

基于时间序列遥感数据的森林火烧迹地提取

王乾坤¹, 于信芳¹, 舒清态²

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101; 2. 西南林业大学 林学院, 云南 昆明 650224)

摘要:森林火灾是当今世界性的重大灾害之一,也是影响北方森林演替的主要因素,其成灾后往往会造成很大的经济损失,并对该地区的森林生态环境产生很大影响。基于2000-2013年8 d合成的MODIS EVI和land surface temperature (LST)时间序列数据,综合应用表征植被生长状态的植被物候期特征指标及全球扰动指数(MGDI),提出了一种森林火烧迹地检测方法,并在大兴安岭及其附近林区进行了应用验证。结果表明,所提研究方法可以有效地提取火烧迹地信息;与基于Landsat的森林扰动监测结果相比,该方法对植被细微的异常变化更加敏感,所提着火点像元也更加集中,在时间尺度上也更加精确和可靠。

关键词:MODIS;物候;扰动指数;火烧迹地;大兴安岭

中图分类号:TP75

文献标志码:A

Forest burned scars area extraction using time series remote sensing data

WANG Qiankun¹, YU Xinfang¹, SHU Qingtai²

(1. State Key Lab of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract Forest fire is one of the major disasters over the world, which is also an important factor influencing succession of forest in the north. Fire disasters may cause huge economic losses and significantly impact the future forest ecological environment in the region. In this paper, considering the character of the vegetation growth state and the MODIS Global Disturbance Index (MGDI), we proposed a method for forest burned scars detection based on the 8-day MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) and Land Surface Temperature (LST). The proposed method was applied to the Daxing'an Mountains and its adjacent forest region. The result indicates that, this approach may effectively extract information about burned scar area. Compared with the results extracted from the Landsat disturbance products, this method is more sensitive to subtle abnormal changes in vegetation. The extracted ignition points are more concentrated and more accurate and reliable in the time scale.

Keywords: MODIS; phenology; disturbance index; burned scar area; Daxing'an Mountains

林火作为森林演替的主要自然驱动力之一,是影响北方森林最主要的扰动因素^[1-3]。火灾的发生不仅改变了植被的物理状况,导致了地表覆盖的巨大改变,也促进了不同森林类型交互镶嵌^[4],同时在火灾发生过程中又会向大气中释放CO₂,CH₄等温室气体,引起地表发射率、湿度和温度的变化,对全球气候变化具有

收稿日期:2016-03-29; 修回日期:2016-06-20

基金项目:国家自然科学基金项目(41001279);中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050102)

Supported by: National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41001279); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Science (Grant No. XDA05050102)

作者简介:王乾坤(1987-),男,硕士研究生,主要从事3S技术在植被遥感监测中的应用研究. E-mail: wqkone.2@163.com

通讯作者:于信芳,女,博士,助理研究员. E-mail: yuxf@igsrr.ac.cn

负面影响^[5]。大兴安岭地区作为重大森林火灾的频发区,不仅给当地带来了巨大的社会经济损失,同时加深了该地区森林生物群落的自然演替,对气候产生了深远的影响。

传统的火烧迹地监测方法主要依赖于大量的野外调查,采用人工制图的方法对火灾造成的影响进行分类^[6],耗时耗力,而且难以适应对大区域及偏远地区的作业。随着遥感技术的发展,空间信息技术的不断进步,遥感监测技术在林业中发挥了越来越重要的作用^[7]。目前对于森林火灾的监测,遥感指数方法的效率最高,应用也最为广泛,提出了大量的修正植被指数和火烧迹地指数,如 NDVI、BBFI(burned boreal forest index)、GEMI(global environmental monitoring index)以及 BAI(burned area index)等^[8-13],这些方法都是基于光谱特性,通过对火灾发生后植被燃烧减少和燃烧残留物沉积这两个变化特征来进行分析的^[14],较少考虑植被自身的生物特性和整体的生长特征,提取指标单一,检测结果往往容易受干旱、植被季节变化等非火灾原因影响,容易造成检测结果出现偏差^[15-16]。

本文探索基于高时间分辨率的 MODIS 数据,从最能反映植被生长状况的物候特征信息入手,结合地表温度(LST)和植被指数数据的全球扰动指数,通过阈值的设定和信息的叠加,力图找出二者的最佳结合点,提高区域尺度的森林火烧迹地检测精度和效率,为未来火烧迹地植被生长状况的监测提供可靠的数据支持。

1 试验区概况和数据获取

1.1 实验区概况

本文所选研究区为我国大兴安岭林区及其以北部分区域(50°36'N-54°24'N,120°36'E-126°54'E),地跨中、俄两国。该地区属寒温带季风区,又具有明显的山地气候特点,全年平均气温在-8℃到6℃之间^[17]。该区域森林资源丰富,植被覆盖度高,在中国植被区划中属于寒带针叶林区,是横贯欧亚大陆北部的“欧亚针叶林区”的东西伯利亚明亮针叶林向南延伸的部分。林分结构简单,植物种类单纯,种数较少。主要树种有兴安落叶松、白桦、山杨、樟子松等,属东西伯利亚型^[18]。气候干燥,林火发生较频繁。如图1所示为本研究区空间位置图,地图是基于2006年的MODIS土地覆盖产品(MCD12Q1),分类体系为国际地圈生物圈计划制定的分类体系。

1.2 遥感数据获取

1.2.1 时间序列 MODIS 数据

考虑到对植被生长状况的监测需要较高的时间分辨率作为支持,本文使用了EOS/Terra卫星提供的8天合成的MOD09A1数据产品,空间分辨率为500 m,其中包括有1-7波段的反射率数据及表征各波段数据质量的质量指标数据。将产品中包含的前3个波段通过计算得到该地区的增强型植被指数数据(EVI),其计算公式如下:

$$EVI = 2.5 \times \left(\frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{L + \rho_{nir} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue}} \right). \quad (1)$$

