

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2026.03.011 CSTR:32310.14.stbcbx.2026.03.011

闫梦云,彭双云,蔡发鹏,等.寒温带森林火后恢复轨迹及其对气候因子的响应[J].水土保持学报,2026,40(3):243-252.

YAN Mengyun, PENG Shuangyun, CAI Fapeng, et al. Post-fire recovery trajectories of cold-temperate forests and their response to climatic factors [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(3): 243-252.

寒温带森林火后恢复轨迹及其对气候因子的响应

闫梦云^{1,2}, 彭双云^{1,2}, 蔡发鹏¹, 王伟航¹, 崔毕婷¹, 向叶舟¹

(1. 云南师范大学地理学部, 昆明 650500; 2. 西部资源环境地理信息技术教育部工程研究中心, 昆明 650500)

摘要: [目的] 准确评估火后植被恢复轨迹及其驱动机制对理解森林生态系统韧性至关重要, 其中燃烧严重程度如何调节恢复过程对气候变化的敏感性尤为关键。[方法] 基于 Google Earth Engine (GEE) 平台, 利用 2006—2024 年 Landsat 时间序列数据与 LandTrendr 算法, 系统解析了黑龙江嘎拉山林场 2006 年特大火灾后 18 a 的植被恢复过程。[结果] 1) 火后植被恢复整体呈“波动上升”趋势, NBR 年均增长 0.01, 约 10 a 即超越灾前水平, 展现了强大的生态系统韧性。所有燃烧区均在火后第 1 a 恢复至灾前 80% 水平 ($Y2R80=1$), 体现了极快的初期恢复速率。2) 燃烧严重程度显著塑造了恢复路径。高燃烧区虽初期受损最重 ($ARI=-68%$), 但其长期恢复速率最快, 表现出可能依赖先锋物种更新的恢复模式; 而低、中度燃烧区恢复过程则更为平稳。3) 多元线性回归模型证实, 地表温度 (LST) 显著抑制恢复 ($p<0.01$), 而降水 (Pr) 则显著促进恢复 ($p<0.01$)。关键在于气候因子的影响强度受燃烧严重程度的显著调节, 模型对高燃烧区的解释力 ($R^2=34.91%$) 远高于低燃烧区 ($R^2=26.77%$), 且 LST 的负面效应在高燃烧区最为强烈。[结论] 研究结果揭示了重度受损的生态系统对气候变化 (尤其是高温胁迫) 更为敏感, 为寒温带森林火后差异化、气候适应性的生态管理提供了关键的科学依据。

关键词: 森林火灾; 植被恢复; 燃烧严重程度; 生态系统韧性; 归一化燃烧比 (NBR); 气候变化

中图分类号: S718.55; S762.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2026)03-0243-10

Post-Fire Recovery Trajectories of Cold-Temperate Forests and Their Response to Climatic Factors

YAN Mengyun^{1,2}, PENG Shuangyun^{1,2}, CAI Fapeng¹, WANG Weihang¹, CUI Biting¹, XIANG Yezhou¹

(1. Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. The Engineering Research Center of GIS Technology in Western China, Ministry of Education, Kunming 650500, China)

Abstract: [Objective] Accurate assessment of post-fire vegetation recovery trajectories and their driving mechanisms is crucial for understanding forest ecosystem resilience. In particular, how burn severity modulates the sensitivity of recovery processes to climate change is especially critical. [Methods] Based on the Google Earth Engine (GEE) platform, Landsat time-series data from 2006 to 2024 and the LandTrendr algorithm were used to systematically analyze the 18-year vegetation recovery process following the 2006 megafire in the Gala Mountain Forest Farm, Heilongjiang Province. [Results] 1) The overall post-fire vegetation recovery exhibited a "fluctuating upward" trend, with the normalized burn ratio (NBR) increasing by 0.01 per year on average. The pre-fire NBR level was exceeded in approximately 10 years, demonstrating strong ecosystem resilience. All burned areas recovered to 80% of the pre-fire level in the first year after the fire ($Y2R80=1$), reflecting an extremely fast initial recovery rate. 2) Burn severity significantly shaped the recovery trajectories. Although high-severity burned areas suffered the most severe initial damage ($ARI=-68%$), they exhibited the fastest long-term recovery rate, suggesting a recovery pattern potentially reliant on pioneer species regeneration. In contrast,

收稿日期: 2025-11-07 修回日期: 2025-12-09 录用日期: 2025-12-15 网络首发日期 (www.cnki.net): 2026-01-30

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42261073, 42561055, 42471131, 42261037); 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目 (202305AC160083); 云南省环印度洋资源与安全国际联合实验室建设专项 (202303AP140002)

第一作者: 闫梦云 (2002—), 女, 硕士研究生, 主要从事植被遥感研究。E-mail: 2143206000136@ynnu.edu.cn

通信作者: 彭双云 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要从事植被遥感和城市地理信息系统研究。E-mail: pengshuangyun@ynnu.edu.cn

http://stbcbx.alljournal.com.cn

the recovery processes in low- and moderate-severity burned areas were more stable. 3) Multiple linear regression models confirmed that land surface temperature (LST) significantly inhibited recovery ($p < 0.01$), whereas precipitation (Pr) significantly promoted recovery ($p < 0.01$). Critically, the intensity of climatic factor impacts was significantly modulated by burn severity. The model's explanatory power for high-severity burned areas ($R^2 = 34.91\%$) was much higher than that for low-severity burned areas ($R^2 = 26.77\%$), and the negative effect of LST was strongest in high-severity burned areas. [Conclusion] The findings reveal that severely damaged ecosystems are more sensitive to climate change, particularly to high-temperature stress. This study provides a key scientific basis for differentiated and climate-adaptive ecological management of post-fire cold-temperate forests.

