

doi: 10.6046/zrzyyg.2023030

引用格式: 王健,杜玉玲,高钊,等. 基于MODIS时序数据的大兴安岭火烧迹地时空变化及其森林恢复研究[J]. 自然资源遥感,2024,36(2):142-150. (Wang J, Du Y L, Gao Z, et al. Exploring the spatio-temporal variations and forest restoration of burned zones in the Great Xing'an Range based on MODIS time series data[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(2): 142-150.)

基于MODIS时序数据的大兴安岭火烧迹地 时空变化及其森林恢复研究

王健¹, 杜玉玲¹, 高钊², 吕海燕¹, 时雷¹

(1. 河南农业大学信息与管理科学学院, 郑州 450046; 2. 陕西测绘地理信息局自然资源部第一大地测量队, 西安 710054)

摘要: 林火是对森林生态造成影响的最主要干扰因素之一, 探究林火时空变化规律及森林恢复具有一定的社会学和生态学意义。大兴安岭拥有我国面积最大的原始林区, 也是林火频繁发生的重点区域。本研究使用MODIS火烧迹地、土地覆盖以及总初级生产力(gross primary productivity, GPP)时间序列产品对大兴安岭2002—2021年火烧迹地分布信息进行提取, 并对火后森林恢复情况进行统计。结果表明: 2002—2021年间, 大兴安岭森林地区火灾次数整体呈下降趋势, 但火烧迹地面积呈现波动性变化, 其中2003年无论是过火面积还是火灾频率都为最高, 2008年次之, 2019年过火面积最小; 林火主要集中在春秋两季, 3月过火面积和过火次数都为最高, 9月的过火次数较高; 同时林火在空间上由东北向西南呈不均匀分布, 主要集中在黑龙江大兴安岭地区和内蒙古呼伦贝尔市, 且内蒙古地区的林火面积远远大于黑龙江地区。对过火地区的林种分析可知, 阔叶林的过火区域最大, 其次是混交林, 最后是针叶林。通过对过火区域的GPP时间序列分析得出, 一般灾后第一年GPP数值恢复最快, 但需要近7a时间才能完全恢复到过火前的生长水平, 且不同森林类型在灾后恢复速度存在明显差异, 阔叶林地恢复速度较快, 其次是针叶林, 之后是混交林。了解林火的时空分布能够为布置和调整防火、灭火力量提供数据支撑, 灾后森林的恢复研究可为森林重建和持续发展提供科学依据。

关键词: 森林火灾; 大兴安岭; 火烧迹地; 森林恢复; MODIS

中图法分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)02-0142-09

0 引言

森林作为重要的自然资源和环境资源, 在维护和改善生态环境中发挥着至关重要的作用, 同时为经济社会的发展做出了巨大贡献。森林火灾是世界八大自然灾害之一, 影响着森林结构和森林环境^[1-2]。森林火灾的发生与气候、地形和植被类型等都有极大关联, 存在较为明显的时空分布特征。研究森林火灾的时空分布有助于了解其发生规律, 是进行林火预测的前提, 为布置和调整防火、灭火力量提供依据。森林火烧迹地的植被恢复是林业建设的重要组成部分, 灾后森林的恢复研究可为森林重建和持续发展提供科学依据, 也是目前研究森林火

灾的一个重要方向。

遥感技术可以有效地用于统计森林火灾的相关信息, 还可以对潜在危险区域的林火进行监测和持续跟踪, 已成为当前林火监测和识别的重要手段^[3-6], 众多学者利用MODIS^[7-8] (moderate-resolution imaging spectroradiometer) 及NOAA (national oceanic and atmospheric administration-satellite) 系列^[9-10]等多种遥感数据对林火进行长时间序列的监测、识别及恢复研究, 其中MODIS数据由于其辐射精度高、光谱范围广、重访周期短等特点成为目前使用率较高的遥感数据之一^[11]。Zhao等^[12]采用卫星观测和统计模型研究中国2003—2016年火灾引起的森林死亡的时空模式, 认为森林火灾主要发生在冬季和春季, 主要分布在东北、西南和华南地区; 俞

收稿日期: 2023-02-13; 修订日期: 2023-05-14

基金项目: 河南省自然科学基金项目“基于物联网的小麦赤霉病早期检测与预报技术研究”(编号: 222300420463)和河南省科技研发计划联合基金(优势学科培育类)项目“基于空-地多源数据的小麦赤霉病监测预警机制研究”(编号: 222301420113)共同资助。

第一作者: 王健(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要从事农业遥感方面的研究。Email: wangj_rs@126.com。

通信作者: 时雷(1979-), 女, 博士, 教授, 主要从事数据挖掘、智慧农业方面的研究。Email: shilei@henau.edu.cn。

昊天等^[13]基于MODIS数据,利用CART火点识别算法对澳大利亚森林火灾进行识别,研究其森林火灾时空分布规律;曾爱聪等^[14]基于MODIS卫星火点数据,运用数据统计、Mann-Kendall趋势检验法和滑动t检验,对浙江省2001—2016年森林火灾时空分布特征、变化趋势和防火期的变化进行研究;崔阳等^[15]根据2001—2018年MODIS火烧迹地产品数据集,并结合历史火灾记录资料对黑龙江的森林火灾时空分布规律进行研究,得出MCD64A1火烧迹地产品可以较准确地提取火灾信息,其精度达75.21%。

目前,火灾后的生态修复已成为人们关注的热点,遥感影像由于监测范围广、监测时间长等优点成为火灾后森林恢复研究的一个重要途径。Nolè等^[16]基于MODIS的野火光谱指标和衍生的恢复指标,对欧洲森林(包括火灾多发的地中海地区)的火灾严重程度和火灾后恢复趋势进行了长期分析,指出欧洲森林火灾后植被恢复越来越滞后的情况;Hislop等^[17]使用MODIS和陆地卫星数据来监测全球北方和温带森林的火灾干扰及其恢复情况,分析得出一些生物群落的恢复随时间推移而缩短的情况很大程度上取决于所在位置;Qin等^[18]利用多种传感器数据对2019—2020年澳大利亚森林地区火灾后植被恢复的变化程度和速度进行评估,得出2019年被烧毁的以桉树为主的森林显示出较高的恢复能力,大多数受火灾影响的森林地区火灾后快速再生。

