

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170402

# 新巴尔虎草原火时空分布特征及对气象因子响应

官大鹏 康峰峰 刘晓东

(北京林业大学林学院, 北京 100083)

**摘要:**【目的】草原火是草原生态系统重要的干扰因子,严重影响着系统的结构与功能。新巴尔虎草原是我国重要的草原生态系统,随着极端气候事件的频发,加剧了该地区发生重特大草原火灾的可能性。本研究可为草原火的火险区划和管理提供科学依据。【方法】本研究基于遥感影像,借助地理信息系统和 ENVI 等软件,分析了 2001—2016 年新巴尔虎草原火时空特征,并结合气象数据,探讨草原过火面积对气象因子的响应特性。【结果】新巴尔虎草原火在时间和空间上呈现规律性分布。在时间上,过火面积年变化存周期性变化规律,2003 年和 2013 年分别出现过火面积峰值,周期间隔 10 年;过火面积月变化差异明显,过火面积集中在 4、5 月和 9、10 月,时间对应研究区域火灾频发的春秋两季;在空间上,高频度火灾发生区域全部分布于国境线附近,越境火灾风险比较大。草原火过火面积与气象因子有着密切关系。在月平均气温为 0~10℃、月总降水量在 0~20 mm、月平均相对湿度 40% 以下及月平均风速大于 5 m/s 的区域最利于草原火灾的发生和蔓延。【结论】新巴尔虎草原火预防工作在区域上应集中在新巴尔虎草原西部、东南部和东北部地区,加强边境地区草原火的监测和管理。在时间上应关注每年 4、5 月和 9、10 月,特别是月平均气温 0~10℃、月总降水量 0~20 mm、月平均相对湿度 40% 以下及月平均风速大于 5 m/s 的地区。未来可从更长的时间和更广的空间尺度来对草原火的发生周期进行模拟和预测,更有效地探究野火的长期动态变化规律及其影响因素。

**关键词:**草原火; MODIS; 时空特征; 气象因子

**中图分类号:**S762.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2018)02-0082-08

**引文格式:**官大鹏,康峰峰,刘晓东.新巴尔虎草原火时空分布特征及对气象因子响应[J].北京林业大学学报,2018,40(2):82-89. Gong Da-peng, Kang Feng-feng, Liu Xiao-dong. Spatial and temporal distribution patterns of grassland fire and its response to meteorological factors in XinBarag Prairie of northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(2): 82-89.

## Spatial and temporal distribution patterns of grassland fire and its response to meteorological factors in XinBarag Prairie of northwestern China

Gong Da-peng Kang Feng-feng Liu Xiao-dong

(College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** [Objective] Grassland fire is a key disturbance factor in natural ecosystems and it greatly influences ecosystem structure and function. XinBarag Prairie of northwestern China is one of the important grassland ecosystems in China. With the frequent occurrence of extreme weather events, more extra serious wildfires will occur in this region. This study could provide a scientific basis for zoning grassland fire risks and wildfire management. [Method] In this study, the spatial and temporal patterns of wildfires in XinBarag Prairie were analyzed using statistical software, GIS and ENVI based on MODIS

收稿日期: 2017-11-14 修回日期: 2017-12-28

基金项目: 国家重点研发计划子课题(2017YFD0600106-1), 国家自然科学基金项目(31270696), 国家林业局项目“火对内蒙古达赉湖鹤类栖息地影响评价及改造试点”。

第一作者: 官大鹏. 主要研究方向: 生态学. Email: dp\_gong@bjfu.edu.cn 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者: 康峰峰, 讲师. 主要研究方向: 生态学. Email: phoonkong@163.com 地址: 同上. 刘晓东, 副教授. 主要研究方向: 生态学. Email: xd\_liu@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

data from 2001 to 2016. Through the integration of meteorological data, the impact of meteorological factors on the characteristics of monthly variations in grassland fire was investigated. [ **Result** ] XinBarag Prairie had regular distribution in the spatial and temporal patterns of wildfires. In the temporal patterns, annual burned area had a fluctuation period of 10 years generally in the whole region. The monthly burned area had significant differences among various months and the burned area was mainly distributed in April, May, September and October. The time corresponds to spring and autumn, in which fire disaster occurred frequently. In spatial patterns, the high frequencies of wildfires were all widely distributed near the country's borders. The large-scale fires crossing the border line will pose a serious threat to the steppe in China; There were close relations between grassland fire and meteorological factors. Grassland fires easily occurred and spreaded in areas with monthly average temperature ranged between 0 and 10 °C, monthly total rainfall ranged between 0 and 20 mm, monthly mean relative humidity was below 40% and monthly mean wind speed was above 5 m/s. [ **Conclusion** ] The preventing region of grassland fire in XinBarag Prairie should concentrate in its western, southeastern and northeastern regions, and the monitoring and management of grassland fire in border region should be strengthened. In time, we should concern April, May, September and October, especially the areas with monthly average temperature between 0 and 10 °C, monthly total rainfall between 0 and 20 mm, monthly mean relative humidity below 40% and monthly mean wind speed above 5 m/s. In addition, future research will focus on the fluctuation period of grassland fire from longer temporal and wider spatial scale to explore the dynamic change of wildfires and its influencing factors more effectively.