Keywords: forest fire; vegetation recovery; burn severity; ecosystem resilience; normalized burn ratio (NBR); climate change

Received: 2025-11-07

Revised: 2025-12-09

Accepted: 2025-12-15

Online(www.cnki.net): 2026-01-30

森林火灾作为全球陆地生态系统中最普遍的自然扰动之一,深刻塑造着森林的结构、物种组成及生物地球化学循环过程^[1-3]。在当前全球变化背景下,火灾频率和强度的增加已成为全球性环境挑战。IPCC第六次评估报告^[4]指出,1997—2016年,全球火灾年均过火面积约为4.64亿 hm^2 ,火灾导致的直接碳排放约占人为化石燃料排放的5%~8%。火灾后的植被恢复不仅是生态系统演替的关键阶段,更直接关系到区域生物多样性、水土保持、碳汇功能等核心生态服务的维持与稳定^[5-6]。在全球气候变化背景下,极端高温和干旱事件频发,导致全球多个地区的火灾频率、强度和规模呈加剧态势,使得准确监测和深入理解火后植被的恢复动态及其驱动机制,成为生态学和全球变化科学的前沿课题^[7-8]。黑龙江省作为我国北方重要的森林生态屏障,其寒温带森林生态系统对火灾扰动尤为敏感,系统研究其火后恢复过程对于保障区域生态安全和指导可持续林业管理具有重要的理论与实践意义。

传统的火后植被恢复监测依赖于地面样地调查,虽能提供精确的物种和结构信息,但受限于人力、财力,难以实现大尺度、长时序的动态监测,尤其无法捕捉恢复过程的空间异质性^[9]。遥感技术的迅猛发展为此提供有效的解决方案。其中,具有长期历史存档和中等空间分辨率的Landsat系列卫星数据,已成为监测森林扰动与恢复的黄金数据源^[10-12]。已有学者^[13-14]基于Landsat影像开发了一系列光谱指数,其中,归一化燃烧比(normalized burn ratio, NBR)及其差值(dNBR)因其对植被含水量和叶绿素变化的敏感性,被广泛证实是评估燃烧严重程度和追踪植被恢复轨迹的最优指标之一。

然而,有效利用长达数十年的Landsat数据档

案,从充满噪声的像素级时间序列中提取清晰的恢复信号,曾是该领域的一大技术瓶颈。近年来,以谷歌地球引擎(GEE)为代表的云计算平台彻底改变此局面^[15]。GEE提供强大的在线计算能力和海量的即用型遥感数据,使研究者能够摆脱数据下载和本地处理的束缚,从而实现从传统的“双时相”比较到“完整时间序列”分析的范式转变。在此平台基础上,LandTrendr等时间序列分割算法应运而生,它从充满噪声的光谱轨迹中提取关键转折点与趋势,精细刻画火灾扰动及其后续恢复过程^[16]。依托这些技术,国内外研究在不同生态区(如北方针叶林、地中海灌丛、澳大利亚桉树林等)系统评估火后恢复,并进一步探讨其驱动机制,普遍认为气候因子是影响恢复速率的关键外部驱动^[17]。SUN等^[18]研究发现,西伯利亚南部boreal森林的火后恢复受到气候变率的显著影响,干旱年份会延缓恢复进程;VIANA-SOTO等^[19]则指出,地中海松林的恢复对火后短期气候条件高度敏感。

然而,现有研究仍存在一些待深入探讨的方面。首先,大多数研究集中于北美、欧洲等地区,针对我国寒温带针阔混交林生态系统的长时序(>15 a)火后恢复研究案例尚不充分。其次,尽管气候因子的重要性已获共识,但燃烧严重程度是否会调节植被恢复对气候变化的响应敏感性,此关键科学问题尚未得到充分的量化回答,即受损程度不同的森林斑块,其恢复过程是否对同样的气候波动(如高温、干旱)表现出不同的脆弱性或适应性?回答这一问题对于制定差异化、精准化的火后生态修复策略至关重要。

因此,本研究以2006年发生火灾的黑龙江嘎拉山林场为典型案例区,旨在:1)利用2006—2024年

的完整 Landsat 时间序列数据,结合 LandTrendr 算法,精细刻画火后 18 a 植被恢复的时空动态图谱;2)基于多种光谱恢复指标,定量评估不同燃烧严重程度下的植被恢复速率与模式差异;3)通过构建多元线性回归模型,揭示地表温度和降水对植被恢复过程的影响,并重点探究该影响如何因燃烧严重程度而异。本研究以期为深入理解我国寒温带森林的火后恢复力及其对气候变化的响应机制提供新的证据,并为区域气候适应性森林管理提供科学支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为黑龙江省黑河市嫩江市的嘎拉山林场(50°53'N,126°10'E),地处小兴安岭向大兴安岭的过渡地带(图 1)。该区属寒温带大陆性季风气候,冬长严寒,夏短温润,年平均气温-1.5℃,年降水量约 500 mm,且集中于夏季。地貌以海拔 300~600 m 的低山丘陵为主,土壤为山地暗棕壤。植被类型为典型的寒温带针阔混交林,优势树种为兴安落叶松、伴生白桦等。独特的“北国”气候与易燃植被组合使之成为火灾高发区。2006 年 5 月 21 日至 6 月 2 日,该林场发生特大雷击火,是近 50 a 来最严重的火灾事件。在异常高温(>32℃)、低湿度(<30%)和强

风(>6 m/s)的极端条件下,火灾迅速蔓延,过火面积达 8 650 hm²,占林场总面积的 31%。

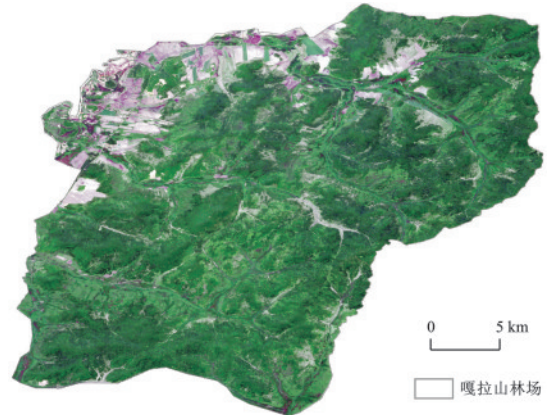


图 1 研究区概况

Fig.1 Overview of study area

1.2 数据来源

本研究所有数据处理与分析均在 GEE 云平台上完成,数据来源见表 1。为保证数据质量和时序一致性,首先对年度生长季(5—9月)内的所有无云 Landsat 影像采用多维中值合成方法,生成一景最能代表该年生长季光谱特征的年度合成影像。随后,将 MODIS LST 和 GPM 降水数据通过双线性插值法重采样至 30 m 分辨率,并统一到 WGS-84 坐标系,以匹配 Landsat 影像。

表 1 数据来源
Table 1 Data sources

数据内容	数据集名称	分辨率	数据来源
植被恢复监测	(2000—2011) LANDSAT/LT05/C02/T1_L2	30 m	https://www.usgs.gov/
	(2013—2024) LANDSAT/LC08/C02/T1_L2		
地表温度	MODIS/061/MOD11A1	1 000 m	https://www.earthdata.nasa.gov/
降水	NASA/GPM_L3/IMERG_V06	0.1°×0.1°	https://disc.gsfc.nasa.gov/
研究区影像图	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED	10 m	https://dataspace.copernicus.eu/
研究区域	嘎拉山林场矢量边界		基于 Google Earth 平台的高分辨率影像目视解译手动绘制

