东北地区自然植被火动态特征及其对干旱的响应

于成龙[1,2,3], 刘 丹[1,2,3], 何 锋[1,2,3], 韩俊杰[1,2,3]

(1. 中国气象局 东北地区生态气象创新开放实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;
2. 黑龙江省气象院士工作站, 黑龙江 哈尔滨 150030; 3. 黑龙江省气象科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: [目的] 研究 2002—2017 年东北地区自然植被火的发生发展及其对干旱的响应规律,从而为区域火管理、火险等级预报和森林资源保护提供科学依据。[方法] 基于 MODIS 公开的数据产品和改进帕默尔干旱指数(scPDSI),采用统计学方法,分别季节和年际尺度,分析东北地区自然植被火动态特征,探寻其对干湿状况的响应规律。[结果] ①在季节尺度上,春季和秋季是森林和草地火的多发期,草地火次数在春季和秋季呈显著增加趋势; ②在年际尺度上,森林火次数以 18 次/a 的速度呈显著下降趋势,平均过火面积呈弱上升趋势,草地火次数以 36 次/a 的速度呈极显著上升趋势,平均过火面积呈弱下降趋势; ③火次数和过火面积分别与 scPDSI 呈线性负相关与指数负相关; ④随着干旱程度的加深,森林和草地火的平均次数和平均单次过火面积都有增加的趋势。[结论] 干旱可能会增加东北地区自然植被的起火次数和单次过火面积。

关键词: 干旱; 火; 东北地区; 改进帕默尔干旱指数(scPDSI)

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2019)04-0009-08 **中图分类号**: S762

文献参数: 于成龙, 刘丹, 何锋, 等. 东北地区自然植被火动态特征及其对干旱的响应[J]. 水土保持通报, 2019,39(4):9-16. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2019.04.002; Yu Chenglong, Liu Dan, He Feng, et al. Dynamic characteristics of natural vegetation fires and their response to drought in Northeast China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019,39(4):9-16.

Dynamic Characteristics of Natural Vegetation Fires and Their Response to Drought in Northeast China

Yu Chenglong[1,2,3], Liu Dan[1,2,3], He Feng[1,2,3], Han Junjie[1,2,3]

(1. *Innovation and Opening Laboratory of Regional Eco-meteorology in Northeast China, China Meteorological Administration, Harbin, Heilongjaing* 150030, *China*; 2. *Meteorological Academician Workstation of Heilongjiang Province, Harbin, Heilongjaing* 150030, *China*; 3. *Heilongjiang Province Institute of Meteorological Sciences, Harbin, Heilongjaing* 150030, *China*)

Abstract: [Objective] The development law of natural vegetation fires and their response to drought in Northeast China during 2002—2017 was studied, so as to provide scientific basis for regional fire management, fire risk level prediction and forest resources protection. [Methods] Based on the published available Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) satellite products and the self-calibrating Palmer drought severity index(scPDSI)data, the seasonal and interannual characteristics of fire dynamics of natural vegetation in Northeast China were analyzed by using statistical methods, and the response law of fire dynamics to dry-wet conditions was explored. [Results] On seasonal scale, most forest and grassland fires occurred in spring and autumn, and grassland fire occurrence increased significantly in these two seasons. On inter-annual scale, forest fire occurrence decreased significantly at the rate of 18 times per year and their average burnt area increased faintly. Grassland fire occurrence showed an extremely significant upward trend at the rate of 36 times per year, and their average burnt area decreased faintly. There were linear and negative correlations between fire occurrence and scPDSI. But burnt area appeared exponential and negative correlations with scPDSI. Both average fire occurrence and average burnt area per individual fire showed an increasing trend

收稿日期:2019-05-07 **修回日期**:2019-06-17

资助项目:黑龙江省自然科学基金联合引导项目"生态文明建设气象条件贡献率评价研究"(LH2019D014); 中国气象局东北地区生态气象创新开放实验室开放基金项目(stqx2018zd03); 中国气象局沈阳大气环境研究所开放基金项目(2018SYIAEZD1)

第一作者:于成龙(1973—),男(汉族),黑龙江省桦川县人,博士,高级工程师,主要从事生态气象研究。E-mail:nefuycl@163.com。

通讯作者:刘丹(1974—),女(汉族),黑龙江省加格达奇区人,博士,正高级工程师,主要从事生态气象研究。E-mail:nefuliudan@163.com。

with the deepening of drought. [Conclusion] Fire occurrence and burnt area per individual fire of natural vegetation could be increased under the condition of drought.

Keywords: drought; fire; Northeast China; the self-calibrating Palmer drought severity index(scPDSI)

火改变植被群落结构[1]、碳水循环[2]、土壤化学成分[3]乃至全球气候系统[4]。遥感监测以其监测范围大、成本低、人机交互判识率高等特点,成为当前火点监测及过火面积提取的重要手段之一[5],目前成序列的卫星监测产品主要有美国航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)基于 Terra 和 Aqua 卫星数据的近 20 a 全球火数据产品 $MCD_{45}A_1$ 和 $MCD_{64}A_1$(空间分辨率为 500 m)[6];欧洲航天局(European Space Agency, ESA)Globcarbon 计划支持的碳监测产品(空间分辨率为 1 000 m)[7],气候变化项目(climate change initiative, CCI)支持的全球火烧面积产品 Fire_cciv4.1(空间分辨率为 300 m)和 Fire_cciv5(空间分辨率为 250 m)[8]等,这些产品为全球植被燃烧规律[9-10]、火排放[11-12]、火险等级预报[13-14]等的研究提供了基础数据。

