

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.02.004

基于 *EVI* 的大兴安岭火烧迹地植被恢复特征研究

王冰, 张金钰, 孟勳, 张秋良*

(内蒙古农业大学林学院, 呼和浩特 010019)

摘要: [目的] 选取 Landsat 数据源, 基于 *dNBR* 和 *EVI* 指数开展火烧迹地识别和植被恢复特征研究。[方法] 以 1987 年大兴安岭北部林区根河林业局金林林场森林火灾为研究背景, 在地类划分的基础上, 以 *dNBR* 为基础数据, 采用 K-means 方法识别并提取火烧迹地, 并进行轻、中、重火烈度等级划分; 基于火烧迹地的 *EVI* (增强型植被指数) 值, 采用一元线性回归分析、Mann-Kendall 和 Theil-Sen median 趋势分析等方法分析火烧迹地 1987—2019 年的植被恢复特征, 探究大兴安岭火烧迹地植被恢复进程。[结果] 基于 *dNBR* 得到研究区过火面积为 1 291.68 hm², 轻、中、重度火烧迹地面积占比分别为 45.70%、32.16% 和 22.14%, 重度过火区分布于火烧迹地中心, 从中心向外, 过火强度逐渐降低; 林火对迹地 *EVI* 影响明显, 轻、中和重度火烧迹地 *EVI* 值分别下降约 30.0%、48.3% 和 68.8%; 林火后, 随着植被的恢复, 迹地 *EVI* 值逐渐增加, 与对照区的差异逐渐缩小。不同烈度林地火烧迹地 *EVI* 恢复速率表现为重度 > 中度 > 轻度, 灌草地火烧迹地的 *EVI* 值在林火发生后 2 a 即与对照持平; 火烧迹地植被恢复过程中, 林地 *EVI* 突变点较灌草地少, 林地轻度火烧迹地 *EVI* 突变点较重、中度迹地少, 对照区的突变时间点均滞后于火烧迹地。[结论] *dNBR* 可用于研究区火烧迹地和火烈度提取研究。林火使迹地 *EVI* 值明显下降, 下降程度随火烈度升高而增大。植被恢复过程中, 迹地 *EVI* 值逐渐增加, 林地轻度和中度火烧迹地在火后 6~8 a, 重度火烧迹地在火后 14 a 左右恢复为正常植被状态; 而灌草地火烧迹地在林火发生后 2 a 即可恢复正常。火烈度和自然环境是影响大兴安岭火烧迹地植被恢复的主要因素。

关键词: 遥感; 火烧迹地; 增强型植被指数; 植被恢复

中图分类号: S754

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)02-0032-10

林火是森林生态系统最活跃的因子之一, 可以影响和改变整个系统的碳循环和碳分布格局^[1-3]。火烧迹地的识别与提取是林火遥感研究的基础工作, 国内外学者利用多源遥感数据对不同地区的火烧迹地进行了识别与提取研究^[4-11], 研究多基于 Landsat、MODIS、SPOT 等遥感数据, 采用 *NDVI*、*SWIR*、*NBR*、*BAI* 等指数。因近红外波段对植物活体的叶绿素较敏感, 而中红外波段可用来区分枯死木与土壤、灰烬等^[12], 所以由它们组合而成的归一化燃烧率 (*NBR*) 对林火起到更好的探测作用, 还

能减少地形光谱和光照角度对目标物的不利影响。在植被恢复研究中, 植被指数被广泛应用^[13-16], 其中应用较多的是归一化植被指数 (*NDVI*), 但其易受裸土干扰, 对温度、降水等有滞后效应。而在其基础上发展起来的增强型植被指数 (*EVI*), 可以改变易饱和和与现实植被覆盖缺少线性关系的状况。

本研究以 1987 年大兴安岭根河林业局火烧迹地为研究对象, 基于长时间序列的 Landsat 数据, 在采用随机森林、K-means 等方法进行地类划分和火烧烈度分级的基础上, 利用 *EVI* 指数分析火后植

收稿日期: 2020-06-05 修回日期: 2020-08-24

基金项目: 内蒙古自然科学基金 (2018MS03049)、“十三五”国家重点研发计划 (2017YFC0504003)

* 通讯作者: 张秋良, 博士, 教授。主要研究方向: 森林可持续经营。Email: 18686028468@163.com

作者简介: 王冰, 硕士, 副教授, 主要研究方向: 林业遥感。Email: wbingbing2008@126.com

被的恢复进程和特征,以期为火后植被的恢复和经营提供一定的数据支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区地处内蒙古自治区根河林业局金林林场,121°14'~121°24' E, 50°50'~50°57' N,位于大兴安岭的西北坡,属于典型的寒温带大陆性季风气候,年平均气温-3℃,年平均降水量500 mm。土壤类型主要为棕色针叶林土,兴安落叶松(*Larix gmelinii* (Rupr.) Kuzen)是主要的优势树种,伴生有白桦(*Betula platyphylla* Suk.)、蒙古栎(*Quercus mongolica* Fisch.)、山杨(*Populus davidiana* Dode)等。灌木主要有兴安杜鹃(*Rhododendron dauricum* L.)、越桔(*Vaccinium vitis-idaea* Linn.)、杜香(*Ledum palustre* L.)等。因冻土层和蒙古草原风的普遍存在,该区在5、6月较干旱,火险增多。本次研究的森林火灾发生于1987年5月,属雷击火,过火面积约1292 hm²,过火前主要为阔叶混交林、灌木林和草地。