1.3 研究方法

1.3.1 燃烧严重程度评估 采用归一化燃烧比(NBR)及其差值(dNBR)评估燃烧严重程度。计算公式为:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (1)$$

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_t \quad (2)$$

式中:NIR 和 SWIR2 分别为近红外和短波红外 2 波段的地表反射率。本研究选取 2005 年为火灾前(NBR_{pre})基准,2006 年为火灾后(NBR_t)即时状态。

依据 dNBR 值,并参考相关研究^[13,20],将燃烧区划分为 3 个等级:低度燃烧(30≤dNBR<100)、中度燃烧(100≤dNBR≤230)和高度燃烧(dNBR>230)。

1.3.2 时间序列分析与植被恢复趋势 1)采用 LandTrendr 时间序列分割算法对 2005—2024 年的年度 NBR 合成影像时间序列进行处理。该算法通过识别光谱轨迹中的关键转折点,拟合出一系列线性分段,有效去除年际噪声,并提取出森林扰动(如火灾)的年份、幅度及后续恢复的速率和持续时间。算法主要参数设置见表 2。

表 2 LandTrendr 参数设置
Table 2 Parameter settings for LandTrendr algorithm

参数名称	参数值	含义解释
maxSegments	6	将时间序列分割拟合的最大段数
spikeThreshold	0.9	识别和剔除异常值的变化幅度阈值
vertexCountOvershoot	3	控制最初确定顶点超出最大分段数的数量
preventOneYearRecovery	TRUE	避免将单年光谱变化误判为植被恢复
recoveryThreshold	0.25	界定植被恢复速率合理性的阈值
pvalThreshold	0.05	评估模型拟合显著性的阈值
bestModelProportion	0.75	最优模型需在 75% 数据上表现最佳的比例要求
minObservationsNeeded	6	进行有效分析所需的最少观测数

2) 为评估植被恢复的长期趋势, 采用 Mann-Kendall (M-K) 非参数检验与 Theil-Sen 斜率估计相结合的方法^[21], 对经 LandTrendr 去噪后的 2006—2024 年 NBR 时间序列进行逐像元分析, 以同时量化趋势的显著性与速率。

1.3.3 植被恢复定量评价指标 为定量刻画火后植被的恢复过程, 本研究计算了 4 个光谱指标。

1) 绝对恢复指标 (absolute recovery index, ARI)

该指标用于衡量植被恢复的绝对水平, 通过将当前年份的光谱值与火灾前的值进行比较, 直接反映植被状态与原始水平的接近程度, 计算公式为:

$$ARI = \frac{NBR_t - NBR_{pre}}{NBR_{pre}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: NBR_t 为火后某一年份的归一化燃烧比 (NBR) 值。ARI 值越高, 表明植被恢复程度越接近火灾前状态。

2) 相对恢复指标 (relative recovery index, RRI)

该指标通过将恢复过程标准化来评估植被的相对恢复进程。它不仅考虑当前恢复水平, 还考虑火灾造成的最大损害程度, 因此适用于在不同燃烧严重等级的区域间进行比较。计算公式为:

$$RRI = \frac{NBR_t - NBR_{min}}{NBR_{pre} - NBR_{min}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: NBR_{min} 为火灾后观测到的最低 NBR 值, 可通过分析火灾后一段时间内的植被光谱数据得到。RRI 值直观地表示当前恢复量占总损失量的百分比。

3) 恢复到 80% NBR 所需年限 (years to reach 80% of NBR, Y2R80)

Y2R80 是一个衡量恢复速率的时间指标, 定义为火后 NBR 值首次达到或超过火前值 80% 所需的最短年数 (t)。80% 被广泛用作一个生态系统功能基本恢复的阈值^[22]。其判断条件为:

$$NBR_t \geq 0.8 \times NBR_{pre}$$

Y2R80 值越小, 表明植被的恢复速率越快; 反之, 则恢复进程缓慢。

4) 逐年平均光谱变化 (year-to-year spectral change, YrYr)

该指标用于量化恢复过程的年际波动性或稳定性, 通过计算相邻年份 NBR 值变化绝对值的平均值来实现。计算公式为:

$$YrYr = \frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^{T-1} |NBR_{i+1} - NBR_i| \quad (5)$$

式中: T 为研究时序的总年数; NBR_{i+1} 和 NBR_i 分别为相邻 2 a 的 NBR 值。YrYr 值较小, 意味着恢复轨迹平稳; 值较大, 则表明恢复过程存在显著的年度波动, 可能受到气候变率等因素的干扰。

1.3.4 气候因子影响分析 为定量解析关键气候因子对火后植被恢复过程的驱动作用, 本研究构建了多元线性回归模型。考虑到植被恢复是一个受多种因素控制的动态过程, 本研究选取生长季平均归一化燃烧比 (NBR) 作为因变量, 以表征植被在特定年份的生长状态与覆盖度; 选取同年生长季平均地表温度 (LST, °C) 和累计降水量 (Pr, mm) 作为关键的气候自变量。为探究燃烧严重程度的调节作用, 分别对低、中、高 3 个燃烧等级区域进行独立建模。各分层模型采用的形式为:

$$NBR = c + a \times LST + b \times Pr + \epsilon \quad (6)$$

式中: c 为截距; a 和 b 为 LST 和 Pr 的回归系数, 其正负和大小直接反映气候因子影响的方向和强度; ϵ 为误差项。

本研究主要关注恢复过程中的状态值 (NBR) 与当期气候因子的响应关系。虽然使用绝对 NBR 可能包含部分空间背景差异, 但在分级建模 (将同类严重度区域放在一起分析) 的框架下, 已最大程度减少初始受损程度不同带来的空间异质性干扰。比较这 3 个独立模型的结果, 旨在实现的目标有: 1) 通过分析回归系数 (a, b) 的显著性和符号, 判断 LST 和 Pr 对植被恢复是起促进还是抑制作用; 2) 通过对比决定系数 (R^2), 评估气候因子在不同严重等级下对植被恢复变异的解释能力; 3) 最终揭示气候驱动效应如何因初始干扰强度而异, 从而深化对火后生态系统恢复机制的理解。

2 结果与分析

2.1 黑龙江嘎拉山林场扰动的时空识别

本研究利用 LandTrendr 算法对 2005—2024 年的 NBR 时间序列进行分析。LandTrendr 算法的核心机制在于通过时间序列分割与迭代拟合,捕捉光谱轨迹中的“顶点(vertices)”和“线段(segments)”,从而有效剔除噪声并提取真实的扰动信息。以 2006 年火烧迹地中心的 1 个典型像元(50°55'26"N,126°09'00"E)为例,为了数据呈现方便,将 NBR 值扩大 1 000 倍处理,该算法的识别过程为:1)稳定期。2000—2005 年,该像元的 NBR 值维持在 0.15 左右的小幅波动区间,算法将其拟合为一条斜率接近 0 的稳定线段,表明火前植被生长状况良好且稳定。2)扰动发生期。2006 年,NBR 值骤降至 0.05 以下,这种短时间内大幅度的光谱下降(Magnitude 超过预设阈值)被算法捕捉为关键的“顶点”,并被标记为“扰动事件”。3)恢复期。

