

大兴安岭火烧迹地遥感提取研究

郝帅^{1,2}, 王星¹, 张秋良^{1,2}, 王冰^{1,2}, 田原³

(1. 内蒙古农业大学 林学院, 呼和浩特 010019; 2. 内蒙古大兴安岭森林生态系统国家野外科学观测研究站, 内蒙古 根河 022350; 3. 黄山学院 生命与环境科学学院, 安徽 黄山 245041)

摘要: 林火是森林生态系统的重要影响因子, 遥感技术的发展为林火监测和损失估算提供了强有力的技术手段。以内蒙古根河市 1987 年、2003 年和 2015 年火烧迹地为研究对象, 基于 Landsat 遥感影像, 对比分析 NDVI, EVI, GEMI, BAI, NBR, dNBR, NDSWIR 等 7 种常见遥感指数对火烧迹地的提取能力, 从而筛选出适合大兴安岭火烧迹地提取的最佳遥感指数。通过对遥感指数和分离指数的对比分析, 得出结论: 1) 经历林火干扰的植被, 其光谱特征也相应改变, 基于近红外波段的遥感指数可将火烧迹地与正常植被区分。2) dNBR 为提取大兴安岭火烧迹地的最佳遥感指数, 其提取精度在 90% 以上; 其次为 NBR, BAI, NDSWIR; NDVI 和 EVI 最差。3) 基于 dNBR 提取的 3 个不同年份火烧迹地面积分别为 3 145.23, 197 726.67, 48.06hm²。

关键词: 大兴安岭; 火烧迹地; Landsat; 遥感指数; 分离指数

中图分类号: TP79; S762 文献标识码: A 文章编号: 1002-6622(2022)02-0075-07

DOI: 10.13466/j.cnki.lyzyl.2022.02.011

Study on Remote Sensing Extractions of Burned Areas in Greater Khingan Mountains

HAO Shuai^{1,2}, WANG Xing¹, ZHANG Qiuliang^{1,2}, WANG Bing^{1,2}, TIAN Yuan³

(1. Forestry College Inner Mongolia Agricultural University Hohhot 010019, China; 2. Forest Ecosystem National Observation and Research Station of Greater Khingan Mountains, Genhe, Inner Mongolia 022350, China; 3. College of Life and Environmental Science, Huangshan University Huangshan, Anhui 245041, China)

Abstract: Fire is an important influencing factor of forest ecosystem. The development of remote sensing technology provides a powerful technical means for forest fire monitoring and loss estimation. Based on Landsat images, the extraction abilities of seven common remote sensing indexes (NDVI, EVI, GEMI, BAI, NBR, dNBR, NDSWIR) for the burned area in 1987, 2003 and 2015 of Greater Khingan Mountains were compared and analyzed, so as to select the best remote sensing index suitable for the extraction of burning areas in Greater Khingan Mountains. Through the comparative analysis of the remote sensing indexes and the separation index, the following results were obtained: (1) after the fire, the spectral

收稿日期: 2022-01-15; 修回日期: 2022-02-23

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“火烧及采伐迹地森林生态系统恢复和功能提升关键技术”(2017YFC0504003); 黄山学院人才启动项目“树干直径微变化特征及其对环境因子的响应研究”(2020xkj012)

作者简介: 郝帅(1992-), 男, 内蒙古巴彦淖尔人, 实验师, 研究方向: 林业遥感、森林可持续经营。

Email: alan@imau.edu.cn

通讯作者: 王冰(1981-), 女, 山东潍坊人, 副教授, 博士, 研究方向: 林业遥感、森林可持续经营。

Email: wbingbing2008@126.com

characteristics of vegetation changed correspondingly. The remote sensing index based on near - infrared band can distinguish the burned area from the normal vegetation. (2) The dNBR was the best remote sensing index for extracting the burned area in Greater Khingan Mountains, followed by the NBR, BAI and NDSWIR, the NDVI and EVI were the worst. (3) The areas of three burned areas based on dNBR were 3 145.23, 197 726.67 and 48.06 hm^2 , respectively.