**Key words:** grassland fire; MODIS; spatial and temporal pattern; meteorological factor

草原火是自然环境中重要的干扰因子之一<sup>[1]</sup>,随着全球气温的升高,火干扰的频率、破坏性会升高,干扰持续时间也随之变长<sup>[2]</sup>,影响着生态系统的物质循环、能量流动和信息传递,极易导致草原生态的退化<sup>[3]</sup>,给牧区经济尤其是畜牧业带来了巨大损失<sup>[4]</sup>。因此开展草原火时空分布格局及影响因子研究有助于揭示火干扰的自燃成因及对生态系统各种生态过程的影响,对草原生态系统植被的恢复与管理具有一定的指导意义。

传统的火烧迹地信息主要来源于统计数据<sup>[5-9]</sup>,如王明玉等<sup>[10]</sup>利用美国和中国林火历史统计数据,计算每年火场质心的经纬度,结合波谱分析探讨了林火质心随时间的波动现象。苏立娟等<sup>[11]</sup>根据年鉴数据,借助聚类分析、主成分分析及信息扩散理论,探讨中国 1950—2010 年森林火灾时空分布格局及风险状况。传统方法难以覆盖较大的区域,数据收集较为困难,且难以将数据空间量化。遥感技术的发展为解决这一问题提供了很好的手段,利用卫星遥感数据估测区域或全球的森林草原火灾面积是当前比较可靠的方法,特别是具有高空间、时间分辨率的遥感影像的出现,使得众多学者将目光从火灾统计数据转向利用多源遥感数据对火灾长时间序列的监测。目前对于火灾的遥感监测手段较多,主要包括环境卫星<sup>[12-13]</sup>、MODIS 数据<sup>[14-18]</sup>及 NOAA-AVHRR 数据等<sup>[19-21]</sup>不同监测目的遥感数

据。而在基于遥感的火烧迹地提取中目前应用较广泛的方法有火灾前后 NDVI 差值法<sup>[22]</sup>、NDVI 回归分析方法<sup>[23]</sup>、HANDS 方法<sup>[24]</sup>和时间序列合成数据提取火灾迹地方法<sup>[25]</sup>。这些方法都使用了 NOAA-AVHRR 数据,该数据无法满足长时序的连续观测,加上辐射的不稳定性和云污染等影响<sup>[26-27]</sup>,致使提取的火烧迹地信息存在一定的误差。较之 NOAA-AVHRR 数据,MODIS 数据在这些方面都得到了很大的改善,有着时间分辨率高、针对性强等特点。而基于 MODIS 数据的火灾研究主要包括火点监测与火烧迹地提取两类<sup>[28]</sup>,如 Li 等<sup>[29]</sup>利用 MOD14A1/MYD14A1 数据研究土地利用对火点发生频率的影响,主要获取了火灾发生的时间以及位置信息,虽然也可以产生火烧迹地信息,但结果并不可靠<sup>[30]</sup>。而 MODIS 数据陆地产品 5 系列中的 MCD45/MCD64 数据,是 NASA 推出的 MODIS 标准火烧迹地产品,主要用于研究过火面积。

内蒙古呼伦贝尔地区有着我国最重要的草原生态系统,也是目前人类活动影响最为严重的区域。尤以西部新巴尔虎草原草地覆盖面积大、分布连续,易燃物储量多,火灾风险高,对于该区域的野火分布格局及其在自然生态系统中的作用研究较少。同时随着极端气候事件的频发,加大了极端高温干旱等地区的火灾频发及发生重大森林草原火灾的可能性<sup>[31]</sup>,因此气象要素对火灾发生发展产生重要影

响。因此本文基于 MODIS 数据,分析了该地区草原火灾时空分布特征及气象影响因子,为研究区域草原火灾预警监测及防灾减灾工作提供一定的科学依据。

## 1 研究区概况

本文研究区域为内蒙古呼伦贝尔地区的新巴尔虎草原,行政区域涵盖新巴尔虎左旗、新巴尔虎右旗以及满洲里,研究区属呼伦贝尔盟西部中俄蒙三国交界处,北部与俄罗斯相接,西部和南部与蒙古国接壤,内有达赉湖自然保护区,主要河流乌尔逊河,位于草原中部、达赉湖南侧,由北向南平分草原。地区海拔 650~700 m,坡度比较平缓。研究区属于中温带大陆性草原气候,降水量小,季节分配不均,最高、最低温度出现在夏季和冬季,年平均气温 0.7℃,年均降水量 300 mm 左右,降水集中在 7—8 月份,土壤类型以栗钙土为主。生态系统植被资源丰富,主要的植被群落有贝加尔针茅(*Stipa baicalensis*)群落,线叶菊(*Filifolium sibiricum*)群落和羊草(*Leymus chinensis*)群落。新巴尔虎地区牧草茂密且集中连片,春秋两季枯枝落叶丰厚,气候干旱,极易发生草原火。

## 2 数据与研究方法

### 2.1 数据源

研究所用遥感数据从美国国家航空航天局的地球科学数据中心(<https://earthdata.nasa.gov/>)下载的中分辨率成像光谱仪(MODIS 传感器)的火产品数据 MCD45A1,此数据以 500 m 分辨率的月产品形式发布<sup>[32]</sup>。本产品是由 Terra 和 Aqua 两个卫星平台联合搭载的和日地表反射率的时间序列产生的数据<sup>[33]</sup>,因此对火烧迹地的全局映射是特别发达的<sup>[34]</sup>。MCD45A 数据提供给用户各种质量评估信息和每个像素的质量评估得分,能够预估研究区内总过火面积。时间范围 2001—2016 年,数据格式为 HDF,投影类型为 Sinusoidal,整个研究区由 2 景影像覆盖(分幅号:h25v4/h26v4),共计 384 景。