东北境内有广袤的森林和草原,历来是森林(草原)火灾的高发区。随着全球气候变化,该地区气温增加趋势明显,降水分布不均,大面积干旱时有发生,森林(草原)火动态形势值得关注。许多学者从森林火灾发生发展的时空分布规律[15]、火源特点[16]、碳排放量估算[17]、火险区划[18]以及火对气候变化的响应[19]等方面开展了广泛研究,为进一步开展自然生态系统火干扰研究提供了理论基础。2000—2015 年是自 19 世纪 80 年代以来最温暖的时段[20],为回答在近几十年中最暖时段东北地区自然植被火的发生发展规律及其对干旱的响应,本研究以东北地区自然植被为研究对象,基于 $MCD_{64}A_1$ 数据和改进帕默尔干旱指数(self-calibrating palmer drought severity index, scPDSI),从季节和年际尺度,分析 2002—2017 年东北地区自然植被火次数和过火面积的时空变化特征;探寻季节和年际尺度下火对 scPDSI 的响应关系,明确干旱对年平均发生火次数和平均单次过火面积的影响。从而为区域火管理、火险等级预报和森林资源保护提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

东北地区包括黑龙江省、吉林省、辽宁省和内蒙古自治区东部的赤峰市、通辽市、呼伦贝尔市及兴安盟[21],位于东经 111.15°—135.09°,北纬 37.95°—53.56°之间,土地面积 7.87×10^5 km^2,境内有大兴安岭、小兴安岭、长白山系和东北平原(包括松嫩平原、辽河平原和三江平原),海拔高度在 2～2 667 m 之间。该地区属温带季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,近 30 a(1981—2010 年)年平均气温 -4.08～11.34 ℃,年降水量 199.53～1 170.60 mm,日平均日照时数 5.26～9.21 h[22]。该区植被属欧亚森林、草原植物亚区和中国—日本森林植物亚区,分布着寒温带针叶林、温带针阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林和广袤的草原[23]。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 $MCD_{12}Q_1$ 数据产品 本研究基于 MODIS 的 $MCD_{12}Q_1$ 数据产品(土地类型覆盖产品)的"IGBP 全球植被分类方案"的分类结果提取研究区自然植被分布范围,该数据原始空间分辨率为 500 m。研究中将 $MCD_{12}Q_1$ 数据分类结果分为自然植被(森林、灌木林地、草地、湿地)和非自然植被(包括城市用地、农田、水体和雪地),东北地区森林和草地分别占自然植被总面积的 47.74%和 52.24%,因此把森林和草地作为研究对象。

1.2.2 $MCD_{64}A_1$ 数据产品 $MCD_{64}A_1$ 数据是 MODIS 数据的燃烧面积(burned area)累计月合成值产品,原始空间分辨率为 500 m,包括燃烧日期(burn date)、燃烧数据不确定性(burn date uncertainty)、质量确认(quality assurance)等 5 个文件。在燃烧日期文件中的 DN 值含义详见表 1。

$MCD_{12}Q_1$ 和 $MCD_{64}A_1$ 数据均应用 MODIS Reprojection Tool software(MRT)V4.0 进行影像的拼接、重采样和投影转换(由 Sinusoidal 投影转换为经纬度投影)等预处理,时间范围为 2002—2017 年,空间范围为东北地区。

表 1 $MCD_{64}A_1$ 燃烧日期的像元分级

DN	含义
1～366	燃烧日期(太阳日)
0	未燃烧的土地
-1	因数据不足未判识
-2	水体

1.2.3 scPDSI 数据 选用全球月尺度 scPDSI 数据产品,该数据来源于英国东英格利亚大学(University of East Anglia, UEA)气候研究中心(Climatic Research Unit)编辑的降水和干旱数据集(http://www.cru.uea.ac.uk/),数据的空间分辨率为 0.5°×0.5°的栅格数据,本研究所用数据为 2002 年 1 月至 2017 年 12 月,由 CRUTS3.26 月尺度气候数据集

驱动,无量纲,数据范围为[-5.0,5.0]。为减小边缘锯齿,将 scPDSI 栅格数据重采样为空间分辨率为 0.005°×0.005°。

1.2.4　地面监测数据　利用 2 次地面监测火点数据验证 $MCD_{64}A_1$ 数据的精度,地面监测地点和过火面积情况详见表 2。

表 2　地面监测火场信息

起火时间	起火地点	起火位置	火场面积/km²
2005 年 9 月 15 日	黑龙江省加格达奇区	125.90°E,50.93°N	14.72
2006 年 5 月 22 日	黑龙江省加格达奇区	124.82°E,51.24°N	22.11

1.2.5　地理信息数据　数字高程模型(DEM)为 SRTM 地形产品 V4.1 版本数据,空间分辨率为 90 m,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(http://www.gscloud.cn)。研究所需的行政区划数据来自于中国气象局下发的 1∶25万基础地理信息,对数据进行拓补检查。

1.3　研究方法

1.3.1　火点数据精度验证　把地面监测的起火位置叠加到 $MCD_{64}A_1$ 数据对应日期的图层上,结果显示 2 次起火位置均准确落入 $MCD_{64}A_1$ 数据代表的燃烧点上,利用 $MCD_{64}A_1$ 数据计算的燃烧面积分别为 14.21 和 20.56 km²,误差率分别为-3.46%和-7.02%,可见 $MCD_{64}A_1$ 数据可以作为分析东北地区火时空动态特征的数据源。

1.3.2　统计方法　四季划分标准为:3—5 月为春季;6—8 月为夏季;9—11 月为秋季;1,2 和 12 月为冬季。为避免重复统计火点次数,把当年同一地点发生多次火点记录记为 1 次。采用趋势分析和 Pearson 相关性分析方法,统计火点发生时间、面积的变化趋势,采用 SPSS 软件中的曲线估计工具,分析火与干湿状况的关系。

1.3.3　干湿等级划分　参考王兆礼[24]的干湿等级划分标准,将 scPDSI 从极端干旱到极端湿润划分为 9 个等级(详见表 3)。

表 3　scPDSI 干湿等级划分标准

scPDSI	干湿等级	scPDSI	干湿等级
≥4	极端湿润	-2～-1	轻微干旱
3～4	严重湿润	-3～-2	中等干旱
2～3	中等湿润	-4～-3	严重干旱
1～2	轻微湿润	<-4	极端干旱
1～-1	正常	—	—