Key words: Greater Khingan Mountains; burned area; landsat; remote sensing index; separation index

林火对森林生态系统具有较大威胁,它不仅会烧毁成片的森林植被,伤害林内动物,而且还会影响森林的演替,破坏森林在小气候和涵养水源上的作用,甚而导致生态系统失去平衡。近年来,林火在森林生态系统中的作用已经得到重新认识,林火既可以破坏生态系统的结构和功能,也有利于维持生态系统的平衡与稳定。^[1]

森林火灾频繁发生,全面研究林火信息是必然要求。传统的火烧迹地信息主要来源于统计数据,难以覆盖较大区域,收集较为困难,且难以将数据进行空间化^[2]。遥感技术的发展为解决这一难题提供了有力手段,特别是随着遥感数据时空分辨率的提高,使得遥感数据能够更为准确地对地表过程进行刻画^[3]。遥感植被指数是预测植物生物量与生产力、评价生态系统结构与功能特征的重要指标^[4]。植被指数法是利用卫星遥感影像识别火烧迹地的一种常用方法^[5]。火灾使地表植被遭受破坏,受灾植被在卫星影像不同波段的反射率发生变化,其光谱曲线与正常植被光谱曲线有明显差异^[6]。研究表明,植被指数通过增强这种差异,能有效地用于过火区制图^[7],因此,利用植被指数识别火烧迹地越来越受到关注。近年来,不同学者采用不同的数据源(GF, HJ, Landsat, MODIS等)对不同地区的火烧迹地提取进行了研究,定量评价了NDVI, EVI, GEMI, BAI, NBR, NDSWIR, dNBR等遥感指数识别火烧迹地的潜力^[8-19]。研究发现,适当地引入热红外波段可改进遥感指数对林火迹地的提取能力^[10],但不同区域的最佳提取指数不尽相同。

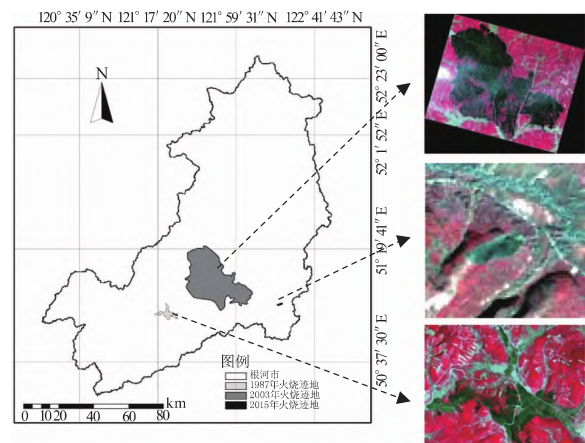
大兴安岭横跨黑龙江省和内蒙古自治区北部,是我国最大的原始林分布区,同时也是我国林火多发地区,存在大量的火烧迹地^[20]。大尺度森林火烧迹地的提取,可以直观地展现火烧迹地所在位置、

范围,同时可以实现对受灾地区的实时监控,这对于及时了解恢复状况和有关部门制定相应政策措施有着指引作用^[20]。本文以内蒙古根河市1987年、2003年和2015年森林火烧迹地为研究对象,基于Landsat遥感影像,对比分析NDVI, EVI, GEMI, BAI, NBR, NDSWIR, dNBR等7种遥感指数对火烧迹地的提取能力,筛选出大兴安岭火烧迹地提取的最佳遥感指数,以期为大兴安岭林火监测与植被恢复提供一定的理论与技术支持。

1 研究区与数据来源

1.1 研究区概况

研究区地处内蒙古自治区根河市境内。本文所选择的1987年、2003年和2015年火烧迹地位于内蒙古大兴安岭重点国有林管理局金河林业局和根河林业局施业区内(图1)。其中:1987年火烧迹地位于金河林业局金林林场,2003年火烧迹地范围覆盖金河林业局以及毗邻的根河林业局,2015年火



注:右侧彩图为研究区标准假彩色遥感影像图,红色区域代表植被,墨绿色区域代表火烧迹地。

图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location map of the study area