式中 ρ_{nir} 、 ρ_{red} 和 ρ_{blue} 分别为MODIS数据的近红外、红和蓝光波段反射率; L (=1)为土壤调节参数; C_1 (=6)为大气修正红光校正参数; C_2 (=7.5)为大气修正蓝光校正参数。

为最大限度地保持数据一致性,地表辐射温度数据选用了空间分辨率为1 000 m的8 d合成的MOD11A2数据产品,通过空间重采样转换到500 m。所有时间序列数据时间覆盖均从2000年1月至2013年12月共598期影像,其中2000年数据缺失前8期数据,考虑到对应冬季的前几期数据对研究结果影响不大,为方便运算及提高有效数据的利用率,选用2001年相应的时间上的影像进行补全。

1.2.2 30 m 火烧迹地数据

为了对所检测的火烧迹地进行验证,本文将Hassen等基于2000-2012年的时间序列Landsat数据得到的植被变化产品与我国大兴安岭区域同期的特大火烧区域相关联得到的30 m空间分辨率的火烧迹地数据^[19]。本研究重点选取了2006年大兴安岭地区松岭砍都河火灾、2005年内蒙古乌奴耳聋以及高积山林场

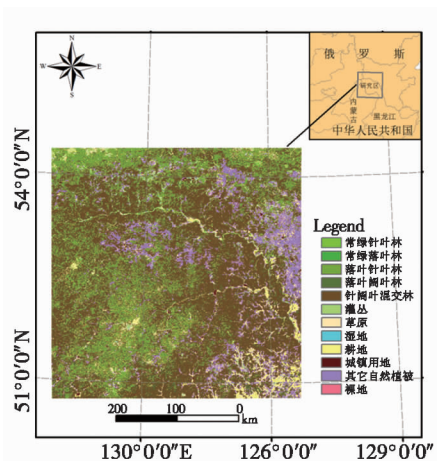


图1 研究区位置示意图

Fig. 1 Location of Study area

“10·12”特大森林火灾和 2006 年内蒙免渡河“5·25”特大雷击森林火灾进行分析^[20-21]。如图 2 所示为所得本研究区的 2002-2012 年森林扰动斑块分布情况,其中大的扰动板块对应着火烧迹地。

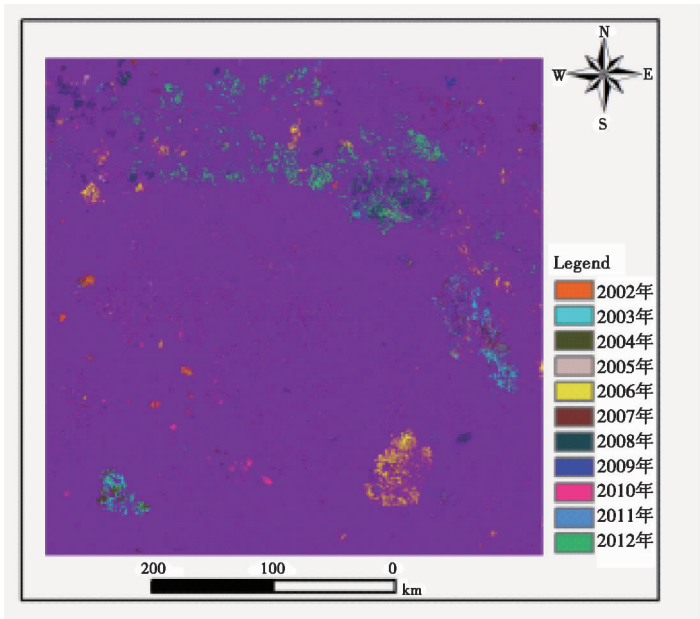


图 2 研究区森林扰动斑块布局格局(2002-1012) (产品来源于 Hansen 等 2013)

Fig.2 Spatial distribution of forest disturbance patches in study area(2002-2012)

2 研究方法

火灾发生后,植被受到火灾影响生长状况变差;地面植被覆盖度降低,在遥感影像上相应波段的反射或辐射值发生异常。通过波段的组合计算,获取相关的检测参数值,可以放大植被发生异常区域的信息,如图 3 所示,本文综合使用植被生长季面积和扰动指数,通过区别分析,设定过火区提取阈值,实现火烧迹地的自动提取。

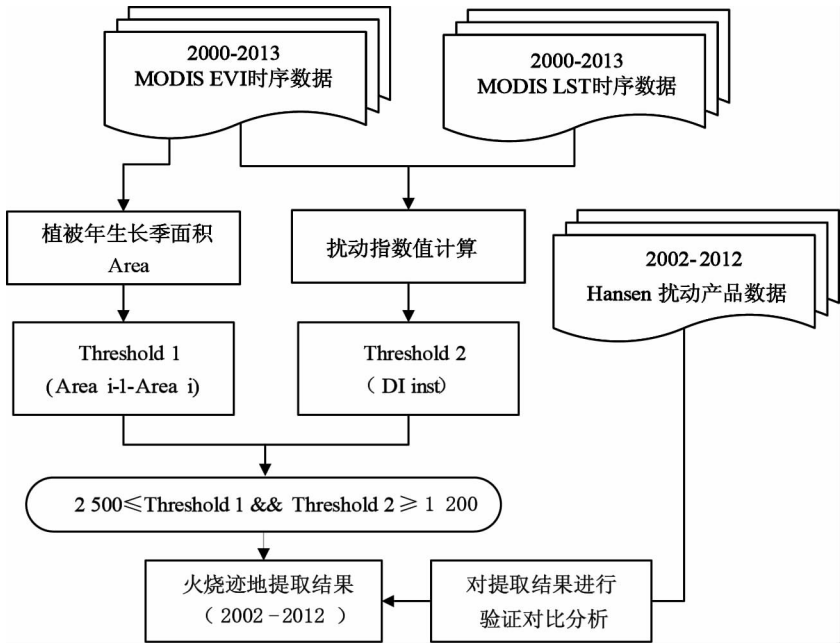


图 3 基于 MODIS 时序数据提取火烧迹地方法流程图

Fig.3 Flowchart for extracting burned scar areas using the time series of based on MODIS data