2　结果与分析

2.1　自然植被火的时间尺度差异

2.1.1　时间分布特征　由图 1 可知,东北地区森林火年平均为 284±170 次,其中 2008 年最多(为 769 次),2012 年最少(84 次),2002 年以来呈显著下降趋势(sig.=0.047),下降速度为每年 18 次;草地火年均为 366±220 次,其中 2015 年最多(为 836 次),2004 年最少(为 89 次),2002 年以来呈极显著上升趋势(sig<0.001),上升速度为每年 36 次。分析年平均过火面积的年际变化可见,森林火点 16 a 平均面积为 0.98±0.63 km²,2008 年最大(2.40 km²),2012 年最小(0.22 km²),2002 年以来呈线性增加趋势,但未通过 95%的显著性检验;草地火点16 a平均面积为 0.84±0.44 km²,2012 年最大(为1.95 km²),2017 年最小(为 0.38 km²),2002 年以来呈线性减小趋势,但同样未通过 95%的显著性检验。

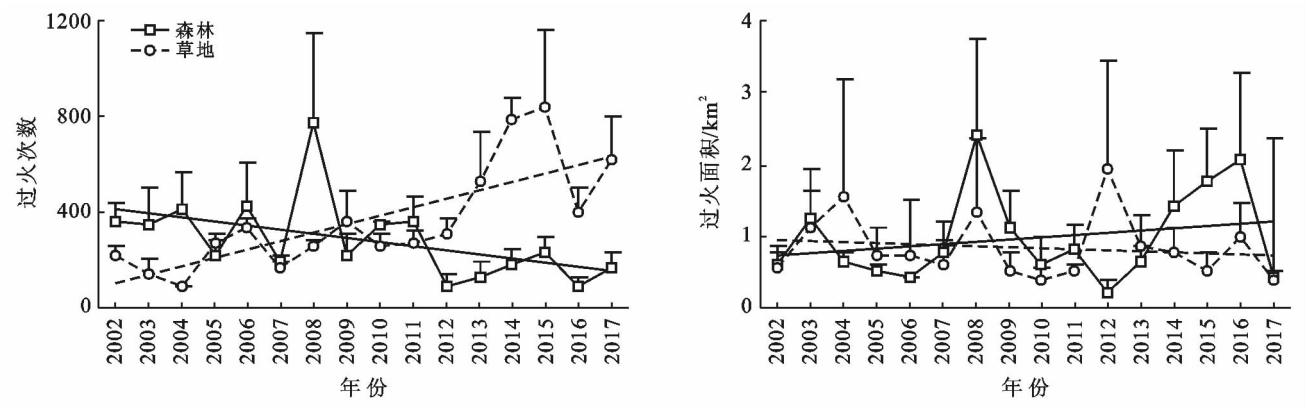


图 1　东北地区 2002—2017 年自然植被火点年际变化

由季节分析可见(图 2),春季和秋季是森林和草地火的多发期,2002 年以来森林在春季平均每年发生 179±159 次火,秋季平均发生 83±82 次,夏季只有 25±35 次,这种规律在 2008 年表现尤为明显,该年森林火总次数为 769 次,其中春季高达 693 次;草地在春季平均每年发生 175±171 次,秋季 115±108 次,夏季 76±43 次,在 2013 年以后火灾次数明显增多,每年均超过 400 次,最多的 2015 年达到 836 次,总体上来看在草地发生的火次数要多于森林。从时间变化趋势上看,春季、夏季和秋季森林火次数呈减少趋势,但均未达显著水平(sig. ＞0.05);草地火次数在夏季呈减少趋势,未达到显著水平,但在春季呈现极显著增加趋势(sig. ＝0.003,平均每年增加 25 次),在秋季呈现显著增加趋势(sig. ＝0.035,平均每年增加 12 次)。

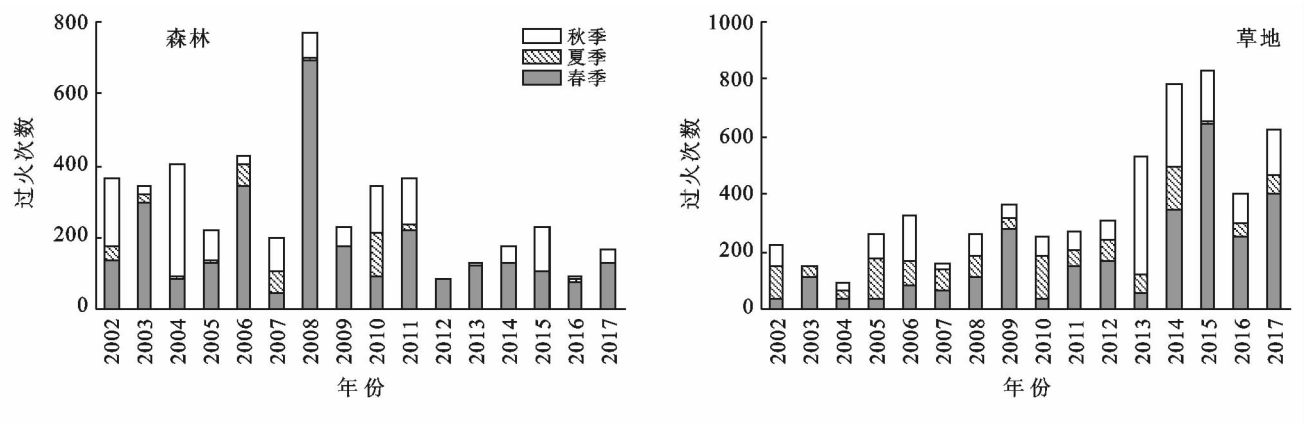


图 2 东北地区 2002—2017 年自然植被火次数的季节变化特征

统计森林和草地在春、夏、秋季平均过火面积可见(图 3),森林(0.76 km^2)总体小于草地(0.80 km^2),各季节排序均为:春季(森林为 1.03 km^2,草地为 1.11 km^2)＞夏季(森林为 0.66 km^2,草地为 0.66 km^2)＞秋季(森林为 0.58 km^2,草地为 0.62 km^2)。分析各个季节森林平均过火面积的时间变化趋势可见,草地均存在下降趋势,森林均存在上升趋势,但都未通过 95% 的显著性检验。