研究所需气象站数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括研究区各气象站点每月的平均气温、总降水量、相对湿度和平均风速等。同时收集整理研究区域 2010—2016 年的火灾统计数据,包括火灾发生的时间、地点、经纬度信息、过火面积、火因以及扑救情况等,数据来源为呼伦贝尔市林业局。

### 2.2 研究方法

#### 2.2.1 MODIS 数据处理

利用 MRT 转换工具做批量 MODIS 图幅拼接及

投影转换,将原有的 Sinusoidal 投影坐标转换为适合中国地区的 Albers 等积割圆锥投影,利用 ENVI/IDL 软件进行批量剪裁并提取 MCD45A1 中 Burntdata 数据。Burntdata 包含过火像元及着火日期,其中着火日期采用儒略日表示(表 1)。基于 ArcGIS 软件,运用统计方法统计出 2001—2016 年过火面积、火灾发生频次等数据。

表 1 MCD45A1 数据集属性值

Tab. 1 Property values of MCD45A1 data set

属性值 Property value	含义 Meaning
0	未燃烧区域 Unburned area
1~366	燃烧儒略日 Approximate Julian day of burning
900	雪或高气溶胶区域 Snow or high aerosol area
9 998	内陆水体 Inland water body
9 999	海洋水体 Sea water body
10 000	数据缺失区域 Data deficiency area

#### 2.2.2 MODIS 提取结果验证

由于验证数据仅提供了火灾发生的位置,因而不能对提取结果进行空间化(逐像元)的误差分析。因此,利用 2010—2016 年历史火灾发生的面积,对基于 MODIS 数据提取的结果进行精度验证。

表 2 可以看出,基于 MODIS 数据提取的年过火面积均大于历史火灾统计数据,总体精度达到 83.4%,其中 2011 年精度高达 96.3%,表明基于遥感提取的过火面积与林业部门统计数据基本保持一致;其次 2012 年与 2015 年面积验证精度同样高达 90% 以上。验证数据均低于基于遥感提取的火灾数据,分析原因在于 2010—2016 年有部分火烧迹地分布于中蒙边境线上,历史统计数据对于边境线附近发生的草原火灾,记录较少。而基于遥感影像的火灾统计数据,能够准确涵盖矢量边界范围内所有的火点像素值,因此基于遥感提取的过火面积均高于验证数据。而不同年度边境火灾规模存在差异,进而影响到验证精度的差异。从精度上看,基于 MODIS 数据提取的火烧迹地信息与实际火灾信息非常接近,因此可以根据提取结果进行宏观的分析研究。

#### 2.2.3 空间分析

由过火面积和频次数据获得研究区的火烧迹地分布特征、过火面积的年际和年内变化等信息,通过分析上述数据,开展新巴尔虎草原 2001—2016 年的过火面积时空分布特征研究。并结合历史气象数据,运用 ArcGIS 空间分析模块(spatial analyst)研究过火面积与气象因子之间的密切关系。本文在进行

表2 过火面积提取验证表

Tab. 2 Extraction and verification table of burned area

项目 Item	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2010—2016年
	Year 2010	Year 2011	Year 2012	Year 2013	Year 2014	Year 2015	Year 2016	Year 2010—2016
历史火灾面积/hm <sup>2</sup> Historical burned area/ha	4 819.83	11 534.40	23 738	28 302.67	19 883.16	27 614.40	9 971.70	125 864.16
提取火灾面积/hm <sup>2</sup> Extracted burned area/ha	6 575	11 975	26 075	35 175	26 800	30 525	13 800	150 925
验证精度 Verifying accuracy/%	73.3	96.3	91.0	80.5	74.2	90.5	72.3	83.4

空间统计分析之前,对各个气象因子进行等级划分,划分依据如下:

根据研究区内3个气象站点月数据,获取新巴尔虎草原的月平均气象要素,并划分为5个等级。月平均气温:Ⅰ级(-10℃以下)、Ⅱ级(-10~0℃)、Ⅲ级(0~10℃)、Ⅳ级(10~20℃)、Ⅴ级(20℃以上);月总降水量:Ⅰ级(0~20mm)、Ⅱ级(20~40mm)、Ⅲ级(40~60mm)、Ⅳ级(60~80mm)、Ⅴ级(80mm以上);月平均相对湿度:Ⅰ级(40%以下)、Ⅱ级(40%~50%)、Ⅲ级(50%~60%)、Ⅳ级(60%~70%)、Ⅴ级(70%以上);月平均风速:Ⅰ级(2m/s以下)、Ⅱ级(2~3m/s)、Ⅲ级(3~4m/s)、Ⅳ级(4~5m/s)、Ⅴ级(5m/s以上)。

### 3 结果和分析

#### 3.1 空间分布特征

根据统计结果,2001年到2016年,整个新巴尔虎草原总过火面积为281 875 hm<sup>2</sup>,研究区涵盖的3个行政区:满洲里、新巴尔虎右旗和新巴尔虎左旗过火面积分别为14 493、118 251和149 131 hm<sup>2</sup>,占比分别为5.1%、42.0%和52.9%。新巴尔虎草原中部火烧迹地分布较少,主要原因新巴尔虎草原中部有达赉湖自然保护区分布,人为保护加强,干扰减少,不利于草原火灾的发生和蔓延;大部分过火面积主要分布在研究区与蒙古国和俄罗斯交界处,可能原因在于蒙古国和俄罗斯境内的草原火灾频发,越境火灾的风险比较大<sup>[32]</sup>。