2007—2024 年,NBR 呈现连续的逐步上升趋势,算法将其拟合为正斜率的恢复线段。基于上述逐像元识别逻辑,由图 2 可知,在整个研究时段内,最大规模且空间上最为集中的扰动事件发生在 2005—2006 年(图 2 中红色区域)。该扰动区域主要分布于林场的中北部,形成大面积的斑块,其发生时间与已知的 2006 年火灾事件高度一致。证实了该次火灾是研究时段内最主要的生态系统干扰源。相比之下,2006 年以后检测到的后续扰动事件(图 2 中其他颜色区域)在规模和空间格局上表现出截然不同的特征。这些扰动在空间上呈现高度零散和碎片化的分布格局,表现为孤立的像元或小面积图斑,并未形成连片的扰动区。从时间上看,这些小规模扰动在火后的各个阶段均有发生,但其总面积远小于 2006 年的主扰动事件。总体而言,该结果确认了 2006 年火灾是研究区近 20 a 来唯一一次大范围的森林扰动,为后续聚焦于该事件后的植被恢复分析提供了明确的研究对象和空间边界。

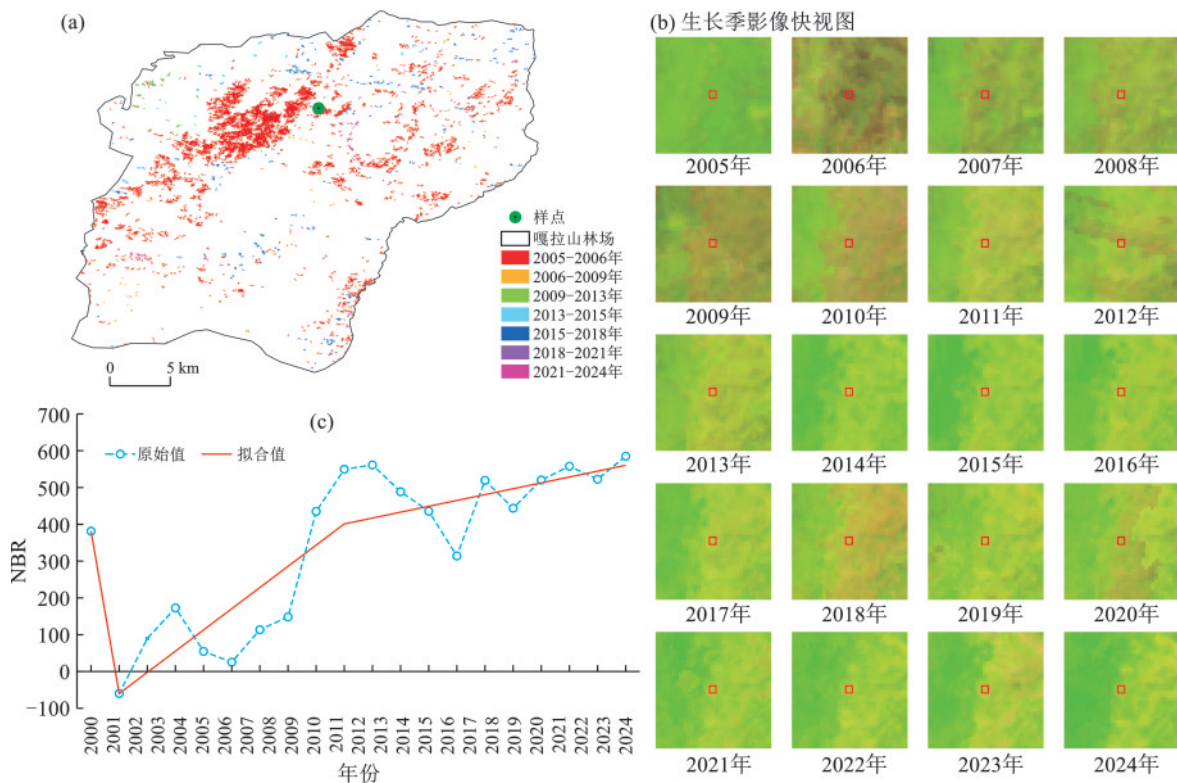


图 2 2005—2024 年森林扰动空间分布
Fig.2 Spatial distribution of forest disturbances from 2005 to 2024

2.2 火后植被恢复的时空动态

研究区生长季平均归一化燃烧比(NBR)的时间序列演变(图 3)清晰地揭示了火灾扰动与植被恢复的完整过程。为建立更可靠的火前基线,本研究选取的分析时段始于 2000 年。由图 3 可知,2000—2005 年,研究区 NBR 平均值维持在 0.13~0.17 的相对稳定区间,表明火灾发生前森林生态系统处于健

康的稳态。火灾发生后,NBR 平均值由 2005 年的约 0.16 骤降至 2006 年的历史最低点 0.07。随后的恢复过程呈显著的“波动性上升”特征。火后第 1 a(2007 年)NBR 迅速回升,但在 2008 年及 2016—2018 年出现 2 次明显的回落。尽管存在短期波动,但长期恢复趋势十分强劲,至 2024 年,NBR 平均值已攀升至 0.30,显著超越火灾前的水平。

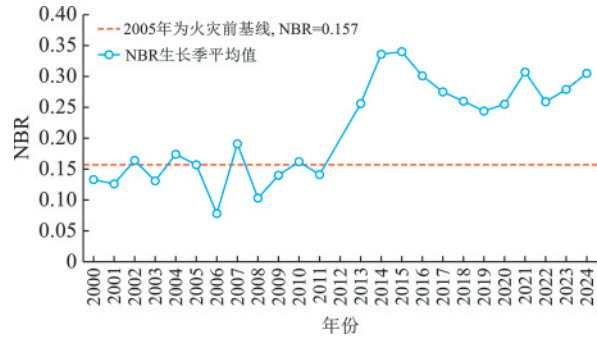


图 3 生长季 NBR 逐年变化趋势

Fig.3 Interannual trends of growing-season NBR

植被恢复的空间动态(图 4)进一步展示上述时间趋势在地理格局上的演变特征。2006 年的 NBR 空间分布图准确地勾勒出火灾的影响范围,尤其是在林场中北部区域,形成大面积的低 NBR 值区(橙色区域)。随着时间的推移,整个研究区经历了持续的“绿化”过程,橙色区域逐渐缩小,青绿色区域不断扩大并加深。至 2015 年,包括原重度燃烧区在内的大部分区域,其 NBR 值已恢复并超过 2005 年的基线水平。时间序列中观察到的 2018 年 NBR 值回落现象,在空间上表现为全区植被绿色度的普遍下降。到