由于全球气候的持续升温,森林火灾发生越发频繁,由中国统计年鉴数据可知2020年中国森林火灾次数总计1153次,受灾森林面积达8526 hm²,其中森林火灾发生频率较高的区域集中在东北和西南林区,主要是东北大兴安岭和长白山地区、西南的云南大部分区域和南方零散分布的区域^[19]。大兴安岭山脉位于我国的最北部,是面积最大的国有林区。

因此,本研究基于火烧迹地数据MOD64A1和总初级生产力(gross primary productivity, GPP)数据MOD17A2H,提取2002—2021年大兴安岭的森林火烧迹地信息和火灾后的GPP数据,分析大兴安岭林火的时空分布规律及火后恢复情况,为该地区的火灾重点防治和森林重建提供科学依据。

1 研究区概况及数据源

1.1 研究区概况

大兴安岭地处内蒙古自治区东北部及黑龙江省西北部,主体跨5个地级行政区(呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市和大兴安岭地区),地理坐标范围为N43°00′~53°30′,E117°20′~126°00′,全长1400 km,均宽约为200 km,总面积32.72万km²(其中内蒙古自治区境内约24万km²,黑龙江省境内8.48万km²),如图1所示。地势呈西高东低,气候属寒温带大陆季风气候,冬寒夏暖,昼夜温差较大,年平均气温零下2.8℃,年平均降水量为746 mm,该区位于我国干湿地区(半干旱地区和半湿润地区)的中界线上,东南坡夏季受海洋季风影响,雨水较多,西北坡比较干旱,成为森林和草原的分界线。大兴安岭地区的植被,北部是以落叶松为主的寒带山地针叶林带,往南针阔混交林带逐渐过渡到以蒙古栎为主的温带丘陵阔叶林带,因地理条件的差异及海拔高度的不同,以兴安落叶松为主的林区呈现不同的类型,研究区的植被具有代表性且分布广的树种还有樟子松、红皮云杉、白桦、二色胡枝子、兴安杜鹃、山杨和蒙古栎等,森林覆盖率达60%以上。2003年5月份大兴安岭呼伦贝尔金河地区发生了特大森林火灾(图1为过火后Landsat7影像),对林区生态系统造成了严重破坏。

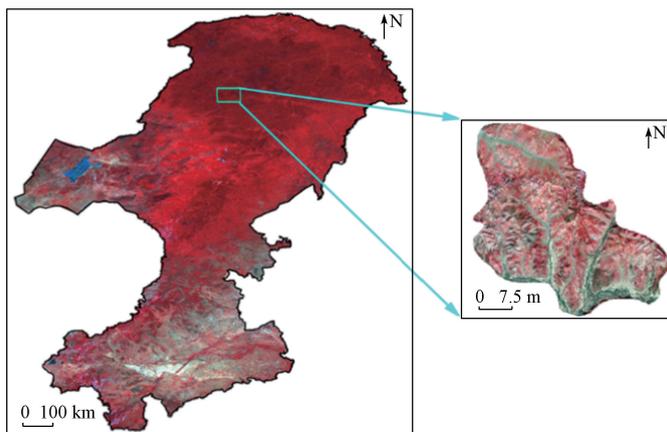


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据源

1.2.1 土地覆盖数据

为了准确研究大兴安岭的森林火灾发生情况,需要引入研究区域的土地覆盖数据将研究区分为森林和非森林像元。MODIS 三级土地覆盖类型产品(MCD12Q1)是根据 Terra 和 Aqua 观测所得的数据经过处理来描述土地覆盖类型,其数据获取途径为: <https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd12q1v006/>,它以每年 500 m 的空间分辨率绘制了 6 种不同的土地覆盖图例。本文选用国际地圈生物圈计划(international geosphere-biosphere programme, IGBP)的土地覆盖分类体系,并对大兴安岭每年的土地覆盖类型进行重采样,重新整合归类并提取森林区域,统计结果如表 1 所示。为了针对森林区域信息进行有效提取,将 IGBP 分类方案中 1~9 像元标识为森林,对非森林区域进行掩模。

表 1 大兴安岭 IGBP 林区土地覆盖分类
Tab. 1 IGBP forest land cover classification
in Great Xing'an Range

重采样编号	重采样类型	包含的 IGBP 类型	对应的 IGBP 编号
10	针叶林	常绿针叶林、落叶针叶林	1,3
20	阔叶林	常绿阔叶林、落叶阔叶林	2,4
30	针阔混交林	混交林	5
40	其他林种	郁闭灌木丛、稀疏灌木丛、多树草地、稀树草地	6,7,8,9

1.2.2 火烧迹地数据

本研究所使用的火烧迹地产品为 MCD64A1,是 MODIS 的 Terra 和 Aqua 传感器的复合结果,将第 5 波段(1 240 nm)和第 7 波段(2 130 nm)计算得到的

燃烧敏感指数,使用动态阈值并结合时间纹理特征等方法进行判定,产品空间分辨率为 500 m,时间分辨率为每月一次,记录了火点开始和结束时间、发生地点、火点空间范围、可信度等信息,由 NASA 网站(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)提供。为了方便分析,在月份产品的基础上,利用地表覆盖分类数据对非森林区域进行掩模,结合 QA 数据获得 2002—2021 年森林火烧迹地标准产品年合成图。针对 MCD64A1 产品在全球范围的验证,其标准误差小于 6%,针对大面积的火烧迹地有着较高的检测性能。

