

加拿大北方森林火烧迹地遥感分析

尤 慧^{1,2}, 刘荣高^{2*}, 祝善友¹, 刘 洋²

(1. 南京信息工程大学遥感学院, 南京 210044; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 森林火灾是加拿大北方森林地区最主要的扰动因素, 对北方生态系统起着主导作用。基于MODIS数据, 采用全球扰动指数算法(MGDI), 对加拿大萨斯喀彻温省和亚伯达省2004–2011年的森林火烧迹地进行检测和分析。通过与MODIS标准火烧迹地产品以及加拿大林业局数据进行比较, 扰动指数算法检测的火烧迹地面积比MODIS标准产品更接近于林业局的统计数据。分析表明, 在2004–2011年间, 由于火灾原因, 整个研究区森林面积平均每年减少76.36万hm², 占该区域森林总面积的3.36%。萨斯喀彻温省平均每年燃烧的森林面积为46.83万hm², 亚伯达省为29.53万hm²。其中, 2006、2008、2010和2011年是火灾的高峰年份。火烧迹地主要集中在生态交错带的北方保护区、针叶林保护区、针叶林平原区, 以及北方平原东北部的伍德布法罗国家森林保护区。

关键词: 北方森林; 火烧迹地; MODIS; 扰动指数

DOI: 10.3724/SP.J.1047.2013.00597

1 引言

加拿大拥有全球三分之一的北方森林^[1], 是全球碳收支的重要组成部分^[2]。火灾会导致北方森林生态系统发生巨大改变, 引起地表发射率、湿度和温度变化, 改变北方森林生物群落的自然演替, 是北方森林最主要的扰动因素, 对全球碳循环有重大影响^[3]。近十年, 加拿大平均每年有7400次左右的森林火灾发生, 过火森林面积达1.9百万hm²^[4]。这些森林火灾主要分布在加拿大西部中心地区^[5], 而位于该区域的萨斯喀彻温省和亚伯达省受火灾扰动影响最为严重^[6–7]。

卫星遥感可以实现对区域地表的重复观测, 已被广泛用于森林火灾监测及影响分析。例如, 基于AVHRR遥感数据, 采用植被指数(例如归一化植被指数, NDVI)^[8–10]或其衍生方法进行大尺度生态系统扰动检测^[11–12]。研究表明NDVI能够较好地估算森林火烧面积^[8–9], 但是单独利用NDVI进行森林火烧迹地检测会因干旱、植被季节变化等非火灾原因造成检测结果出现偏差^[13]。而耦合地表温度(LST)与

NDVI数据证明比单独利用NDVI能更显著地区分检测地表发生的变化^[14–15]。许多研究表明, 利用AVHRR估算燃烧面积是可行的, 但存在较大的局限性^[16], 而MODIS传感器在区域和全球尺度的火烧迹地估测方面有了很大的精度提高^[17]。

本文采用2003–2011年MODIS EVI数据和LST数据, 以及全球扰动指数(MGDI)方法^[18], 检测了加拿大森林火灾主要发生区萨斯喀彻温省(简称萨省)和亚伯达省2004–2011年的森林火灾扰动状况, 并将检测结果与MODIS标准火烧迹地产品、加拿大林业局统计数据进行比较, 同时, 分析了研究区火烧迹地面积的年际变化和空间分布。

2 研究区地理背景与数据源

2.1 研究区地理特征

研究区位于101°W~120°W, 49°N~60°N, 位于加拿大北方森林覆盖的萨省和亚伯达省(如图1)。萨省面积为65.19万km², 位于北部北方森林到南部的大草原之间, 是北方过渡地带, 植被覆盖为大面积

收稿日期: 2012–12–10; 修回日期: 2013–03–14。

基金项目: 气象行业专项项目“卫星遥感全球下垫面类型数据集研制”(GYHY201106014); 国家“973”计划项目“全球不同区域陆地生态系统碳源汇演变驱动机制与优化计算研究”(2010CB950701)。

