DOI: 10.5846/stxb201312313076

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研究.生态学报,2015,35(17): - . Yang W, Zhang S W, Jiang X L. Burned area mapping for Heilongjiang basin based on MODIS time series data. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(17): - .

基于 MODIS 时序数据的黑龙江流域火烧迹地提取 研究

杨伟1,张树文2,*,姜晓丽3

1 太原师范学院地理科学学院,晋中 030619
 2 中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102
 3 太原师范学院城镇与区域发展研究所,晋中 030619

摘要:火烧迹地信息是研究火灾的重要参数和基础数据,也是研究全球生态系统和碳循环扰动的重要依据之一。本文以受森林 火灾影响较为严重的黑龙江流域为研究区,以 MODIS 时间序列数据为数据源建立了一个分为两阶段的火烧基地提取算法(即 首先设定较为严格的提取条件对最有可能发生火灾的像元——核心像元进行提取,然后设定较为宽松的阈值提取距离核心像 元一定范围内的火烧像元),对 2000—2011 年的火烧迹地信息进行了提取,生成了研究区长时间序列火烧迹地分布图,并对其 时空分布特征进行了分析。选择黑龙江省为典型验证区对算法精度进行了验证,结果显示算法的整体精度较之以往的算法有 了一定程度的提高。

关键词:火烧迹地; MODIS; GEMI; BAI

Burned area mapping for Heilongjiang basin based on MODIS time series data

YANG Wei¹, ZHANG Shuwen^{2,*}, JIANG Xiaoli¹

1 School of Geographical Sciences, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

2 Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Science, Changchun 130102, China

3 Institute of Urban and District Development, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, China

Abstract: Fire is an important natural disturbance that affects several ecosystems and is also one of the main factors of the terrestrial carbon cycle. As fire modifies the structure and composition of vegetation, it is considered to be an important land management tool. Burned area mapping is an essential step in forest fire research to investigate the relationship between forest fire and climate change and the effect of forest fire on carbon budgets. Traditional data collection of forest fires in field- which are statistically recorded are difficult to manipulate over a large area. The development of the remote sensing technique provides a labor-efficient method for research of land surface processes. At the regional or global scale, in order to obtain a long-time series of burned area maps, a moderate spatial resolution with high temporal resolution remote sensing data is considered as the best alternative. Currently, the most widely used remote sensing data are Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) images and Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) images. Although the AVHRR provides continuous observations for burned area analyses, some studies have identified several sources of potential errors in burned area discrimination from this sensor, mainly due to its radiometric instability, cloud obscuration, and transmission problems. Most of these problems have been notably reduced in the MODIS sensor, which offers greater

收稿日期:2013-12-31; 网络出版日期:2014-11-03

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090310)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhangshuwen@ neigae.ac.cn

spectral, spatial, and radiometric resolution than the AVHRR. This study proposes an algorithm to map areas burned by forest fire using MODIS time series data in Heilongjiang Valley, China. The algorithm is divided into two steps: First, the "core" pixels were extracted to represent the most possible burned pixels based on a comparison of the temporal change of the Global Environmental Monitoring Index (GEMI), the Burned Area Index (BAI), and the MODIS active fire products between pre- and post-fire spatial patterns. Second, a 15-km distance was set to extract the entire burned area near the "core" pixels. These more relaxed conditions were used to identify the fire pixels for reducing the omission error as much as possible. The algorithm comprehensively considered the thermal characteristics and the spectral change between pre- and post-fire spatial patterns, which were represented by the MODIS fire products and the spectral index, respectively. Heilongjiang province in China was selected as the typical study area to validate the accuracy of the algorithm. The results showed that with the use of the MODIS fire products, the accuracy of the algorithm was improved, with an overall accuracy of 71% and a highest accuracy of 84%. Consequently, the algorithm used in this study produced a long-time series of burned area maps of the study area from 2000 to 2011 with a relatively high accuracy. According to the burned area maps, the study area has been seriously affected by fire disasters on average of 0.53 million ha of burned land each year. The most affected years were 2003 and 2008 with burned areas exceeding 1 million ha. The least affected year was 2010 with a burned area of just 0.18 million ha. The relatively large disparity between the maximum and minimum values of the areas burned by forest fire indicates that there is a fluctuation in the severity of disaster during the studied period.