1.2.3 GPP 数据

针对森林恢复情况,对比分析过火前后 GPP 变化情况,GPP 被定义为在单位时间和单位面积上绿色植物生产出的全部有机物的量,它反映了植被通过光合作用固定 CO₂ 的能力,是森林监测和管理的重要指标。GPP 产品使用的为 MOD17A2H,它是具有 500 m 空间分辨率的 8 d 累计综合数据产品。为了方便后续研究,使用 QA 数据将 GPP 数据进行月份以及年份合成,得到以月和年为单位的森林 GPP 总值,用来分析森林的恢复状况。

2 结果与分析

2.1 大兴安岭火烧迹地时间分布变化

2.1.1 林火发生的年际变化特征

本研究在 2002—2021 年大兴安岭森林火烧迹地信息提取的基础上,分析林火发生频率以及火烧迹地面积变化情况,进而分析森林灾后恢复的情况。2002—2021 年大兴安岭森林总面积以及火烧迹地的年度统计情况如图 2 所示。

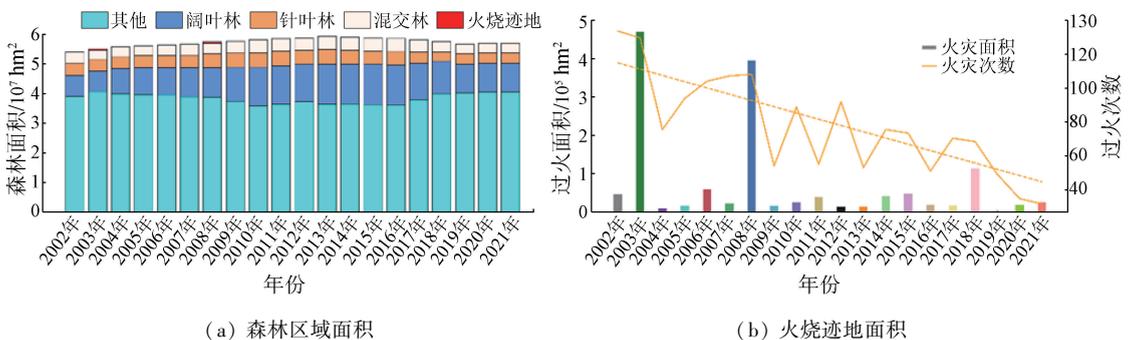


图 2 大兴安岭森林区域面积及过火面积年变化

Fig. 2 Annual changes of forest area and burned area in Greater Khingyan Mountains

从图 2(a)中可以看出,总森林覆盖面积在研究初期呈明显上升趋势,并在 2013 年达到最大值,之后开始缓慢下降,并于 2019 年达到拐点,在之后再次出现上升。与之对比的为火烧迹地在整个研究区

中的变化(图 2(b)),可以看到 2003 年、2008 年和 2018 年这 3 年是火灾发生的高频年份,但即使为火烧迹地发生面积最高的 2003 年过火区域占全部森林面积的比重也不到 0.9%,非火灾频发年份的过

火区域一般都低于0.1%。可以看到火烧迹地发生的比例与森林覆盖面积并没有呈现比较好的一致性,在非异常年份,一般4~5 a会出现一个火烧迹地的高峰年份。

根据2002—2021年火烧迹地产品提取森林火点1 538次,平均每年发生76.9次,累计受灾面积超1 444 234 hm²,平均每年的过火面积约722 211 hm²。图2(b)为年际火灾发生面积及次数分布特征。由图2(b)可知,大兴安岭森林火灾次数在2002—2021年间整体呈下降趋势,其中2002年的过火次数最多,共132次;过火次数最少的年份为2021年,共32次。在2002—2021年20 a间大兴安岭森林过火次数呈波动性变化,其中2004—2008年森林火灾次数缓慢增加,4 a间共增加32次;从2017—2021年间火灾次数出现明显下降,2021年较2017年火灾次数下降了54.29%。2002—2021年火烧迹地面积不断发生波动,2003年火烧迹地面积为468 552.77 hm²,是整个研究时期过火面积最大的年份,其中2008年过火面积次之,达到394 446.49 hm²;2019年过火面积最小,仅为3 617.73 hm²。从图2(b)可以看出,2003年和2008年的过火次数和过火面积都处于一个较高的数值,这可能与当时的环境气候有关。大兴安岭林区2002年持续干旱,降水较少,故2003年的气温在入春后回升较快导致林内植被干燥^[20]。在2003年5月发生了2次特大森林火灾,5月5日人为火源借风势迅速蔓延,在内蒙古呼伦贝尔市引生了特大森林火灾,过火面积达108 673 hm²;5月17日黑龙江大兴安岭地区由于自然火源引发火灾,过火面积达361 900 hm²。2008年大兴安岭地区遭受高温干旱天气的侵扰,地下潜伏火受春季大风天气的影响,火势蔓延,并在短时间内迅速形成多个火场,呈现集中爆发趋势。从2009年之后,森林总过火面积基本控制在5 000 hm²以下,但偶尔还是会有起伏较大的年份。

