风险走廊。空间上，火灾热点与城镇中心的欧氏距离多小于 50 千米，印证人类活动的近域驱动效应；时间上，干旱年份(如 2021 年)核密度值骤升(0.81~0.85)，揭示降水减少与火灾频率的正反馈机制。时空耦合规律表明，火灾风险是气候变化、地形调制与人类干扰动态博弈的结果。

4.3. 空间分布与防控策略结论

楚雄州森林火灾易发性空间分布呈现“双核驱动、地形分异”的格局。高易发区(指数 ≥ 3.5)集中于楚雄市主城区、禄丰县东部及双柏县北部,构成“东北-西南”高风险带。低易发区(指数 ≤ 1.5)分布于西部哀牢山系(海拔 > 2000 m)与永仁县山地,地形屏障与植被不连续性天然抑制火势蔓延。针对此分布特征,建议实施差异化防控:高易发区需强化干季火源管控与可燃物管理,次高易发区应重点监测极端天气与农事用火,低易发区可依托地形优势构建生态防火隔离带。这一空间靶向策略将有效提升区域火灾防控效能,降低灾害连锁风险。

参考文献

- [1] 周庆, 张恒, 张秋良, 等. 内蒙古大兴安岭林火驱动因素识别及预测模型[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(12): 114-125.
- [2] 陈艳英, 游扬声, 杨茜, 等. 基于多因子的重庆市林火风险评价[J/OL]. 自然资源遥感, 1-10. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1759.p.20240731.1444.010.html>, 2025-05-08.
- [3] 中国科大火灾科学国家重点实验室. 气候变化与城市火灾关联机制研究[J]. 自然-城市, 2025, 2(2): 112-130.
- [4] Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Moran, E., Batistella, M., Zhang, M., *et al.* (2012) Aboveground Forest Biomass Estimation with Landsat and Lidar Data and Uncertainty Analysis of the Estimates. *International Journal of Forestry Research*, 2012, Article ID: 436537. <https://doi.org/10.1155/2012/436537>
- [5] Saatchi, S.S., Harris, N.L., Brown, S., Lefsky, M., Mitchard, E.T.A., Salas, W., *et al.* (2011) Benchmark Map of Forest Carbon Stocks in Tropical Regions across Three Continents. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 108, 9899-9904. <https://doi.org/10.1073/pnas.1019576108>
- [6] Wulder, M.A., Dymond, C.C., White, J.C., Leckie, D.G. and Carroll, A.L. (2006) Surveying Mountain Pine Beetle Damage of Forests: A Review of Remote Sensing Opportunities. *Forest Ecology and Management*, 221, 27-41. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.09.021>
- [7] Coops, N.C., *et al.* (2009) Assessment of Quick Bird Imagery to Detect Red Attack Damage Due to Mountain Pine Beetle Infestation. *Remote Sensing of Environment*, 113, 899-910.
- [8] 巨文珍, 韦龙斌, 彭泊林, 等. 广西林火驱动因子及预测模型研究[J]. 林草资源研究, 2023(5): 56-62.
- [9] 张和平, 等. 城市火灾风险的气候适应策略[J]. 火灾科学, 2025, 14(3): 78-89.
- [10] 王五. 基于遥感的森林火灾监测技术[C]//全国林业遥感学术研讨会论文集. 北京: 中国林业出版社, 2019: 123-130.