1.2 数据准备与预处理

根据数据可获取性和数据质量,选用了1986—2019年Landsat-5 TM和Landsat-8OLI共计17景遥感影像,其中OLI数据4景,成像时间均在植被生长最好的6—8月(具体见表1)。本研究借助ENVI5.3软件对数据进行了必要的预处理,主要包含辐射校正和大气校正。

1.3 数据处理与分析

1.3.1 地类划分 根据土地利用现状分类标准(GB/T210102017),选用随机森林分类法将研究区划分为林地、灌草地和其它3类。

1.3.2 火烧迹地提取与烈度分级 将过火前后1986年和1987年的NBR值相减,得到dNBR值,用于火烧迹地的提取。具体公式为:

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

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

式中,NBR是归一化火烧指数,NIR,SWIR2分别是TM第4波段近红外波段、第7波段中红外波段2,NBR_{pre}、NBR_{post}分别表示火前和火后影像的NBR值。

基于dNBR值,利用K-means聚类法区分火烧

表1 1986—2019年Landsat数据获取时间
Table 1 Data acquisition time of Landsat from 1986 to 2019

年份 Year	传感器类型 The sensor type	月份 Month		
		6月 Jun	7月 Jul	8月 Aug
1986	Landsat TM	√		
1987	Landsat TM	√		
1989	Landsat TM			√
1991	Landsat TM			√
1992	Landsat TM		√	
1995	Landsat TM		√	
1996	Landsat TM			√
1999	Landsat TM		√	
2001	Landsat TM		√	
2004	Landsat TM	√		
2006	Landsat TM		√	
2008	Landsat TM			√
2009	Landsat TM			√
2011	Landsat OLI		√	
2014	Landsat OLI	√		
2015	Landsat OLI		√	
2019	Landsat OLI	√		

注:“√”表示该年影像具体月份。
Note:“√” represents the specific month of images in the year.

迹地、非火烧迹地,并对火烧区域进行轻、中、重烈度分级^[17-18]。采用误差混淆矩阵法对分类结果进行精度验证。

1.3.3 EVI指数计算 选用EVI^[19]分析火烧迹地植被特征。利用Landsat5的第1、3、4波段和Landsat8的第2、4、5波段计算得到研究区的增强型植被指数(EVI)数据,其计算公式为:

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6.0\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1} \quad (3)$$

式中, ρ_{nir} , ρ_{red} , ρ_{blue} 分别为Landsat5、Landsat8数据的近红外、红光和蓝光波段反射率,该植被指数可免受火烧迹地裸露土壤的干扰以及减除对温度、降水等的滞后效应。

1.3.4 EVI变化分析 采用一元线性回归法、Mann-Kendall突变检验法与Theil-Sen median趋势分析法分析EVI的时间变化特征。

(1)一元线性回归

表达式^[20]为:

$$y = ax + b \quad (4)$$

式中, y 为样点拟合的因变量估计值, x 为自变量, a 为回归系数, b 为常量。

(2) Mann-Kendall (M-K) 突变检验
Mann-Kendall 趋势检验的过程^[21]为:

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sign}(EVI_k - EVI_i) \quad (6)$$

$$\text{Var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

$$\text{sign}(EVI_k - EVI_i) = \begin{cases} 1, & EVI_k - EVI_i > 0 \\ 0, & EVI_k - EVI_i = 0 \\ -1, & EVI_k - EVI_i < 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, sign 为符号函数, EVI_k 及 EVI_i 为时序数据集, n 为集合长度。在 α 显著性水平下, 当 $|Z_c| > U_{1-\alpha/2}$ 时, 则时间序列在 α 水平上变化趋势显著。若 $Z_c > 0$, 则变化趋势上升, 若 $Z_c < 0$, 则变化趋势为下降。

(3) Theil-Sen median 趋势分析

Theil-Sen median 趋势分析可以把 EVI 的变化趋势量化, 表示 EVI 在单位时间内的变化量, 其公式^[21]是:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{EVI_i - EVI_j}{i - j} \right), \forall j < i \quad (9)$$

式中, $1 < i < j < n$ 。若 $\beta > 0$, 则 EVI 时间序列呈上升趋势, 否则为下降趋势。

2 结果与分析

2.1 地类划分

利用 1986 年 Landsat 影像, 基于随机森林法将研究区地类划分为林地、灌草地和其它 3 种类型 (见图 1)。经统计, 研究区林地、灌草地和它的面积分别为 11436.75、1556.55、1226.7 hm^2 , 占比分别为 80.43%、10.95%、8.63%。

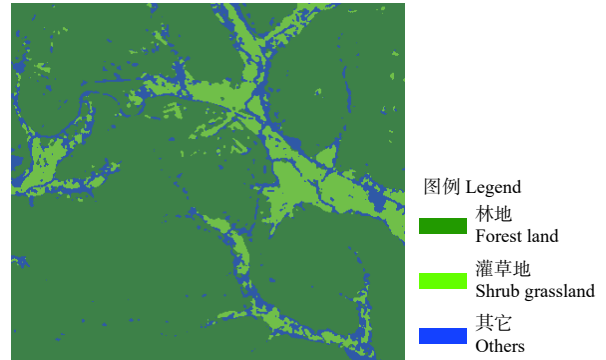


图 1 地类划分示意图

Fig. 1 Land classification map

误差混淆矩阵验证结果 (表 2) 显示, 林地、灌草地、其它的制图精度分别为 80.31%、83.70%、83.66%, 用户精度分别为 83.17%、81.76%、82.97%, 采用随机森林法的总精度、Kappa 系数分别为 82.52%、0.74, 分类精度较高, 结果较准确。