烧迹地位于根河林业局约安里林场。根河市(50°20′~52°30′N, 120°12′~122°55′E): 位于大兴安岭北段西坡、呼伦贝尔市北部, 是中国纬度最高的城市之一; 属寒温带大陆性季风气候, 年平均气温 -5.3℃, 结冰期 210d 以上; 总体地势较平缓, 呈东北高、西南低地形地貌, 平均海拔 1 000m, 河网发育, 河谷开阔。兴安落叶松 (*Larix gmelinii*) 是该地区的主要优势树种, 并伴有山杨 (*Populus davidiana*)、白桦 (*Betula platyphylla*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 等植被。

1.2 数据来源

选用 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 卫星遥感数据进行火烧迹地识别研究(表 1)。

表 1 遥感影像列表

Tab.1 List of remote sensing images

传感器	年份	属性	景数
Landsat 5	1986	火前	1
	1987	火后	1
	2001	火前	1
	2003	火后	1
Landsat 8	2014	火前	1
	2015	火后	1

2 研究方法

2.1 影像预处理

在 ENVI5.3 软件中完成不同年份影像的辐射定标、大气校正和图像裁剪等预处理。

2.2 地物光谱特征提取

通过目视解译在影像上划分出不同的地类, 分别地类选取样本。样本点中, 70% 为分类训练样本, 30% 为精度验证样本。通过对遥感影像的目视解译, 1987 年划分为火烧迹地、林地、裸地、道路等 4 种类别; 2003 年划分为火烧迹地、林地、道路、河流等 4 种类别; 2015 年划分为火烧迹地、裸地、道路等 3 种类别。在选取样本点时应遵循“样本点在影像上均匀分布, 分类训练样本与精度验证样本不同”的原则, 然后通过选取的样本点进行后续的分析计算。利用 ENVI5.3 软件中的 Spectral Library Builder 工具, 通过分类训练样本提取不同地物的平均光谱曲线。

2.3 遥感指数计算

遥感指数可以有效地提取火烧迹地。本研究选取了 7 种常见的遥感指数 (NDVI, EVI, GEMI, BAI, NBR, dNBR, NDSWIR), 利用 ENVI5.3 软件中的 Bandmath 工具计算各火烧迹地的遥感指数值, 各指数的计算公式为:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (1)$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + 6\rho_R + 7.5\rho_B + 1} \quad (2)$$

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \frac{\rho_R - 0.125}{1 - \rho_R} \quad (3)$$

$$\eta = \frac{2(\rho_{NIR}^2 - \rho_R^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R + 0.5} \quad (4)$$

$$BAI = \frac{1}{(0.1 - \rho_R)^2 + (0.06 - \rho_{NIR})^2} \quad (5)$$

$$NBR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

$$dNBR = NBR_{pre-fire} - NBR_{post-fire} \quad (7)$$

$$NDSWIR = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{MIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{MIR}} \quad (8)$$

式中: ρ_R 为红光波段反射率; ρ_B 为蓝光波段反射率; ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_{MIR} 为短波红外波段反射率(对应于 TM 的第 5 波段, OLI 的第 6 波段); ρ_{SWIR} 为短波红外波段反射率(对应于 TM 的第 7 波段, OLI 的第 7 波段); $NBR_{pre-fire}$ 为火前影像的 NBR 值; $NBR_{post-fire}$ 为火后影像的 NBR 值。

2.4 分离指数计算

分离指数能定量评价不同遥感指数对火烧迹地与其它地类的区分能力, 其计算公式为:

$$M = \frac{\mu_b - \mu_\mu}{\sigma_b + \sigma_\mu}$$

式中: μ_b 和 σ_b 分别为火烧迹地像元的样本均值和标准差; μ_μ 和 σ_μ 分别为其它类别像元的样本均值和标准差。 M 值越大, 火烧迹地与其它地类的分离性越好; 当 $M \geq 1$ 时, 表示分离性良好, 当 $M < 1$ 时, 表示分离性较差^[21]。

3 结果与分析

3.1 光谱特征分析

正常植被在不同波段具有不同的反射光谱特

征在可见光波段内,蓝光和红光波段是叶绿素吸收带,而在二者中间的绿光波段由于吸收作用小,形成了一个反射峰;在近红外波段,植被反射率急剧上升,形成“红边现象”;在短波红外波段,植被的光谱响应主要受水的强烈吸收带支配。