2.1.2 林火发生的月度变化特征

大兴安岭林火月度变化如图3所示。从图3分

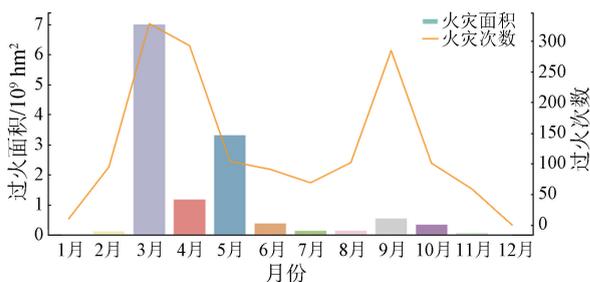


图3 大兴安岭林火月度变化

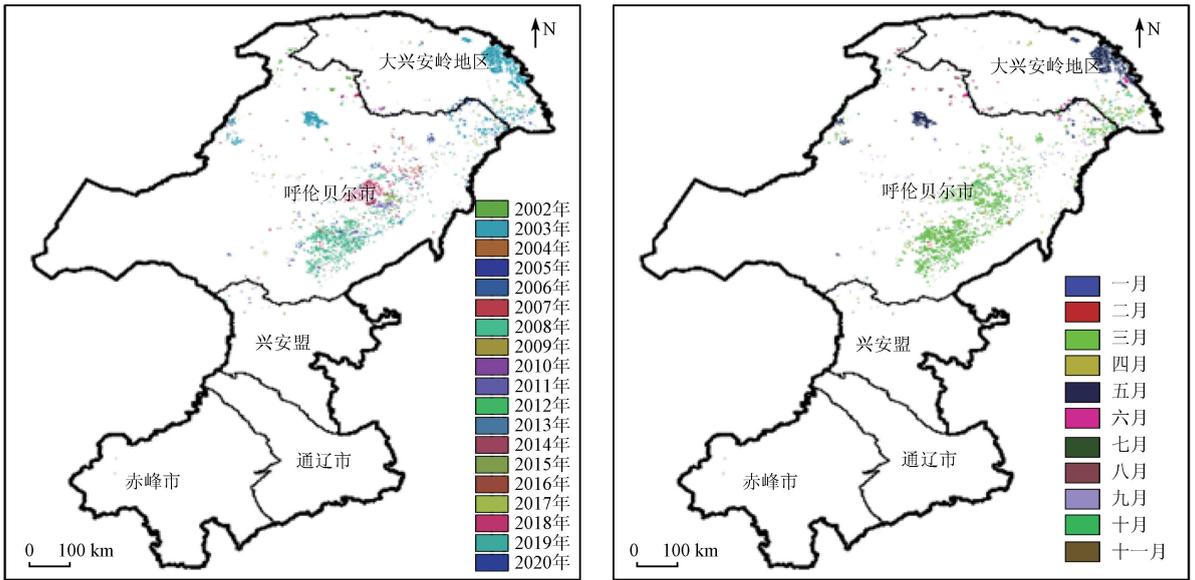
Fig. 3 Monthly changes of forest fires in the Greater Khingan Mountains

析可知,森林火灾主要集中发生在每年的3—5月及8—10月,这6个月的火灾次数均在100次以上,但春季的火点数量和过火面积都要高于秋季。森林火灾次数最多的月份是3月,共329次,之后的4月和9月火灾次数分别为293次和285次,这3个月的过火面积占总体的65.54%,其中3月的过火面积最高,超过70万hm²,5月过火面积超过30万hm²。大兴安岭林火主要集中在春秋两季,这与大兴安岭春秋两季的森林防火期具有高度一致性。春季气温回升较快,气候相对干旱且降水较少,植被体内含水量较少,多风且可燃物丰富,当温度升高时容易产生火灾,另外人们在春季进行的踏青、旅游、春季祭祖等活动会加大引发火灾的可能性;秋季植被的枝叶逐渐干枯凋零,地面堆积大量的枯枝落叶及土壤微生物也随之增加,加上秋季天气干燥多风,给火灾频发创造了自然条件。8—10月的过火面积均保持10万hm²以下,虽然过火次数较高,但过火面积总体占比较低。大兴安岭夏季多雨,整个山区的气候较湿润,这在一定程度上减少了林火发生的次数。森林火灾在12—1月发生的概率极小,2002—2021年20 a间这2个月仅检测到10次。本研究结果与许多研究结果相似^[15,21-23],即森林过火次数和过火面积在年尺度上呈波动性变化,在季尺度表现出林火的多发时期为春秋两季,且与人类活动及气候特点息息相关。

2.2 大兴安岭火烧迹地空间分布变化

2.2.1 林火的空间分布特征

将2002—2021年火烧迹地逐年及逐月数据分别进行叠加,林火年月的空间分布如图4所示,可以看出大兴安岭林火由东北向西南呈不均匀分布,具体表现为东北部和中部较多,中部比东北部的林火更频繁,主要集中在黑龙江大兴安岭地区和内蒙古呼伦贝尔市,极少量火点零散分布在其他3个地级市。林火集中地处于东部季风区的湿润和半湿润地区,这是因为树木的生长对水分、光照等条件有一定的要求,大兴安岭的东侧近海,由于夏季风给东侧带来了水汽,年降水量在400 mm以上,光照充足,适宜树木的生长,东侧森林植被茂盛,覆盖率较高,林火的发生概率较大。大兴安岭山脉上有着我国面积最大的原始森林,面积约为8.46万km²,森林存在着许多易燃树种(白桦树和蒙古栎),白桦树树皮经常干枯脱落且含油脂较多,极易点燃;蒙古栎多生长在干燥山坡,冬季幼树的枝叶干枯而不脱落,容易燃烧。这2个地区的林区处于高寒区,同时人烟稀少,交通不便,一旦发生林火,很难被人们察觉,因此极易扩散蔓延。



(a) 林火年空间分布

(b) 林火月空间分布

图 4 林火空间分布

Fig. 4 Spatial distribution maps of forest fires

综合分析大兴安岭的年月空间变化可知,黑龙江大兴安岭地区自 2003 年 5 月起林火面积平缓变化,连续十多年无大面积的森林火灾;内蒙古呼伦贝尔市的林火多集中在每年的 3 月和 4 月,且防火紧要期是每年的春夏秋季。内蒙古地区的林火面积远远大于黑龙江地区的,大兴安岭地区冬长夏短,尤其黑龙江地带的冬季长达 7 个月以上且日照时间非常短,年平均气候为 $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$,有大面积的多年冻土区。