依据过火频次统计结果,可以将研究区内划分为2个火灾频度区:(1)低频度火灾发生区,主要位于新巴尔虎地区中部,火烧迹地分布较少,且2001—2016年火灾发生的频次基本全部1~2次。(2)高频度火灾发生区,全部分布于国境线附近,主要位于研究区与俄罗斯交界的东北部,以及与蒙古国交界的西部和东南部。16年内国境线附近火灾发生次数达6~8次,甚至同一个像元上发生9次以上草原火灾。

#### 3.2 时间分布特征

##### 3.2.1 过火面积年变化特征

图1反映了2001—2016年新巴尔虎草原过火

面积年变化趋势,同时每年过火面积按照行政区域划分为3个部分。2001—2016年间研究区过火面积存在明显的年际变化差异。2003、2012、2013、2014以及2015年的过火面积比较高,分别为43 475、26 075、35 175、26 800和30 525 hm<sup>2</sup>,全部高于年平均过火面积17 617.2 hm<sup>2</sup>,其他年份的过火面积均小于年均值,其中2007年的过火面积最低,为6 400 hm<sup>2</sup>。2001—2016年过火面积年际变化存在一定周期性变化规律。2001—2010年,新巴尔虎草原过火面积呈现先增后减趋势,其中2003年达到最大值;2010—2013年火灾面积呈现递增趋势,2013年再次达到峰值,2013年以后火灾面积开始减少,两次过火面积峰值间隔10年,表现出周期性变化规律。

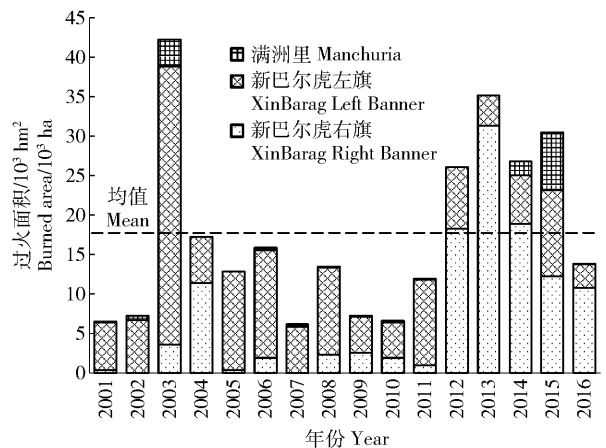


图1 2001—2016年新巴尔虎草原过火面积年变化趋势

Fig. 1 Annual changing trend of burned area in XinBarag Prairie from 2001 to 2016

2001—2016年,新巴尔虎草原总过火面积为281 875 hm<sup>2</sup>,研究区涵盖的3个行政区:满洲里、新巴尔虎左旗和新巴尔虎右旗过火面积分别为14 493、149 131和118 251 hm<sup>2</sup>。从年际变化图上可以看出,2001—2011年,年过火面积主要集中在新巴尔虎左旗(2004年除外)。而2011年以后,年过火面积则集中分布在新巴尔虎右旗。而满洲里则在2001—2016年始终分布较少的过火面积,这与其行政区划面积较小有着直接关系。因此在不同时间段和不同区域,过火面积因受到人为和环境因素影响而存在差异性。

### 3.2.2 过火面积月变化特征

图2反映了2001—2016年的研究区过火面积月变化趋势,可以看出4月份为新巴尔虎草原过火面积最大的月份,累计高达99 050 hm<sup>2</sup>,占总过火面积的35.1%,此时新巴尔虎草原正处于春季干燥时期,正是该地区发生火灾最频繁的月份。随后过火面积显著下降,8月份达到最低值5 725 hm<sup>2</sup>,主要原因在于5—8月份新巴尔虎草原植被处于迅速生长期,植被茂盛,含水量高,不利于草原火灾的发生和蔓延。而8月份以后草地植被逐渐枯萎,可燃物积累,同时伴随有利于火灾发生和蔓延的气象条件,致使过火面积再次上升,10月份再次达到峰值,过火面积46 100 hm<sup>2</sup>。统计结果显示2001—2016年新巴尔虎地区每年1、2、11、12月未发生过草原火灾,过火面积全部为0,该段时间新巴尔虎草原正处于冬季,温度较低,地表有积雪,不利于火灾的发生。

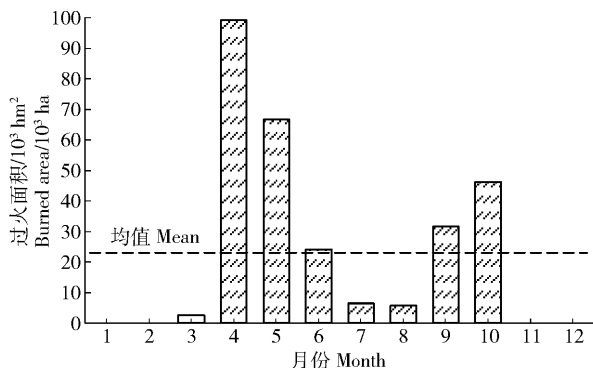


图2 2001—2016年新巴尔虎草原过火面积月变化趋势

Fig. 2 Monthly changing trend of burned area in XinBarag Prairie from 2001 to 2016