经历火灾之后的植被,光谱特征也发生了相应的变化(图2)。在可见光波段内没有形成明显的反

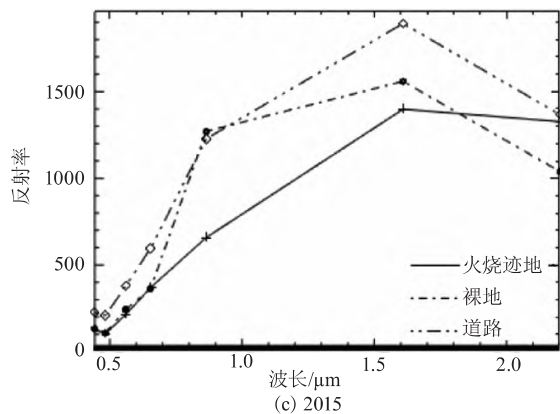
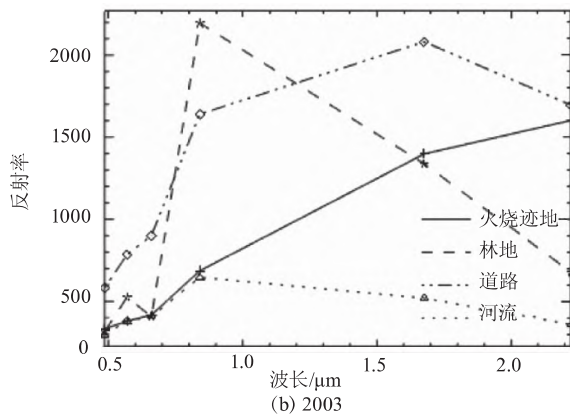
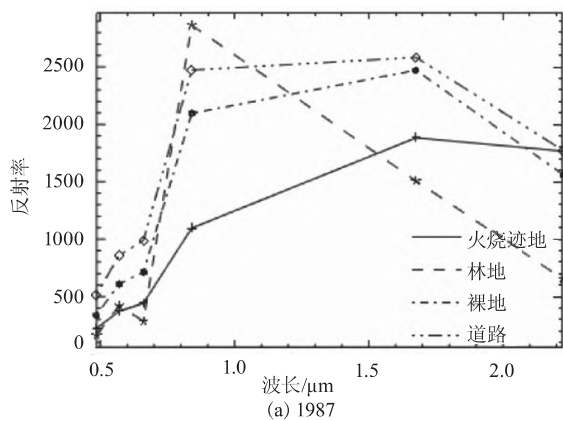


图 2 地物光谱曲线图

Fig. 2 Spectral curves of ground objects

射峰;在近红外波段,火烧迹地的反射率低于正常植被,没有形成“红边现象”;而在短波红外波段(2.08 ~ 2.35 μm),火烧迹地的反射率高于正常植被区和水体的反射率,且普遍低于道路的反射率。

3.2 遥感指数分析

不同年份各地类的遥感指数值如图3-图5所示。1)由图3可知,1987年,BAI,NBR,dNBR和NDSWIR对于火烧迹地区分能力较强,火烧迹地的遥感指数均值明显区别于其它地类。其中:火烧迹地NBR指数值为负值,而其它地类为正值;火烧迹地dNBR指数值为正值,而其它地类为负值。因此,NBR和dNBR对火烧迹地区分能力更佳。2)由图4可知2003年,NBR,dNBR和NDSWIR对于火烧迹地区分能力较强,火烧迹地的遥感指数均值明显区别于其它地类。但这3个遥感指数对于火烧迹地与道路的区分能力不太强,以火烧迹地的遥感指数值与道路的遥感指数值相减,数值由大到小依次为dNBR > NBR > NDSWIR。因此,2003年以dNBR区分火烧迹地的能力最强。3)由图5可知,2015年,BAI,NBR,dNBR,NDSWIR对于火烧迹地区分能力较强,火烧迹地的遥感指数均值明显区别于其它地类。以火烧迹地的这4个遥感指数值与最易混淆的地物遥感指数值相减,数值由大到小依次为dNBR > BAI > NBR > NDSWIR。因此,2015年以dNBR区分火烧迹地的能力最强。

