

基于遥感指数的草原火后植被恢复研究

官大鹏, 闫 淳, 郭赞权

(中国消防救援学院, 北京 102202)

摘 要: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。基于遥感数据,以2015年“4·16”特大草原火灾为例,利用ENVI和ArcGIS等软件,分别对NDVI和GPP指数及火烧严重度下的植被恢复过程进行定量分析。结果表明,基于NDVI和GPP指数的火后植被恢复过程表现相似,不同年份植被恢复情况存在一定差异。火灾发生当年(2015年)火烧迹地植被恢复状况高于未发生火灾区域,而在火后第1年(2016年)却又稍低于未发生火灾区域,直到火后第2年(2017年),火烧迹地植被基本恢复到火前状态。同时,不同火烧严重度下的植被恢复过程存在明显差异。草原火灾发生后当年(2015年),中强度火烧下植被恢复最好,其次是轻度,重度表现最差。草原火烧严重度对植被恢复的影响,主要表现在火后第1个植被生长季。在之后的年份里,由于草原更新能力强大,不同火烧严重度对草原植被的影响不明显。本研究可丰富草原火灾及火烧迹地植被恢复等相关研究成果,同时为草原火灾管理和草原生态系统的可持续发展提供科学依据。

关键词:草原火;遥感数据;植被恢复;火烧严重度

中图分类号:S762

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)06-0204-07

Vegetation Regeneration After Grassland Fire Based on Remote Sensing Index

GONG Da-peng, YAN Chun, GUO Zan-quan

(China Fire and Rescue Institute, Beijing 102202, China)

Abstract: Grassland fire is a key disturbance factor in natural ecosystems that greatly influences ecosystem patterns and processes. Based on the remote sensing data of from a single burned area, the process of vegetation regeneration under different indices and different fire severities was analyzed quantitatively by the software of NDVI and GPP. The results of the vegetation regeneration process based on NDVI and GPP were similar, and there was a certain difference in vegetation regeneration among different years. In 2015, the vegetation recovery in the burned area was higher than that in the non-fire area, but it was slightly lower than that in the non-fire area in 2016. Until 2017, the vegetation in the burned area completely recovered to the pre fire state. The process of vegetation restoration under different fire severities was significant different in different years. In the first year after the occurrence of grassland fire, the restoration of vegetation was the best in moderate severity fire, followed by low severity, and high severity performed worst. The effect of grassland fire severity on vegetation recovery appeared mainly in the first growing season of vegetation after the fire occurrence. In the following years, the impact of the severity was nonexistent because of the strong capacity of grassland regeneration. The research results in this paper can enrich the research cases of grassland fire and vegetation regeneration, and provides scientific basis for the management of grassland fire behavior and the sustainable development of grassland ecosystem.

Key words: grassland fire; remote sensing data; vegetation regeneration; fire severity

收稿日期:2020-12-07 修回日期:2021-05-18

基金项目:应急管理部重点实验室开放课题(2019XFZB06);中国消防救援学院院级资助项目(xfxy202005)。

作者简介:官大鹏,硕士,助教。研究方向:林火生态学。E-mail:786505411@qq.com

火灾是生态系统中植被演替历史的重要事件,在自然界中普遍存在。几千年来,世界范围内的大部分草原和森林环境都受到过人为或自然的火灾干扰。火灾作为干扰全球土地植被主要原因之一,目前对全球植被分布的影响几乎等同于气候的影响^[1]。众多研究表明,土地覆被持续的干扰将导致生态系统功能显著和持久的变化,包括物质循环、碳储量及物种组成与分布、以及物种丰富度等^[2-6]。随着国内外学者对火灾的研究深入,火后生态系统植被的恢复和重建,成为当今重要研究内容。在20世纪30年代,俄罗斯相关学者最先尝试此方面相关研究,随后到了50年代,美国和加拿大也相继开始了相关研究,但更侧重于火后环境变化研究。当前国外相关研究侧重点是火对森林生态系统的影响,而对草原生态系统的相关研究则很少。