2.1 时序数据植被生长季面积提取

2.1.1 MODIS 时间序列数据的去噪处理

基于 8 d 最大值合成的 MODIS EVI 数据虽然一定程度上去除了部分云和大气的干扰,但仍可能受太阳高度角、观测角度、气溶胶等随机因素的干扰,仍有部分噪声,因此在使用前需要进行滤波重建处理^[22-24]。

为能在最大限度的去除噪声同时保留更多的原始曲线特征用于后续的研究,本文首先选用了 S-G 滤波方法对 EVI 数据进行了初步的滤波处理^[25]。该方法能够较好拟合原始曲线波峰,且不会造成滤波结果曲线整体提升,可以保留更多植被的原始信息用于后续研究^[26]。

2.1.2 植被生长季面积的计算

植被生长季面积是生长季的开始到结束时刻 EVI 值的积分。提取的关键是确定生长季的开始和结束时刻即植被开始生长和停止生长的时间。以重建处理后的 EVI 时序数据为数据源,本文采用 Zhang 等^[27]提出的曲率最大值法对植被生长季面积进行了计算和提取。

曲率最大值法是将时序数据曲线曲率的最大值作为植被生长转折点的物候阶段划分法。植被物候年循环被分为四个关键的转换期:绿色生长开始期,即光合作用的开始期;成熟期,植物的绿色叶面积最大期;衰落期,光合作用和绿色叶面积开始快速降低期;休眠期,生理活动几乎停止期,每个时期均对应时序曲线上的一个拐点。这种模式反映了植物生长过程可以很容易地通过 Logistic 模型表达^[28-29]。因此,可以使用 Logistic 函数拟合生长或衰落期的 EVI 曲线,基于 Logistic 函数的拐点确定植被生长季。选择对应于生长季起始期和休眠期的(生长末期)的两个物候特征参量,运用积分计算出植被年 EVI 生长季面积,如式(2)所示

$$AREA_{\text{生长季}} = \int_{\text{生长始期}}^{\text{生长终期}} EVI dt. \quad (2)$$

正常生长状态下,健康植被的开始生长时间和结束时间年差异不大,生长期内 EVI 值的年际变化也不大,生长季面积基本处于一个均衡状态。但当受灾害条件影响时,伴随着植被生长物候期的延迟或提前, EVI 强度值也会发生变化,从而导致生长季面积会有一个更剧烈的综合反映,因此可以通过对植被生长季面积的分析更加全面的了解植被的生长状态。

2.2 扰动信息的提取

扰动指数为每年合成的最大地表温度与同年合成的最大植被指数的比率除以目标监测年之前多年的扰动比率均值。尤慧等^[30]认为生态系统在未发生扰动时,在干年和湿年的地表能量平衡都会在自然变异范围内波动(多年的平均值一般接近 1.0)。而发生火灾扰动时,地表温度会出现显著的增高,高于植被自然变化情况下最大的地表温度值,同时植被指数减小。导致 LST/EVI 比值瞬时增加。通过检测 LST/EVI 比值偏离自然变异(多年 LST/EVI 的均值)的范围来提取火烧迹地。采用式(3)生成瞬时扰动指数 DI_{inst} :

$$DI_{\text{inst}} = \frac{(LST_{\text{max}}/EVI_{\text{max post}})_{\text{current}(y)}}{(LST_{\text{max}}/EVI_{\text{max post}})_{\text{mean}(y-1)}}. \quad (3)$$

其中: DI_{inst} 是瞬时扰动指数; LST_{max} 表示每年 8 d 合成的 LST 的最大值; $EVI_{\text{max post}}$ 是当年 LST_{max} 所对应的时间之后所有 EVI 的最大值; $\text{current}(y)$ 表示当前年份; $\text{mean}(y-1)$ 是指目标检测年之前多年的平均值。当发生火灾等异常情况时,随着 $(LST_{\text{max}}/EVI_{\text{max post}})_{\text{current}(y)}$ 的瞬时增加, DI_{inst} 值异常变大,因此可以通过对判断 DI_{inst} 值的异常情况来判断是否发生火灾。

2.3 火烧迹地信息的提取

根据 Hansen 植被变化产品及火灾发生的历史记录,提取 2005-2006 年火灾发生像元的时序曲线。如图 4 所示,火灾发生后 EVI 曲线较正常曲线表现出明显差异;受火灾发生时间和程度的不同,在植被物候期上表现出了绿叶开始出现时间延后、生长旺盛期缩短及绿叶结束期提前等现象,随着时间推移植被生长物候期逐渐恢复正常,在时序曲线上表现为火灾发生时生长季面积较前一年正常年份显著减少,扰动指数显著增加,随后逐渐恢复正常。但植被生长异常状况的发生受多种因素的影响,如气温、降水、人为砍伐、自然病虫害的发生等,只是变化量会有所不同。因而通过设定综合阈值的方法,剔除一些因气候等因素影响而异常的点或变化量相对较小的点^[31]。

考虑到 2000-2013 年时间跨度较大,植被生长物候期必然会受气候变化等因素的影响表现出不确定性,按刘丽娟等在研究中设定单一标准生长起始期和结束在本研究中不太适合^[32]。而正常年份相邻两年植

被物候特征差异较小,发生火灾像元相差却很大,因此本文直接通过两相邻时间上的生长季面积差(前一年减去后一年)来判定植被生长状况。最后取扰动指数和植被生长季面积变化量的交集,作为提取出的2002–2012年过火像元。