2.2.2 不同植被类型的林火分布特征

将大兴安岭森林类型分布与火烧迹地数据进行叠加,并提取不同植被类型的过火,统计各类型占总林区的比例,2002—2021 年大兴安岭森林火灾统计情况如表 2 所示。阔叶林作为大兴安岭的主要森林类型,占地面积较大且过火面积也较大。大兴安岭的气温较低,光照时间较短,阔叶有利于吸收光照,而冬天天气寒冷,加剧了脱落酸的分泌,故大兴安岭的阔叶林植被属落叶阔叶林,秋冬两季落叶提供了大量的可燃物质,导致阔叶林的过火区域较大。根据大兴安岭的植被抗火特性,兴安落叶松>白桦>二色胡枝子>平榛>黑桦>兴安杜鹃>山杨>蒙古栎^[24]。大兴安岭针叶林主要以兴安落叶松等抗火性较好的林种为主,研究区域频繁过火促进了山杨—兴安落叶松混交林的形成,而阳性且喜光树种山杨能够最先生长起来,故针叶林的面积占比虽大于混交林,但过火面积比之小。在其他林种中火烧迹地主要集中在多树草原和稀树草原,其中多树草原的过火最多,总占比高达 64%。原因在于大兴安岭林区 52% 都

是多树草原且植被为分布稀疏的白桦林和以兴安杜鹃为主的林下灌木,地势较平坦,在旱季易引起地下林火和森林火灾。

表 2 大兴安岭森林过火面积及森林类型分布

Tab. 2 Forest fire area and forest types distribution in the Greater Khingan Mountains

森林类型	过火面积/ $10^8\text{ } \text{hm}^2$	占总过火面 积的比例/%	森林类型 占比/%
阔叶林	3 453. 59	25. 33	18. 95
针叶林	110. 82	0. 81	7. 39
混交林	221. 63	1. 63	6. 64
其他林种	9 846. 31	72. 23	67. 03

2.3 森林植被恢复研究

统计大兴安岭森林区域的 GPP 数据(图 5)可知,2003 年由于特大森林火灾的发生导致 GPP 总产值、平均值都远低于其他年份,但灾后第一年就可以恢复到过火前水平,大兴安岭火灾的发生在整体上对森林的恢复影响有限,但是在区域上火烧迹地的恢复却有着明显的差异。为了避免重复过火对森林火灾后恢复的影响,统计 2002—2021 年间火灾发生的累计次数,其分布情况如图 6 所示,分析可知 20 a 内绝大多数地区仅发生 1 次过火,2 次过火区仅占小部分,多次重复过火的地区较少。综合图 5 和图 6 的结果,以 2003 年发生在呼伦贝尔市金河森林的特大森林火灾为研究区进行过火后森林恢复情况的研究。

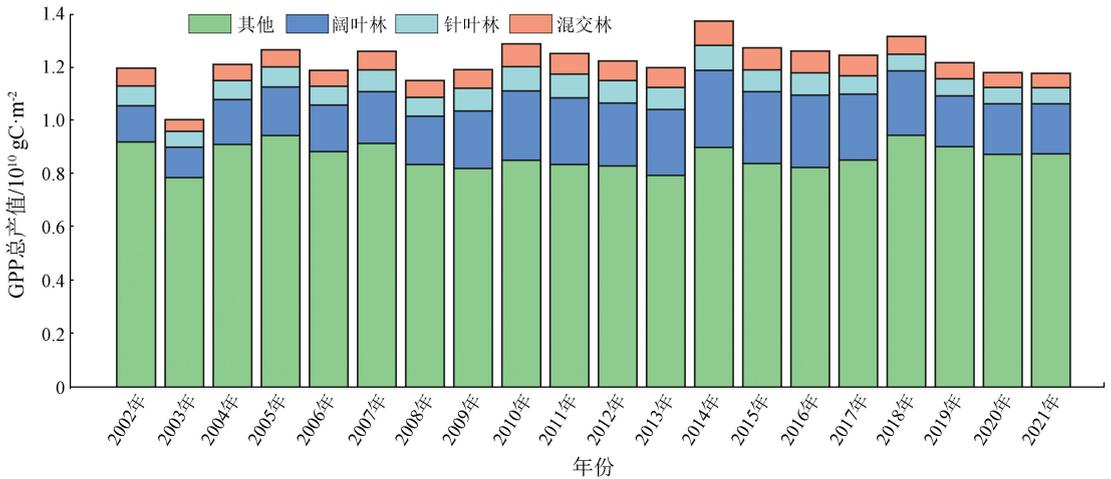


图 5 大兴安岭森林区域 GPP 变化趋势

Fig. 5 Trend of GPP in the Greater Khingan Mountains forest region

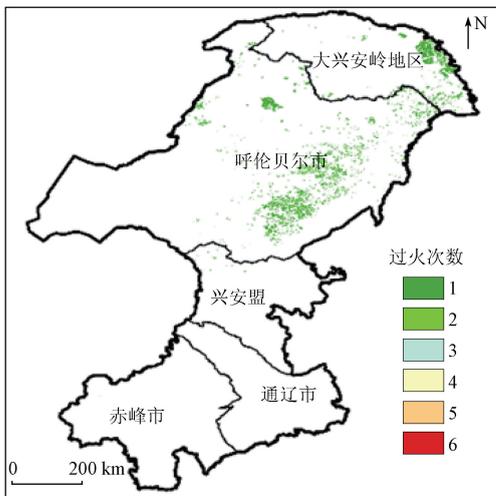


图 6 大兴安岭森林累积过火分布

Fig. 6 Distribution of cumulative forest overfire in Greater Khingan Mountains

2.3.1 过火区域的森林年度恢复分析

通过对森林区域的 GPP 进行统计,最大值多数出现在每年的 7 月份,选取 7 月份过火区域的森林 GPP 估算结果对森林恢复情况进行监测。从图 7 中可以看到,过火区和森林整体 2003 年 GPP 均值较 2002 年相比大幅度降低,灾后一年 GPP 数值大幅度提升,即 2004 年的数值就直接提升了近乎一倍。林火对森林造成破坏,但另一方面也对森林的生态平衡起到调整,林火燃烧造成的养分会对幼林以及灌木等生长起到促进作用,迅速形成新的植被群落。2007 年过火区的 GPP 均值基本上可以恢复到火烧前的状态,但远低于森林整体的均值数。2008—2011 年期间过火区和森林整体的 GPP 均值之间的差距逐渐减小,且过火区的 GPP 数值基本上维持在一个相对稳定的范围内。