Key Words: burned area; MODIS; GEMI; BAI

火灾是影响众多生态系统(森林、草地等)的一个重要的扰动因素。火灾对于植被的结构和组成具有显著的作用,被认为是一个重要的"地表管理工具"^[1]。以森林生态系统为例,火灾是森林生态系统最为重要的干扰之一,全球平均每年约有1%的森林受到火灾的影响^[2]。森林生态系统是全球碳循环的重要组成部分,火灾的发生通过改变森林生态系统的格局与过程,进而改变整个生态系统的碳循环以及分配过程^[3]。此外,森林火灾对于气候变暖也有着重要的响应^[4-6]。研究表明,北方森林的火灾发生范围对于温度的增加非常敏感,受气候变化的影响较为显著^[7]。此外,还有研究认为气候变暖很有可能影响到传统的火灾循环,例如缩短火灾的周期、增大火灾尺度等^[8-9]。

不论是对于碳循环的影响研究,还是森林火灾与气候变暖的相关性研究,火烧迹地的空间信息都是一个 重要的基础参数。传统的火烧迹地信息主要来源于统计数据,难以覆盖较大的区域,收集较为困难,且难以将 数据进行空间化。遥感技术的发展为解决这一问题提供了很好的手段,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的对地表过程进行刻画^[10]。

在区域或者全球尺度下,为获取长时间序列的火烧迹地信息,中空间分辨率且具有高时间分辨率的遥感数据被认为是最好的选择。目前,应用最为广泛的为 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)数据^[11-13]与 MODIS(Moderate-Resolution Imaging Spectroradia-meter)数据^[14,15]。前者由于发射时间较早,时间序列较长而被使用。但研究表明 AVHRR 数据提取火烧迹地信息存在一定的潜在误差,主要来源于辐射的不稳定性、云污染以及辐射传输问题等方面^[16-18]。较之 AVHRR 数据,MODIS 数据在这些方面都得到了很大的改善,但其局限在于数据仅从 2000 年开始。

本文提出了一种基于 MODIS 时序数据的火烧迹地提取方法,以此为基础对黑龙江流域 2000—2011 年的 火烧迹地信息进行了提取,生成研究区长时间序列火烧迹地分布图,并对其分布特征进行了分析。

1 材料与方法

1.1 研究区

研究区选择位于西伯利亚北方森林南部的黑龙江流域(41°45′—53°33′N,115°13′—135°05′E),面积208×

10⁴km²,西起蒙古高原,包括蒙古(东方省、苏赫巴托尔省等)、俄罗斯(阿穆尔州、哈巴罗夫斯克、外贝加尔等) 和中国(黑龙江省、吉林省、辽宁省、内蒙古自治区等)的13个省及朝鲜的小部分,研究区植被覆盖度较高(图 1),受森林火灾影响较为严重。流域的东部地区主要属于温带湿润季风气候,这是全球季风气候的最北缘, 西部主要受大陆性气候的影响。全年平均气温在-8℃到6℃之间,但其时空分布差异显著。同时,流域内降 水量的时空分布也很不均衡,年平均降水量主要在250—800 mm,大约50%以上的降水量集中在最热的夏季, 而近7个月的干季(1—4月,10—12月)降水量仅为25%;在空间上,降水主要集中在沿海地带,向西逐渐 递减。