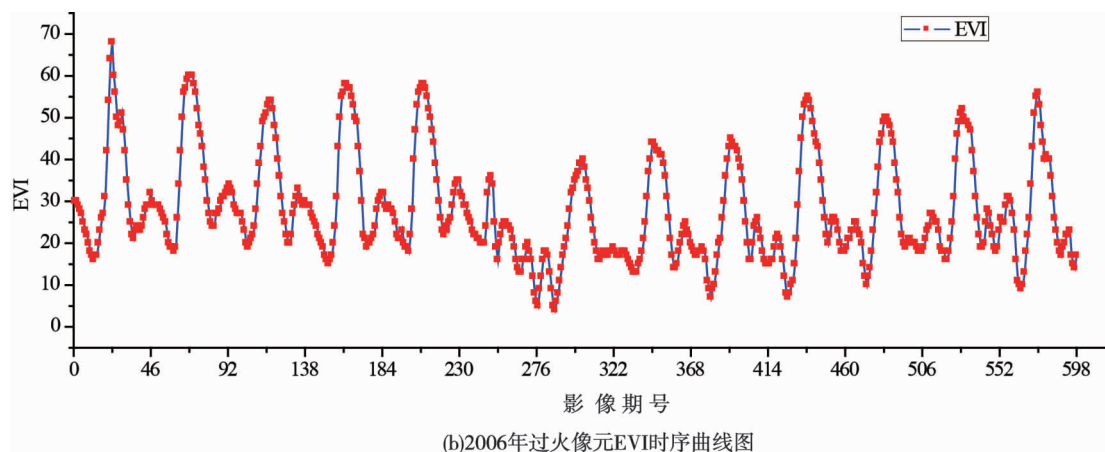
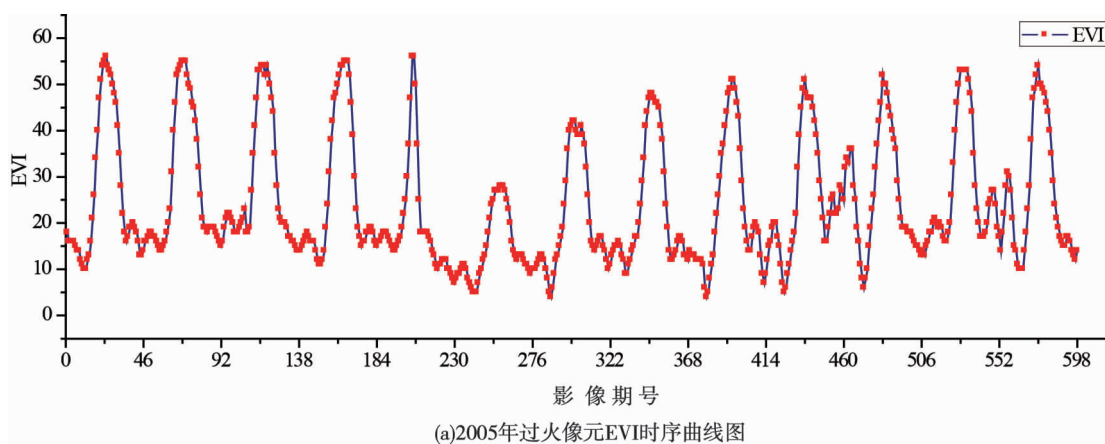


图4 2005–2006年火烧迹地火灾发生前后像元EVI时序曲线

Fig. 4 EVI time sequence curves of burned scar area before and after the fire (during 2005–2006)

3 结果及分析

3.1 火烧迹地提取阈值确定

通过对生长季面积和扰动指数分布态势的统计和比较分析,确定出这两个检测指标异常像元值的分布范围。图5所示为2005–2006年生长季面积变化统计图,正值表示目标年生长季面积较前一年的减少量,面积变化大部分集中在2000以内,在0值左右成对称分布;同时在4000–8000之间有一个小的集中区域,可以判断为异常发生的集中区,考虑到森林火灾对植被生长所带来的灾害程度,初步确定了火灾最可能发生的像元面积差值分布在大于2000的范围内。图6为2005–2006年该地区瞬时扰动指数分布情况,受地表能量平衡作用, DI_{inst} 都会在一个自然变异范围内波动大部分值在0.9~1.1范围。将两个监测指标不断进行叠加运算,以目视解译并计算每个阈值下的异常像元面积,最终确定出火烧迹地的提取阈值。以2006年火烧迹地提取为例,如公式(4)所示。设定火灾发生当年像元生长季面积较前一年减少量大于2500 ($Threshold_1$),扰动指数大于1.2 ($Threshold_2$)。

$$((Area_{2005} - Area_{2006}) > Threshold_1) \cap ((DI_{2005} - DI_{2006}) > Threshold_2). \quad (4)$$

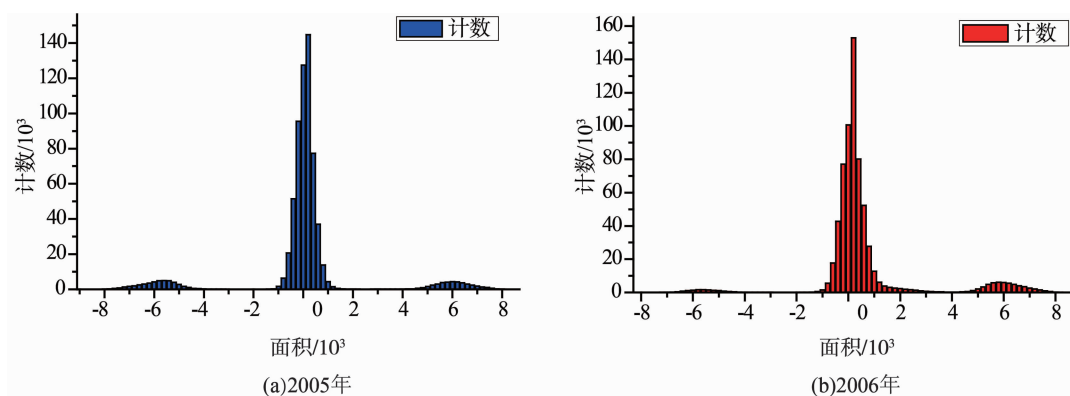


图 5 2005 - 2006 年生长季面积变化分布态势统计图

Fig. 5 Statistical diagram of distribution state of area change in growth season during 2005 - 2006