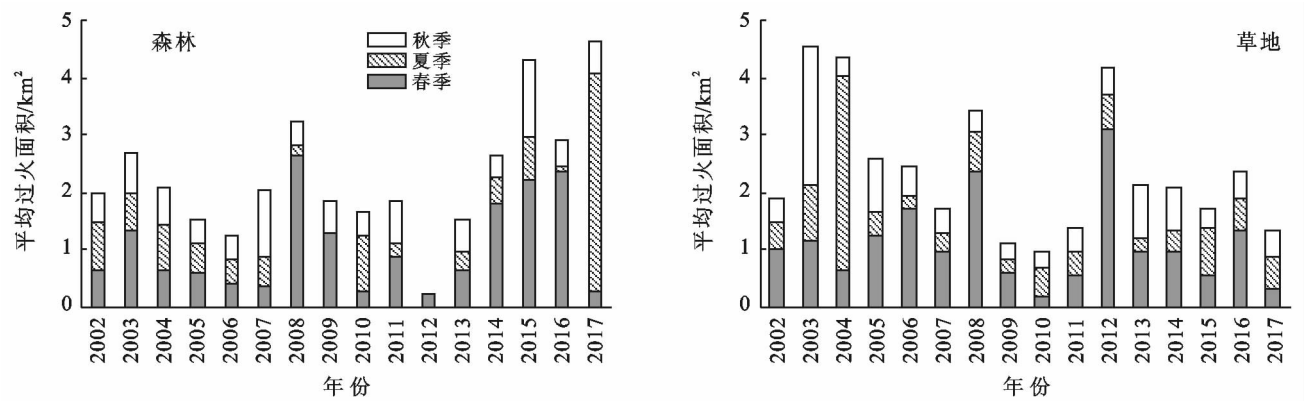


图 3 东北地区 2002—2017 年自然植被平均过火面积的季节变化特征

2.1.2 空间分布特征 由图 4 可以看出,2002 年以来森林火点主要分布在大兴安岭和小兴安岭,长白山脉只有零星分布,集中分布区域与春季相近;草地火点覆盖了呼伦贝尔、松嫩平原和霍林郭勒,较为集中的区域在松嫩平原西部和呼伦贝尔西北部。

从不同季节火点的空间分布可见(图 5),春季森林火主要集中在 3 个区域:①沿大兴安岭中南部区域:鄂伦春自治旗中部—阿荣旗西部—扎兰屯市北部一线;②中俄边境区域:呼玛县东部和鄂伦春自治旗东北部;③小兴安岭东南部区域:包括逊克县、嘉荫县、庆安县北部、鹤岗市南部。夏季森林火密度明显小于春季,春季时火最密集的区域(沿大兴安岭中南部)很少有夏季火出现,而春季火较少的大兴安岭北部区域(额尔古纳市北部和呼玛县)夏季火明显增多。秋季火分布区域与春季相近,但火密度小于春季。