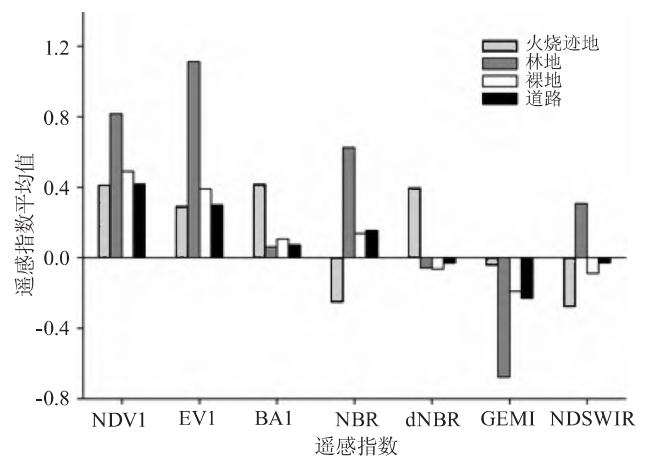


图 3 1987 年火烧迹地遥感指数分布图

Fig. 3 Distribution map of remote sensing indexes in 1987 burned area

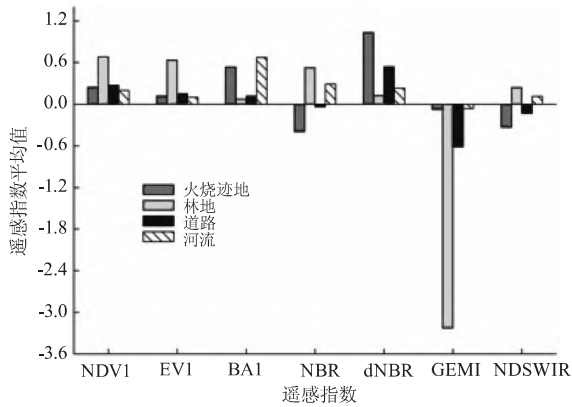


图 4 2003 年火烧迹地遥感指数分布图
Fig. 4 Distribution map of remote sensing indexes in 2003 burned area

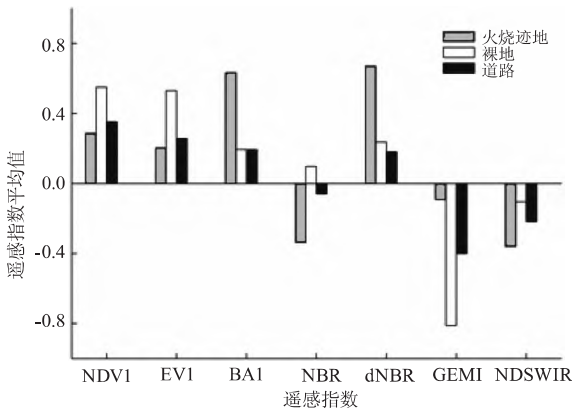


图 5 2015 年火烧迹地遥感指数分布图
Fig. 5 Distribution map of remote sensing indexes in 2015 burned area

由图 3 - 图 5 可知,NDVI、EVI 和 GEMI 对于林地区分能力强,遥感指数均值以林地最为突出。NDVI 和 EVI 的火烧迹地遥感指数值与道路和河流相近,因此不能很好地分离过火区;除 2003 年火烧迹地易与河流混淆外,GEMI 的火烧迹地遥感指数值相比其它地物以小值突出,因此,GEMI 区分火烧迹地的能力较好。BAI、NBR、dNBR 和 NDSWIR 对于火烧迹地区分能力强,遥感指数均值以火烧迹地最为突出。其中,BAI 和 dNBR 火烧迹地遥感指数值以正值较大突出,但 BAI 在 2003 年易与河流混淆;NBR 和 NDSWIR 火烧迹地遥感指数值以负值最小突出,两者相比较,以 NBR 区分能力更强。综合来看,以 NBR 和 dNBR 识别火烧迹地能力最强,BAI