图 1 研究区位置及其土地覆被 Fig.1 Location and land cover of Heilongjiang basin

1.2 MODIS 产品数据

研究选择数据为 MODIS 8 天合成地表反射率数据 MOD09Q1(MODIS atmospherically- correct Level 3 8-Day composite Surface Reflectance products, 空间分辨率 250 m)以及 MODIS 8 天合成火产品数据 MOD14A2 (MODIS Level 3 8-Day composite active fire products, 空间分辨率 1 km)。其中, MODIS 火产品数据为 MODIS 火情监测算法下提取的火点信息^[19,20], 其算法依据主要为火灾发生时的热学特性, 代表火灾发生时的温度 异常。

MOD09Q1 与 MOD14A2 产品均采用 Sinusoidal 投影系统发布,数据格式为 HDF (Hierarchy Data Format)。 研究区共涉及6景 MODIS 标准分幅数据。下载研究区 2000—2011 年的 MODIS 产品数据(每年 34 期×12 年× 6景)。时间选择为每年的2月末至11月初,这一时间为火灾发生集中的时间段。对数据进行投影转换及裁 剪处理。此外,由于数据空间分辨率不一致,需要将 MOD14A2 产品重采样为 250 m 分辨率,与 MOD09Q1 产 品相一致。

1.3 火烧迹地提取方法

基于遥感的火灾研究主要包括火点(active fire)监测^[21,22]与火烧迹地(burn scars)提取^[23,24]两类,两者均可以产生火烧迹地数据^[25]。火点监测主要是基于火灾发生时的温度异常,监测卫星过境时可能发生火灾的像元,对火点进行实时观测。这一过程的主要目的在于捕捉火灾发生的时间以及位置信息,虽然也可以产生火烧迹地信息,但结果并不可靠^[26,27]。火烧迹地提取通过对比火灾发生前后的光谱反射特征或者光谱指数特征变化来识别火烧迹地,从而达到提取火烧迹地的目的^[28,29]。这一方法的缺陷在于,一些与火灾发生具有类似光谱特征的事件较难区分,如洪水、森林砍伐以及农作物收获等导致的光谱特征变化。本文的火烧迹地提取方法以后者为基础,并进行了改进,以消除类似的混淆事件。

1.3.1 判别指数选取

火烧迹地识别方法是通过比较火灾发生前后的光谱特征变化来提取火烧面积。因而需要选取适合的光

谱指数来进行表征,如 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)、BBFI(Burned Boreal Forest Index)、GEMI (Global Environmental Monitoring Index)以及 BAI (Burned Area Index)等。其中,NDVI 的应用最为广泛。 NDVI 能够很好的对植被覆盖进行描述^[30,31],但研究表明 NDVI 在植被覆盖度较高的地区容易达到饱和^[32], 且在火烧迹地信息提取中存在较大的潜在误差^[33]。因此,我们选用 GEMI 作为识别火烧迹地的主要判别指 数,其计算公式如下:

$$GEMI = \eta \times (1 - 0.25\eta) - (\rho_{red} - 0.125)/(1 - \rho_{red})$$

$$\eta = (2(\rho_{nir}^{2} - \rho_{red}^{2}) + 1.5\rho_{nir} + 0.5\rho_{red})/(\rho_{nir} + \rho_{red} + 0.5)$$
(1)

其中, ρ_{nr} 以及 ρ_{red} 为近红外波段和红光波段。火灾发生后 GEMI 表现出显著的下降。

为了避免采用单一光谱指数所带来的潜在误差,我们选择了另一个光谱指数 BAI 来作进一步的限定,其 计算公式如下:

BAI =
$$1/((\rho_{\rm nir} - \rho_{\rm cnir})^2 + (\rho_{\rm red} - \rho_{\rm cred})^2)$$
 (2)

其中, ρ_{cnir} 和 ρ_{cred} 分别被设定为 0.06 与 0.1。火灾发生后 BAI 值表现出显著的上升。

除此之外,在比较火灾发生前后光谱特征变化的同时,为了考虑火灾发生时的热学特性,即温度异常,我 们将 MODIS 火产品数据作为一个输入波段加入到判别流程,以提高判别精度。