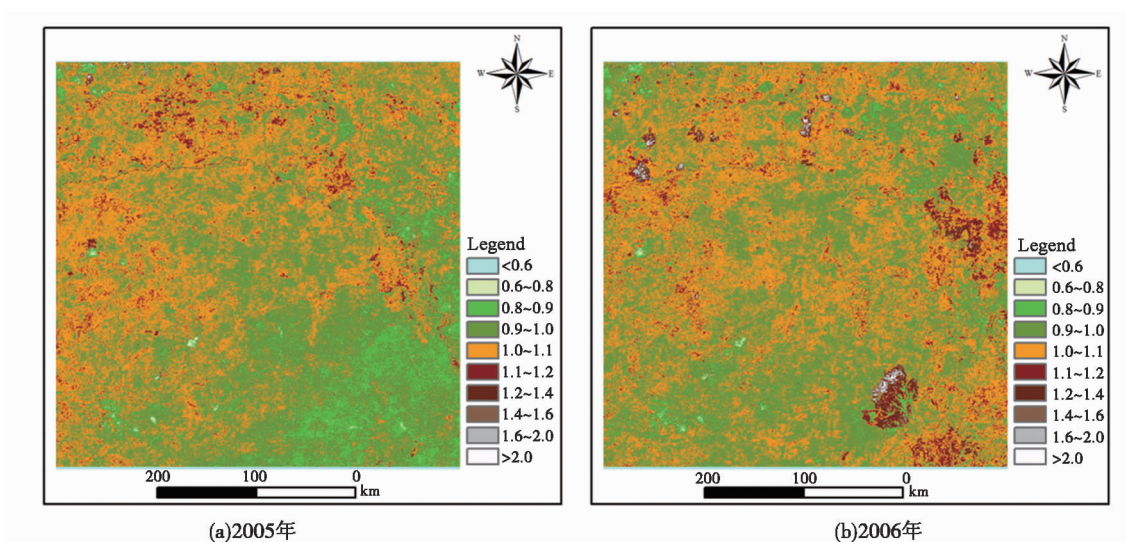


图 6 2005 - 2006 年瞬时扰动指数 (DIinst) 分布图

Fig. 6 Distribution pattern of disturbance index during 2005 - 2006

3.2 火烧迹地提取结果及检测分析

3.2.1 异常像元提取结果

图 7 分别为 2002 - 2012 年基于植被生长季面积变化差异、扰动指数及综合阈值的不同异常点提取结果。三者所提的异常像元集中区域的空间分布格局基本一致, 单独基于植被生长季面积和扰动指数的提取结果都含有大量不确定信息, 特别是单独使用面积变化信息的提取结果, 包含的不确定像元更多, 主要原因可能是由于所使用指标的单一性及影响植被生长的复杂性导致的。因此针对不同的区域, 对于方法的使用要充分考虑当地的自然条件和植被生长特征。

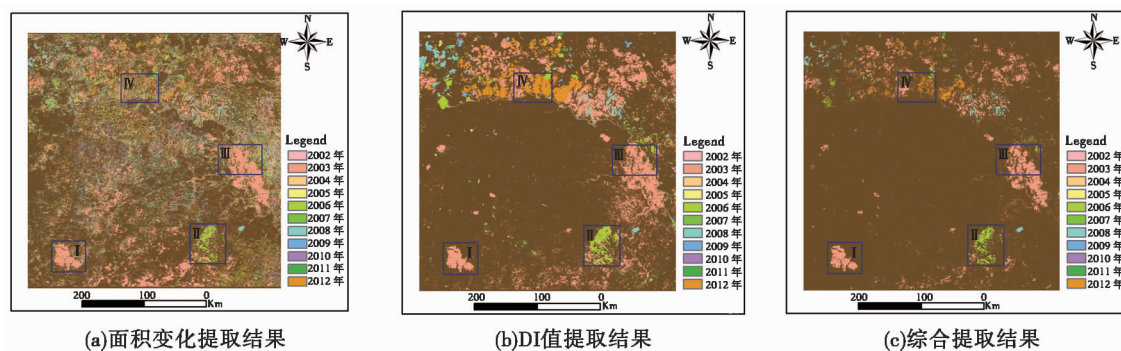


图 7 火烧迹地提取结果空间分布格局 (2002 - 2012)

Fig. 7 Spatial distribution of pattern of extracted burned scar area during 2002 - 2012

3.2.2 火烧迹地检测结果与 Hansen 变化产品提取结果对比分析

选取图 7 中小框区域,就检测结果与 Hansen 变化产品提取结果进行对比分析,如图 8 所示为 2002 - 2012 年各分区内着火点像元在时间和空间上的分布格局。在空间上,两种火烧迹地结果具有较强的一致性。由于空间分辨率的差异,相比而言本研究所提火烧迹地结果像元较集中且多成片分布。