我国真正开始全面开展火后植被恢复研究,是在1987年大兴安岭“5·6”特大森林火灾发生后^[7]。这场特大森林火灾带来了严重的损害,引发了国内外的高度关注,在火灾发生后的数年里,为使森林植被能够快速恢复到火前状态,相关领域的学者和专家进行了实地踏查,对火灾烧毁程度^[8-9]、森林类型^[10-11]、林木结实^[12]和土壤^[13-14]等方面进行了深入研究,总结了许多火后植被恢复的措施和技术方法,对我国火后植被恢复的研究起到了完善和推动作用。随着遥感技术的发展和广泛应用,利用遥感影像提取火后植被信息来监测生态变化更具有优势。戴昌达^[15]使用了AVHRR和TM影像提取的火烧迹地信息记录了“5·6”特大森林火灾发生的全过程,通过对比分析火灾发生前、发生时和发生后的影像,获取火烧迹地相关信息和植被恢复情况。高素华等^[16]基于NOAA数据研究表明火灾前后的绿度值和地表温度值具有很好的线性关系。解伏菊等^[17]基于TM数据研究表明火烧严重程度与植被恢复状况具有明显的相关性,即火烧严重程度越高,植被恢复状况越差。

每年我国发生的森林草原火灾仍不计其数,对生态系统和人员财产安全造成了极大损害。现有火生态研究广泛集中于林火,草原火灾的影响及草原火后草植被恢复研究则少之又少。因此草原火灾对草原生态系统的影响,特别是草原火后的灾害损失评估、植被恢复等研究,可以为我国科学决策和科学用火提供依据,这无疑具有重要的实践意义。本研究基于遥感数据,以国内典型草原火灾为例,分别对不同遥感指数下的植被恢复过程进行定量分析,以期对草原火后植被更新提供理论依据和决策支持。

1 数据与研究方法

1.1 数据来源

归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)和植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)是植被动态变化研究的重要表征参量。NDVI数据来自MOD13A3植被指数月产品,共计12景,GPP数据来自MOD17A2H总初级生产力8d合成产品,共计48景。为了减少雪覆盖带来的不确定性影响,将数据时间范围设定在每年的植被生长季。时间跨度包括火前、火灾当年,以及火后植被生长旺盛的月份。同时为研究不同火烧严重程度下植被覆盖度恢复情况,使用OLI遥感影像的时间跨度为2014年到2017年,共计6景影像。MODIS数据来自美国国家航空航天局的地球科学数据中心(<https://earthdata.nasa.gov/>),Landsat 8 OLI影像来自美国地质调查局(<http://landsat.usgs.gov/>)。

1.2 数据处理

1.2.1 MODIS数据处理 MODIS数据预处理包括镶嵌、投影转换及剪裁等工作。由于数量较大,研究采用美国NASA官网站提供的MRT(MODIS Reprojection Tool)软件进行MODIS数据的镶嵌和投影转换等工作。后续利用ENVI和ArcGIS等软件对遥感影像进行剪裁、数据转换、信息提取和出图等工作。

1.2.2 OLI影像处理 本研究使用的Landsat8遥感影像为L1T级别,是经过地面控制点和数字高程模型数据进行精确校正后的数据,因此不需要进行几何校正,但还未进行辐射定标、大气校正和影像剪裁等工作,以上处理均使用ENVI5.2软件完成,质量满足研究使用需求。

1.3 研究方法

2015年4月16日,呼伦贝尔地区新巴尔虎右旗和满洲里交界处,发生1起草原大火,过火面积约为70 km²,火烧迹地东西长约27.5 km,南北宽28.5 km,位于117°18'22"—117°40'58"E,49°21'26"—49°35'28"N。以此次“4·16”特大草原火灾为研究对象,基于卫星遥感数据,利用ENVI和ArcGIS等软件提取火烧迹地信息,分别对不同遥感指数(NDVI和GPP)的植被恢复过程进行了定量分析。同时,为排除每年气候差异对植被变化的影响,在与火场较近且拥有相同或相似的植被和环境条件下设置对比区域,以确保研究差异变化主要来自火灾的影响。

火烧严重程度是指火灾对于森林草原生态系统的

破坏程度。基于实地踏查的火烧严重度是通过烧死林木的百分比来计算,并且受火强度和火蔓延速度等影响。与此不同的是,基于遥感的火烧严重度可以通过光谱指数的计算来实现。差分归一化燃烧指数(differenced normalized burn ratio, dNBR)是基于火前和火后遥感图像获取的差分燃烧指数,是适用于研究区域的适宜遥感评价指数^[18]。本研究选用 dNBR 指数对草原火灾发生后的火烧严重度进行分级,采用像元二分模型对火后的植被覆盖度(fractional vegetation cover, FVC)进行反演,利用 ArcGIS 的交集制表(tabulate intersection)功能,统计分析不同火烧严重度下的植被恢复过程。