### 3.3 过火面积与气象因子关系

火灾作为一种自然灾害,其发生、蔓延受各种环境因子的影响,如地形、气温、降水、风速以及植被类型等。新巴尔虎草原地势平缓开阔,多为平原草原地貌,在其范围内分布最广的地带性植被类型为典型草原,因此研究区域海拔地形以及植被类型的变化差异较小,对于草原火的发生和蔓延影响并不显著。选取平均气温、降水量、相对湿度和风速等气象因子为研究对象,基于ArcGIS进行统计,探讨与草原火月平均过火面积的关系(图3)。

同一气象因子不同等级下月平均过火地面积存在明显差异。2001—2016年,新巴尔虎草原月平均气温在0~10℃(Ⅲ级)时,更容易发生草原火灾,过火面积为5 176 hm<sup>2</sup>,占比达到61.8%。而在月平均气温0℃以下(Ⅰ、Ⅱ级)时,过火面积几乎为0,在10℃以上(Ⅳ、Ⅴ级)时,过火面积同样较小。

而月总降水量对过火面积的影响更加明显,随

着月总降水量的增加,月平均过火面积呈现显著减少的趋势。其中月总降水量在0~20 mm(Ⅰ级)之间,过火面积达到最大值,为1 760 hm<sup>2</sup>。月总降水量处于60~80 mm时,过火面积最少。

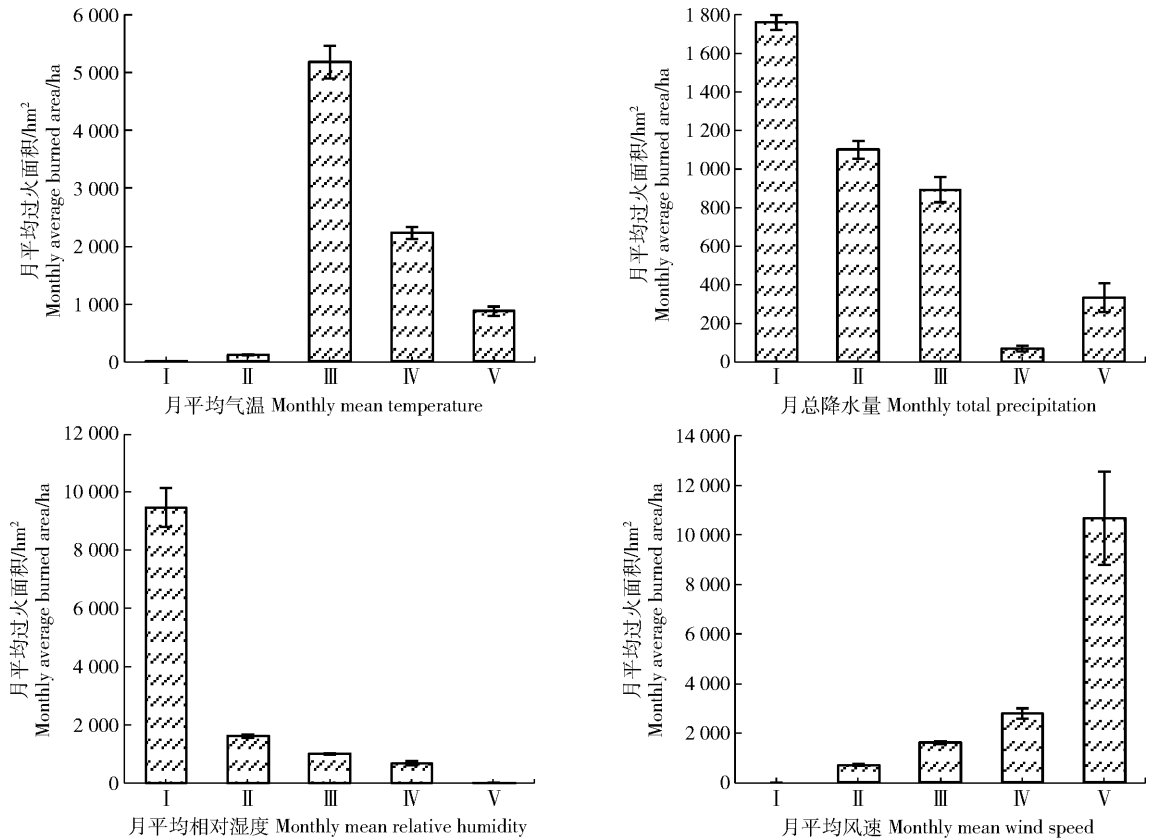
过火面积对相对湿度更为敏感。月平均相对湿度在40%以下(Ⅰ级),最容易发生草原火灾,过火面积为9 435 hm<sup>2</sup>,占比高达74.2%。随着相对湿度的增加,过火面积逐渐减少,到达70%以上(Ⅴ级)时,几乎很少有火灾发生。

风速有助于草原火的蔓延,随着平均风速的增加,过火面积呈显著增加趋势。风速小于2 m/s(Ⅰ级)时,基本未发生草原火灾。在风速大于5 m/s(Ⅴ级)时,过火面积达到最大值,为10 658 hm<sup>2</sup>。