1.3.2 判别流程

火烧迹地的识别流程主要分为两个阶段:首先,设定较为严格的判别阈值以提取火烧的核心像元——即 火灾最有可能发生的像元。这一阶段的主要目标在于尽可能的减少错判误差,因而需要对火灾发生前后的光 谱指数变化设定严格的阈值,并且同时用使用 MODIS 火灾产品进行筛选,以表示提取像元在相关植被指数变 化前曾出现温度异常。这一过程同时考虑了火灾发生前后地表植被的突变以及火灾发生时的温度异常,从而 可以与其他造成地表突变的因素相区分。其次,对第一阶段提取的核心像元 15 公里范围内的光谱指数变化 特征进行判别,设定较为宽松的阈值,以尽可能减少漏判误差。判别流程及判别条件如图 2 所示。



图 2 算法流程图 Fig.2 Flowchart of algorithm

第一阶段的提取过程以 GEMI、BAI、以及 MOD14A2 产品为基础,具体的判别条件如下所示: 首先,火灾发生之前的 GEMI 值必须大于一定的阈值,以确保判别区域为植被覆盖。

(3)

$$\text{GEMI}_{t-1} > 0.170$$

其中,*t*为时间(下同)。选择数据为 MODIS8 天合成数据,每年共 34 期数据,因此 *t* 的范围为: 0 < *t* ≤ 34。

火灾发生后, GEMI 值必须表现出显著的下降, 且这一下降过程必须持续一定的时间, 以区分由云污染等 造成的 GEMI 值的短暂下降。这一过程通过以下两个判别条件来实现:

$$(\text{GEMI}_{,-}\text{GEMI}_{,-1})/\text{GEMI}_{,<-0.1}$$

$$\tag{4}$$

$$(\operatorname{GEMI}_{i+2} - \operatorname{GEMI}_{i-1}) / \operatorname{GEMI}_{i+2} < -0.1$$
(5)

然后,我们使用 BAI 指数来对火烧像元做进一步的限定。火灾发生后, BAI 值显著增加, 其判别条件如下:

$$BAI_{t} > 250 \pm BAI_{t-1} > 200$$
 (6)

最后,我们使用 MODIS 火产品数据来对火烧像元进行掩膜,以保证光谱指数变化前,所提取像元表现出 温度异常的特征。

$$\rho_{\iota} > 6 \quad \text{if } \rho_{\iota-1} > 6 \tag{7}$$

其中,ρ为 MODIS 火产品数据像元值。

第二阶段的判别过程以第一阶段提取的核心像元为基础,采用较为宽松的阈值来对邻近像元进行判别。 在对研究区的火灾发生特征进行分析之后,距离核心像元的最大距离被设定为15 km。第二阶段的火烧迹地 信息提取,仅对核心像元15 km 范围内像元进行判别,判别条件如下:

$$\operatorname{GEMI}_{t} - \operatorname{GEMI}_{t-1} < -0.03 \tag{8}$$

$$\operatorname{GEMI}_{\iota+1} - \operatorname{GEMI}_{\iota-1} < -0.02 \tag{9}$$

$$\operatorname{GEMI}_{\iota+2} \operatorname{-}\operatorname{GEMI}_{\iota-1} < 0 \tag{10}$$

$$\operatorname{GEMI}_{i+1} - \operatorname{GEMI}_i \leq 0 \tag{11}$$

$$BAI_t > 250 \tag{12}$$

最后,将两个阶段的提取结果进行合成。采用一个 3×3 的变换核,对合成结果进行滤波处理,消除提取 过程中产生的小斑块。

2 结果与分析

2.1 精度验证

由于研究区涉及境外地区,验证数据难以获取。考 虑到以上提取方法的基础为火烧前后植被指数的变化 以及温度的异常,使得该方法对火烧迹地的提取具有普 适性,从而可以采用选择典型验证区的方法对算法进行 验证。故以黑龙江省为典型研究区,对提取结果进行精 度验证。验证数据来源于相关林业部门 2000—2005 年 的火灾统计数据,包括火灾发生的时间、地点、经纬度信 息以及过火面积等。