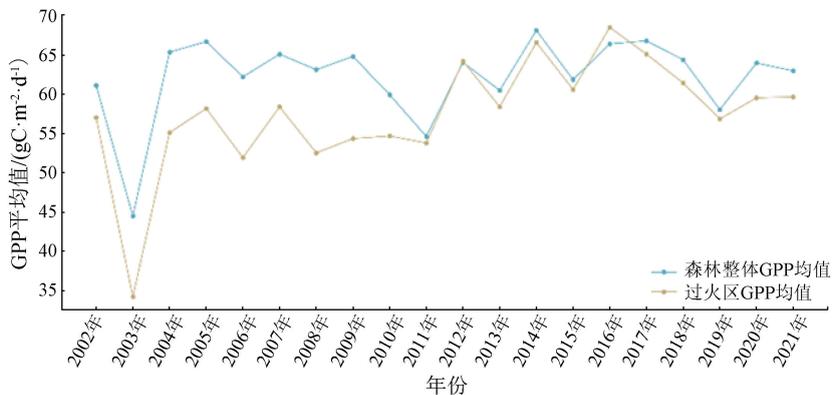


图 7 过火区和森林整体的 7 月份 GPP 均值对比

Fig. 7 Comparison of the average GPP values in July between the burned area and total forest area

2.3.2 森林植被类型的恢复分析

为了将火灾后形成的灌木等因素去除,统计了仅有阔叶林、针叶林和混合林的 3 种情况,表 3 为过

火区不同植被类型 7 月份的 GPP 总产值统计结果,图 8 为 GPP 的均值与误差条结果。不同植物由于自身的结构影响着其光能吸收量,如树干的高度、树

叶的形状等,因此对太阳能的固定量存在差异,对阳光较喜好的植被类型的 GPP 值增长速率会相对较快^[25],从表 3 可以看出,不同森林类型 GPP 总产值的增长变化趋势一致,2003 年过火后明显降低,在 2004 年大幅度增长后再缓慢增加。森林大火后可能导致混交林的结构发生改变,调整为阔叶林或针叶林,自然演替可能需要很长时间,可以看到在火灾发生之后的 18 a 中,混交林无论是 GPP 总产值还是所占比例都没有达到 2002 年的水平。针叶林 GPP 产值比例在火灾前后变化程度不大,但其总产值恢复到过火前水平需 6~7 a;阔叶林的 GPP 产值比例变化明显,其中阔叶林的产值比例在火灾后超过混交林,且阔叶林 GPP 总产值 3 a 左右可以恢复。阔叶林的叶片较大且树干较高,对阳光的吸收较好,环境适应能力强,故森林火烧后能够最先生长起来,从而使 GPP 的恢复速度快于其他森林类型,针叶林由于树冠稀疏,树叶稀少的特征导致其在 7 月份 GPP 增长慢于阔叶林。以 GPP 的总产值分析,3 种林型自遭受火灾后,再次恢复到 2002 年的 GPP 产值,需要至少 7 a 时间。

表 3 过火区不同植被类型 7 月份的 GPP 产值数据

Tab. 3 GPP production data of different vegetation types in the burned area in July

年份	GPP 总产值/($\times 10^4$ gC·m ⁻²)			总产值比例/%		
	针叶林	阔叶林	混交林	针叶林	阔叶林	混交林
2002 年	514.10	65.95	89.40	76.79	9.85	13.35
2003 年	288.27	36.97	41.04	78.70	10.09	11.20
2004 年	411.10	65.83	63.61	76.05	12.18	11.77
2005 年	414.72	73.28	67.79	74.62	13.18	12.20
2006 年	401.79	74.80	62.67	74.51	13.87	11.62
2007 年	480.75	88.55	74.85	74.63	13.75	11.62
2008 年	445.81	72.63	60.89	76.95	12.54	10.51
2009 年	504.37	79.85	59.84	78.31	12.40	9.29
2010 年	540.19	76.37	66.08	79.13	11.19	9.68
2011 年	515.82	70.04	49.75	81.15	11.02	7.83
2012 年	610.78	84.05	48.86	82.13	11.30	6.57
2013 年	542.83	82.75	38.45	81.75	12.46	5.79
2014 年	603.19	111.19	55.01	78.40	14.45	7.15
2015 年	559.94	106.39	54.86	77.64	14.75	7.61
2016 年	643.04	123.39	65.02	77.34	14.84	7.82
2017 年	480.60	111.90	67.15	72.86	16.96	10.18
2018 年	354.19	77.83	40.05	75.03	16.49	8.48
2019 年	353.97	58.06	32.85	79.57	13.05	7.38
2020 年	343.13	52.63	39.41	78.85	12.09	9.06
2021 年	347.30	52.51	39.17	79.12	11.96	8.92
均值	467.79	78.25	55.84	77.68	12.92	9.40

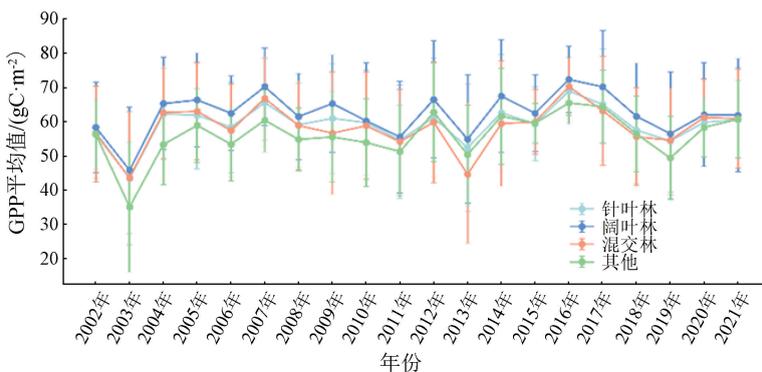


图 8 过火区不同植被类型 7 月份的 GPP 平均值与误差条形图

Fig. 8 Means and error bars of GPP in July for different vegetation types in the burned area