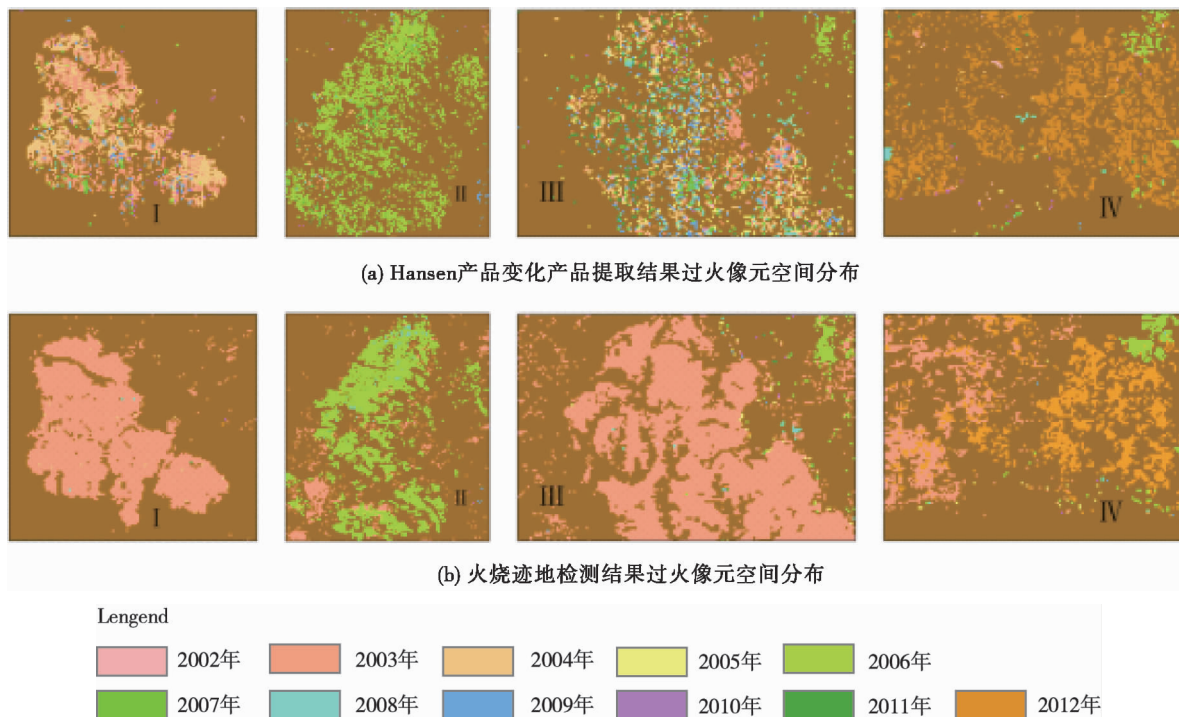


图 8 火烧迹地检测结果与 Hansen 变化产品提取提取结果比较

Fig. 8 Comparison of forest burned scar area obtained from this paper with that from Hansen product

在时间上,两种结果所提像元存在一定差异,在区域 1 和 3 中可以看出,本文检测结果火烧像元多在 2003 年,而 Hansen 结果则大部分分布在 2003 年前 1 a 或之后的 2 a 时间内,部分像元的火灾发生时间甚至更远。对于这种现象本文进行了进一步的分析,分别在 1 和 3 区域针对差异结果出现的年份,随机提取了差异像元的 EVI 时序曲线,如图 9 所示。可以看出这些像元异常情况均发生在 2003 年,其它年份除正常波动外,无论是峰值还是整个波形都较平均,单从曲线特征看,没有发生火灾的迹象和可能性,这也从侧面说明了本研究方法在时间尺度上的提取结果更加精确和有效。

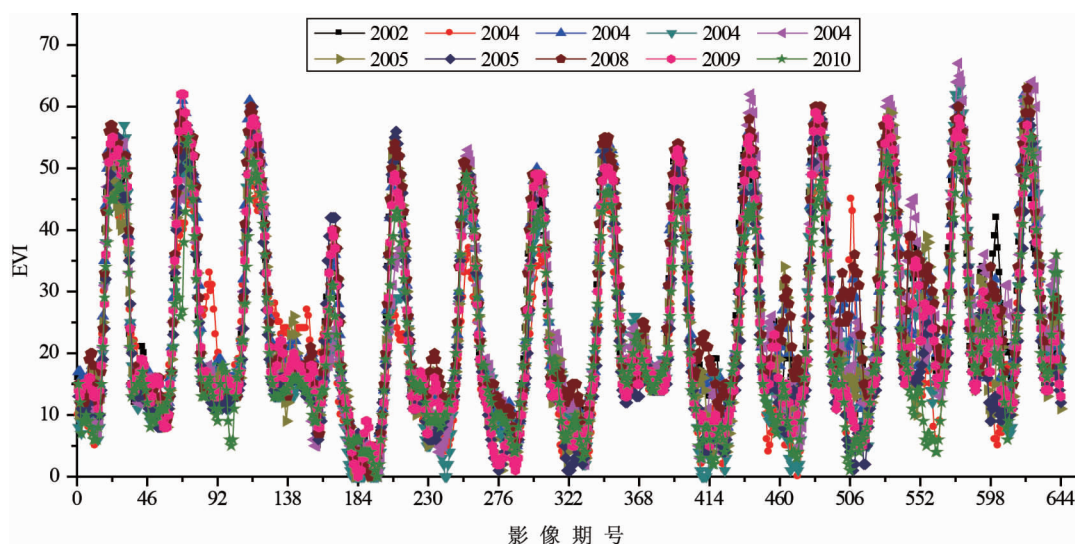


图 9 火烧迹地检测结果与 Hansen 变化产品提取结果差异像元 EVI 曲线特征

Fig. 9 The feature of the EVI time series curves from the abnormal cell

3.2.3 火烧迹地检测结果像元统计

为定量分析本次检测的结果,对各年火烧迹地像元进行了统计分析,如表 1。根据历史记载^[33],分别对 2002 – 2004 年本研究区火灾发生面积进行了统计分析,2002 年为大兴安岭北部林区夏季雷击火,过火面积为 16 493 hm²,换算像元个数为 659,本文提取结果为 290,相差了 369 个像元;2003 年发生在本研究区内的火灾主要包括有内蒙古自治区根河市“5·5”特大森林火灾、黑龙江大兴安岭“5·17”特大森林火灾、黑龙江省“5·20”特大森林火灾和黑龙江省大兴安岭“3·19”草甸森林火灾,过火面积达 738 825 hm²,换算为像元个数为 29 953,本文所提个数为 35 249 个,相较于 Hansen 产品提取结果差异更小;2004 年大型火灾发生地位于黑龙江黑河市,基本不在本研究区内,相应的本文提取结果也仅有 209 个像元。综合 3 a 提取结果,本文方法提取的结果更加符合实际情况。在其它年份中,2006 年和 2008 年提取的过火像元个数最为接近。两种方法的检测结果既有一致性也有差异性,都具有一定参考价值,但总体而言本文的检测方法为当地火烧迹地的提取提供一种更加精确的方法选择。