2.2 火烧迹地提取

基于 $dNBR$ 值, 利用 K-means 方法, 提取了研究区的火烧迹地, 并进行了火烈度分级 (图 2)。从图 2 可以看出, 轻度过火区域的 $dNBR$ 值居于 0.25~0.39 之间, 中度过火区域的 $dNBR$ 值为 0.39~0.60, 重度过火区域的 $dNBR$ 值在 0.60 以上; 1987 年研究区火烧迹地面积共计 1291.7 hm^2 , 轻度过火区域

表 2 地类划分精度验证

Table 2 Accuracy verification of land classification

类型 Types	林地 Forest land	灌草地 Shrub grassland	其它 Others	总样本数 Total samples	制图精度 Mapping accuracy/%
林地 Forest	420	62	23	505	80.31
灌草 Grassland	82	529	36	647	83.70
其它 Others	21	41	302	364	83.66
总样本数 Total samples	523	632	361	1516	-
用户精度 User accuracy/%	83.17	81.76	82.97	-	-
总精度 Total accuracy/%			82.52		
Kappa系数 Kappa coefficient			0.74		

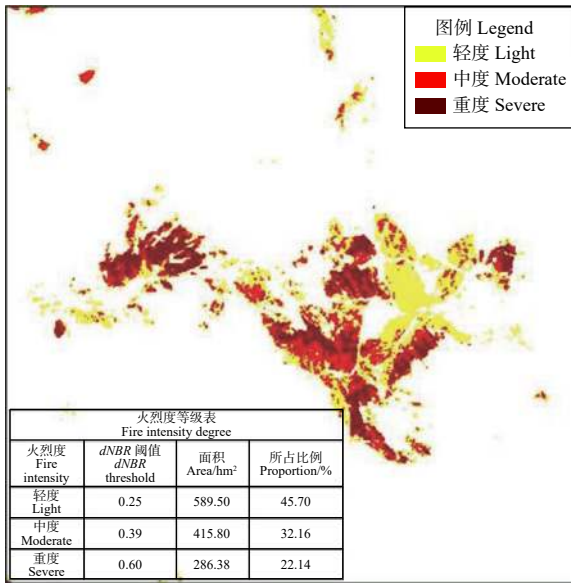


图2 火烧迹地空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of burned area

面积占比最大(45.70%),重度过火区域面积占比最小(22.14%)。从空间分布看,重度过火区域分布于火烧迹地的中心,由中心向外,过火强度逐渐降低,轻度过火区域多分布于四周的非森林区域,

受林火影响较小。

表3结果表明,本研究分类精度满足要求。未燃烧的制图和用户精度均在98.0%以上,其特征最明显;高烈度的特征次之,除小部分会与中烈度斑块混淆外,易与低烈度和未燃烧区域区分,制图与用户精度均在91.0%以上;中烈度会与部分低烈度或高烈度区域相似;低烈度特征最不明显,易与未燃烧斑块和中等烈度斑块混淆,中、低烈度的制图和用户精度均在80%~90%。

2.3 EVI空间变化特征

从1986—2019年EVI时间序列空间分布图(图3)可以看出,1986年研究区(即火烧迹地)的EVI值多在0.20~0.40,零星分布有0.40~0.60的区域,即植被生长状况中等;但在1987年火烧后,研究区EVI值明显下降,大部分处于0.07~0.20之间。1989—1995年间,EVI值在增加,植被处于恢复中,1995年时,研究区的EVI值只有少数在0.40以下,其余均在0.40~0.80之间;到2019年,研究区植被的EVI值处在0.40~0.80之间,且以0.40~0.60的居多。

表3 火烈度分类精度验证

Table 3 Accuracy verification of fire intensity classification

项目 Items	未燃烧 Unburned	低烈度 Light	中烈度 Moderate	高烈度 Severe	制图精度 Mapping accuracy/%
未燃烧 Unburned	1500	121	0	0	99.0
低烈度 Light	105	1032	102	0	83.2
中烈度 Moderate	0	83	1055	52	88.7
高烈度 Severe	0	0	69	726	91.3
用户精度 User accuracy/%	98.6	83.5	86.1	93.3	
总精度 Total accuracy/%			89.0		
Kappa系数 Kappa coefficient			0.85		

2.4 EVI时间变化特征

2.4.1 EVI时间变化分析 在火烧迹地周边选取对照样区(含灌草地和林地),分别计算不同火烧烈度区域及对照区各年的EVI均值,见图4和图5。

经统计,林地林火发生前(1986年),轻、中、重度火烧迹地及对照区的EVI值分别为0.30、0.29、0.32和0.37,差别较小。林火发生后(图4),1987年各区域的EVI值分别为0.21、0.15、0.10、0.45。对照区EVI值有所增加,而火烧迹地的EVI值明显下降,轻、中和重度火烧迹地EVI值分别下降了约30%、48.3%和68.8%,表明火烈度越高,EVI

值下降越明显。之后,随着恢复时间的增加,火烧迹地的EVI值逐渐提高,与对照区的差异逐渐缩小;各区域EVI增加速率大小依次为重度>中度>轻度>对照区。1990年左右,火烧迹地的EVI均值上升至0.41,相比对照区域(EVI=0.45)差异不明显;1990—1995年,轻、中、重度火烧迹地的EVI值均持续增加,直至与对照区的EVI值相等,即0.53;1996—2002年,各区域的EVI值出现轻微波动,但基本呈增加趋势;2004—2006年和2008—2011年间,轻、中、重度火烧迹地的EVI值继续增加,其中重度区域变化最明显,分别由