和 NDSWIR 次之,NDVI 和 EVI 最差。

3.3 分离指数分析

3 个不同年份各遥感指数的分离指数值如图 6 所示。由图 6 可知:1) 1987 年,NDVI 和 EVI 的分离指数值均小于 1,对火烧迹地的区分能力差;GEMI、BAI、NBR、dNBR 和 NDSWIR 分离指数值均大于 1,对火烧迹地区分能力强,其分离能力由大到小依次为 BAI > NBR > dNBR > NDSWIR > GEMI,其中以 BAI 区分能力最佳。2) 2003 年,NDVI、EVI、BAI 和 GEMI 的分离指数值均小于 1,对火烧迹地区分能力差;NBR、dNBR 和 NDSWIR 分离指数值均大于 1,对火烧迹地区分能力强,其分离能力由大到小依次为 dNBR > NBR > NDSWIR,其中以 dNBR 区分能力最佳。3) 2015 年,由于火烧迹地面积小,易区分,7 种遥感指数的分离指数值均在 1 以上,区分能力较好,分离能力由大到小依次为 dNBR > NBR > NDSWIR > BAI > GEMI > NDVI > EVI,其中以 dNBR 区分能力最佳。

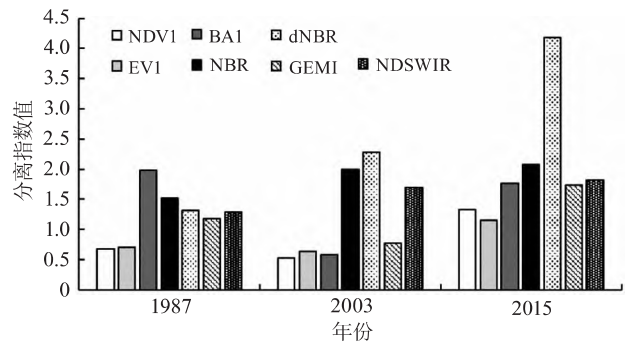


图 6 火烧迹地分离指数图
Fig. 6 Separation index graphs of burned areas

从 3 个年份分离指数分布总体来看,仅 NBR、dNBR 和 NDSWIR 值均大于 1。因此,对于研究区而言,NBR、dNBR 和 NDSWIR 识别火烧迹地能力较强。在 NBR、dNBR 和 NDSWIR 这 3 个遥感指数中,dNBR 3 年的分离指数值均位于前 3,且在 2003 年和 2015 年分离指数值均为最高。因此,在分离指数分析中,以 dNBR 作为区分火烧迹地的最优遥感指数。

3.4 提取精度分析及面积统计

3.4.1 精度分析

本研究对各遥感指数的火烧迹地提取精度进

行评价(表 2)。由表 2 可知:1987 年,7 种遥感指数提取火烧迹地的总体精度由大到小依次为 $NBR > dNBR > BAI > NDSWIR > GEMI > NDVI > EVI$; 2003 年,7 种遥感指数提取火烧迹地的总体精度由大到小依次为 $dNBR > NBR > BAI > NDSWIR > NDVI > EVI > GEMI$; 2015 年,7 种遥感指数提取火烧迹地的总体精度由大到小依次为 $dNBR > NBR > BAI > NDVI > EVI > NDSWIR > GEMI$ 。综合来看,dNBR 和 NBR 对火烧迹地提取能力较好,总体精度均在 90% 以上;BAI 次之,总体精度在 89% 以上。