作者简介: 尤 慧(1987–), 女, 江苏宿迁人, 硕士生, 研究方向为3S集成与气象应用。E-mail: youhuinuist@hotmail.com

*通讯作者: 刘荣高(1970–), 男, 贵州锦屏人, 博士, 研究员, 研究方向为全球定量遥感。E-mail: liurg@igsnnr.ac.cn

的北方森林,多为原始针叶林,并有部分落叶阔叶林分布。萨省气候四季分明,比较干燥,夏季平均气温 25°C ,冬季平均零下 25°C 。亚伯达省面积约 66万 km^2 ,南部为平坦的平原,除沿河地带适于乔木生长外,植被以丛生草本植物为主;北部为杨木森林和草原地带,最北部为森林区。该区主要受大陆性北极气候影响,冬季寒冷,白天平均气温约 -10°C ;夏季温暖,白天平均气温约 25°C 。

研究区主要分为以下6个生态区:北方平原、针叶林保护区、北方保护区、针叶林平原、山区山脉、大草原(图1)。在北方平原中主要以云杉、红色香脂冷杉、白杨等为特征树种。而针叶林保护区森林则以黑云杉、加拿大短叶松、胶杨等为主。北方保护区的特征树种主要为黑云杉和白云杉。针叶林平原区的特征种为恩氏云杉、落矶山冷杉、扭叶松。山区山脉中以西黄松为特征种,花旗松也有较广分布。大草原生长着几种数目极多的树种,主要是杨属的几个种、柳树及白杉等。

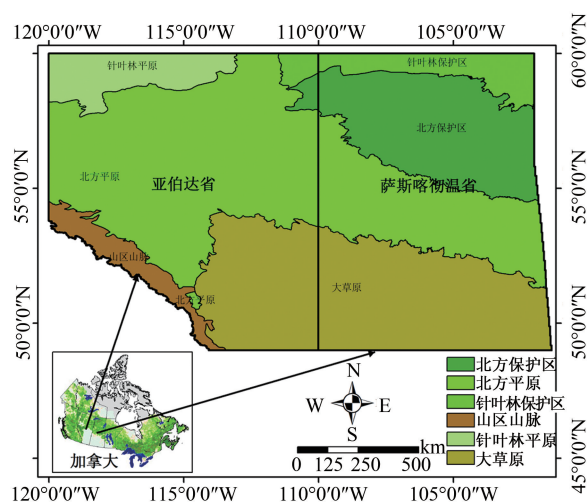


图1 研究区的生态区空间分布图

Fig.1 Spatial distributions of the ecological zones in the study area

2.2 数据源与预处理

(1) MODIS EVI数据和LST数据

为保持数据空间分辨率的一致性,本文选用空间分辨率为 1000m ,16天合成的MYD13A2增强型植被指数EVI产品(覆盖整个研究区域数据为h10v03、h10v04、h11v03、h11v04和h12v03)作为对象(两种数据投影方式均为正弦等积投影,数据的存储格式为EOS-HDF)。由于LST数据自2002年的第185天开始,因而选用2003–2011年具有完整

年份的EVI和LST数据用于森林火烧迹地检测(文中所用MODIS数据通过<http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/>下载)。

(2) MODIS 火烧迹地产品

用2004–2011年MODIS标准火烧迹地产品MCD45(MODIS Burnt Areas Product)用来与扰动指数算法结果在空间分布和范围上进行比较。MCD45产品的空间分辨率为 500m ,合成的时间窗口为1月。该数据是利用连续多日反射率数据和角度信息,用BRDF模型,通过阈值判断目标像元上光谱反射率的时间序列变化与正常状况的差异来检测火烧迹地^[19]。产品中包含每个燃烧像元的时间信息及质量信息。数据中“0”表示未燃烧的区域,“1–366”表示燃烧日期。

MCD45A1的标准产品是月合成数据,故首先将每年12幅火烧迹地数据中的火烧迹地的像元($0<\text{像元值}<367$)进行年合成,再利用MCD12Q1的地表覆盖分类数据对非森林区域进行掩膜,获得2004–2011年森林火烧迹地标准产品年合成图。