鉴于 MODIS 产品空间分辨率以及火烧迹地信息提 取后进行去除小斑块的滤波处理的需要,对过火面积小 于 60 hm²(约 3×3 个像元)的火灾进行剔除,最终得到 黑龙江省 2000—2005 年的火灾验证数据(图 3)。

利用 2000 年—2005 年火灾发生的经纬度信息(图 3)对提取结果进行错判以及漏判分析(表 1)。由于验





证数据仅提供了火灾发生的位置,因而不能对提取结果进行空间化(逐像元)的误差分析。以火灾发生的位置信息为参照,对提取结果进行分析,两者一致则认为提取结果正确。如果在标有火灾发生的位置没有提取 出火烧迹地信息,被认为是漏判;相反,在没有标出火灾发生的位置,却提取出火烧迹地信息,认为是错判。

	Table 1	Validation table of I	ourned area			
时间 Time	2000	2001	2002	2003	2004	2005
火灾发生次数 Number of fire happened/起	88	61	33	62	27	10
提取火灾次数 Number of fire extracted/起	83	53	36	68	25	13
漏判 Omission error/起	21	23	8	11	9	3
错判 Commission error/起	16	15	11	17	7	6
提取面积 Extracted area/hm ²	50541.4	81837.17	45244.2	486747	155413	93757.7
验证数据 Validation area/hm ²	76613.9	128233.9	53352.85	797247.6	185547.2	132247.8

表 1 火烧迹地提取验证表 ble 1 Validation table of burned are

此外,我们将提取结果的面积进行汇总与验证数据进行了比较(表1)。结果显示,2000—2005年每年均 有一定的漏判以及错判误差存在,且提取的火烧迹地面积均小于验证数据,总体精度为71%。其中,提取面 积精度最高为2002年,达84%;提取面积精度最低为2003年,精度为61%。较之以往的研究^[35],精度有所 提高。

2.2 黑龙江流域火烧迹地分布特征分析

2.2.1 黑龙江流域火烧迹地信息提取

使用以上所验证的火烧迹地提取方法,以 MOD09Q1数据以及 MOD14A2数据为基础,对黑龙江 流域 2000—2011年的火烧迹地信息进行了提取,得到 研究区长时间序列火烧迹地分布图(图4)。

2.2.2 火烧迹地特征分析

将黑龙江流域的火烧迹地面积进行逐年汇总,从而 得到流域逐年的火烧迹地面积统计数据(图 5)。

黑龙江流域 2000—2011 年受火灾影响较为严重, 年均过火面积达 53.21 万 hm²。火灾发生最严重的年份 为 2003 年,面积为 146.79 万 hm²;而受火灾影响最小的 年份为 2010 年,过火面积仅有 18.39 万 hm²,差距较大。 火灾发生较为严重的年份还包括 2008 年,过火面积也 超过了百万公顷,达 119.41 万 hm²。其他年份受火灾影 响较为平均,其中 2005 年相对较为严重,面积为 62.41 万 hm²;其次为 2001、2002、2004 以及 2011 年,火烧迹



2011)

地面积分别为 41.55 万 hm²、43.83 万 hm²、43.59 万 hm²以及 43.23 万 hm²;最后为 2000、2006、2007 以及 2009 年,火烧迹地面积分别为 33.08 万 hm²、38.87 万 hm²、24.01 万公顷以及 23.41 万 hm²。

从火烧迹地的空间特征来看,火烧迹地的分布与森林覆被密切相关,主要分布于黑龙江流域的中、高纬度 地区。俄罗斯境内的火烧迹地分布较为均匀,原因在于其高的植被覆盖度。中国境内火烧迹地主要分布于 大、小兴安岭以及长白山地区,其中以黑龙江省受影响最为严重。此外,蒙古和朝鲜境内也有少部分火烧迹地 分布。