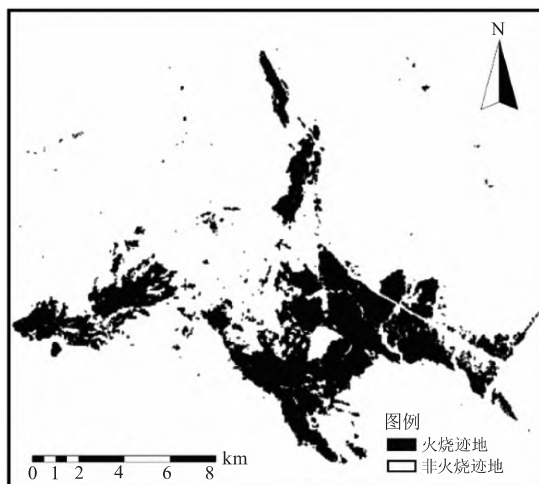
表 2 精度评价表

Tab. 2 Accuracy evaluation table

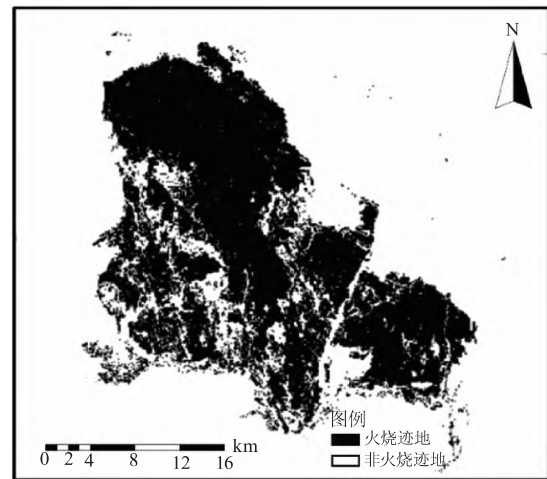
遥感指数	总体精度/%			Kappa 系数		
	1987	2003	2015	1987	2003	2015
NDVI	73.73	85.88	86.04	0.48	0.72	0.43
EVI	69.58	81.26	81.87	0.41	0.62	0.35
GEMI	73.92	80.65	79.56	0.49	0.61	0.32
dNBR	90.54	95.19	94.62	0.81	0.90	0.68
BAI	89.30	92.96	90.44	0.78	0.86	0.47
NBR	91.87	93.09	90.88	0.84	0.86	0.52
NDSWIR	80.32	89.89	80.99	0.61	0.80	0.30

3.4.2 面积统计

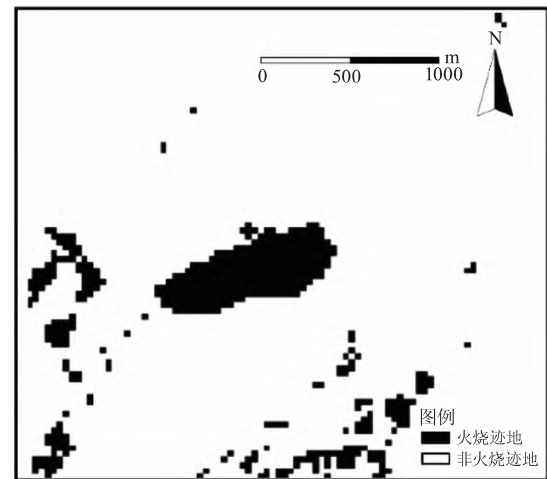
利用筛选出的最佳遥感指数 dNBR 提取各年份的火烧迹地(图 7) 并进行面积统计,结果如表 3 所示。由表 3 可知,1987、2003、2015 年的火烧迹地面积分别为 3 145.23、197 726.67、48.06hm²。



(a) 1987



(b) 2003



(c) 2015

图 7 火烧迹地空间分布图

Fig. 7 Spatial distribution maps of burned areas

表 3 火烧迹地面积统计表

Tab. 3 Statistical table of burned areas

火烧年份	1987	2003	2015
面积/hm ²	3145.23	197726.67	48.06

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究得出提取火烧迹地最优的遥感指数为 dNBR。经过光谱分析得知,在近红外波段,火烧迹地的反射光谱与正常植被有着明显区别,没有形成“红边现象”;而在短波红外波段,火烧迹地的反射率普遍高于正常植被和水体,而低于道路。因此,基于近红外波段和短波红外波段的遥感指数可以

将火烧迹地与其它地类进行区分。NBR 是基于近红外和短波红外的遥感指数,因此,它可以很好地区分火烧迹地,而 dNBR 是在 NBR 的基础上创建的一种遥感指数,以火前的 NBR 值减去火后的 NBR 值计算得到,因此 dNBR 可以更好地区分火烧迹地。