(3) MODIS 全球土地覆盖数据

MCD12Q1是年合成的土地覆盖产品,空间分辨率为 500m 。产品中包含5种不同的土地覆盖分类方案,共有17个土地覆盖类别,信息提取的主要技术是监督决策树分类算法^[20]。

为了实现分类数据与MODIS EVI数据和LST数据空间分辨率的一致性,首先,将2004–2009年的MCD12Q1数据重采样为 1000m 的空间分辨率。然后,采用IGBP全球植被分类方案数据集,提取像元值为1–5的部分作为森林,掩膜非森林的部分。由于MCD12Q1产品只包括2001–2009年的全球土地覆盖信息,因此,2010–2011年份缺少的数据均用2009年的处理结果替代。

3 森林火烧迹地MODIS图像提取分析

3.1 火烧迹地提取算法

扰动指数定义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。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(1)生成瞬时扰动指数 DI_{inst} :

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

其中, DI_{inst} 是瞬时扰动指数; LST_{max} 表示每年 8 天合成的 LST 最大值; $EVI_{max\ post}$ 是当年 LST_{max} 所对应的时间之后所有 EVI 的最大值; $current(y)$ 表示当前的年份; $mean(y-1)$ 是指目标检测年之前多年的均值。

3.1.1 LST 年最大值合成

将一年内时间序列的所有 8 天合成的 LST 数据进行比较, 计算出每个像元一年内的最大值, 取该值为目标年的 LST_{max} , 每年合成一幅当年 LST_{max} 影像。同时标记出 LST_{max} 像元出现所对应的日期, 以便于 3.1.2 中 $EVI_{max\ post}$ 数据的计算。由于卫星反演的 LST 会受到天气变化的影响, 而年最大值 LST_{max} 合成有助于消除自然天气变化及不同季节对地表温度的影响。

3.1.2 EVI 年最大值合成

在 EVI 数据中代表植被下边界条件的基线阈值为 0.025, 小于这个阈值的像元主要与水体、雪/冰等地物类型相关^[21]。在质量控制处理后, 首先, 去除 EVI 小于 0.025 的像元, 然后, 将目标年份 LST_{max} 每个像元记录最大值出现时间之后的所有 EVI 数据进行最大值提取, 每年生成一幅瞬时 $EVI_{max\ post}$ 影像。瞬时 $EVI_{max\ post}$ 合成数据能保证: (1) 当发生火灾产生 LST_{max} 值时, 对应的 $EVI_{max\ post}$ 值不会在火灾前出现。(2) 由于发生真实扰动后 $EVI_{max\ post}$ 值会小于夏季末出现的低 EVI 值, 因此, 不会将干旱的夏季末可能出现的并非代表真实扰动的低 EVI 值误标记为扰动。

3.1.3 DI 值的计算

(1) 目标年扰动比率的计算

用每年的 LST_{max} 除以当年的 $EVI_{max\ post}$ 生成瞬时扰动的 LST/EVI 比率 R_{inst} (式 2)。LST/EVI 比率是一个无量纲量, 可对不同变量的变化表现出强烈的敏感性。例如, 当发生火灾时 LST_{max} 瞬时增大, 同时 $EVI_{max\ post}$ 瞬时减小, 导致 R_{inst} 明显偏离自然变化范围。

$$R_{inst} = \frac{LST_{max}}{EVI_{max\ post}} \quad (2)$$

(2) 多年 R 均值的计算

多年的 R 均值是指目标年之前所有年扰动比率的平均, 即 $\bar{R}_{(y-1)}$ 。R 均值反应地表未发生扰动情况下的平衡状态, 并能作为评定目标检测年发生的扰动偏离自然变化范围的统一标准。