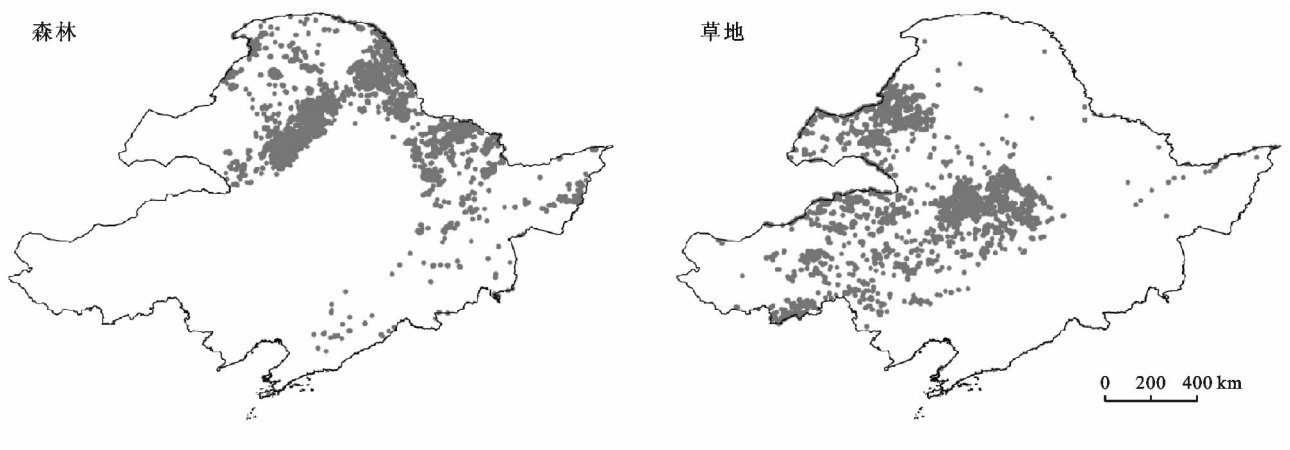


图 4　东北地区 2002－2017 年自然植被火点空间分布

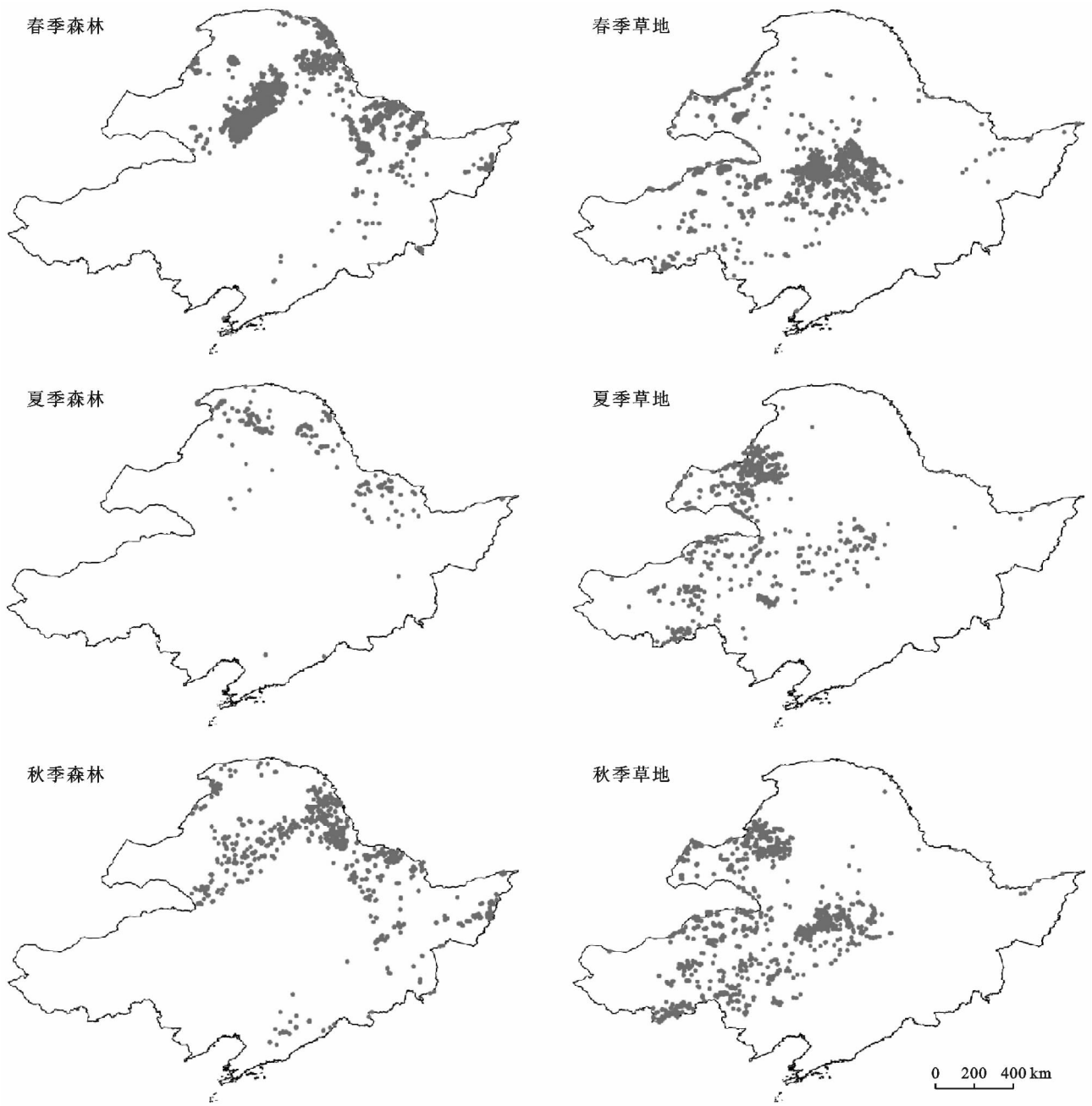


图 5　东北地区 2002－2017 年自然植被不同季节火点空间分布

春季草地火分布最集中的区域在松嫩平原西部，包括扎赉特旗、乌兰浩特市、科尔沁右旗前旗东部、齐齐哈尔市、杜蒙县、大庆市、泰来县；其它草地有零星分布。夏季草地火最集中的区域在呼伦贝尔草原，松嫩平原区域火密度明显减小，其它地区的火密度与春季相近。秋季火集中的区域有呼伦贝尔草原和松嫩平原，其它区域的火密度也大于春季和夏季。

2.2 自然植被火对干湿状况响应的尺度差异

2.2.1 火对 scPDSI 的响应 在年际尺度上分析森林和草地火次数与对应 scPDSI 的相关性可见，森林火次数与 scPDSI 呈现弱的相关关系（$y=-61.60x+261.45$，$R^2=0.201\ 8$，sig. $=0.081$），草地火次数与 scPDSI呈现出极显著线性负相关关系（$y=-298.55x-233.24$，$R^2=0.662\ 4$，sig. <0.001）。在季节尺度上，春季和秋季的森林火次数与对应的 scPDSI 均呈显著线性负相关关系（春季：$y=-59.58x+161.65$，$R^2=0.269\ 1$，sig. $=0.040$；秋季：$y=-26.61x+66.92$，$R^2=0.307\ 9$，sig. $=0.026$），夏季未见显著相关关系，春季与对应的前一年冬季的 scPDSI 也未见显著相关关系；春季和秋季的草地火次数与对应的 scPDSI 均呈极显著线性负相关关系（春季：$y=-104.57x-4.59$，$R^2=0.425\ 6$，sig. $=0.006$，秋季：$y=-48.58x+1.56$，$R^2=0.395\ 1$，sig. $=0.009$），其它季节未见显著相关关系。可见草地火次数对 scPDSI 的敏感性要大于森林。

用同样的方法分析年际尺度上森林和草地的过火面积与对应 scPDSI 之间的相关关系可见，森林过火面积与 scPDSI 呈现弱的相关关系（$y=170.60e^{-0.385x}$，$R^2=0.242\ 8$，sig. $=0.053$），草地的过火面积与 scPDSI 呈现极显著指数关系（$y=57.82e^{-0.696x}$，$R^2=0.454\ 9$，sig. $=0.006$）。