孙桂芬^[8]在使用 GF-1 和 Landsat 8 数据识别火烧迹地的最优植被指数的研究中认为,对于 GF-1 数据,基于可见光和近红外构建的 BAI 识别火烧迹地的能力较好;对于 Landsat 8 数据,基于近红外和短波红外构建的 NBR 识别火烧迹地的能力较好。余哲修等^[15]对基于 NBR 的森林火灾火烧迹地识别规则在我国森林火灾火烧迹地识别中的可用性和适用性进行了研究探讨,结果表明:NBR 和 dNBR 在遥感影像上能增强显示火烧区域。吴立叶等^[10]对不同遥感指数对林火迹地的提取能力进行了研究,其结果表明:NBR、NSTV1、NSTV2 和 NSEV1 这 4 个指数的林火迹地提取能力较高。以上的研究结果均与本文的研究相似。

4.2 结论

通过对内蒙古根河市 1987、2003、2015 年火烧迹地光谱特征、遥感指数特征和分离指数特征的计算与分析,得到如下主要结论:

1) 经历林火干扰的植被,其光谱特征也相应改变。在可见光波段未形成明显波峰,在近红外波段未形成明显的“红边现象”;而在短波红外波段,其反射率明显高于正常植被。因此,基于近红外波段的遥感指数可将火烧迹地与正常植被区分。

2) 由各地类的遥感指数值和各遥感指数的分离指数值得出,dNBR 为研究区火烧迹地提取的最优遥感指数;其次为 NBR、BAI、NDSWIR;而 NDVI 和 EVI 的提取效果最差。

3) 利用筛选出的最佳遥感指数 dNBR 提取得到 1987、2003、2015 年的火烧迹地面积分别为 3 145.23、197 726.67、48.06hm²。

参考文献:

- [1] 安森鹏,高振岭,王磊. 林火对森林生态系统的影响[J]. 科技信息, 2013(6): 90-91.
- [2] 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.
- [3] Mouillot F, Schultz M G, Yue C, et al. Ten years of global burned ar-

- ea products from spaceborne remote sensing—A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments[J]. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 2014, 26: 64-79.
- [4] 钱峻屏,李岩,廖其芳,等. 利用遥感植被指数分析中国东部样带农业生态系统的生产力格局[J]. 生态学报, 2001(6): 46-49.
- [5] 孙桂芬,覃先林,刘树超,等. 典型植被指数识别火烧迹地潜力分析[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 204-211.
- [6] Key C H. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity[J]. *Fire Ecology*, 2006, 2(2): 34-59.
- [7] Roy D P, Jin Y, Lewis P E, et al. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 137-162.
- [8] 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.
- [9] 朱曦,覃先林. 基于二阶段算法的 HJ-CCD 数据过火区制图[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(1): 72-77.
- [10] 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.
- [11] 祖笑锋,覃先林,尹凌宇,等. 基于高分一号影像光谱指数识别火烧迹地的决策树方法[J]. 林业资源管理, 2015(4): 73-78.
- [12] 康祥瑞. 基于 Landsat TM 影像的火烧迹地遥感提取及林火烈度的空间分析[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
- [13] 包月梅,孙紫英,赵鹏武,等. 基于遥感数据的根河市火烧迹地植被覆盖度时空分析[J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(11): 62-69.
- [14] 罗火钱,陈文惠. 火烧迹地森林恢复的植被指数时间序列特征谱研究[J]. 四川林勘设计, 2012(1): 23-30.
- [15] 余哲修,何超,李昔纯,等. 基于归一化燃烧率火烧迹地遥感提取识别规则研究[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(1): 216-224.
- [16] 王晓莉,王文娟,常禹,等. 基于 NBR 指数分析大兴安岭呼中森林过火区的林火烈度[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 967-974.
- [17] Veraverbeke S, Harris S, Hook S. Evaluating spectral indices for burned area discrimination using MODIS/ASTER(MASTER) airborne simulator data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(10): 2702-2709.
- [18] Loboda T, O'Neal K J, Csiszar I. Regionally adaptable dNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, 109(4): 429-442.
- [19] Bastarrika A, Chuvieco E, Martín M P. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 115(4): 1003-1012.
- [20] 钱安,陈娅男,王秋玲. 基于 Landsat 影像提取大兴安岭区域火烧迹地[J]. 山西建筑, 2017, 43(15): 192-193.
- [21] Gitas I Z, Devereux B J. The role of topographic correction in mapping recently burned Mediterranean forest areas from LANDSAT TM images[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(1): 41-54.