## 4 结论与讨论

研究基于MODIS数据,利用ArcGIS统计分析功能获取2001—2016年整个研究区的过火面积与过火频次等数据,以同时期历史火灾统计数据进行精度验证,对新巴尔虎草原火进行时空分布特征分析;并结合历史气象数据,分析过火面积与气象因子之间的密切关系。研究发现基于MODIS数据提取的年过火面积均大于历史火灾统计数据,总体精度达到83.4%,其中2011年精度高达96.3%,表明基于遥感提取的过火面积与林业部门统计数据基本保持一致。与杨伟等<sup>[35]</sup>关于林火研究相比,MODIS数据提取过火面积精度提高很大,主要原因在于草原火灾极易被遥感识别火场边界,而对于地表火和地下火等被树冠遮掩的森林火灾则很难精确识别。因此具有空间分辨率适中、时间分辨率高、数据获取简单等特点的MODIS数据,非常适合大面积草原火的研究。

新巴尔虎草原过火面积在时间和空间上呈现规律性分布。2001—2016年新巴尔虎草原受火灾影响较为严重,总过火面积高达28.2万hm<sup>2</sup>,平均每年过火面积1.76万hm<sup>2</sup>。在时间上,过火面积年际变化存在一定周期性变化规律,2003年和2013年分别达到过火面积峰值,周期间隔10年。基于气候特点和植被特征,使得新巴尔虎草原火灾的发生具有明显的季节性,过火面积集中在4、5月和9、10月,时间对应该地区火灾频发的春秋两季<sup>[36]</sup>。春季,随着草原地区积雪逐渐融化,高温、大风天气增多,进入草原火灾高发期;秋季草原植被开始枯黄,降雨减少,较易发生草原火灾。在空间上,新巴尔虎草原高频度火灾发生区全部分布于国境线附近,主要位于研究区与蒙古国交界的西部、东南部,以及与俄罗斯交界的东北部。原因在于蒙古国和俄罗斯境



月平均气温 I、II、III、IV、V 级分别为  $-10^{\circ}\text{C}$  以下、 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ 、 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 、 $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 、 $20^{\circ}\text{C}$  以上；月总降水量 I、II、III、IV、V 级分别为  $0\sim 20\text{ mm}$ 、 $20\sim 40\text{ mm}$ 、 $40\sim 60\text{ mm}$ 、 $60\sim 80\text{ mm}$ 、 $80\text{ mm}$  以上；月平均相对湿度 I、II、III、IV、V 级分别为  $40\%$  以下、 $40\%\sim 50\%$ 、 $50\%\sim 60\%$ 、 $60\%\sim 70\%$ 、 $70\%$  以上；月平均风速 I、II、III、IV、V 级分别为  $2\text{ m/s}$  以下、 $2\sim 3\text{ m/s}$ 、 $3\sim 4\text{ m/s}$ 、 $4\sim 5\text{ m/s}$ 、 $5\text{ m/s}$  以上。Grade I, II, III, IV, V of monthly mean temperature are below  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$ ,  $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ ,  $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ , above  $20^{\circ}\text{C}$ , respectively. Grade I, II, III, IV, V of monthly total precipitation are  $0\sim 20\text{ mm}$ ,  $20\sim 40\text{ mm}$ ,  $40\sim 60\text{ mm}$ ,  $60\sim 80\text{ mm}$  and above  $80\text{ mm}$ , respectively. Grade I, II, III, IV, V of monthly mean relative humidity are below  $40\%$ ,  $40\%\sim 50\%$ ,  $50\%\sim 60\%$ ,  $60\%\sim 70\%$ , above  $70\%$ , respectively. Grade I, II, III, IV, V of monthly mean wind speed are below  $2\text{ m/s}$ ,  $2\sim 3\text{ m/s}$ ,  $3\sim 4\text{ m/s}$ ,  $4\sim 5\text{ m/s}$ , above  $5\text{ m/s}$ , respectively.

图3 过火面积与气象因子关系

Fig. 3 Correlations between burned area and meteorological factors

内的草原火灾频发,越境火灾的风险比较大<sup>[32]</sup>,根据 2010—2016 年历史火灾统计数据,研究区发生数起境外火引发的草原火灾,外来火(源)发生次数虽然较少,但过火面积较大,占总过火面积近三分之一。这类火源与其他火源相比,极易形成火势较大的火场,其能量等级远远大于其他种类火源<sup>[37]</sup>,因此新巴尔虎草原更应加强边境地区草原火的监测和管理。

草原火灾的发生和蔓延与气象因子有很密切的关系。研究表明不同气象因子等级下过火面积存在明显差异,气温过高过低均不适宜草原火灾的发生和蔓延,最适宜月平均气温在  $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。这个气温区间,植物刚过生长季或者处于枯死状态,地表凋落物增加,释放可燃气体<sup>[38]</sup>,容易发生火灾<sup>[39]</sup>。而月总降水量对过火面积的影响更加明显,随着月总降水量的增加,月平均过火面积呈现显著减少的趋势;

但在月总降水量大于  $80\text{ mm}$  时出现增加趋势,因此降水量与过火面积并非简单的线性关系,与胡海清等<sup>[40]</sup>研究林火特征与气候因子之间关系,基本一致。过火面积对相对湿度更为敏感,月平均相对湿度在  $40\%$  以下,最容易发生草原火灾,而到达  $70\%$  以上,几乎没有火灾发生。随着平均风速的增加,过火面积呈显著增加趋势,风速不仅影响森林火灾的发生,而且直接影响火灾的蔓延,风速越大,火灾越易蔓延<sup>[41]</sup>。