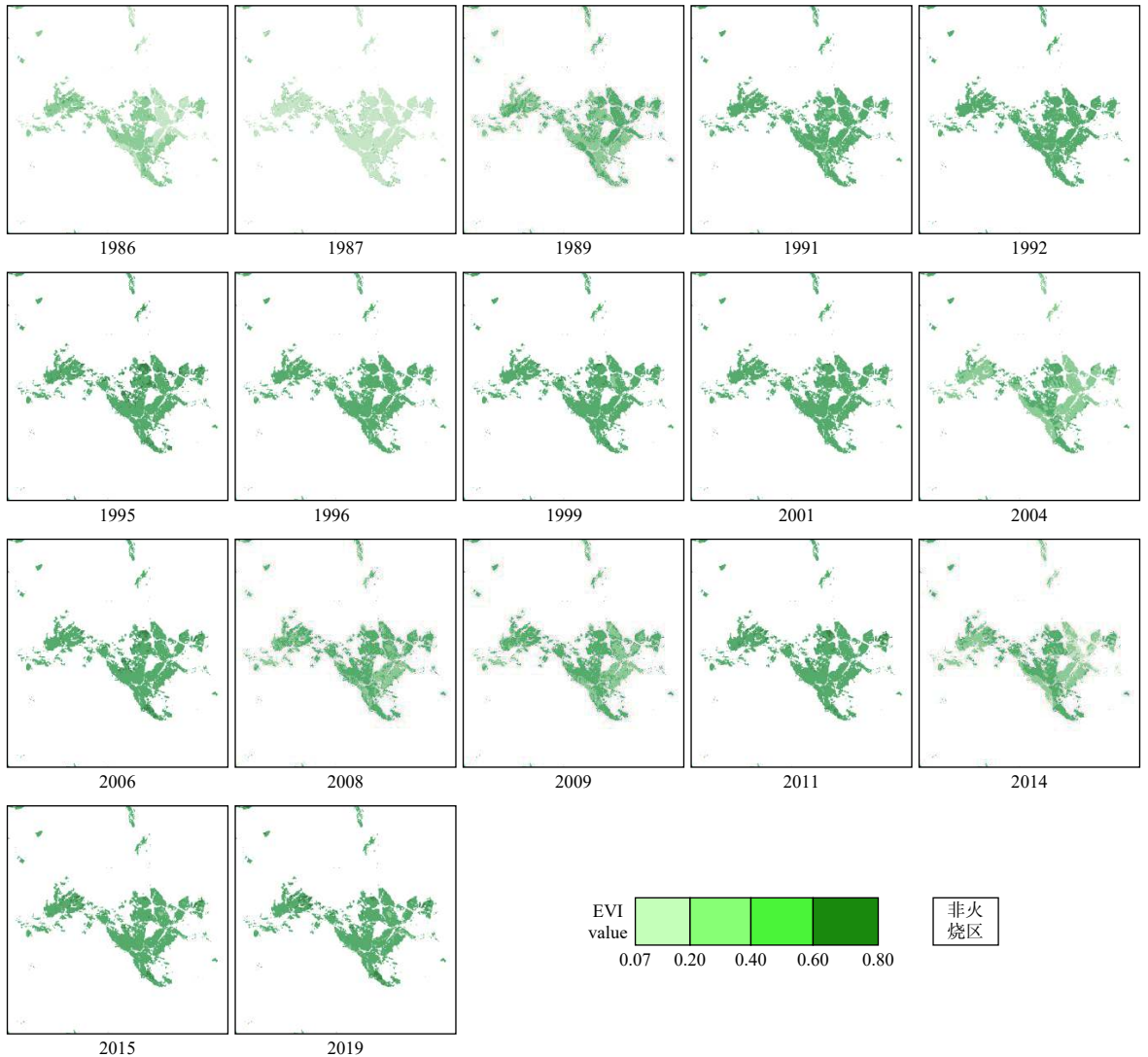


图3 1986—2019年EVI变化

Fig. 3 EVI variation map in 1987—2019

0.38增加至0.53,由0.42增加至0.55。不同火烈度与对照区在1995年、2002—2004年、2006—2008年和2011—2014年的EVI值均有所下降,但下降程度不同,对照区变化较平缓,而火烧迹地EVI值变化程度随火烈度增加而逐渐增强。说明火烧迹地生态系统较脆弱,受环境影响更明显。火烧2a后,重度火烧迹地的EVI值增加最明显,增加值为0.31。在1987—2000年,EVI值的大小始终为对照区>轻度>中度>重度;2000年以后,火烧迹地植被状态较好,除2004和2014年外,其EVI均高于对照区。

经统计,灌草地林火发生前(1986年),火烧迹地和对照区的EVI值无明显差别。林火发生后(如图5所示),1987年对照区EVI值有所增加,

而火烧迹地EVI值下降明显,下降了约35.3%。但之后火烧迹地的EVI值迅速增加,在1989年基本与对照区持平,恢复到火烧前水平;之后的时间里,火烧区和对照区的EVI值均无明显差异。