(3) 扰动指数值的计算

利用目标年份扰动比率除以目标年之前多年对应的 R 均值, 计算出瞬时扰动指数 DI_{inst} (式 1)。由于选取 2003 年为数据的初始年份, 根据 DI 的扰动计算公式, 2003 年的扰动值无法计算, 因此, 扰动指数结果从 2004 年开始获取。并以 2004–2011 年的 MCD12Q1 数据提取 DI 影像中的森林部分, 掩膜非森林区域。

3.1.4 扰动信息的提取

在植被未受扰动的正常情况下, DI 在常数 1 附近波动。而在火扰动情况下, 由于 LST_{max} 增高, $EVI_{max\ post}$ 减小, 两者的比率瞬时增大, 大幅度偏离正常状态。为了消除前一年的火烧迹地在下一年仍被检测到, 从而造成累积效应的影响。通过计算目标检测年份的 DI 值与前一年 DI 影像的变化比率作为当年的火烧迹地检测影像。并在 DI 变化比率图中, 叠加萨省野火周界面积矢量数据^[22], 用像元统计分析的方法从已知的火烧迹地区中选取 200 个像元, 找出其中最小的 DI 变化比值 (89%) 像元。为了更好地区分火烧迹地与非火烧迹地 (如砍伐迹地) 信息, 并且火烧迹地变化比率阈值应该小于最小 DI 变化比值, 通过设定不同的扰动阈值 (分别为 55%、65%、75% 以及 85%), 以目视解译并计算每个阈值下对应的总森林扰动面积的方法, 最终选取变化比值 65% 作为火烧迹地的提取阈值^[18]。

3.2 火烧迹地提取结果与检测分析

3.2.1 EVImaxpost、LSTmax 及 DI 变化比率

本文选取 2005–2006 年萨省和亚伯达省北方森林保护区与北方平原区的交界处 (55~59°N, 100~116°W), EVImaxpost、LSTmax 以及 DI 的变化比率 (图 2)。图中叠加了 2006 年该区域的野火周界面积矢量图, 从图 2 中黑色箭头所指的火烧迹地区中选取 16 个像元, 分别统计 EVImaxpost、LSTmax, 以及 DI 的变化比率, 并计算其平均值。在计算的结果中, EVImaxpost 的平均变化比率为 -74.63%, LST-

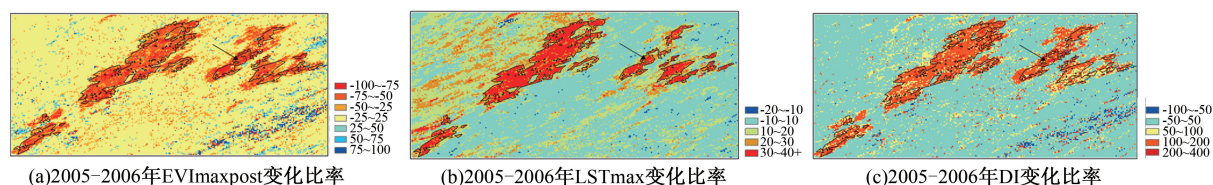


图2 2005-2006年萨省和亚伯达省交界处变化比率图

Fig.2 Percent change results at the junction of Saskatchewan and Alberta provinces in 2005-2006

max 为 27.56%, 而 DI 平均变化率为 208.88%。结果表明, 利用植被指数与地表温度相结合生成扰动指数的方法能够放大火扰动信号, 也比单独的利用 LST 或 EVI 其中一种信息能更好的检测火烧迹地。

3.2.2 火烧迹地检测结果与 MODIS MCD45A1 产品的对比分析

以 2003-2011 年 MODIS LST 数据和 MODIS EVI 数据驱动火烧迹地检测算法, 提取扰动信息, 并与对应年份 MCD45A1 火烧迹地年合成产品进行比较。图 3 给出了萨省和亚伯达省在 2010 年的主要