从季节尺度上看，春季森林过火面积、秋季森林过火面积、春季草地过火面积与对应的 scPDSI 均呈显著的指数关系（春季森林：$y=94.72e^{-0.460x}$，$R^2=0.265\ 2$，sig. $=0.041$；秋季森林：$y=11.97e^{-0.835x}$，$R^2=0.370\ 3$，sig. $=0.012$；春季草地：$y=38.34e^{-0.576x}$，$R^2=0.275\ 7$，sig. $=0.037$）；夏季森林和草地的过火面积与对应的 scPDSI 均未见显著相关关系，春季森林与对应的前一年冬季的 scPDSI 也未见显著相关关系；秋季的草地过火面积与对应的 scPDSI 呈极显著的指数关系（$y=7.176e^{-0.700x}$，$R^2=0.681\ 4$，sig. <0.001）。说明 scPDSI 对秋季草地的过火面积影响最大。其原因可能是秋季草地的地上生物量大于春季和夏季，即使在植被自身含水量相同的情况下，一旦起火，可燃物载量大，火蔓延速率快，火强度大，过火面积可能就会增大。

2.2.2 火对干旱等级的响应 为了解森林和草地在不同时间尺度下对不同干旱等级的响应规律，分别季节和年尺度提取了森林和草地的年平均发生火次数、平均单次过火面积对应的干旱等级（图 6），分析可见，在年际尺度上，森林和草地同样表现为随着干旱程度的加深，年平均发生火次数有增加的趋势，但均未达到显著水平。用同样的方法分析干旱等级对平均单次过火面积对的影响，结果显示与年平均发生火次数有相似的规律，但干旱的贡献均未达到显著水平。

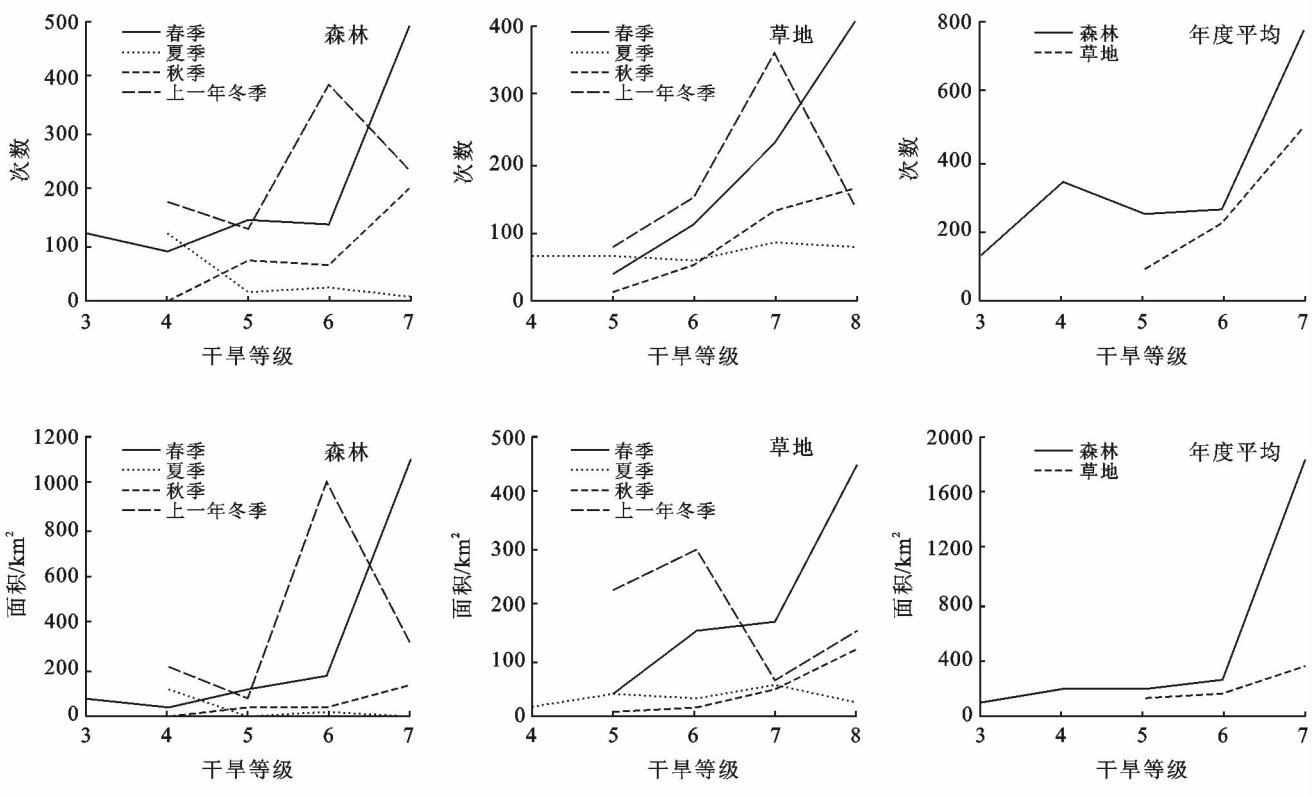
在季节尺度上，春、秋季的森林和草地火的次数对干旱等级有所响应，表现为随着干旱程度加深年平均火次数和平均单次过火面积都增加的趋势，通过相关分析探寻干旱对森林和草地火次数的贡献程度可见，春季和秋季的干旱对森林和草地火的次数和平均单次过火面积的贡献都达到极显著水平（sig. <0.010），夏季干旱对森林火的次数和平均单次过火面积的贡献都达显著水平（sig. <0.050）。

3 讨 论

NASA 的 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的两个中分辨率成像光谱仪（MODIS）提供了近 20 a 来的全球火数据，为研究区域乃至全球火的变化规律、火对全球气候变化的响应等科学问题提供了较长时间序列的基础数据。Fusco 等[25]、祖笑锋等[26]、王卫国等[27]利用 $MCD_{45}A_1$ 数据开展火生态的相关研究取得了可信结果；贾旭等[28]在分析内蒙古自治区野火时空变化特征时，利用 Landsat 数据对 $MCD_{45}A_1$ 数据进行验证，得出 $MCD_{45}A_1$ 数据产品可以作为大范围火灾情监测的重要手段的结论；邓欧等[18]将 $MCD_{45}A_1$ 数据与黑龙江省森林历史火点记录进行叠加，认为在时空分布上两种数据源均具有较高的相关性；可见 $MCD_{45}A_1$ 数据产品具有较好的可用性，并可用于东北地区。本研究所应用的 $MCD_{64}A_1$ 数据产品，在 $MCD_{45}A_1$ 算法的基础上进行了改进，显著提高了对小烧伤的检测能力，适度减少了烧伤日期的时间不确定性，并大大减少了未映射区域的范围[29-31]。另外，本研究利用 2 次火的地面记录与 $MCD_{64}A_1$ 数据进行了对比，误差率分别为 -3.46% 和 -7.02%，可见 $MCD_{64}A_1$ 数据可以作为分析东北地区火时空动态特征的数据源。