2.4.2 EVI趋势分析 利用Theil-Sen median方法对1987—2019年不同地类、不同火烈度的EVI值(6种情形)进行趋势分析,其过程在python中运行,结果如表4。

由表4可知,重度和中度林地火烧区的EVI呈极显著增加趋势,轻度林地火烧区呈显著增加趋势,且植被恢复的效果为重度>中度>轻度。灌草地、林地对照区的EVI增加趋势不显著。

2.4.3 EVI突变分析 利用M-K方法对不同烈度、不同地类的EVI值进行时间序列突变分析^[22],

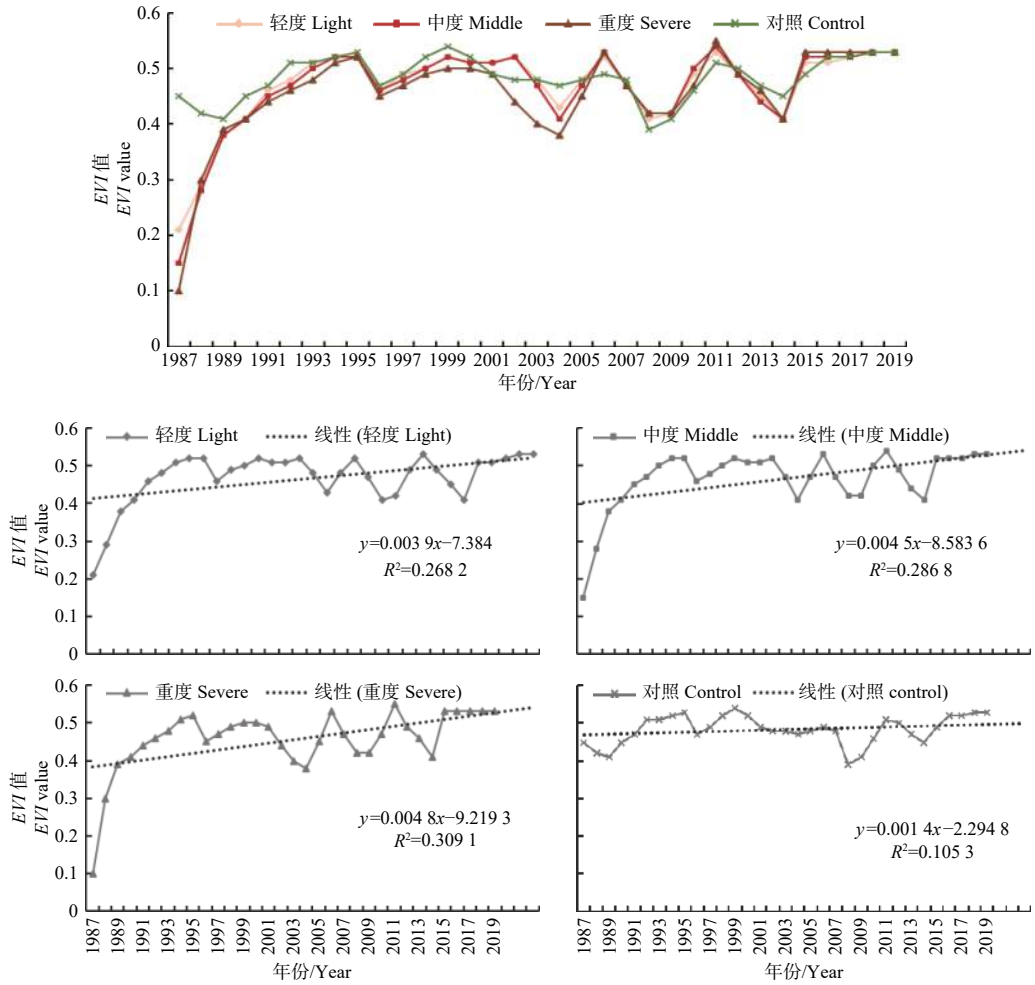


图4 1987—2019年林地 *EVI* 变化曲线

Fig. 4 *EVI* variation curves of forest area in 1987—2019

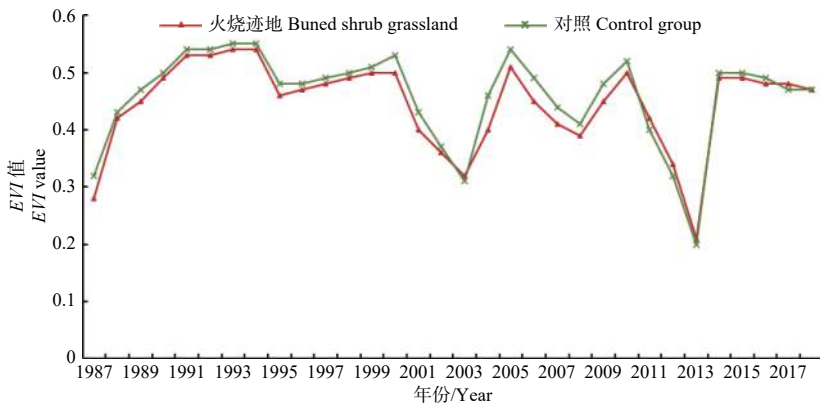


图5 1987—2019年灌草地火烧迹地 *EVI* 变化曲线

Fig. 5 *EVI* variation curves of shrub grassland in 1987—2019

结果见图6。

如图6所示,对于林地,轻度火烧迹地 *EVI* 的突变时间点出现在1990、2003、2018年,中度火烧迹地 *EVI* 的突变时间点出现在1990、2003、2006、2011、2017年,重度火烧迹地 *EVI* 的突变