火烧迹地年份中, 扰动指数算法检测结果与 MCD45A1 火烧迹地结果的比较。从图 3 可以看出, 扰动指数算法与 MODIS 标准产品在检测结果中都获得了较好的效果, 两种结果在空间位置和分布上具有较强的一致性, 尤其是在绿色椭圆标注区。MODIS 标准产品中的森林火烧迹地像元在本文检测的结果上均有对应像元, 而且扰动指数算法检测结果能够更加细化的检测出来局部个数较少的火烧迹地像元, 如红色椭圆区域, 扰动指数检测结果与 MODIS 影像均可反映该区域的扰动晴空, 而 MCD45A1 则未检测出。

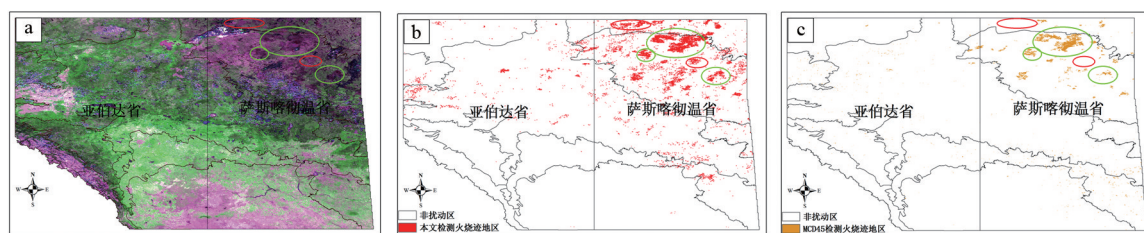


图3 2010年萨省和亚伯达省森林火烧迹地检测结果:(a)MYD13A2影像图(2010年第217天数据);(b)扰动指数算法结果;(c)MODIS标准产品(2010年全年数据累加)

Fig.3 Forest burned area detection results at Saskatchewan and Alberta provinces in 2010: a) MYD13A2 image (the 217th day); b) the result of DI; and c) MODIS MCD45A1 product (yearly accumulative data in 2010)

为了定量验证扰动指数算法的结果, 分别将 MCD45A1 检测的森林火烧迹地面积、扰动指数算法提取的森林火烧迹地面积与林业局给出的 2004-2011 年总研究区森林火灾面积进行比较, 如图 4 所示。林业局统计数据数据主要是由省级或地区的资源管理机构提供, 并由加拿大林务局定期汇编而成。相对于林业局统计的森林火灾面积, 扰动指数算法检测结果平均相对误差 (MRE_1) 为 8.03%, 均方根误差 ($RMSE_1$) 为 20.67 万 hm^2 , 而 MODIS 标准火烧迹地产品的平均相对误差 (MRE_2) 和均方根误差 ($RMSE_2$) 分别高达 70.53%、86.39 万 hm^2 。在萨省, 扰动指数算法检测的年均森林火烧迹地面积为 46.83 万 hm^2 , 而 MCD45A1 检测出的结果仅为 8.90 万 hm^2 , 与林业局给出的年均 64.19 万 hm^2 的森林过

火面积相比, 相对误差分别为 27.04%、86.13%。而在亚伯达省, 林业局给出的年均森林过火面积为 20.40 万 hm^2 , 扰动指数算法和 MCD45A1 检测的年均森林火烧迹地面积分别为 29.53 万 hm^2 和 5.17 万 hm^2 。由此可见, 扰动指数算法结果与林业局的官方数据具有更高的一致性, 比 MODIS 标准火烧迹地产品能够更好地检测出目标年份的森林火烧迹地。

3.2.3 火烧迹地年际变化分析

加拿大北方森林火灾在面积和严重程度上会表现出显著的年际变化^[23]。分别提取 2004-2011 年萨省、亚伯达省火烧迹地像元, 并计算出各省以及两省总森林火烧迹地面积, 进行年际变化分析。从图 4 可以看出, 2006、2008、2010 和 2011 年为研究区

的主要火灾年份,每年平均扰动的森林面积达119.83万 hm^2 ,其中,2011年的森林火烧迹地面积与2010年相近,分别为128.03万 hm^2 和127.52万 hm^2 ,其次则为2006年的117.53万 hm^2 。而非主要的火灾年份中,平均每年减少的森林面积为32.89万 hm^2 。