本研究发现，春季和秋季是东北地区森林和草地火的多发期，这与许多同类研究结果一致，如田晓瑞等[32]在研究中国主要生态地理区的林火动态特征后得出了北方地区的火灾主要发生在春季和秋季的结

论;李兴华等[33]研究了 1981—2007 年的内蒙古东北部地区森林草原火灾时间变化规律,其中 2002—2007 年与本研究时段重合,这段时间火灾次数的变化规律也与本研究一致。



注:干旱等级中 1 为极端湿润,2 为严重湿润,3 为中等湿润,4 为轻微湿润,5 为正常,6 为轻微干旱,7 为中等干旱,8 为严重干旱,9 为极端干旱。

图 6　干湿程度对应的年平均火次数和平均单次过火面积

自然植被火是一种复杂的自然现象,干旱往往是其高发和蔓延的重要诱因之一,本研究表明,草地火对干旱的敏感程度要大于森林,此结论与 Wragg 等[34]的研究结果一致,分析其原因与植被自身特点和 scPDSI 有关,火的起因与植被和死地被物的含水量有密切关系[35-36],scPDSI 划分的标准反应是浅层土壤的旱涝程度[37],森林主要利用深层土壤水分,草地主要利用浅层土壤水分,因此当 scPDSI 处于干旱等级(scPDSI<−1)时,草自身的含水量会比森林下降得更快,同时草地的死地被物上层无遮挡,水分蒸发速度相对于有树冠遮挡的林下地被物更大,因此起火和火蔓延的可能性更大。

本研究的数据基础是 MODIS 数据产品,除其固有的空间分辨率的限制外,本研究的局限性还在于:$MCD_{64}A_1$ 数据监测火受到云和浓烟的干扰,因此监测结果可能偏小;仅统计了火次数和面积与对应季节或年份干旱等级之间的关系,没有区分独立干旱和连续干旱对火的影响。尽管存在以上不足,但本研究还是以定量的方式给出了火次数和过火面积与干湿状况的关系,从而为森林(草原)火险预测预报、野火防范和扑救等提供可靠参考。

4　结 论

(1) 在季节尺度上,东北地区春季和秋季是森林和草地火的多发期,而且草地火灾次数呈显著增加趋势;在年际尺度上,森林火次数少于草地,但年平均过火面积大于草地,森林火次数呈显著下降趋势,草地火次数呈极显著上升趋势。

(2) 无论是季节尺度,还是年际尺度,东北地区火次数与 scPDSI 均呈负线性相关关系,过火面积与 scPDSI 呈负指数相关关系。

(3) 在春季和秋季,随着干旱程度的加深,东北地区森林和草地火的次数和平均单次过火面积均有增加的趋势;年际尺度也有同样的规律。

[参 考 文 献]

[1] Malone S L, Kobziar L N, Staudhammer C L, et al. Modeling relationships among 217 fires using remote sensing of burn severity in southern pine forests[J]. Remote Sensing, 2011,3(9):2005-2028.

[2] Brazhnik K, Hanley C, Shugar H H. Simulating changes in fires and ecology of the 21 st century Eurasian boreal forests of Siberia[J]. Forests, 2017,8(2):49-63.

[3] Martin M L, Gonzalez-Vila F J, Knicker H. Distribution of black carbon and black nitrogen in physical soil fractions from soils seven years after an intense forest fire and their role as C sink[J]. Science of The Total Environment, 2018,637:1187-1196.

[4] Saranya K R L, Reddya C S, Prasada-Rao P V V. Estimating carbon emissions from forest fires over a decade in Similipal Biosphere Reserve, India[J]. Remote Sensing Applications Society and Environment, 2016,4:61-67.

[5] 王乾坤,于信芳,舒清态.基于时间序列遥感数据的森林火烧迹地提取[J].自然灾害学报,2017,26(1):1-10.

[6] Tansey K, Gregoire J M, Defourny P, et al. A new, global, multi-annual(2000—2007) burnt area product at 1 km resolution[J]. Geophysical Research Letters, 2008,35(1):L011401.

[7] Plummer S, Arino O, Simon M, et al. Establishing a earth observation product service for the terrestrial carbon community: The globcarbon initiative[J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2006,11(1):97-111.

[8] Chuvieco E, Yue C, Heil A, et al. A new global burned area product for climate assessment of fire impacts[J]. Global Ecology and Biogeography, 2016,25(5):619-629.

[9] Andela N, Morton D C, Giglio L, et al. A human-driven decline in global burned area[J]. Science, 2017, 356(6345):1356-1362.

[10] Hantson S, Pueyo S, Chuvieco E. Global fire size distribution is driven by human impact and climate[J]. Global Ecology and Biogeography, 2015,24(1):77-86.

[11] Shi Y S, Sasai T, Yamaguchi Y. Spatio-temporal evaluation of carbon emissions from biomass burning in Southeast Asia during the period 2001—2010[J]. Ecological Modelling, 2014,272(24):958-115.

[12] Van der W G R, Randerson J T, Giglio L, et al. Global fire emissions estimates during 1997—2016[J]. Earth System Science Data, 2017,9(2):697-720.

[13] Caccamo G, Chisholm L A, Bradstock R A, et al. Using remotely-sensed fuel connectivity patterns as a tool for fire danger monitoring[J]. Geophysical Research Letters Banner, 2012,39(1):L01302.