2024 年,植被恢复在空间上已非常充分,整个林场的 NBR 值达到研究时段内的最高水平,表明生态系统恢复状态良好。

为从长时序和空间维度揭示植被恢复的内在规律,本研究进一步采用 Theil-Sen 斜率估计与 Mann-Kendall(M-K)检验相结合的方法,对 2006—2024 年的 NBR 时间序列进行逐像元的趋势分析,结果见图 5。综合分析该组图可以得出,研究区内绝大多数面积呈现为“上升”(青色)状态,为火后植被的积极恢复提供了强有力的空间证据。此趋势得到图 5 的有力支持:一方面,显示全区普遍呈现恢复性的正向增长(图 5 中青色区域代表正斜率),且恢复速率最快的区域(深青色)恰恰是火灾影响最严重的中北部;另一方面,M-K 检验结果则从统计学上确认这些恢复趋势的强度和显著性,中北部区域同样呈最深的青色,代表最强劲、最显著的上升趋势。因此,该结果清晰地表明,在火灾后的 18 a,嘎拉山林场的生态系统恢复不仅在时间上趋势显著,在空间上也具有高度的广泛性和一致性,充分体现该区域寒温带森林生态系统强大的自然恢复潜力。

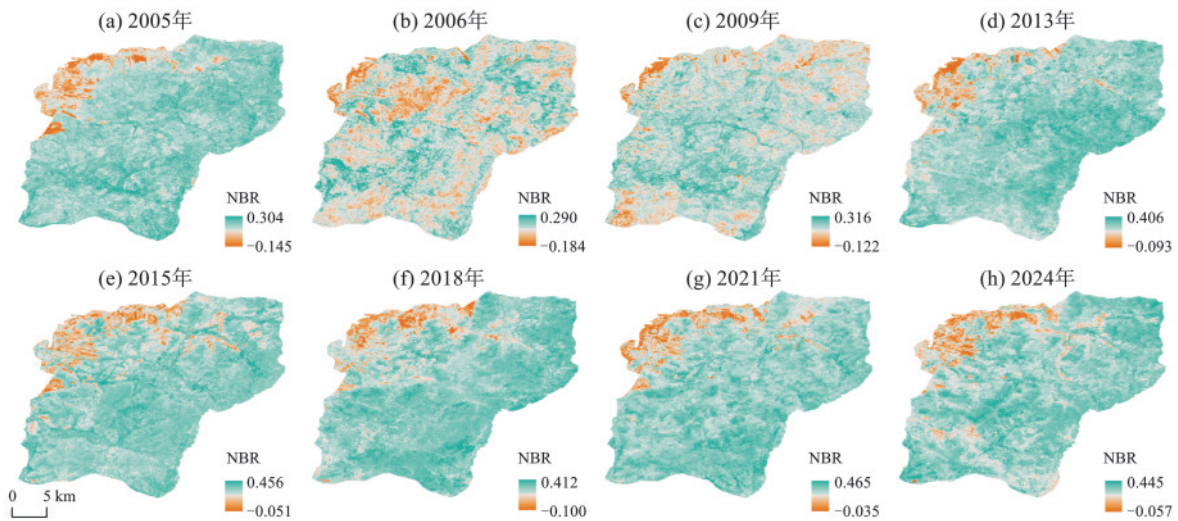


图 4 2005—2024 年 NBR 变化

Fig.4 Changes in NBR from 2005 to 2024

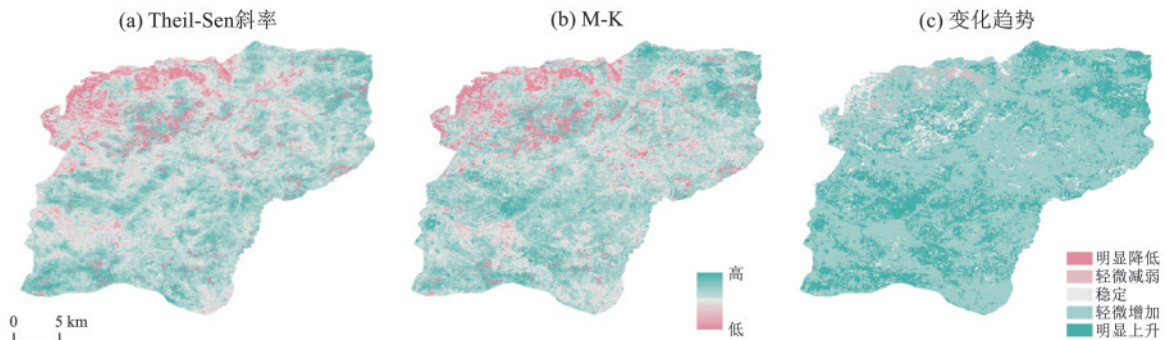


图 5 2006—2024 年 NBR 趋势

Fig.5 NBR trends from 2006 to 2024

2.3 不同燃烧严重程度下植被恢复的差异化特征

2.3.1 燃烧严重程度空间分异 基于dNBR指数,火灾迹地被划分为低、中、高3个严重程度等级(图6)。空间分布显示,高严重程度燃烧区主要集中于林场中北部,而低、中度燃烧区则环绕其外围或呈斑块状分布。

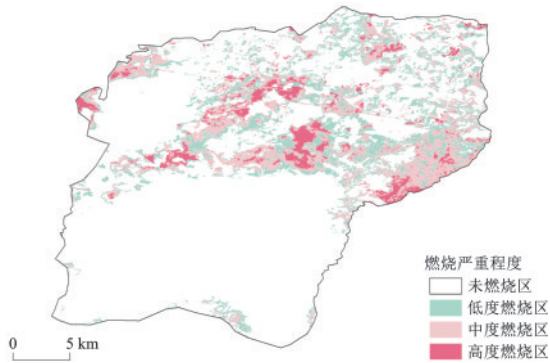


图6 2006年火灾事件燃烧严重程度空间分级

Fig.6 Spatial classification of burn severity in 2006 fire event

2.3.2 恢复过程的定量比较分析 表3定量展示不同燃烧严重程度区域在恢复过程中的差异化特征。在初始扰动与恢复启动期(2006—2007年),火灾的初始冲击与燃烧严重程度密切相关,2006年高、中、低严重程度区域的绝对恢复指标(ARI)分别为-68.00%、