3 结论与讨论

MODIS 产品因其能准确提取火烧迹地信息而成为监测火灾及其恢复的重要手段。本研究使用 MCD12Q1 土地利用产品提取 2002—2021 年大兴安岭森林分布数据,在此基础上利用 MCD64A1 火烧迹地产品提取森林火点分布及过火面积来分析林火的时空分布格局,同时结合 MOD17A2H 总初级生产力数据来探究火灾后的森林恢复,在区域尺度上对森林变化进行分析,得出以下结论:

1) 森林过火面积与森林总面积存在弱相关性,过火面积的大小与气温、风向、当地的重视程度等密切相关。大兴安岭森林火灾次数在 2002—2021 年

间整体呈下降趋势,但火烧迹地面积不断波动,2003 年和 2008 年的过火次数和过火面积都处于一个较高的水平,2019 年的过火面积最小,这可能与当时的环境气候有关;从 2009 年起,森林过火面积基本维持在一个较低的水准。大兴安岭地区林火主要集中在春秋两季,其中 3 月和 5 月的过火面积和过火次数都较高,9 月的过火次数次之,但火烧迹地面积较低,这 3 个月是大兴安岭进行防火工作的重点时期,需做好详细的防火工作安排。

2) 2002—2021 年大兴安岭林火由东北向西南呈不均匀分布,东北部的黑龙江大兴安岭地区和中部的内蒙古呼伦贝尔市较多,中部的林火面积远大于东北部,但中部比东北部的林火发生更为频繁,极少量火烧迹地零散分布在其他 3 个地级市。阔叶林

作为大兴安岭的主要森林类型,过火区域较大,其次是混交林,最后是针叶林。

3) 统计 2003 年过火区域的 GPP 年变化值可以看出 GPP 具有明显的季节特征,且主要集中在每年的 3—10 月,且最大值多数在每年的 7 月份。过火区域植被需要经历将近 7 a 的时间才基本恢复,一般在过火后的第一年 GPP 数值恢复较快,在之后的几年中 GPP 的增长速率减慢且有时会略微降低。不同植被类型在火烧后的恢复速度不同,阔叶林的恢复速度较快,其次是针叶林,最后是混交林。

2020—2022 年这 3 a 间,疫情在一定程度上限制了人们的出行,这对大兴安岭人为火灾的数量产生了一定的影响。由于春游、外出旅游等活动的大量减少,根据 2020 年和 2021 年的统计结果大兴安岭的森林火灾次数持续降低,两者可能存在着较强的关联。

参考文献 (References):

- [1] 白夜,王博,武英达,等. 2021 年全球森林火灾综述[J]. 消防科学与技术,2022,41(5):705-709.
Bai Y, Wang B, Wu Y D, et al. A review of global forest fires in 2021[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(5): 705-709.
- [2] 马振宇,陈博伟,庞勇,等. 基于林火特征分类模型的森林火情等级制图[J]. 国土资源遥感,2020,32(1):43-50. doi:10.6046/gtzyyg. 20200107.
Ma Z Y, Chen B W, Pang Y, et al. Forest fire potential forecast based on FCCS model[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 43-50. doi:10.6046/gtzyyg. 20200107.
- [3] Sannigrāhi S, Pilla F, Basu B, et al. Examining the effects of forest fire on terrestrial carbon emission and ecosystem production in India using remote sensing approaches[J]. The Science of the Total Environment, 2020, 725:138331.
- [4] 陈艳英,马鑫程,徐彦平,等. 地形及 NDVI 在林火遥感监测二次识别中应用的方法探讨[J]. 自然资源遥感,2022,34(3):88-96. doi:10.6046/zrzyyg. 2021142.
Chen Y Y, Ma X C, Xu Y P, et al. Methods for the application of topography and NDVI in re-identification of remote sensing-based monitoring of forest fires[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(3): 88-96. doi:10.6046/zrzyyg. 2021142.
- [5] Li Q, Cui J, Jiang W, et al. Monitoring of the fire in Muli County on March 28, 2020, based on high temporal-spatial resolution remote sensing techniques[J]. Natural Hazards Research, 2021, 1(1): 20-31.
- [6] Pérez-Cabello F, Montorio R, Alves D B. Remote sensing techniques to assess post-fire vegetation recovery[J]. Current Opinion in Environmental Science and Health, 2021, 21:100251.
- [7] Marcos B, Gonçalves J, Alcaraz-Segura D, et al. Improving the detection of wildfire disturbances in space and time based on indicators extracted from MODIS data: A case study in northern Portugal [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78:77-85.
- [8] Morton D C, DeFries R S, Nagol J, et al. Mapping canopy damage from understory fires in Amazon forests using annual time series of Landsat and MODIS data[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(7):1706-1720.
- [9] Giglio L, Roy D P. Assessment of satellite orbit-drift artifacts in the long-term AVHRR FireCCI11 global burned area data set [J]. Science of Remote Sensing, 2022, 5:100044.
- [10] Roy D P, Li Z, Giglio L, et al. Spectral and diurnal temporal suitability of GOES Advanced Baseline Imager (ABI) reflectance for burned area mapping [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 96:102271.
- [11] Giglio L, Boschetti L, Roy D P, et al. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 217:72-85.
- [12] Zhao J, Wang J, Meng Y, et al. Spatiotemporal patterns of fire-driven forest mortality in China [J]. Forest Ecology and Management, 2023, 529:120678.
- [13] 俞昊天,耿君,艾达娜·哈克木,等. 2019—2020 年澳大利亚森林火灾遥感监测研究[J]. 测绘通报,2021(s1):165-169.
Yu H T, Geng J, Adana H, et al. Remote sensing monitoring of forest fires in Australia from 2019 to 2020 [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(s1): 165-169.
- [14] 曾爱聪,郭新彬,郑文霞,等. 基于 MODIS 卫星火点数据的浙江省林火时空动态变化特征[J]. 北京林业大学学报,2020,42(11):39-46.
Zeng A C, Guo X B, Zheng W X, et al. Temporal and spatial dynamic characteristics of forest fire in Zhejiang Province of eastern China based on MODIS satellite hot spot data [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(11): 39-46.
- [15] 崔阳,狄海廷,邢艳秋,等. 基于 MODIS 数据的 2001—2018 年黑龙江省林火时空分布[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2021,45(1):205-211.
Cui Y, Di H T, Xing Y Q, et al. Spatial and temporal distributions of forest fires in Heilongjiang Province from 2001 to 2018 based on MODIS data [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(1): 205-211.
- [16] Nolè A, Rita A, Spatola M F, et al. Biogeographic variability in wildfire severity and post-fire vegetation recovery across the European forests via remote sensing-derived spectral metrics [J]. Science of the Total Environment, 2022, 823:153807.
- [17] Hislop S, Haywood A, Jones S, et al. A satellite data driven approach to monitoring and reporting fire disturbance and recovery across boreal and temperate forests [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 87:102034.
- [18] Qin Y, Xiao X, Wigneron J P, et al. Large loss and rapid recovery of vegetation cover and aboveground biomass over forest areas in Australia during 2019 - 2020 [J]. Remote Sensing of Environment, 2022, 278:113087.
- [19] 田晓瑞,代玄,王明玉,等. 多气候情景下中国森林火灾风险评估[J]. 应用生态学报,2016,27(3):769-776.
Tian X R, Dai X, Wang M Y, et al. Forest fire risk assessment for China under different climate scenarios [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(3): 769-776.
- [20] 刘星光,闫中帅. 2003 年大兴安岭春季森林火灾前期气象条件分析[J]. 黑龙江气象,2003,20(4):29-30.
Liu X G, Yan Z S. Analysis of meteorological conditions in the early stage of spring forest fire in Daxing'anling in 2003 [J]. Hei-