表 1 研究区火烧迹地像元分布格局

Table 1 Statistics of burned points number in the study area

年 份	Hansen 产品	提取结果	年份	Hansen 产品	提取结果
2002	1 611	290	2008	6 253	4 471
2003	3 830	35 249	2009	1 562	424
2004	5 390	209	2010	1 843	289
2005	2 095	416	2011	1 286	554
2006	5 707	5 459	2012	15 285	7 868
2007	1 829	102	总和	46 691	55 331

4 结 论

本文基于高时间序列的 MODIS EVI 数据和 LST 数据发展了一种植被火烧迹地提取方法,并用东北亚大兴安岭地区 2000 – 2013 年 14 a 间的数据进行了算法有效性实验,结果表明:

(1) 本文将表征植被生长状态的物候参数信息和与地表辐射温度相关的全球扰动指数的联合使用,相对于仅使用单个扰动指数或植被生长状态方面的分析更能显著地提高过火像元的提取精度和效率,很大程度地避免了仅使用单个参数进行检测所带来的精度上的不足。

(2) 本文算法成功提取了东北亚地区大兴安岭地区 2002 – 2012 年 11 a 间的火烧迹地,检测结果与 Landsat 数据的提取结果在空间和时间上都具有较强的一致性。但某些斑块也存在明显差异,本文所提结果在空间上更加连续和集中,多成片区,对植被细微的异常变化更加敏感,一定程度上弥补了单一时相不能很好反映全年植被生长变化的不足,所提过火信息的时间精度也更可靠。

通过对大兴安地区的实验及与 Hansen 数据产品所提结果的对比,本文所使用的植被火烧迹地检测方法是可行的,本方法在少量地面调查数据的支持下,通过对加强区域内所有像元植被生长季面积和扰动指数分布特征的归纳分析,不但达到了提取火烧迹地的目的,同时也揭示了植被生长状态的一些规律。植被生长开始时间和结束时间的提前和延后都会影响到植被的生长季面积,但正常状态下植被生长季面积年差变化并不大,基本都在 2 000 以内;当生态系统在未发生扰动时,地表能量平衡都会在自然变异范围内波动,扰动指数基本在 1.1 以内。虽然初步判定该方法可以提取该地区着火点像元,但未来在更多地面调查数据的支持下,进一步改进检测方法,细化检测阈值;更大限度的来发挥时间序列数据的优势,再提高检测精度的同时,加强火烧迹地植被恢复检测的研究。

参考文献:

- [1] Cuevas – Gonzalez 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.
- [2] 吕爱锋, 田汉勤, 刘永强. 火干扰与生态系统碳循环[J]. 生态学报, 2005, 25(10): 2734 – 2743.
LU Aifeng, TIAN Hanqin, LIU Yongqiang. State – of – the – Art in quantifying fire disturbance and ecosystem carbon cycle[J]. Acta Ecologica