时间点出现在1990、2001、2011、2017年,对照区 *EVI* 的突变时间点出现在1991、2001、2019年。对比发现,林地的 *EVI* 值在1990—1991、2001—2003、2017—2019年间均出现了突变,突变的产生可能是因为不稳定的气候因素,且对照区的突变

表4 1987—2019年EVI变化趋势统计
Table 4 Statistics on EVI variation trend from 1987 to 2019

项目 Items	趋势 Trend	单位时间变化量 Change per unit time	检验统计量 Test statistic	方差 Variance	标准化后检验统计量 Post-standardization inspection statistic(Z_C)
轻度森林火烧区 Light burned forestland	显著增加	0.016	156	4 104.667	2.419 (> 1.96)
中度森林火烧区 Moderate burned forest land	极显著增加	0.005	180	4 099.333	2.796 (> 2.58)
重度森林火烧区 Severe burned forest land	极显著增加	0.003	191	4 123.667	2.959 (> 2.58)
森林对照区 Control forest	不显著增加	0.156	92	4 110.667	1.419
灌草火烧区 Burned shrub grassland	不显著增加	0.675	-28	4 140.667	-0.420
灌草对照区 Control shrub grassland	不显著增加	0.484	-46	4 138.0	-0.700

注:置信区间为0.01。

Note: The confidence interval is 0.01.