[14] Spessa A C, Field R D, Pappenberger F, et al. Seasonal forecasting of fire over Kalimantan, Indonesia[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2015,15(3):5079-5111.

[15] 张冬有,邓欧,李亦秋,等.黑龙江省 1980—2005 年森林火灾时空特征[J].林业科学,2012,48(2):175-179.

[16] 尹赛男,舒立福,张大明,等.吉林省森林火灾火源数据特征分析[J].林业科学,2018,54(7):165-172.

[17] 潘登,张合平,潘高,等.桂西南松栎林火行为研究及碳排放计量[J].自然灾害学报,2017,26(5):51-61.

[18] 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,2012,183(8):200-205.

[19] 赵凤君.气候变化对内蒙古大兴安岭林区森林火灾的影响研究[D].北京:中国林业科学研究院,2007.

[20] Sholihah R I, Trisasongko B H, Shiddiq D, et al. Identification of agricultural drought extent based on vegetation health indices of Landsat data: Case of Subang and Karawang, Indonesia[J]. Procedia Environmental Sciences, 2016,33:14-20.

[21] 王士君,宋飏.中国东北地区城市地理基本框架[J].地理学报,2006,61(6):574-584.

[22] Liu Dan, Yu Chenglong, Zhao Fang. Response of the water use efficiency of natural vegetation to drought in Northeast China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(5):611-628.

[23] 徐文铎.中国东北主要植被类型的分布与气候的关系[J].植物生态学与地植物学学报,1986,10(4):254-263.

[24] 王兆礼,李军,黄泽勤,等.基于改进帕默尔干旱指数的中国气象干旱时空演变分析[J].农业工程学报,2016,32(2):161-168.

[25] Fusco E J, Abatzoglou J T, Balch J K, et al. Quantifying the human influence on fire ignition across the western USA[J]. Ecological Applications, 2016,26(8):2390-2401.

[26] 祖笑锋,覃先林,李增元,等.基于幂律分布的森林燃烧生物量卫星遥感估测方法[J].林业科学,2017,53(10):90-99.

[27] 王卫国,潘竟虎,冯娅娅,等.基于 MODIS 数据和 GWLR 的甘肃省火灾风险模型与区划[J].遥感技术与应用,2017,32(3):514-523.

[28] 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.

[29] Pereira A A, Pereira J M C, Libonati R, et al. Burned area mapping in the Brazilian Savanna using a one-class support vector machine trained by active fires[J]. Remote Sensing, 2017,9(11):1161-1182.

[30] Guindos-Rojas F, Arbelo M, García-Lázaro J R, et al. Evaluation of a bayesian algorithm to detect burned areas in the canary islands' dry woodlands and forests ecoregion using MODIS data[J]. Remote Sensing, 2018,10(5):789-810.

[31] Giglioa L, Boschettib L, Roy D P, et al. The Collection6 MODIS burned area mapping algorithm and product[J]. Remote Sensing of Environment, 2018,217:72-85.

(下转第 43 页)

究[D]. 北京:北京林业大学,2008.

[16] 郝心敏. 沙漠草原的中草药分布[J]. 内蒙古中医药,1999(3):17-19.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社,2000.

[18] Güsewell S. N∶P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2010, 164(2):243-266.

[19] Craine J M, Jackson R D. Plant nitrogen and phosphorus limitation in 98 North American grassland soils [J]. Plant and Soil, 2010,334(1/2):73-84.

[20] Harpole W S, Ngai J T, Cleland E E, et al. Nutrient co-limitation of primary producer communities [J]. Ecology Letters, 2011,14(9):852-862.

[21] 张珂,何明珠,李新荣,等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报,2014,34(22):6538-6547.

[22] Aerts R, Chapin F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. Advances in Ecological Research, 2000,30(3):1-67.

[23] Han Wenxuan, Fang Jingyun, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across753 terrestrial plant species in China [J]. New Phytologist, 2005,168(2):377-385.

[24] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000,408(6812):578-580.

[25] 阎凯,付登高,何峰,等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报,2011,35(4):353-361.

[26] 李征,韩琳,刘玉虹,等. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C,N,P 化学计量特征[J]. 植物生态学报,2012. 36(10):1054-1061.

[27] Poorter L, Bongers F. Leaf traits are good predictors of plant performance across 53 rain forest species[J]. Ecology, 2006,87(7):1733-1743.

[28] Shipley B, Lechowicz M J, Wright I, et al. Fundamental trade-offs generating the worldwide leaf economics spectrum[J]. Ecology, 2006,87(3):535-541.

[29] Wright I J, Reich P B, Westoby M, et al. The worldwide leaf economics spectrum[J]. Nature, 2004,428(6985):821-827.

[30] 崔东,陈亚宁,李卫红,等. 伊犁河谷苦豆子 C,N,P 含量变化及化学计量特征[J]. 生态学报,2018,38(17):6163-6170.

(上接第 16 页)

[32] 田晓瑞,舒立福,赵凤君,等. 中国主要生态地理区的林火动态特征分析[J]. 林业科学,2015,51(9):71-77.

[33] 李兴华,武文杰,张存厚,等. 气候变化对内蒙古东北部森林草原火灾的影响[J]. 干旱区资源与环境,2011,25(11):114-119.

[34] Wragg P D, Mielke T, Tilman D. Forbs, grasses, and grassland fire behaviour[J]. Journal of Ecology, 2018, 106(5):1983-2001.

[35] Johnson E A, Miyanishi k. Forest fires Behavior and Ecological Effects [M]// Nelsonn R M. Water Relations of Forest Fuels. Academic Press, 2001.

[36] 李晓炜,赵刚,于秀波,等. 不同区域森林火灾对生态因子的响应及其概率模型[J]. 生态学报,2013,33(4):1219-1229.

[37] Schrier V D G, Barichivich J, Briffa K R, et al. A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901—2009[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2013,118(10):4025-4048.