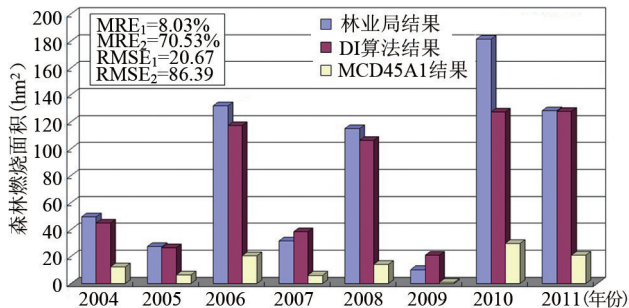


图4 DI算法、MCD45A1检测的森林火烧迹地面积与林业局结果的比较

Fig.4 Comparison of forest burned area among DI results, MCD45A1 products and the inventory data from Forestry Bureau of Canada

萨省在2006年及2008年经历了大范围的火季,森林火烧迹地面积分别达70.17万 hm^2 和78.93万 hm^2 。而2010年萨省的森林火烧迹地面积为8年最高,达110.03万 hm^2 ,同时在加拿大各省的林火中,萨省也是2010年火灾最严重的省份^[4]。在2004-2010年间,萨省是研究区森林火灾发生的主要省份,森林火烧迹地扰动面积变化趋势与总研究区极其相似。但是在2011年,萨省森林火烧迹地面积明显出现了与总森林面积变化趋势的不一致,火烧迹地面积较2010年显著降低,并且研究区主要的扰动省份也变成了亚伯达省。这是由于在拉尼娜的影响下,2010年萨省整个冬天的降雪量和降水都异常的高,因此大大缓解了该省在2011年春末的干旱条件,使得2011年萨省森林火灾得到了大大压制,但是亚伯达省相反^[5]。

2011年加拿大有两个火季节,亚伯达火季即为其中之一。因而亚伯达经历了高于正常火活动的时期,其中火情主要发生在5月和6月^[7]。比较亚伯达2010年与2011年的火烧迹地面积,可以发现2011年的燃烧面积尤为显著,高于前一年75.97万 hm^2 之多。在这8年期间,亚伯达每年森林火烧迹地面积平均为29.53万 hm^2 ,仅2011年减少的森林面积即为前7年平均扰动森林面积的4.58倍。由于极端干旱的冬天以及整个省的降水量低于正常年

份,火季较往年提前了一个月^[7],使得2006年也成为主要火扰动年份,亚伯达省森林火烧迹地面积占该省总森林面积的2.72%,仅次于2011年的4.79%。

3.2.4 火烧迹地的空间分布

为了分析研究区森林火烧迹地的分布,将2004-2011年每年检测的火烧迹地结果进行叠加,生成了多年火烧迹地分布图。从图5可以看出,北方保护区、针叶林保护区,以及北方平原的东北部是森林火灾的主要发生位置。

2006、2008、2010和2011年为研究区的主要火灾年份。在2006年,由于萨省从5月到7月中旬少雨,气候干燥及亚伯达省低于正常年份的降水情况,使得萨省北纬 55° 以北和亚伯达省的北部几乎都能检测到林火的零散发生(绿色区域)。黄色区域代表2008年检测的森林火烧迹地,从图5可看出,森林火灾主要是位于萨省北部丘吉尔河流域和阿萨巴斯卡地区之间,持续干旱使得该省的整个远北地区都受到了不同程度的火扰动^[7]。2010年的森林火烧迹地主要发生在萨斯喀彻温省的北方森林区中,还有小部分发生在洪堡和艾伯特王子城。在亚伯达省检测出的森林火烧迹地主要位于伍德布法罗国家公园区和北方中部高地。2011年森林火烧迹地空间分布地区(红色区域)主要为亚伯达省,火烧迹地聚集在北方平原中伍德布法罗国家森林保护区,以及其西南和东南部的北方中部高地。萨省的火烧迹地则较零散的分布在北方保护区和第三大城市艾伯特王子城。