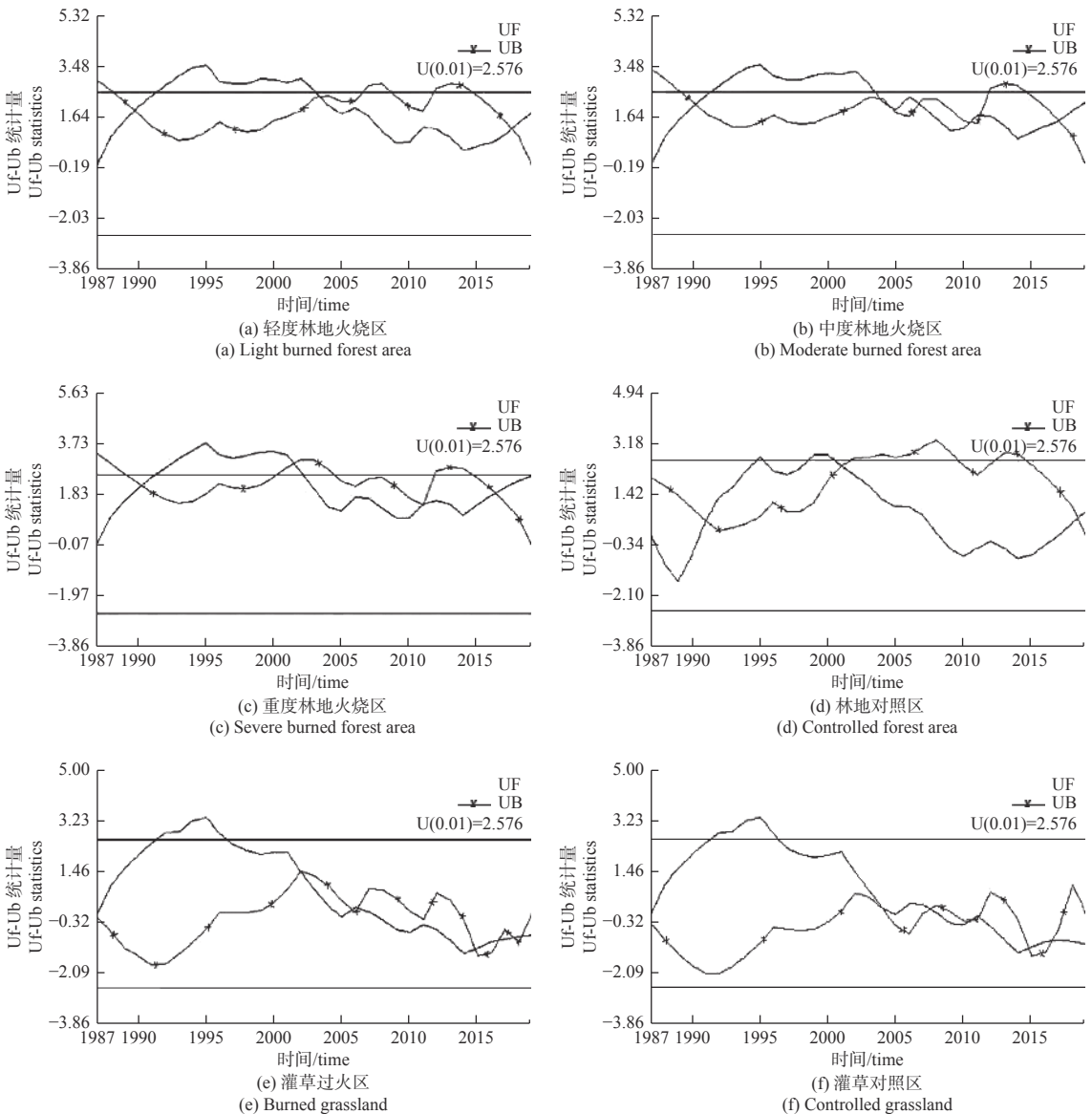


图6 1987—2019年EVI突变分析

Fig. 6 EVI mutation analysis in 1987—2019

时间点较火烧迹地滞后。对于灌草地,火烧迹地与对照区的EVI突变特征较一致。

3 讨论

3.1 EVI时间变化特征

火灾发生后,研究区的EVI值出现明显下降,且火烈度越高,下降越明显。之后EVI值逐渐增加,与对照的差异逐渐缩小,植被恢复特征明显。研究时段内,研究区的EVI值出现了几次下降,可能受到了环境条件的影响;且火烈度不同,EVI下降程度不同,对照区变化较平缓,火烈度越强,波动越明显。由于林地的组成较复杂,过火区域即使已经恢复为原来状态,其生物多样性、稳定性还会发生变化^[23],易受到自然环境的影响。1987—1995年间,由于火后开放的环境使幼苗更容易获得阳光而很快恢复为火烧前的状态,也可得知此时的植被恢复状态与受灾程度有很大关系,此时火烧区的植被生长还不稳定,容易受环境影响而产生较大波动。2000年之后EVI的变化,说明植被的生长已经不再主要受1987年林火的影响,而更易受到该区域立地条件的制约,这与孙桂芬等^[4]的研究结果一致;从另一方面来说,林火也有一定的积极作用,可以促进群落演替和某些树种的生长发育^[24]。对轻、中、重度的EVI变化曲线分别拟合后发现,EVI恢复速率为重度>中度>轻度,这与王爱爱等^[25]研究人员的结论相一致,即森林恢复速率与火烧强度呈正相关。对于草原来说,火烧强度不是十分重要的因素^[26],故本研究未进行灌草火烧迹地的火烈度分级,灌草火烧迹地经过2a时间的恢复,已经与对照区无显著差异,王春霞等人^[27]的研究结果也表明草原在发生火灾后的几个月或者一到两年的时间里即可恢复原来的状态。总体上看,随着时间的变化,研究区火烧迹地的植被在逐步恢复。

3.2 EVI趋势与突变特征

林地重度、中度过火区可以较彻底地清理地表冠层,更有利于幼树生长;在林地轻度火烧区,烧毁树木较少,而林下灌木和荒草等地被层被燃尽,使种子与土壤接触的机会变大,在火后几年时间内EVI变化明显,但持续时间不长,故其总体增加趋势没有中度和重度森林火烧区明显;灌草区由于其恢复速度快,在火烧后几乎2a的时间就已经恢复,之后受环境的影响较大,波动较大,所以灌草

区的植被增加趋势并不明显。相对于林地,灌草地的突变点更多,说明森林生态系统的稳定性要比草地生态系统强。而不同烈度下的森林火烧迹地的突变情况也不尽相同,且对照区的突变时间点较火烧迹地滞后,这与其本身的立地条件有关。本研究关于EVI变化趋势的分析结果与王爱爱^[25]的结论较一致。

4 结论

本研究以大兴安岭北部林区1987年森林火灾为研究背景,基于Landsat数据开展了火烧迹地识别和植被恢复特征研究。主要研究结论如下:

(1) 研究区过火面积为1291.68 hm²,基于dNBR值将研究区划分为轻、中、重度火烧迹地,其面积占比分别为45.70%、32.16%和22.14%,dNBR可用于研究区火烧迹地和火烈度提取研究。

(2) 林火对迹地EVI影响明显,轻、中和重度火烧迹地EVI值分别下降了约30%、48.3%和68.8%,火烈度越高,EVI下降越明显。

(3) 林火后,随着植被的恢复,迹地EVI值逐渐增加,与对照区的差异逐渐缩小。不同烈度林地火烧迹地EVI恢复速率表现为重度>中度>轻度,轻度和中度火烧迹地在火后6~8a,重度火烧迹地在火后14a左右恢复为正常植被状态;而灌草地火烧迹地在林火发生后2a即可恢复正常。

(4) 过火区生态系统脆弱,易受环境条件影响。火烧迹地恢复过程中,林地EVI突变点较灌草地少,说明森林生态系统较灌草地稳定性强。不同烈度林地火烧迹地的突变情况也存在一定差异,且对照区的突变时间点滞后于火烧迹地。

参考文献:

- [1] 胡海清,罗斯生,罗碧珍,等.林火干扰对广东省2种典型针叶林森林生物碳密度的影响[J].林业科学研究,2020,33(1):19-27.
- [2] 赵志霞,李正才,周君刚,等.火烧对北亚热带杉木林土壤有机碳的影响[J].林业科学研究,2016,29(2):301-305.
- [3] 徐凯健,林伟盛,杨智杰,等.米楮人促更新林皆伐火烧后初期土壤CO₂通量动态[J].林业科学研究,2016,29(1):53-60.
- [4] 孙桂芬.森林火烧迹地识别及植被恢复卫星遥感监测方法[D].北京:中国林业科学研究院,2018.
- [5] Fernández T A, Mazuelas B P. Landsat and MODIS images for burned areas mapping in Galicia, Spain[D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute of Technology, 2012.