由于 MODIS 数据仅可以提取火灾时间、位置和过火面积信息,因此在探究新巴尔虎草原野火的时空变化特征时仅考虑过火面积和过火频次的分布特征,并未涉及火灾发生次数、火烧强度等。今后可从更长的时间和更广的空间尺度来对草原火的发生周期进行模拟和预测,更有效地探究野火的长期动态变化规律,或结合主观因素(火灾起因等)和其他客

观因素(地理因素等),综合分析其对火灾发生和蔓延的影响。

### 参 考 文 献

- [1] 雒瑞森. 全球火格局的时空变异及其机理分析[D]. 杭州:浙江大学, 2013.  
Luo R S. Global analysis of spatial and temporal variations of fire patterns and the mechanisms [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [2] Li Z, Fraser R, Jin J, et al. Evaluation of satellite-based algorithms for fire detection and mapping within North America[J/OL]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(D2): 4076 [2017-05-11]. www.researchgate.net/publication/24611.DOI:10.1029/2001JD001377.
- [3] 周广胜, 卢琦. 气象与森林草原火灾[M]. 北京:气象出版社, 2009.  
Zhou G S, Lu Q. Meteorology and forest-grassland fire [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009.
- [4] 陈世荣. 草原火灾遥感监测与预警方法研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2006.  
Chen S R. A study of grassland fire monitoring and early warning methods using remote sensing[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [5] 胡海清, 李楠, 孙龙, 等. 伊春地区森林火灾时空分布格局[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10):67-70.  
Hu H Q, Li N, Sun L, et al. Spatial and temporal distribution patterns of forest fires in Yichun, Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10):67-70.
- [6] 马楠楠, 张彦雷, 李建, 等. 黑龙江呼玛县森林火灾时空分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2016, 44(5):20-23.  
Ma N N, Zhang Y L, Li J, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of forest fire in Huma County of Heilongjiang Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(5):20-23.
- [7] 杨广斌, 唐小明, 宁晋杰, 等. 北京市1986—2006年森林火灾的时空分布规律[J]. 林业科学, 2009, 45(7):90-95.  
Yang G B, Tang X M, Ning J J, et al. Spatial and temporal distribution pattern of forest fire occurred in Beijing from 1986 to 2006[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2009, 45(7):90-95.
- [8] Seol A, Lee B, Chung J. Analysis of the seasonal characteristics of forest fires in South Korea using the multivariate analysis approach[J]. Journal of Forest Research, 2012, 17(1):45-50.
- [9] 郑琼, 邸雪颖, 金森. 伊春地区1980—2010年森林火灾时空格局及影响因子[J]. 林业科学, 2013, 49(4):157-163.  
Zheng Q, Di X Y, Jin S. Temporal and spatial patterns of forest fires in Yichun Area during 1980-2010 and the influence of meteorological factors[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2013, 49(4):157-163.
- [10] 王明玉, 孙龙, 舒立福, 等. 林火在空间上的波动性及其区域化行为[J]. 林业科学, 2006, 42(5):98-103.  
Wang M Y, Sun L, Shu L F, et al. Fluctuation of forest fire in spatial space and their regional behavior [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(5):98-103.
- [11] 苏立娟, 何友均, 陈绍志. 1950—2010年中国森林火灾时空特征及风险分析[J]. 林业科学, 2015, 51(1):88-96.  
Su L J, He Y J, Chen S Z. Temporal and spatial characteristics and risk analysis of forest fires in China from 1950 to 2010 [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(1):88-96.
- [12] 贺宝华, 陈良富, 陶金花, 等. 基于观测几何的环境卫星红外相机遥感火点监测算法[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(2):104-108.  
He B H, Chen L F, Tao J H, et al. A contextual fire detection algorithm based on observation geometry for HJ-1B-IRS [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2011, 30(2):104-108.
- [13] Liu W, Wang L, Zhou Y, et al. A comparison of forest fire burned area indices based on HJ satellite data [J]. Natural Hazards, 2016, 81(2):1-10.
- [14] Liu M, Zhao J, Guo X, et al. Study on climate and grassland fire in HulunBuir, Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. Sensors, 2017, 17(3):616.
- [15] Araújo F M D, Ferreira L G, Arantes A E. Distribution patterns of burned areas in the Brazilian Biomes: an analysis based on satellite data for the 2002-2010 Period [J]. Remote Sensing, 2012, 4(7):1929-1946.
- [16] 邓欧, 李亦秋, 冯仲科, 等. 基于空间 Logistic 的黑龙江省林火风险模型与火险区划[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):200-205.  
Deng O, Li Y Q, Feng Z K, et al. Model and zoning of forest fire risk in Heilongjiang Province based on spatial Logistic [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8):200-205.
- [17] 何诚, 巩垠熙, 张思玉, 等. 基于MODIS数据的森林火险时空分异规律研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(9):2472-2477.  
He C, Gong Y X, Zhang S Y, et al. Forest fire division by using MODIS data based on the temporal-spatial variation law [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(9):2472-2477.
- [18] 贾旭, 高永, 齐呼格金, 等. 基于MODIS数据的内蒙古野火时空变化特征[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1):127-135.  
Jia X, Gao Y, Qihugejin, et al. MODIS-based spatial-temporal distribution of wildfire in Inner Mongolia [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1):127-135.
- [19] Zhu Q, Rong T, Sun R. A case study on fractal simulation of forest fire spread [J]. Science in China, 2000, 43(1):104-112.
- [20] Ponomarev E I, Kharuk V I, Ranson K J. Wildfires dynamics in Siberian larch forests [J]. Forests, 2016, 7(6):125.
- [21] Csizsar I, Fraser R, Hao W M. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America from NOAA/AVHRR data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(2):198-208.
- [22] Li Z, Nsdon S, Cihlar J, et al. Satellite-based mapping of Canadian boreal forest fires: evaluation and comparison of algorithms [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 20(16):3071-3082.
- [23] Fernandez A, Illera P, Casanova J L. Automatic mapping of surfaces affected by forest fires in Spain using AVHRR NDVI composite image data [J]. Remote Sensing of Environment, 1997,