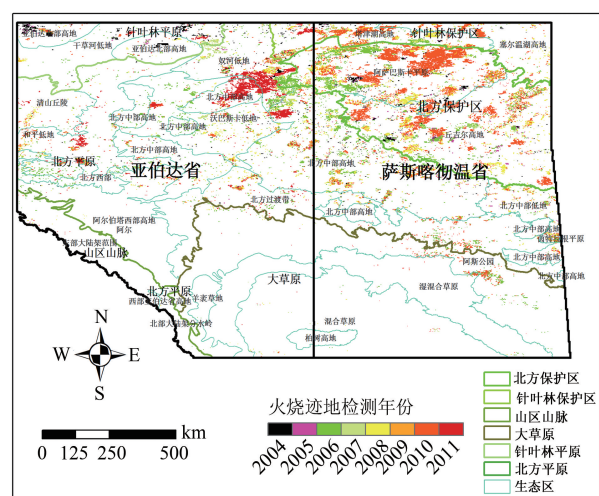


图5 2004-2011年森林火烧迹地叠加图

Fig.5 Overlay map of forest burned area during 2004-2011

4 结语

采用地表温度和增强型植被指数数据相结合的方法,通过与MCD45A1标准火烧迹地产品的对比发现,扰动指数检测结果在空间位置和分布上与MODIS标准产品类似,但扰动指数算法结果与加拿大林业局数据误差仅为8.03%,而MODIS产品与官方数据的年均森林燃烧面积误差达70.53%。相对于MODIS标准产品,扰动指数算法结果明显与林业局结果更相近。

在萨省和亚伯达省2004–2011年的森林火烧迹地检测结果中,火灾减少的森林面积分别占本省森林总面积的11.00%(46.83万 hm^2)和1.63%(29.53万 hm^2),萨省燃烧的森林面积几乎是亚伯达省的1.6倍。其中,2006、2008、2010和2011年为研究区主要的森林火灾年份,每年平均减少的森林面积达119.83万 hm^2 。除2011年以外,萨省为研究区中火烧迹地发生的主要省份。森林火烧迹地发生的位置主要集中在生态交错带的北方保护区、针叶林保护区、针叶林平原地区,以及北方平原东北部的伍德布法罗国家森林保护区。

扰动指数算法所用的数据是空间分辨率为1000m的MODIS数据,因而一些小面积的相对比较弱的火烧迹地无法检测,对于面积大于10 km^2 的火灾能够很好地进行检测^[18]。研究中没有考虑植被恢复的影响,在以后的研究中可以通过设定DI差值的方法提取森林恢复的区域。另外由于MCD12Q1地表分类产品本身存在的不确定性,故对其结果会造成一定误差。扰动指数算法选用年最大地表温度像元,以及年最大EVI结果进行计算,降低了对绝对连续晴空的要求。

参考文献:

- [1] Goldammer J G, Stocks B J. Eurasian perspective of fire: Dimension, management, policies, and scientific requirements[J]. *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest*, 2000(138):49-65.
- [2] Fraser R H, Li Z. Estimating fire-related parameters in boreal forest using SPOT VEGETATION[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,82(1):95-110.
- [3] 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.
- [4] Natural Resources Canada. <http://cfs.nrcan.gc.ca/pages/153#cn-tphp>.
- [5] Stocks B J, Mason J A, Todd J B, *et al.* Large forest fires in Canada[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2002,108(D1):1959-1997.
- [6] National Forestry Database. http://nfdp.ccfm.org/fires/quick_facts_e.php.
- [7] Canadian Interagency Forest Fire Centre, Canada Reports. http://www.cifc.ca/index.php?option=com_content&task=view&id=40&Itemid=60.
- [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] Lambin E F, Strahler A H. Indicators of land-cover change for change-vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994(15):2099-2119.
- [11] Potter C, Kumar V, Klooster S, *et al.* Recent history of trends in vegetation greenness and large-scale ecosystem disturbances in Eurasia[J]. *Tellus*, 2007(59):260-272.
- [12] Potter C, Tan P N, Steinbach M, *et al.* Major disturbance events in terrestrial ecosystems detected using global satellite data sets[J]. *Global Change Biology*, 2003(9):1005-1021.
- [13] 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.
- [14] Borak J S, Lambin E F, Strahler A H. The use of temporal metrics for land cover change detection at coarse spatial scales[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000(21):1415-1432.
- [15] Lambin E F, Ehrlich D. The surface temperature - vegetation index space for land cover and land-cover change analysis[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996(17):463-487.
- [16] Rauster Y, Herland E, Frelander H, *et al.* Satellite-based forest fire detection for fire control in boreal forests[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997,18(12):2641-2656.
- [17] Kaufman Y J, Justice C O, Flynn L P, *et al.* Potential global fire monitoring from EOS-MODIS[J]. *Journal of Geo-*