2 结果与分析

2.1 基于 NDVI 的火烧迹地植被恢复分析

归一化植被指数(NDVI)是植物生长状态及空间分布密度的最佳指示因子,与植被分布密度呈线性相关^[19]。选取 NDVI 最大值和平均值作为变量,对比过火区域和未过火区域随时间变化的过程,分析火后植被恢复状况。

由图 1 可以看出,火灾发生当月(2015 年 4 月)火烧迹地 NDVI 均值处于最低水平(0.16)。与火前 2014 年 7 月 NDVI 均值相比较下降约 0.42,与参照区域 NDVI 均值下降幅度一致。主要在于火前植被处于生长旺盛期,火灾发生时植被基本烧毁。2015 年 5—9 月,火烧迹地与参照区域的 NDVI 均值表现出差异,虽然火灾发生后均表现为快速增长,8 月达到峰值。但火烧迹地 NDVI 均值明显高于未发生火灾区域。原因在于火灾发生后,草地燃烧焚尽后留下大量富含钾等元素的草木灰,为当年植被的生长提供大量肥料,植被长势更加旺盛,因此与未发生火灾的区域比较,火烧迹地 NDVI 均值更高。

而到火灾发生后的第 1 年,2016 年植被生长旺盛的 7—8 月,火烧迹地的 NDVI 均值却低于对比区域,主要原因:1)不同时间和地理位置的气候差异性影响,导致遥感指数变化过程可能出现波动;2)与森林生态系统不同,火灾当年草原植被的大量生长使得秋冬季地表累积更多的枯枝落叶,无论是从营养物质还是生长环境都影响到了第 2 年植被的生长。而到了 2017 年的 7—8 月,火烧迹地与未发生火灾的对比区域 NDVI 均值基本达到了同一水平,表明植被恢复到火前状态。图 2 显示 NDVI 最大值变化趋势与 NDVI 均值表现基本一致,即火灾发生当年火烧迹地植被恢复高于未发生火灾区域。而在火后第 1 年植被恢复状况却有低于未发生火灾区域,直到火后第 2 年,火烧迹地植被完全恢复到火前状态。

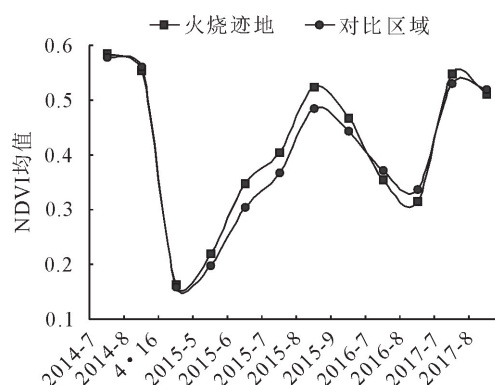


图 1 火烧迹地 NDVI 均值变化序列

Fig. 1 Variation trend of NDVI mean value

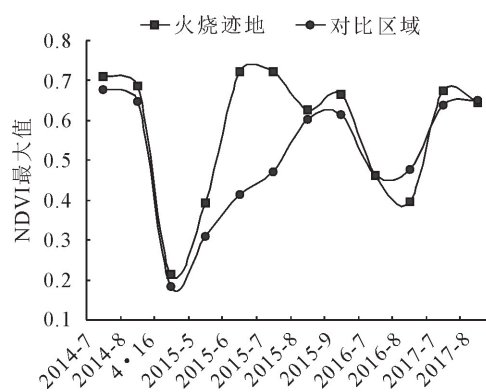


图 2 火烧迹地 NDVI 最大值变化序列

Fig. 2 Variation trend of NDVI Maximum value

2.2 基于 GPP 的火烧迹地植被恢复分析

GPP 和 NPP 是生态系统中植被生产能力的重要评价指标,其变化特征直接体现了地表植被的动态过程,从而使得 GPP 和 NPP 成为火后植被变化研究的重要参数之一^[20]。由于草地植被恢复较快,研究时间分辨率以月为单位,而 NPP 数据主要来源于 MOD17A3 的年数据,因此研究基于 GPP 指标分析火后植被恢复情况。与 NDVI 相同的研究方法,选取 GPP 最大值和平均值作为变量,分析火烧迹地的植被恢复过程。