- 60(2):153-162.
- [24] Fraser R H, Li Z, Cihlar J. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 74(3): 362-376.
- [25] Leeuwen W J D V, Huete A R, Laing T W. MODIS vegetation index compositing approach[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(99):264-280.
- [26] Barbosa P M, Grégoire J M, Pereira J M C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69(3):253-263.
- [27] Martin M P, Chuvieco E. Mapping and evaluation of burned land from multi-temporal analysis of AVHRR NDVI images [J]. *EARSel Advances in Remote Sensing*, 1995, 4(3):7-13.
- [28] Zhang X, Kondragunta S, Quayle B. Estimation of biomass burned areas using multiple-satellite-observed active fires [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2011, 49(11):4469-4482.
- [29] Li Y P, Zhao J J, Guo X Y, et al. The influence of land use on the grassland fire occurrence in the northeastern Inner Mongolia Autonomous Region, China[J]. *Sensors*, 2017, 17(3), 437.
- [30] Giglio L, Werf G R V D, Randerson J T, et al. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations [J]. *Atmospheric Chemical Physics*, 2006, 6(4):957-974.
- [31] 赵凤君, 舒立福. 气候异常对森林火灾发生的影响研究[J]. *森林防火*, 2007(1):21-23.
- Zhao F J, Shu L F. Influence of climate anomaly on forest fire occurrence[J]. *Forest Fire Prevention*, 2007(1):21-23.
- [32] 丽娜, 包玉龙, 银山, 等. 中蒙边境地区草原火时空分布特征分析[J]. *灾害学*, 2016, 31(3):207-210.
- Li N, Bao Y L, Yin S, et al. Spatiotemporal characteristics of grassland fire in China-Mongolia border regions [J]. *Journal of Catastrophology*, 2016, 31(3):207-210.
- [33] Araújo F M D, Ferreira L G. Satellite-based automated burned area detection: a performance assessment of the MODIS MCD45A1 in the Brazilian savanna [J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2015, 36:94-102.
- [34] Ruiz J A M, Lázaro J R G, Cano I D Á, et al. Burned area mapping in the north American boreal forest using Terra-MODIS LTDR (2001-2011): a comparison with the MCD45A1, MCD64A1 and BA GEOLAND-2 products [J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(1):815-840.
- [35] 杨伟, 张树文, 姜晓丽. 基于 MODIS 时序数据的黑龙江流域火烧迹地提取[J]. *生态学报*, 2015, 35(17):5866-5873.
- Yang W, Zhang S W, Jiang X L. Burned area mapping for Heilongjiang Basin based on MODIS time series data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(17):5866-5873.
- [36] 曲熠鹏, 郑淑霞, 白永飞. 蒙古高原草原火行为的时空格局与影响因子[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4):807-813.
- Qu Y P, Zheng S X, Bai Y F. Spatiotemporal patterns and driving factors of grassland fire on Mongolian Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4):807-813.
- [37] 傅泽强. 内蒙古干草原火灾时空分布动态研究[J]. *内蒙古气象*, 2001(1):28-30.
- Fu Z Q. Distribution and dynamics of fire in steppe of Inner Mongolia [J]. *Meteorology Journal of Inner Mongolia*, 2001(1):28-30.
- [38] 谢力, 温刚, 符淙斌. 中国植被覆盖季节变化和空间分布对气候的响应: 多年平均结果[J]. *气象学报*, 2002, 60(2):181-187.
- Xie L, Wen G, Fu Z B. The response of the vegetation seasonal variability and its spatial pattern to climate variation in China: multi-year average [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(2):181-187.
- [39] 刘晓东, 王博. 森林燃烧主要排放物研究进展[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(12):118-124.
- Liu X D, Wang B. Review on the main emission products released by forest combustion [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2017, 39(12):118-124.
- [40] 胡海清, 金森. 黑龙江省林火规律研究(II): 林火动态与格局影响因素的分析[J]. *林业科学*, 2002, 38(2):98-102.
- Hu H Q, Jin S. Study on forest fire regime of Heilongjiang Province (II): analysis on factors affecting fire dynamics and distributions [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2002, 38(2):98-102.
- [41] 孙海滨, 王美莲, 张红星, 等. 大兴安岭森林火灾与气象因子相关性研究[J]. *内蒙古农业大学学报(自然科学版)*, 2012, 33(5-6):87-90.
- Sun H B, Wang M L, Zhang H X, et al. Correlation analysis between forest fire and meteorological elements in Daxinganling Mountain [J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2012, 33(5-6):87-90.

(责任编辑 赵勃  
责任编辑 赵秀海)