Fig.5 Burned area dynamic in Heilongjiang basin

3 结论与讨论

长时间序列火烧迹地数据是区域或者全球尺度下森林火灾相关研究的重要基础信息。本文以黑龙江流 域为研究区,利用 MODIS 时序数据对其 2000—2011 年的火烧迹地信息进行了提取,主要结论如下:

低空间分辨率高时间分辨率的遥感数据是区域或者全球尺度下火烧迹地信息提取的主要数据源,通过建 立相应的算法,可以实现长时间序列火烧迹地信息的提取过程。

综合考虑火灾发生前后的植被变化(光谱指数变化)与火灾发生时的热学特征能够更为有效的对火烧迹 地信息进行提取,提高提取精度。

黑龙江流域 2000—2011 年受火灾影响较为严重,年平均产生火烧迹地 53.21 万 hm²,受火灾影响最大年 份与最小年份之间的火烧迹地面积差距较大。

本文基于 MODIS 数据空间分辨率以及提取结果滤波处理的需求,将过火面积大于 60 hm²的森林火灾作 为验证数据,较之 Emilio 等使用大于 200 hm²的火灾^[34]作为验证数据,提高了对算法精度的要求。结果显示 主要的漏判误差仍来源于100 hm²左右的森林火灾。证明由于遥感数据空间分辨率的局限,算法对于面积较 小的火烧迹地提取具有一定难度。而空间分辨率相对较高的遥感数据,如 TM 数据,其时间分辨率却难以满 足火烧迹地信息提取的要求。遥感数据融合可以较好的解决这一问题,如何采用融合之后的高空间分辨率以 及时间分辨率的遥感数据进行更为细致的火烧迹地提取将成为我们进一步研究的内容。

参考文献(References):

- [1] Dubinin M, Potapov P, Lushchekina A, Radeloff V C. Reconstructing long time series of burned areas in arid grasslands of southern Russia by satellite remote sensing. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8): 1638-1648.
- [2] Fraser R H, Li Z. Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION. Remote Sensing of Environment, 2002, 82(1): 95-110.
- [3] 吕爱锋,田汉勤,刘永强.火干扰与生态系统碳循环.生态学报,2005,25(10):2734-2743.
- [4] Amiro B D, Orchansky A L, Barr A G, Black T A, Chambers S D, Chapin III F S, Goulden M L, Litvak M, Liu H P, McCaughey J H, McMillan A, Randerson J T. The effect of post-fire stand age on the boreal forest energy balance. Agricultural and Forest Meteorology, 2006, 140 (1/4): 41-50.
- [5] Kasischke E S, Turetsky M R. Recent changes in the fire regime across the North American boreal region-Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. Geophysical Research Letters, 2006, 33(9): 1-5.
- [6] Morton D C, Collatz G J, Wang D, Randerson J T, Giglio L, Chen Y. Satellite-based assessment of climate controls on US burned area. Biogeosciences, 2013, 10(1): 247-260.
- [7] Flannigan M D, Logan K A, Amiro B D, Skinner W R, Stocks B J. Future area burned in Canada. Climatic Change, 2005, 72(1/2): 1-16.
- [8] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [9] Gillet N P, Weaver A J, Zwiers F W, Flannigan M D. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires. Geophysical Research Letters, 2004, 31(18), L18211, doi: 18210.11029/12004GL02 0876.