从图 3、图 4 可以看出,草原火灾的发生对 GPP 有着显著影响。在火灾发生当年(2015 年 4—9 月),GPP 均值呈现增长趋势,而火烧迹地 GPP 均值明显高于未发生火灾的对比区域,到 8 月达到最高值,为 $107.87 \text{ g} \cdot \text{C}/\text{m}^2$ 。火灾发生后第 1 年(2016 年 7—8 月)火烧迹地 GPP 均值开始减小,低于对比区域。到了火后发生后第 2 年(2017 年 7—8 月),GPP 均值与对比区域持平。GPP 最大值变化趋势不显著,但整体变化特征与 GPP 均值一致。

GPP 的恢复过程与 NDVI 变化趋势一致,均表现为火灾当年植被恢复远好于植被火前状态,而火后第 1 年却低于对比区域,火灾发生后第 2 年后植

被基本恢复到火前状态。与森林火灾不同,森林火灾的恢复过程往往需要很长时间,逐年恢复到火前状态;而草原过火后,植被恢复过程时间较短,呈现波动变化过程。

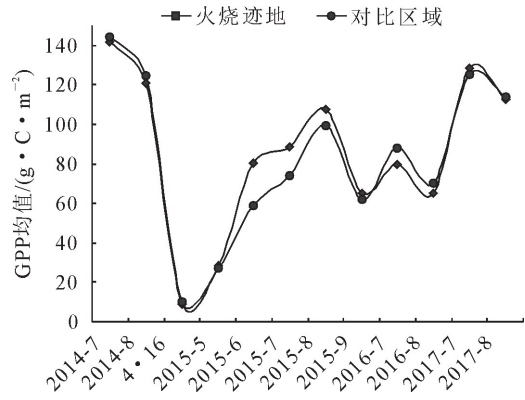


图 3 火烧迹地 GPP 均值变化序列
Fig. 3 Variation trend of GPP mean value

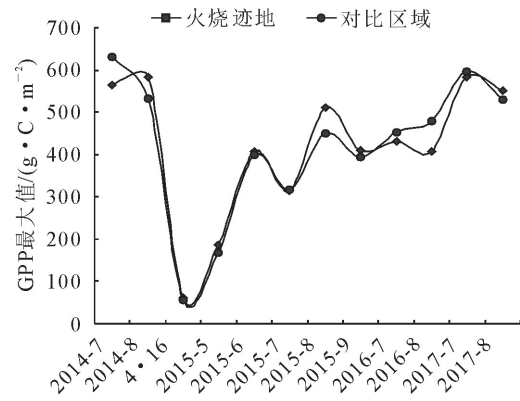


图 4 火烧迹地 GPP 最大值变化序列
Fig. 4 Variation trend of GPP Maximum value

2.3 不同火烧严重程度下植被覆盖度恢复分析

2.3.1 基于 dNBR 指数的草原火烧严重程度分级
燃烧指数是通过选取对火灾比较敏感的波段进行组合运算,使火场范围在影像上得到增强。通过对影像上火场信息的分析可获取过火面积和火烧严重程度等信息,从而对火灾进行遥感评估。燃烧指数被广泛用于火烧严重程度研究,基于已有研究成果,选取适宜研究区域火烧严重程度评价的 dNBR 燃烧指数^[18],对不同火烧严重程度进行分级(图 5)和面积的统计(表 1)。

根据火烧严重程度分级图和火场形态可初步判定起火点位于火场西北角,受西北风影响,火场迅速向东南方向蔓延,与火场实际信息相一致。火烧迹地范围特别大,总过火面积达到 73.3 km²。不同火烧严重度的面积分布差异较小。其中中度火烧面积最大,占总过火面积的 45.5%,其次是重度火烧和轻度火烧面积,分别占总过火面积的 32.9%和 21.6%。但根据火灾现场的踏查结果看,满洲里

4·16 的特大草原火灾不仅波及范围广,而且火烧强度较高,其中对生态系统中植被破坏较为严重的重度火烧占 1/3。

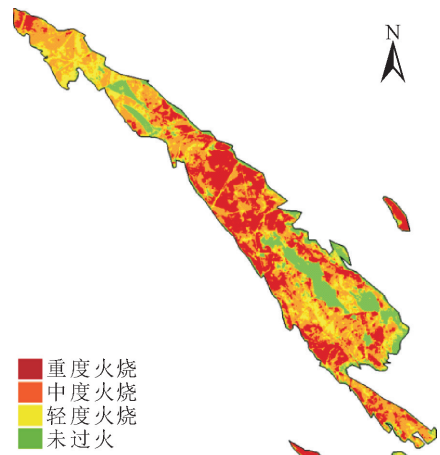


图 5 基于 dNBR 指数的草原火烧严重程度分级
Fig. 5 Map of fire severity based on dNBR burn index

表 1 火烧严重程度面积统计
Table 1 Area statistics of fire severity

火烧严重程度	dNBR 阈值	像素数	面积/km ²	比例/%
未过火	<30	16 293	14.66	—
轻度火烧	[30,182)	17 614	15.85	21.6
中度火烧	[182,299)	37 022	33.32	45.5
重度火烧	>299	26 813	24.13	32.9