-59.34%和-51.48%。然而,尽管初始受损程度不同,所有区域均表现出强大的初期恢复能力。恢复到火前80% NBR水平所需年限(Y2R80)均为1 a。至2007年,各区域的相对恢复指标(RRI)均已超过120.00%,表明火后第1 a植被已迅速启动恢复进程。

在恢复动态与波动性期(2008—2015年),所有区域的恢复路径均呈非线性的“波动上升”特征,并在2015年时ARI均已超过100.00%,实现对火前植被状态的超越。然而,恢复过程的稳定性与燃烧严重程度呈显著负相关。逐年平均光谱变化(YrYr)指标显示,高严重程度区的年均波动最大(0.052),显著高于中度(0.048)和低度(0.046)区域,表明受损最严重的生态系统在恢复过程中对年际环境变化更为敏感。

在恢复后期(2016—2024年),尽管所有区域的恢复水平均维持在高位,但恢复速率和潜力表现出明显差异。高严重程度燃烧区虽然初期受损最重、过程波动最大,但其后期恢复的绝对速率(如2019—2024年ARI的增幅)表现突出,展现较强的长期恢复潜力。相比之下,低度和中度燃烧区的恢复过程更为平稳均衡。至研究期末(2024年),各区域均达到超越基准的稳定恢复状态。

表3 不同燃烧严重程度下ARI、RRI计算结果

Table 3 Calculated results of ARI and RRI under different burn severity levels

年份	ARI			RRI		
	低度燃烧	中度燃烧	高度燃烧	低度燃烧	中度燃烧	高度燃烧
2006	-51.48	-59.34	-68.00	0	0	0
2007	15.35	18.72	15.38	129.82	131.55	122.60
2008	-30.99	-32.11	-39.90	39.78	45.88	41.00
2009	-14.59	-13.06	-12.98	71.87	78.00	80.90
2010	-1.26	-1.86	-5.74	97.55	97.00	91.50
2011	-14.48	-14.30	-15.67	71.88	75.90	76.90
2013	62.99	68.80	67.40	221.00	215.80	199.00
2014	108.74	114.82	110.00	309.00	293.50	262.00
2015	111.96	118.83	113.30	315.00	299.00	267.00
2016	84.86	90.87	85.20	263.00	253.00	225.00
2017	68.39	72.99	69.20	232.00	222.00	192.00
2018	62.67	68.05	61.10	221.00	214.00	181.00
2019	52.67	57.33	52.70	202.00	196.00	177.00
2020	52.95	61.38	58.20	203.00	203.00	186.00
2021	89.76	94.20	89.50	272.00	259.00	232.00
2022	60.00	60.70	58.40	230.00	202.00	186.00
2023	73.46	75.50	77.90	245.00	227.00	215.00
2024	91.19	97.25	91.80	277.00	264.00	235.00

2.4 气候因子对植被恢复的影响

由表4可知,多元线性回归分析表明,地表温度(LST)与植被恢复指数(NBR)在不同燃烧严重程度

区域均呈显著负相关,即LST升高抑制植被恢复,且抑制强度随燃烧严重程度加剧而增强(低、中、高严重程度下LST系数分别为-40.06、-47.60、-48.36),表

明高温对高严重度受损区域的植被恢复胁迫效应更显著。降水(Pr)与NBR呈显著正相关,但促进作用存在等级差异:中等严重度区域Pr系数达76.24,促进效应最强,而高严重度区域可能因生态系统脆弱性,Pr系数降至16.60,促进作用减弱。多元线性回归模型拟合效果随燃烧严重程度的增加而增强, R^2 从低严重程度的26.77%增至高严重程度的34.91%,表明气候因子对高严重度区域植被恢复的解释力更强。所有变量的T统计量绝对值均远超2($p < 0.05$),F比率显示模型整体高度显著($p \approx 0$),证实LST和Pr对不同燃烧严重度区域的植被恢复具有统计学意义上的差异化影响。由图7可知,散点图直观展示LST与NBR的负相关关系,所有燃烧区的拟合线(红线)均呈下降趋势,表明地表温度升高对植被绿度具有显著抑制作用;同时,预测值与观测值散点图显示,尽管生态数据存在自然波动,模型仍能较好地捕捉恢复轨迹的主要趋势(数据点沿对角线分布)。本研究结果为该区域火灾后生态修复提供量化依据,提示高严重度区域需重点应对高温胁迫,中等严重度区域可优化降水利用以促进植被恢复,可为气候适应性修复策略的制定提供科学支撑。

3 讨论

3.1 火后植被的恢复模式与生态系统韧性

本研究通过 18 a 的长时序监测发现,嘎拉山林场

火后植被恢复呈现典型的“波动性上升”模式,并在约 10 a 后超越火前水平,充分展示该寒温带森林生态系统强大的恢复力。火后第 1 a 所有燃烧区均能恢复至灾前 80% 的 NBR 水平($Y2R80=1$),与全球许多北方森林的发现相符。例如,GOETZ 等^[23]在加拿大北方森林的研究中也观察到火后初期由草本和灌木主导的快速“绿化”现象。这种快速恢复可能主要归因于土壤种子库的萌发、耐火植物(如杨树、桦树等阔叶树种)的根蘖更新,以及先锋草本植物对开放生境的迅速占据,它们共同构建了恢复初期的植被覆盖。

表 4 不同 BS 植被恢复 NBR 的多元线性回归模型
Table 4 Multiple linear regression models for NBR under different BS levels

燃烧程度	变量	估计值	标准误差	T-统计	$R^2/\%$	F-比率
低	constant	1 154.98	0.32	3 663.90	26.77	532.76
	LST	-40.06	0.01	-2 735.73		
	Pr	33.23	0.10	321.02		
中	constant	1 295.87	0.31	4 212.07	32.79	717.28
	LST	-47.60	0.01	-3 323.29		
	Pr	76.24	0.09	822.40		
高	constant	1 338.35	0.81	1 645.10	34.91	307.67
	LST	-48.36	0.04	-1 282.71		
	Pr	16.60	0.28	59.18		