- [10] Mouillot F, Schultz M G, Yue C, Cadule P, Tensey K, Ciais P, Chuvieco E. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 64-79.
- [11] Vafeidis A T, Drake N A, Wainwright J. A proposed method for modelling the hydrologic response of catchments to burning with the use of remote sensing and GIS. Catena, 2007, 70(3): 396-409.
- [12] Pu R L, Li Z Q, Gong P, Csiszar I, Fraser R, Hao W M, Kondragunta S, Weng F Z. Development and analysis of a 12-year daily 1-km forest fire dataset across North America form NOAA/AVHRR data. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(2): 198-208.
- [13] Sukhinin A I, French N H F, Kasischke E S, Hewson J H, Soja A J, Csiszar I A, Hyer E J, Loboda T, Gonrad S G, Romasko V I, Pavichenko E A, Miskiv S I, Slinkina O A. AVHRR-based mapping of fires in Russia: New products for fire management and carbon cycle studies. Remote Sensing of Environment, 2004, 93(4): 546-564.
- [14] Oadilla M, Stehman S V, Litago J, Chuvieco E. Assessing the temporal stability of the accuracy of a time series of burned area products. Remote Sensing, 2014, 6(3): 2050-2068.
- [15] Roy D P, Boschetti L, Justice C O, Ju J. The collection 5 MODIS burned area product—Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(9): 3690-3707.
- [16] Barbosa P M, Gregoire J M, Pereira J M C. An algorithm for extracting burned areas from time series of AVHRR GAC data applied at a continental scale. Remote Sensing of Environment, 1999, 69(3): 253-263.
- [17] Martin M P, Chuvieco E. Mapping and evaluation of burned land from multi-temporal analysis of AVHRR NDVI images. EARSeL Advances in Remote Sensing, 1995, 4(3): 7-13.
- [18] Pereira J M C. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(1): 217-226.
- [19] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, Kaufman Y J. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. Remote Sensing of Environment, 2003, 87(2/3): 273-282.
- [20] Dozier J. A method for satellite identification of surface temperature fields of subpixel resolution. Remote Sensing of Environment, 1981, 11: 221-229.
- [21] Movaghati S, Samadzadegan F, Azizi A. An agent-based approach for regional forest fire detection using MODIS data. Journal of Applied Sciences, 2009, 9(20): 3672-3681.
- [22] 王彩云, 扎西顿珠, 陈涛. EOS/MODIS 数据在西藏森林火灾中的应用. 高原山地气象研究, 2010, 30(3): 66-69.
- [23] Ruiz J A M, Riano D, Arbelo M, French N H F, Ustin S L, Whiting M L. Burned area mapping time series in Canada (1984-1999) from NOAA-AVHRR LTDR: A comparison with other remote sensing products and fire perimeters. Remote Sensing of Environment, 2012, 117: 407-414.
- [24] Giglio L, Loboda T, Roy D P, Quayle B, Justice C O. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(2): 408-420.
- [25] Zhang X Y, Kondragunta S, Quayle B. Estimation of biomass burned areas using multiple-satellite-observed active fires. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(11): 4469-4482.
- [26] Kasischke E S, Hewson J H, Stock B, van der Werf G, Randerson J. The use of ATSR active fire counts for estimating relative patterns of biomass burning-a study from the boreal forest region. Geophysical Research Letters, 2003, 30(18), doi: 10.1029/2003GL017859.
- [27] Giglio L, Van der Werf G R, Randerson J T, Collatz G J, Kasibhatla P. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(4): 957-974.
- [28] Key C H. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. Fire Ecology, 2006, 2(2): 34-59.
- [29] Roy D P, Jin Y, Lewis P E, Justice C O. Prototyping a golbal algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. Remote Sensing of Environment, 2005, 97(2): 137-162.
- [30] Fraser R H, Li Z, Cihlar J. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. Remote Sensing of Environment, 2000, 74(3): 362-376.
- [31] Kucera J, Yasuoka Y, Dye D G. Creating a forest fire database for the Far East Asia using NOAA/AVHRR observation. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(11): 2423-2439.
- [32] Cai H Y, Zhang S W, Bu K, Yang J C, Chang L P. Intergrating geographical data and phenological characteristics derived from MODIS data for improving land over mapping. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(4): 705-718.
- [33] Chuvieco E, Martín M P, Palacios A. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(23): 5103-5110.
- [34] Chuvieco E, Englefield P, Trishchenko A P, Luo Y. Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(5): 2381-2396.