2.3.2 火后植被再生过程分析
利用 ENVI5.2 软件 band math 工具分别计算火灾发生后不同年份的同时期植被覆盖度恢复情况(图 6),图像时间用儒略日(Julian Day)表示。同时利用 ArcGIS 叠加分析和交集制表功能,统计出不同火烧严重程度下植被年时序恢复状况(表 2)。

结合图 6 和表 2,从火烧迹地植被覆盖度年时序恢复图中可以看出,火灾发生后当年(2015 年 7 月),火烧迹地植被覆盖度恢复 80%以上的面积为 3 690.5 hm²,可以认为超过 50%面积恢复到了火前状态。而到了火灾发生后 1 a(2016 年 7 月),火烧迹地植被覆盖度恢复 80%以上面积为 1 245.8 hm²,与 2015 年相比减少 66%,而恢复 40%~80%的面积高达 4 272.1 hm²,占总面积的 60%以上,表明 2016 年与 2015 年相比较,植被覆盖度反而有所下降,主要原因在于火灾当年植被的大量生长使得秋冬季地表累积更多的枯枝落叶,无论是从营养物质还是生长环境都影响到了第 2 年植被的生长。而到 2017 年 7 月,5 960.9 hm² 的火烧迹地植被覆盖恢复到 80%,占总面积的 83%,表明火灾发生后第 2 年,植被基本恢复到火前 2014 年 7 月覆盖度状态。整体植被覆盖度年时序变化趋势与植被指数 NDVI 和 GPP 年变化趋势相吻合。