- longjiang Meteorology, 2003, 20(4): 29–30.
- [21] 吴志伟, 常禹, 贺红土, 等. 大兴安岭呼中林区林火时空分布特征分析[J]. 广东农业科学, 2011, 38(5): 189–193.
Wu Z W, Chang Y, He H S, et al. Analyzing the spatial and temporal distribution characteristics of forest fires in Huzhong area in the Great Xing'an Mountains[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 38(5): 189–193.
- [22] 朱贺, 张珍, 杨淞, 等. 中国南北方林火时空分布及火险期动态变化特征——以黑龙江省和江西省为例[J]. 生态学报, 2023, 42(1): 198–207.
Zhu H, Zhang Z, Yang S, et al. Temporal and spatial distribution of forest fire and the dynamics of fire danger period in southern and northern China: A case study in Heilongjiang and Jiangxi Provinces [J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(1): 198–207.
- [23] 萨如拉, 周庆, 刘鑫晔, 等. 1980—2015年内蒙古森林火灾的时空动态[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(2): 137–143.
Sa R L, Zhou Q, Liu X Y, et al. Studies on the spatial and temporal dynamics of forest fires in Inner Mongolia from 1980 to 2015[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2019, 43(2): 137–143.
- [24] 张恒, 敖子琦, 乌日汉, 等. 内蒙古大兴安岭主要乔灌木种理化性质及抗火性研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(4): 61–67.
Zhang H, Ao Z Q, Wu R H, et al. Study on physicochemical properties and fire-resistance of main tree and shrub species in Daxing'an Mountains, Inner Mongolia [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2020, 40(4): 61–67.
- [25] 张玉红, 闫浩. 森林火灾后植被恢复的遥感监测[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(2): 127–136.
Zhang Y H, Yan H. RS monitoring of vegetation restoration after forest fire [J]. Journal of Natural Disasters, 2022, 31(2): 127–136.

Exploring the spatio-temporal variations and forest restoration of burned zones in the Great Xing'an Range based on MODIS time series data

WANG Jian¹, DU Yuling¹, GAO Zhao², LYU Haiyan¹, SHI Lei¹

(1. College of Information and Management Science, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450046, China;

2. The First Geodetic Survey Team of the Ministry of Natural Resources, Shaanxi Bureau of Surveying, Mapping and Geoinformation, Xi'an 710054, China)

Abstract: Forest fires are one of the most significant disturbance factors affecting forest ecosystems. Exploring their spatio-temporal variations and forest restoration holds certain sociological and ecological significance. The Great Xing'an Range, possessing the largest primitive area in China, is a key area suffering frequent forest fires. Hence, this study extracted the distribution information of burned zones in the Great Xing'an Range from 2002 to 2021 from the MODIS time series products involving burned zones, land cover, and gross primary productivity (GPP). Moreover, it statistically analyzed the post-fire forest restoration. The results show that: ① Fires in the forest area of the Great Xing'an Range showed an overall downward trend from 2002 to 2021, but the burned areas showed fluctuating changes. Both the burned area and fire frequency were the highest in 2003, followed by 2008, with the lowest burned area seen in 2019; ② Forest fires occurred primarily in spring and autumn, with the highest burned area and fire frequency in March and the second highest fire frequency in September; ③ Forest fires manifested an uneven spatial distribution from northeast to southwest, predominantly in the Great Xing'an Range within Heilongjiang and Hulunbuir City of Inner Mongolia. Moreover, the forest fire area in Inner Mongolia far exceeded that in Heilongjiang. The analysis of forest types in burned zones reveals that the burned areas decreased in the order of broad-leaved, mixed, and needle-leaved forests. According to the time series analysis of GPP in burned zones, GPP values recovered the fastest in the first year post-fire, but it took nearly seven years to recover to the pre-fire growth level. Different forest types manifested significantly distinct post-fire restoration rates, which decreased in the order of broad-leaved, needle-leaved, and mixed forests. Overall, ascertaining the spatio-temporal distribution of forest fires can provide data support for the arrangement and adjustment of fire prevention and control efforts, while investigating the post-fire forest restoration can provide a scientific basis for the rehabilitation and sustainable development of forests.

Keywords: forest fire; Great Xing'an Range; burned zone; forest restoration; MODIS

(责任编辑: 陈昊旻)