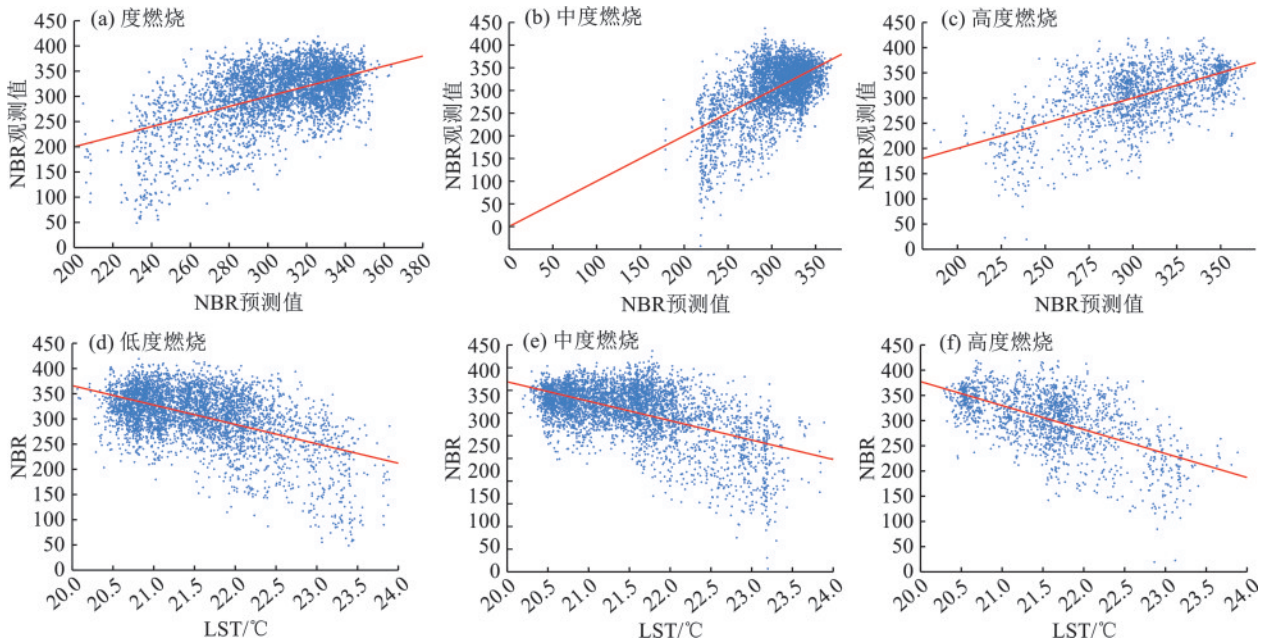


图 7 不同燃烧严重程度下植被恢复(NBR)的多元线性回归模型拟合诊断与气候响应

Fig.7 Fit diagnostics and climatic responses of multiple linear regression models for vegetation recovery indicated by NBR under different burn severity levels

本研究一个关键发现是不同燃烧严重程度区域表现出迥异的恢复路径。高燃烧区“初期受损最重、过程波动最大,但长期恢复潜力强”的模式尤为突出。

严重的火灾通过移除上层林冠和地表凋落物,为喜光的先锋树种(如研究区的桦树、山杨)创造了理想的“生态位窗口”,减少与残存耐荫树种的竞争,与

ZHAO等^[22]在大黄石生态系统的发现类似,他们也指出火灾为某些树种的更新提供了有利条件。此外,燃烧过程释放的矿质养分短期内能提高土壤肥力,可能也促进植被的快速生长。相比之下,低、中度燃烧区保留了更多的林下植被和土壤有机层,其恢复更倾向于一种基于残存个体的“内部演替”,过程更为平稳但可能缺乏爆发性增长。恢复过程中的年际波动,特别是2008年和2018年的2次低谷,与区域气候记录中的干旱年份相吻合,凸显了即使在恢复力强大的生态系统中,恢复轨迹也极易受到短期气候胁迫的干扰。

3.2 燃烧严重程度对气候-植被恢复关系的调节作用

本研究的核心贡献之一是定量揭示燃烧严重程度对气候因子驱动效应的调节作用。本研究发现,地表温度(LST)升高对植被恢复的抑制效应随燃烧严重程度的加剧而增强,与生态学理论高度契合:严重火灾彻底摧毁林冠的遮蔽作用,导致地表太阳辐射直射,土壤温度急剧升高,水分蒸散加剧^[24]。对于正在更新的脆弱幼苗而言,这种微气候环境的恶化(高温和干旱胁迫)是致命的。此发现与VIANA-SOTO等^[19]的研究结果形成呼应,他们同样强调火后短期水分亏缺对恢复的限制作用。本研究进一步明确指出,这种限制作用在重度燃烧区表现得淋漓尽致。

更有趣的是降水的差异化效应。降水对中度燃烧区的促进作用最强,而在高燃烧区反而减弱,可能与火灾对土壤物理性质的影响有关。高强度的火灾可能导致土壤憎水性的产生,破坏土壤团聚体结构,降低水分入渗率,从而使得降水效率大打折扣。因此,即使降水量相同,高燃烧区植被能有效利用的水分可能更少。而中度燃烧区可能达到一个“最佳平衡点”:火灾清除部分地表竞争者,改善光照条件,但又未严重破坏土壤结构,使得降水能够被最有效地转化为植被生长。此发现为火后管理提供重要启示:在高燃烧迹地,仅仅依赖自然降水可能不足以支持快速恢复,可能需要考虑保水措施或人工干预。

3.3 研究的贡献、局限性与展望

本研究结合GEE平台和LandTrendr算法,系统揭示我国东北寒温带森林在火后近20 a的详细恢复过程,并创新性地量化燃烧严重程度对“气候-植被恢复”关系的调节作用,为深入理解生态系统恢复机制和火灾生态学提供新的区域性证据。然而,本研究仍存在一些局限性。首先,NBR作为一个综合性光谱指数,虽能有效反映植被覆盖和健康状况,但无法区分物种组成和群落结构的变化。未来的研究应结合高分辨率影像(如Planet, Sentinel-2)或地面调查数据,深入分析火后物种演替的详细过程。其次,气候

数据(LST, Pr)与Landsat影像的空间尺度不匹配可能引入不确定性,未来可尝试使用降尺度后的高分辨率气候数据进行分析。此外,必须承认的是,本研究观测到的NBR长期上升趋势虽然主要由火后植被再生主导,但也不可避免地叠加区域气候变暖、CO₂浓度升高及林龄增加所带来的背景“绿化效应”。尽管宏观环境因子驱动的植被生长变化通常较为平缓,与火后初期剧烈的植被恢复(高NBR增长率)在幅度上存在显著级差,因此,火后恢复信号在光谱趋势中占据主导地位,但在长时序分析中完全剥离这些背景趋势仍具挑战性。最后,本研究未考虑地形(坡向、坡度)、土壤类型及火后人类活动(如植树造林)等因素,它们同样可能对恢复过程产生重要影响。

展望未来,应致力于多因子综合分析,构建更复杂的生态模型,以更全面地揭示植被恢复的驱动机制。同时,将研究成果与森林经营管理实践相结合,例如,基于本研究发现的燃烧严重程度与气候敏感性的关系,可以为不同受损区域制定差异化的、具有气候适应性的恢复策略,从而提升森林生态系统在未来气候变化背景下的韧性。