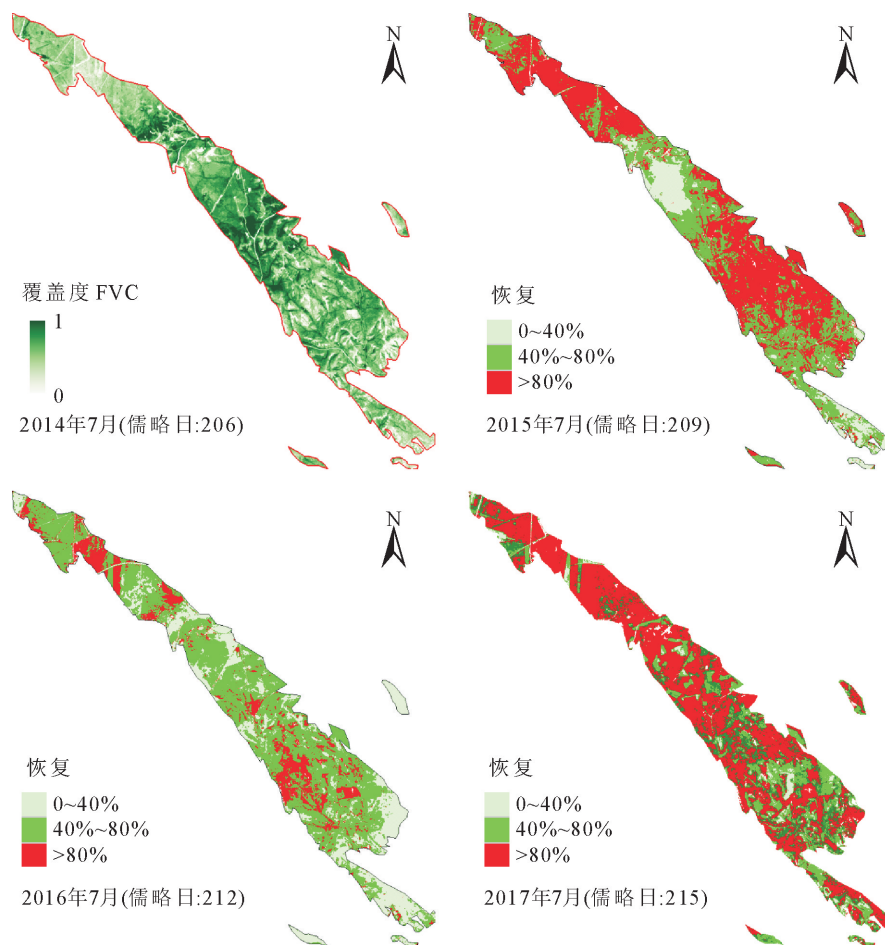


图6 过火区域植被覆盖度恢复情况

Fig. 6 Recovery of vegetation coverage on burned area

表2 火后植被恢复情况

Table 2 Vegetation restoration after fire

时间	火烧严重度 /hm ²	植被覆盖度			hm ²
		0~40%	40%~80%	>80%	
2015年7月	轻度	122.6	567.5	857.7	
	中度	382.6	721.1	2 118.6	
	重度	325.3	1 473.0	714.2	
2016年7月	轻度	405.7	687.3	472.7	
	中度	833.0	2 002.2	492.7	
	重度	550.2	1 582.6	280.4	
2017年7月	轻度	99.4	301.0	1 093.1	
	中度	103.2	543.3	2 666.3	
	重度	31.4	178.9	2 201.5	

从火烧严重度面积分布状况可以看出,2015年到2017年,不同年度植被覆盖度恢复情况不尽相同。火灾发生的2015年,年内不同火烧严重度下植被恢复情况存在一定差异;在轻度火烧下,植被覆盖度恢复80%以上的比重最大,占55%,其次为恢复40%~80%和恢复0~40%,分别占37%和8%;在中度火烧强度下表现出与轻度火烧相同甚至更显著的特征,植被覆盖度恢复80%以上比重最大,高达

66%,其次为恢复40%~80%和恢复0~40%,分别占22%和12%;而在重度火烧强度下,植被恢复40%~80%的比重最大,为59%,其次是为恢复80%以上和恢复0~40%,分别占28%和13%。2016年和2017年,不同火烧严重度下植被覆盖度恢复情况不存在明显差异,比重大小基本一致。2016年7月,不同火烧严重度均在恢复40%~80%比重最大,而2017年7月,均在恢复80%以上比重最大。

3 结论与讨论

基于NDVI和GPP指数的草原火后植被恢复过程表现相似,不同年份植被恢复情况存在一定差异。NDVI和GPP均值变化趋势与最大值变化一致,火灾当年火烧迹地植被恢复高于未发生火灾区域。而在火后第1年植被恢复状况却又低于未发生火灾区域,直到火后第2年,火烧迹地植被基本恢复到火前状态。这与苗庆林等^[21]关于大兴安岭不同植被火后NDVI恢复过程研究结果一致,火后植被NDVI总体呈显著的上升趋势,并呈明显年际波动。

国外学者开展基于 Landsat 时序数据的火后植被恢复评估研究表明,乔木和灌丛在火后第 2 年达到 NDVI 最低值,而草原地区恢复速度非常快,在火后第 2 年即可恢复至火前水平^[22],与本研究结果相似。与森林火灾不同,草原过火后,植被恢复过程时间较短,而森林植被的火后恢复过程往往需要更长时间。研究表明,森林火灾发生后 NDVI 指数完全恢复需要 13 a 以上的时间^[23]。除此之外,利用 NDVI 指数计算得到的表征植被生长状况的生态参数也被广泛地应用到火后植被恢复的研究中,比较常用的有植被覆盖度(FVC)^[24-25]、叶面积指数(LAI)^[26]、净初级生产力(NPP)^[27]和光合作用有效辐射吸收率(fAPAR)^[23]等。

不同火烧严重程度下的植被恢复过程在不同年份存在明显差异。火灾发生当年(2015 年),年内不同火烧严重程度下植被恢复情况存在一定差异,中强度火烧下植被恢复最好,其次是轻度,重度表现最差,这与蔡文华等^[28-29]关于大兴安岭林区火烧迹地森林更新研究结果基本一致。与森林生态系统不同,草原生态系统植被结构单一,火灾发生后植被基本都被烧毁,火烧严重度的差异性在于火灾对土壤破坏的程度不同,重度火烧下,土壤破坏程度更严重,对植被恢复影响更大^[18]。因此,草原火烧严重程度对植被恢复的影响主要表现在发生火灾后植被第 1 个生长季。在之后的年份里,由于草原更新能力强大,火烧严重程度对于草原植被恢复的影响基本不存在。火烧严重程度对森林火后植被恢复影响大于草原,且对森林群落垂直结构影响显著,森林火后 6~8 a^[20-21]、草原火后 2 a 基本可以恢复到火前水平。