- [6] De Santis A, Asner G P, Vaughan P J, *et al.* Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1535-1545.
- [7] Palandjian D, Gitas I Z, Wright R, *et al.* Burned area mapping and post-fire impact assessment in the Kassandra peninsula (Greece) using Landsat TM and Quickbird data[J]. *Geocarto International*, 2009, 24(3): 193-205.
- [8] 陈本清, 徐涵秋. 遥感技术在森林火灾信息提取中的应用[J]. *福州大学学报*, 2001, 29(2): 23-26.
- [9] 高中灵, 汪小钦, 周小成. 火烧迹地信息遥感快速提取方法研究[J]. *国土资源遥感*, 2005, 17(4): 38-41.
- [10] 周小成, 汪小钦, 高中灵. 基于知识的多时相TM图像森林火烧迹地快速提取方法[J]. *灾害学*, 2005, 20(2): 22-26.
- [11] 吴立叶, 沈润平, 李鑫慧, 等. 不同遥感指数提取林火迹地研究[J]. *遥感技术与应用*, 2014, 29(4): 567-574.
- [12] Chu T, Guo X, Takeda K. Remote sensing approach to detect post-fire vegetation regrowth in Siberian boreal larch forest[J]. *Ecological Indicator*, 2016, 62: 32-46.
- [13] 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.
- [14] Epting J, Verbyla D. Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(6): 1367-1377.
- [15] 常 禹, 陈宏伟, 胡远满, 等. 林火烈度评价及其空间异质性研究进展[J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(2): 28-34.
- [16] 蒋迎鹏. 浅析森林在环境保护中的重要作用[J]. *民营科技*, 2014, (2): 264.
- [17] Femande-Manso A, Quintano C, Roberts D. Burn severity influence on post-fire vegetation cover resilience from Landsat MESMA fraction images time series in Mediterranean forest ecosystem[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 184: 112-123.
- [18] 王 伟, 宋卫国, 刘士兴, 等. K-means聚类与多光谱阈值相结合的MODIS云检测算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(4): 1061-1064.
- [19] Hui Q L, Huete A. Feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2): 457-465.
- [20] Gislason P O, Benediktsson J A, Sveinsson J R, *et al.* Random forests for land cover classification[J]. *Pattern Recognition Letter*, 2006, 27(4): 294-300.
- [21] 刘 洋, 李诚志, 刘志辉, 等. 1982—2013年基于GIMMS-NDVI的新疆植被覆盖时空变化[J]. *生态学报*, 2016, 36(19): 6198-6208.
- [22] 王琰森. 水文时间序列趋势与突变分析系统开发与应用[J]. *甘肃科技*, 2016, (9): 36-37, 11.
- [23] 李明泽, 康祥瑞, 范文义, 等. 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.
- [24] 邓湘雯, 孙 刚, 文定元. 林火对森林演替动态的影响及其应用[J]. *中南林业科技大学学报*, 2004, 24(1): 51-55.
- [25] 王爱爱. NDVI时间序列重建及火后森林恢复时空动态分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2018.
- [26] 周道玮. 火烧对草地的生态影响[J]. *中国草地*, 1992, (2): 74-77.
- [27] 王春霞, 张丽华, 包玉海, 等. 基于NDVI和NPP的森林火灾与草原火灾恢复情况的对比分析(英文)[C]//. 风险分析和危机反应中的信息技术//中国灾害防御协会风险分析专业委员会第六届年会论文集. 北京: 中国灾害防御协会风险分析专业委员会, 2014, 649-654.

Study on Vegetation Restoration Characteristics of Daxing'anling Burned Area Based on *EVI*

WANG Bing, ZHANG Jin-yu, MENG Meng, ZHANG Qiu-liang

(College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] Using Landsat images to study the identification and vegetation restoration of burned areas based on *dNBR* (difference Normalized Burned Ratio) and *EVI* (Enhanced Vegetation Index). [Method] Taking the 1987 forest fire happened in the northern region of Daxing'an Mountain as the research background, based on land classification and *dNBR* values, the burned areas were identified and extracted by K-means method, and were classified into light, moderate and severe fire intensity area; and then, based on the *EVI* values of the burned areas, the vegetation restoration characteristics in the burned area from 1987 to 2019 were analyzed by using the methods of one-way linear regression, Mann-Kendall and Theil-Sen median, so as to explore the vegetation restoration process of burned areas in Daxing'an Mountains. [Result] Based on *dNBR*, the total burned area was 1 291.68 hm², and the proportions of light, moderate and severe burned area were 45.70%, 32.16% and 22.14%, respectively. The severe burned area was distributed in the center of the burned area, and the fire intensity gradually decreased from the center to the outside. The impact of forest fire on *EVI* was obvious, the *EVI* values of light, moderate and severe burned area decreased by 30.0%, 48.3% and 68.8%, respectively. After the forest fire, the *EVI* values of burned areas gradually increased with the vegetation recovery, and their differences with the controlled area were gradually reduced. The recovery rates of *EVI* on different burned forest lands were severe > moderate > light, and the *EVI* value of shrub grassland was the same as that of the controlled area 2 years after the forest fire. During the process of vegetation restoration in the burned area, the *EVI* mutation points of forest land were less than that of shrub grassland, *EVI* mutation points of light burned area were less than those of severe and moderate burned area, and the mutation time of controlled area were all lagged behind that of burned area. [Conclusion] *dNBR* can be used to extract the burned area and fire intensity. The *EVI* values of burned area decreased obviously because of the fire, and the decreasing degree increased with the increase of fire intensity. In the process of vegetation restoration, the *EVI* values of the burned are increased gradually; the light and moderate burned forest land recovered to normal vegetation state 6–8 years after the fire, and the severe burned area returned to normal vegetation state about 14 years after the fire, while the burned shrub grassland recovered to normal 2 years after the fire. The ecosystem in the burned area is fragile and vulnerable to environmental conditions. Therefore, the fire intensity and natural environment are the main factors affecting the vegetation restoration of the burned area in Daxing'an Mountains. The results can provide some data support for vegetation restoration and management in Daxing'an Mountains.

Keywords: remote sensing; burned area; Enhanced Vegetation Index (*EVI*); vegetation restoration

(责任编辑: 彭南轩)