- Sinica, 2005, 25(10): 2734 – 2743. (in Chinese)
- [3] 杜春英, 李帅, 刘丹, 等. 大兴安岭地区森林雷击火发生的时空分布[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 72 – 76.
DU Chunying, LI Shuai, LIU Dan, et al. Spatiotemporal distribution of lightning – caused forest fires in Daxinganling area[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 72 – 76. (in Chinese)
- [4] 雒瑞森, 唐丽华, 沈掌泉, 等. 林火及其对森林蓄积量影响的时空格局[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(4): 190 – 196.
LUO Ruisen, TANG Lihua, SHEN Zhangquan, et al. Spatiotemporal pattern of forest fire and its influence on forest accumulative amount[J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(4): 190 – 196. (in Chinese)
- [5] Rocío Hernández Clemente, Rafael María Navarro Cerrillo and Ioannis Z. Gitas. Monitoring post – fire regeneration in Mediterranean ecosystems by employing multitemporal satellite imagery[J]. International Journal of Wildland Fire, 2009, 18(6): 648 – 658.
- [6] Bertolette D, Spotskey D. Remotely sensed burn severity mapping[C]//Proceedings of the 11th Conference on Research and Resource Management in Parks and on Public Lands. Crossing boundaries on the ground with technologies. The George Wright Society, 2001: 44 – 51.
- [7] Beauty R, Taylor A. Spatial and temporal variation of fire regimes in a mixed conifer forest landscape, southern Cascades, California, USA [J]. Journal of Biogeography, 2001, 28(8): 955 – 966.
- [8] Cahoon D R, Stocks B J, Levine J S, et al. Satellite analysis of the severe 1987 forest fires in northern China and southeastern Siberia [J]. Journal of Geophysical Research – Atmospheres, 1994, 99(D9): 18627 – 18638.
- [9] Li Z, Nadon S, Cihlar J. Satellite – based detection of Canadian boreal forest fires; development and application of the algorithm [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21(16): 3057 – 3069.
- [10] Kučera J, Yasuoka Y, Dye D G. Creating a forest fire database for the Far East of Asia using NOAA/AVHRR observation [J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(11): 2423 – 2439.
- [11] Pinty B, Verstraete M M. GEMI: a non – linear index to monitor global vegetation from satellites [J]. Vegetatio, 1992, 101(1): 15 – 20.
- [12] Martín M P. Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA – AVHRR [J]. Serie Geográfica, 1998(7): 109 – 128.
- [13] 郑伟, 李亚君, 刘诚, 等. 基于多源卫星遥感数据的森林过火面积估算方法[J]. 林业科学, 2011, 47(8): 192 – 195.
ZHENG Wei, LI Yajun, LIU Cheng, et al. Extracting forest burned scar region area based on multi – source remote sensing data[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(8): 192 – 195. (in Chinese)
- [14] 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.
WU Liye, SHEN Rumping, LI Xinhui, et al. Evaluating different remote sensing indexes for forest burn scars extraction[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2014, 29(4): 567 – 574. (in Chinese)
- [15] 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.
- [16] Chuvieco E, Martín M P, Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red – near – infrared spectral domain for burned land discrimination [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23): 5103 – 5110.
- [17] 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: 中国科学院大学, 2013: 1 – 7.
YANG Wei. The Study on Burned Area Mapping and Vegetation Regeneration Based on Remote Sensing Data in Heilongjiang Basin[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 1 – 7. (in Chinese)
- [18] 邱扬, 李湛东, 徐化成. 兴安落叶松种群的稳定性与火干扰关系的研究[J]. 植物研究, 1997(4): 44 – 446.
QIU Yang, LI Zhandong, XU Huacheng. Study on the relation between the stability of Larix Gmelini Population and the fire disturbance[J]. Bulletin of Botanical Research, 1997(4): 44 – 446. (in Chinese)
- [19] Hansen M C, Potapov P V, Moore R, et al. “High-resolution global maps of 21st – century forest cover change [J]. Science, 2013, 342(15): 850 – 53.
- [20] 杜永胜, 王立夫, 中国森林火灾典型案例: 1953 – 2005[M]. 北京: 中国林业出版社, 2007.
DU Yongsheng, WANG Lifu. Typical Cases of Forest fires in China: 1953 – 2005 [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2007. (in Chinese)
- [21] 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): 176 – 179.
ZHANG Dongyou, DENG Ou, LI Yiqiu, et al. Temporal and spatial characteristics of forest fires in Heilongjiang Province between 1980 and 2005[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(2): 176 – 179. (in Chinese)
- [22] 王乾坤, 于信芳, 舒清态, 等. MODIS EVI 时序数据重建方法及拟合分析[J]. 地球信息科学学报, 2015(6): 732 – 741.
WANG Qiankun, YU Xinfang, SHU Qingtai, et al. Comparison on three algorithms of reconstructing time – series MODIS EVI[J]. Journal of Geo – Information Science, 2015(6): 732 – 741. (in Chinese)
- [23] 赵伟, 李召良. 利用 MODIS/EVI 时间序列数据分析干旱对植被的影响[J]. 地理科学进展, 2009, 28(5): 1179 – 1187.
ZHAO Wei, LI Zhaojiang. Vertical distribution models of sand transport rate of different grain size groups in coastal Aeolian mass flux[J]. Progress in Geography, 2009, 28(5): 1179 – 1187. (in Chinese)
- [24] 于信芳, 庄大方. 基于 MODIS NDVI 数据的东北森林物候期监测[J]. 资源科学, 2006, 28(4): 111 – 117.
YU Xinfang, ZHUANG Dafang. Monitoring forest phenophases of northeast China based on MODIS NDVI data[J]. Resources Science, 2006, 28(4): 111 – 117. (in Chinese)

- [25] Savitzky A, Golay M J E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 1964, 36(8): 1627 – 1639.
- [26] 周增光, 唐婷. 基于质量权重的 Savitzky – Golay 时间序列滤波方法[J]. *遥感技术与应用*, 2013, 28(2): 232 – 239.
ZHOU Zengguang, TANG Ping. VI – quality – based Savitzky – Golay method for filtering time series data[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, 28(2): 232 – 239. (in Chinese)
- [27] Zhang X, Friedl M A, Schaaf C B, et al. Monitoring vegetation phenology using MODIS [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(3): 471 – 475.
- [28] Ratkowsky D A. *Nonlinear Regression Modeling—A Unified Practical Approach* [M]. New York: Marcel Dekker, 1983: 61 – 91.
- [29] Villegas D, Aparicio N, Blanco R, et al. Biomass accumulation and main stem elongation of durum wheat grown under Mediterranean conditions [J]. *Annals of Botany*, 2001, 88(4): 617 – 627.
- [30] Mildrexler D J, Zhao M S, Running S W. Testing a MODIS global disturbance index across North America [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2103 – 2117.
- [31] 尤 慧, 刘荣高, 祝善友, 等. 加拿大北方森林火烧迹地遥感分析[J]. *地球信息科学学报*, 2013, 15(4): 597 – 603.
YOU Hui, LIU Ronggao, ZHU Shanyou, et al. Burned area detection in the canadian boreal forest using MODIS imagery [J]. *Journal of Geo – Information Science*, 2013, 15(4): 597 – 603. (in Chinese)
- [32] 刘丽娟, 庞勇, Zhang Xiaoyang, 等. 基于时间序列 MODIS EVI 数据的森林生长异常监测[J]. *林业科学*, 2012, 48(2): 54 – 62.
LIU Lijuan, PANG Yong, ZHANG Xiaoyang, et al. Monitoring forest growth disturbance using time series MODIS EVI data [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(2): 54 – 62. (in Chinese)
- [33] 金博. 中国林业年鉴 [N]. 2004, <http://cfdb.forestry.gov.cn;443/searchdb.action> Year of gross forest cover loss event. [EB/OL], <http://earthenginepartners.net>.
JIN Bo. China Forestry YearBook. 2004 <http://cfdb.forestry.gov.cn;443/searchdb.action> Year of gross forest cover loss event. [EB/OL], <http://earthenginepartners.net>. (in Chinese)