考虑到影响火烧迹地植被恢复的因子还包括植被类型、立地条件和物种更新特性等,上述因子及其组合对火后植被恢复的影响有待进一步研究。同时,燃烧指数评估火烧严重度的能力由于受气候、地形和植被类型等因素的影响,表现出空间异质性,现阶段大量研究集中于林火烈度^[30],未来可以借助高分辨率遥感影像,结合地面调查,深入研究地形、气象、可燃物及其相互作用对火烧严重程度空间异质性的影响等。

参考文献:

- [1] BOND W J, MIDGLEY G F. The global distribution of ecosystems in a world without fire[J]. New Phytologist, 2005, 165(2): 525-37.
- [2] 位盼盼, 咎梅. 伊犁地区土地覆被变化及其对植被碳储量的影响[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 158-166.
WEI P P, ZAN M. Changes of land coverage and the impact on vegetation carbon storage in Yili region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 158-166. (in Chinese)
- [3] HARDEN J W, MANIES K L, TURETSKY M R, et al. Effects of wildfire and permafrost on soil organic matter and soil climate in interior Alaska[J]. Global Change Biology, 2006, 12(12): 2391-2403.
- [4] KIELLAND K, MCFARLAND J, OLSON K. Amino acid uptake in deciduous and coniferous taiga ecosystems[J]. Plant and Soil, 2006, 288(1): 297-307.
- [5] 王梦君, 刘万德, 张玉波, 等. 地震干扰后恢复群落物种组成与生物量分配特征[J]. 西北林学院学报, 2010, 25(3): 1-6.
WANG M J, LIU W D, ZHANG Y B, et al. Species composition and biomass allocation in restoration community after earthquake in Wanglang Nature Reserve[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 1-6. (in Chinese)
- [6] 刘发林, 张思玉. 火干扰下马尾松林物种多样性和土壤养分特征[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 36-40.
LIU F L, ZHANG S Y. Characters of species diversity and soil nutrition of *Pinus massoniana* forest under fire disturbance[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 36-40. (in Chinese)
- [7] 孔繁花, 李秀珍, 王绪高, 等. 林火迹地森林恢复研究进展[J]. 林业研究, 2003, 22(2): 60-64.
KONG F H, LI X Z, WANG X G, et al. Research advance in forest restoration on the burned blanks[J]. Journal of Forestry Research, 2003, 22(2): 60-64. (in Chinese)
- [8] 邱扬, 李湛东, 张玉钧, 等. 大兴安岭北部原始林兴安落叶松种群世代结构的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(3): 15-22.
QIU Y, LI Z D, ZHANG Y J, et al. Study on the cohort structure of *Larix gmelini* population in virgin forest in Northern of Daxinganling Mountains[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(3): 15-22. (in Chinese)
- [9] 李秀珍, 王绪高, 胡远满, 等. 林火因子对大兴安岭森林植被演替的影响[J]. 福建林学院学报, 2004, 24(2): 182-187.
LI X Z, WANG X G, HU Y M, et al. Influence of forest fire on vegetational succession in Daxinganling[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2004, 24(2): 182-187. (in Chinese)
- [10] 徐化成, 李湛东, 邱扬. 大兴安岭北部地区原始林火干扰历史的研究[J]. 生态学报, 1997, 17(4): 337-343.
XU H C, LI Z D, QIU Y. Fire disturbance history in virgin forest in Northern region of Daxinganling Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(4): 337-343. (in Chinese)
- [11] 王绪高, 李秀珍, 贺红士, 等. 大兴安岭北坡落叶松林火后植被演替过程研究[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 35-41.
WANG X G, LI X Z, HE H S, et al. Postfire succession of larch forest in the Northern slope of Daxinganling[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 35-41. (in Chinese)
- [12] 张亚姝, 刘佳儒, 唐崇豪, 等. 森林火灾对兴安落叶松结实的影响[J]. 林业科技, 1994, 19(3): 23-24.
ZHANG Y S, LIU J R, TANG C H, et al. Effect of forest fire on seed setting of *Larix gmelinii* [J]. Forestry Science & Technology, 1994, 19(3): 23-24. (in Chinese)
- [13] 谷会岩, 金屿淞, 张芸慧, 等. 林火对大兴安岭偃松-兴安落叶松林土壤养分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(7): 48-54.
GU H Y, JIN Y S, ZHANG Y H, et al. Effects of forest fire