4 结论

1)研究区火后植被恢复力强大,整体呈现显著的“波动上升”趋势,并在约10 a后超越灾前水平。

2)燃烧严重程度是决定植被恢复轨迹的关键因素。高燃烧区虽初期受损最重,但长期恢复速率最快,表现出与中低燃烧区不同的恢复模式。

3)气候因子对植被恢复具有显著的差异化影响。地表温度升高抑制恢复,而降水增加促进恢复。这种影响在重度燃烧区最为明显,表明受损严重的生态系统对气候变化更为敏感和脆弱。

本研究不仅深化对寒温带森林火后生态演替规律的认识,也强调在制定灾后恢复和管理策略时,必须充分考虑燃烧严重程度的空间异质性及未来气候变化带来的挑战。

参考文献:

- [1] HE T H, LAMONT B B, PAUSAS J G. Fire as a key driver of Earth's biodiversity[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2019, 94(6):1983-2010.
- [2] 杨毅,陶波. 陆地生态系统扰动与碳循环模拟研究进展[J]. *世界林业研究*, 2014, 27(4):1-5.
YANG Y, TAO B. Review on terrestrial ecosystem disturbances and carbon cycle modeling[J]. *World Forestry Research*, 2014, 27(4):1-5.
- [3] 胡海清,魏书精,魏书威,等. 气候变暖背景下火干扰对森林生态系统碳循环的影响[J]. *灾害学*, 2012, 27(4):37-41.

- HU H Q, WEI S J, WEI S W, et al. Effect of fire disturbance on forest ecosystem carbon cycle under the background of climate warming [J]. *Journal of Catastrophology*, 2012, 27(4):37-41.
- [4] IPCC. Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021:700-710.
- [5] ROCHE P K, CAMPAGNE C S, GANTEAUME A. Post-fire recovery dynamics and resilience of ecosystem services capacity in Mediterranean-type ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2024, 27(6):833-847.
- [6] 石晓蕊, 信忠保. 雅鲁藏布江流域生态系统服务评估及其权衡/协同关系[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(5):209-218.
- SHI X R, XIN Z B. Ecosystem services evaluation and their trade-offs/synergies in Yarlung Tsangpo River basin [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(5):209-218.
- [7] 汪东, 贾志成, 夏宇航, 等. 森林草原火灾监测技术研究现状和展望[J]. *世界林业研究*, 2021, 34(2):26-32.
- WANG D, JIA Z C, XIA Y H, et al. Research progress and trend in forestry and grassland fires monitoring technology[J]. *World Forestry Research*, 2021, 34(2):26-32.
- [8] 曹云刚, 雷若丹. 多源遥感森林火情监测的进展与展望[J]. *遥感学报*, 2024, 28(8):1854-1869.
- CAO Y G, LEI R D. Progress and prospect of forest fire monitoring based on the multi-source remote sensing data [J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2024, 28(8):1854-1869.
- [9] 王桥. 中国环境遥感监测技术进展及若干前沿问题[J]. *遥感学报*, 2021, 25(1):25-36.
- WANG Q. Progress of environmental remote sensing monitoring technology in China and some related frontier issues[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2021, 25(1):25-36.
- [10] 张兵. 当代遥感科技发展的现状与未来展望[J]. *中国科学院院刊*, 2017, 32(7):774-784.
- ZHANG B. Current status and future prospects of remote sensing[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, 32(7):774-784.
- [11] 陈述彭. 卫星遥感面临应用的新挑战[J]. *环境遥感*, 1990(1):3-10.
- CHEN S P. Challenge to satellite remote sensing from the new applications[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 1990(1):3-10.
- [12] ZAHABNAZOURI S, BELMONT P, DAVID S, et al. Detecting burn severity and vegetation recovery after fire using dNBR and dNDVI indices: Insight from the Bosco difesa grande, gravina in southern Italy[J]. *Sensors*, 2025, 25(10):e3097.
- [13] 郝帅, 王星, 张秋良, 等. 大兴安岭火烧迹地遥感提取研究[J]. *林业资源管理*, 2022(2):75-81.
- HAO S, WANG X, ZHANG Q L, et al. Study on remote sensing extractions of burned areas in Greater Khingan Mountains [J]. *Forest Resources Management*, 2022(2):75-81.
- [14] 张家铮, 朱大明, 王德智, 等. 金沙江中游水电站对植被时空变化的影响[J]. *水土保持学报*, 2025, 39(1):326-337.
- ZHANG J Z, ZHU D M, WANG D Z, et al. Effects of hydropower station on the temporal and spatial changes of vegetation in the middle reaches of the Jinsha River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2025, 39(1):326-337.
- [15] CHU T, GUO X. Remote sensing techniques in monitoring post-fire effects and patterns of forest recovery in boreal forest regions: A review [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(1):470-520.
- [16] VIANA-SOTO A, GARCÍA M, AGUADO I, et al. Assessing post-fire forest structure recovery by combining LiDAR data and Landsat time series in Mediterranean pine forests [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 108:e102754.
- [17] COLLINS L, BENNETT A F, LEONARD S W J, et al. Wildfire refugia in forests: Severe fire weather and drought mute the influence of topography and fuel age [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(11):3829-3843.
- [18] SUN Q Q, BURRELL A, BARRETT K, et al. Climate variability may delay post-fire recovery of boreal forest in southern Siberia, Russia [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(12):e2247.
- [19] VIANA-SOTO A, AGUADO I, SALAS J, et al. Identifying post-fire recovery trajectories and driving factors using landsat time series in fire-prone Mediterranean pine forests [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(9):e1499.
- [20] WHITE J C, WULDER M A, HERMOSILLA T, et al. A nationwide annual characterization of 25 years of forest disturbance and recovery for Canada using Landsat time series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 194:303-321.
- [21] DE JONG R, DE BRUIN S, DE WIT A, et al. Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(2):692-702.
- [22] ZHAO F R, MENG R, HUANG C Q, et al. Long-term post-disturbance forest recovery in the greater Yellowstone ecosystem analyzed using landsat time series stack [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(11):e898.
- [23] GOETZ S J, BUNN A G, FISKE G J, et al. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance [J]. *PNAS*, 2005, 102(38):13521-13525.
- [24] 李明泽, 康祥瑞, 范文义. 呼中林区火烧迹地遥感提取及林火烈度的空间分析[J]. *林业科学*, 2017, 53(3):163-174.
- LI M Z, KANG X R, FAN W Y. Burned area extraction in Huzhong forests based on remote sensing and the spatial analysis of the burned severity [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(3):163-174.