- physical Research-Atmospheres, 1998,103(D24):32215-32238.
- [18] 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.
- [19] Roy D P, Boschetti L, Justice C O, *et al.* The collection 5 MODIS burned area product: Global evaluation by comparison with the MODIS active fire product[J]. Remote Sensing of Environment, 2008,112(9):3690-3707.
- [20] Friedl M A, Sulla-Menashe D, Tan B, *et al.* MODIS Collection 5 global land cover: Algorithm refinements and characterization of new datasets[J]. Remote sensing of Environment, 2010(114):168-182.
- [21] Huete A, Justice C, Leeuwen W V. MODIS vegetation index (MOD13) algorithm theoretical basis document, 1999. http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf.
- [22] Canadian National Fire Database (CNFDB). http://cwffis.cfs.nrcan.gc.ca/en_CA/nfdb/poly/2009fullwidth=0#cont.
- [23] Murphy P J, Mudd J P, Stocks B J, *et al.* Historical fire records in the North American boreal forest[J]. Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest, 2000(138):274-287.

Burned Area Detection in the Canadian Boreal Forest Using MODIS Imagery

YOU Hui^{1,2}, LIU Ronggao^{2*}, ZHU Shanyou¹ and LIU Yang²

(1. School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The boreal forest biome is one of the largest on earth, covering 17% of total land area. The major ecosystems within the boreal zone contain more than 30% of terrestrial carbon stores, thus representing a major component of the global carbon budget. Wildfires are a main disturbance factor in the Canadian boreal forests, which play an important role in boreal ecosystems. In this paper, we mapped the forest burned area in Saskatchewan and Alberta of Canada during 2004-2011, using two data sets of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Land Surface Temperature (LST) and Enhanced Vegetation Index (EVI) imagery at 1 km resolution. The MODIS global disturbance index algorithm (MGDI) was used to detect the forest burned area. It is based on the consistent radiometric relationship between annual maximum LST and the maximum EVI value that occurs after the LST during the same year at every pixel. The performance of the algorithm was evaluated by comparing the results with the MODIS MCD45A1 products and the inventory data from Forestry Bureau of Canada. The results show that the majority of fire events is captured by the MGDI techniques, and the burned area estimated by the fires pixels is better in good agreement with the inventory data than MODIS products. Compared with the Canadian Forestry Bureau data, the average relative error of our algorithm results is only 8.03%, while the MODIS product results is up to 70.53%. The results estimated that the average burned forest area is about 763 600 ha annually, which is about 3.36% of the total forest in this region. A mean annual burned forest is 468 300 ha for Saskatchewan and 295 300ha for Alberta respectively. The Canadian boreal forest fires show a significant interannual variation and severity, the burned scar mainly appeared in the years of 2006, 2008 and 2010-2011. Forest burned area mainly concentrated in the ecotone of the Boreal Shield, Taiga Shield, Taiga plains and the Wood Buffalo National Park located at the northeast of Boreal Plains.

Key words: boreal forest; forest burned area; MODIS; disturbance index

*Corresponding author: LIU Ronggao, E-mail: liurg@igsnr.ac.cn