- on soil nutrients of Ass. *Pinus pumila-Larix gmelinii* forest in Great Xingan Mountains[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(7): 48-54. (in Chinese)
- [14] 杜嘉林, 胡海清. 低强度林火对兴安落叶松林土壤理化性质的影响[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(14): 4305-4308.
DU J L, HU H Q. Effects of low-intensity forest fires on soil properties of *Larix gmelinii* [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(14): 4305-4308. (in Chinese)
- [15] 戴昌达. 卫星监测森林火灾及灾后林木恢复变化[J]. 中国航天, 1991(6): 3-6.
DAI C D. Satellite monitoring of forest fires and post disaster forest restoration changes[J]. Aerospace China, 1991(6): 3-6. (in Chinese)
- [16] 高素华, 叶一舫. 大兴安岭火灾迹地的植被与温度场[J]. 林业科学, 1994, 30(1): 74-78.
GAO S H, YE Y F. The vegetation and temperature field in the fire alash region of Daxinganling[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994, (14): 4305-4308. (in Chinese)
- [17] 解伏菊, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 基于 NDVI 的不同火烧强度下大兴安岭林火迹地森林景观恢复[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 368-372.
XIE F J, XIAO D N, LI X Z, *et al.* Forest landscape restoration assessment based on NDVI under different burn intensity in the burned blank of Daxinganling Mountains[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(4): 368-372. (in Chinese)
- [18] 宫大鹏, 李炳怡, 刘晓东. 草原火烧严重度燃烧指数的适用性比较分析[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2434-2441.
GONG D P, LI B Y, LIU X D. Comparative analysis of burn index adaptability when evaluating grassland fire severity[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7): 2434-2441. (in Chinese)
- [19] 李苗苗. 植被覆盖度的遥感估算方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [20] 杨伟. 基于遥感的黑龙江流域火烧迹地及其植被恢复研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2013.
- [21] 苗庆林, 田晓瑞, 赵凤君. 大兴安岭不同植被火后 NDVI 恢复过程[J]. 林业科学, 2015, 51(2): 90-98.
MIAO Q L, TIAN X R, ZHAO F J. NDVI recovery process for post-fire vegetation in Daxinganling [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(2): 90-98. (in Chinese)
- [22] PENA M A, ULLOA J. Mapping the post-fire vegetation recovery by NDVI time series[C]// 2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE). IEEE, 2017.
- [23] CUEVAS G M, GERARD F, BALZTER H, *et al.* Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices [J]. Global Change Biology, 2009, 15(3): 561-577.
- [24] CLEMENT R, NAVARRO C R, GITAS I. Monitoring post-fire regeneration in Mediterranean ecosystems by employing multitemporal satellite imagery [J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(6): 648-658.
- [25] VERAVERBEKE S, GITAS I, KATAGIS T, *et al.* Assessing post-fire vegetation recovery using red-near infrared vegetation indices: accounting for background and vegetation variability [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2012, 68: 28-39.
- [26] MCMICHAEL C E, HOPE A S, ROBERTS D A, *et al.* Post-fire recovery of leaf area index in California Chaparral: a remote sensing-chronosequence approach [J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(21): 4743-4760.
- [27] 林思美, 黄华国. 基于 3PGS-MTCLIM 模型模拟根河林区火后植被净初级生产力恢复及其影响因子[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3712-3722.
LIN S M, HUANG H G. Simulating the post-fire net primary production restoration and its affecting factors by using MT-CLIM and 3PGS model in Genhe forest region, Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(11): 3712-3722. (in Chinese)
- [28] 蔡文华, 杨健, 刘志华, 等. 黑龙江省大兴安岭林区火烧迹地森林更新及其影响因子[J]. 生态学报, 2012, 32(11): 3303-3312.
CAI W H, YANG J, LIU Z H, *et al.* Controls of post-fire tree recruitment in Great Xingan Mountains in Heilongjiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(11): 3303-3312. (in Chinese)
- [29] 李金享, 春雪, 辛颖, 等. 火烧迹地在不同恢复方式下土壤氮素含量研究[J]. 森林工程, 2020, 36(4): 12-20.
LI J H, CHUN X, XIN Y, *et al.* Research on characteristics of soil nitrogen content of burned area after different restorations[J]. Forest Engineering, 2020, 36(4): 12-20. (in Chinese)
- [30] 付婧婧, 吴志伟, 闫赛佳, 等. 气候、植被和地形对大兴安岭林火烈度空间格局的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(5): 1672-1682.
FU Q Q, WU Z W, YAN S J, *et al.* Effects of climate, vegetation, and topography on spatial patterns of burn severity in the Great Xingan Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(5): 1672-1682. (in Chinese)