

文章编号: 1007-4619(2007)03-0340-10

利用 MODIS 识别草原火灾迹地方法的研究

谭明艳^{1,2}, 陈仲新³, 曹 鑫¹, 陈 晋¹, 杨 伟¹, 辜智慧⁴

(1. 北京师范大学 资源学院, 教育部环境演变与自然灾害重点实验室, 北京 100875; 2. 深圳气象局, 广东 深圳 518001;
3. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 4. 深圳大学 建筑与土木工程学院, 广东 深圳 518060)

摘 要: 中国是草原火灾频繁国家, 草原火灾对牧场和牲畜生产造成了严重的破坏。MODIS 每天可以获得 36 个通道的卫星数据, 为草原火灾迹地研究提供了新的数据源。通过实验研究, 根据火灾迹地在 MODIS 短波红外波段的光谱特征, 提出了 GEMIB 指数以突出火灾迹地的特征, 并进一步提出了基于 GEMIB 指数且适用于火灾迹地面积提取的时间序列数据合成方法。同时发展了一种自动提取草原区域火灾迹地的方法, 利用火点作为初始种子点, 采用种子点扩散算法在时间序列合成数据的 GEMIB 指数图像上实现火灾迹地自动提取。

关键词: 火灾迹地; MODIS; GEMIB; 时间序列数据合成; 自动识别

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

Burn Scar Mapping in Steppe Using MODIS Data

TAN Ming-yan^{1,2}, CHEN Zhong-xin³, CAO Xin¹, CHEN Jin¹, YANG Wei¹, GU Zhi-hui⁴

(1. Key Laboratory of Environment Change and Natural Disaster Ministry of Education of China College of Resource Science and Technology Beijing Normal University Beijing 100875, China;

2. Shenzhen Meteorological Bureau Guangdong Shenzhen 518001, China;

3. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning Chinese Academy of Agricultural Sciences Beijing 100081, China;

4. The College of Architecture and Civil Engineering Shenzhen University Guangdong Shenzhen 518060, China)

Abstract: Wildfires release large amount of green house gas smoke and aerosols which strongly impact on global climate. In China, wildfire in steppe area caused greatly economic loss. Remote sensing is a powerful tool to monitor fire and estimate burn scar area. Based on GEM I (Global Environment Monitoring Index) and spectral characteristics of burn scar in short wave region, a new index GEMIB (Global Environment Monitoring Index-Burn scar) is proposed to extract burn scar in steppe area. In order to avoid the daily disturbance of cloud aerosol sensor zenith and sunglint, new multi-temporal composite methods based on maximal GEMIB are proposed in the study to composite time series MODIS data. Based on active fire (hotspot) map, an automated extraction procedure has also been developed. A case study is carried out for the wildfire occurred in May 2003 on the border area between China and Mongolia. It is suggested by the results that the GEMIB index compositing algorithm and automated extraction method have potential to be applied on burn scar mapping in the semi-arid or arid areas.

Key words: burn scar; MODIS; GEMIB; time series data composite; automated extraction

1 引 言

自然火灾 (Wildfire) 是生态系统演替过程的自

然现象, 但也对区域生态系统和全球气候系统造成了严重影响, 表现为: (1) 植物燃烧向大气中排放大量的温室气体 (CO₂, CO, CH₄, NO_x) 并形成气溶胶, 不仅改变大气化学成分, 而且可能直接影响辐射平

收稿日期: 2005-09-23; 修订日期: 2006-10-31

基金项目: 科技部《科技基础条件平台建设专项》MODIS 数据产品开发与共享服务项目 (编号: 2004DKA10060) 版权所有。http://www.cnki.net

作者简介: 谭明艳 (1981—), 女, 2006 年获北京师范大学地图学与地理信息系统理学硕士学位, 现从事大气遥感研究, 已发表论文 3 篇。

E-mail: chenjin@ires.cn

衡和全球气候系统^[1]; (2)破坏区域生态系统的生产功能,导致动物栖息地和生物多样性的减少^[2]; (3)改变了植被演替方式^[3]和生物营养循环^[4]。鉴于火灾迹地在生态系统管理以及全球变化研究中的重要作用,有必要在全球或区域尺度上对火情和火灾迹地面积进行监测,以便及时控制火灾灾情和准确估计火灾对生态环境的影响。目前大多数有关火灾的遥感监测研究都在森林区域开展,而对于草原火灾的研究则相对滞后。

基于遥感的火灾监测方法可以分为火点(Hotspot)探测和火灾后迹地(Burn scar)识别两类。火点探测通常基于火的热学性质,使用中红外波段(3.55—3.93 μm)对火点进行实时监测^[5-9]。另一方面,火灾后迹地识别主要是通过判断植被在火灾前后的光谱变化来估算燃烧面积。目前应用较广泛的方法有火灾前后 NDVI 差值法^[8]、NDVI 回归分析方法^[10]、HANDS 方法^[11]等,这些方法都使用 NOAA-AVHRR NDVI 最大值合成数据,结合火点监测结果和植被覆盖图,在去除了植被时相上的 NDVI 差异之后,利用局部自动阈值的方法来判断火灾迹地像元。

使用时间序列合成数据提取火灾迹地,可以有效减少单日数据中云、气溶胶、偏离星下点的观测、随机噪声等干扰因素的影响,同时具有数据处理量小、简单方便的特点^[12-13]。最常用的合成方法是 NDVI 最大值合成法(Maximum Value Composite MVC)及其产品^[14],MVC NDVI 数据可以降低云污染、阴影、气溶胶及水汽的影响,保留并强化植被的光谱特征,在监测全球植被覆盖动态中应用非常广泛^[15]。但是,使用 NDVI 最大值合成法来提取火灾迹地存在较大的缺陷^[16-17],首先,如果火灾发生于合成时段内,那么 NDVI 最大值合成法通常会选择火灾发生前的 NDVI 值(因为火灾前的 NDVI 较大),在该时段合成结果中,该像元将被认为没有发生火灾;其次,在合成时段内,如果出现植被的自然恢复,造成 NDVI 上升,将会低估火灾迹地面积。为了解决 NDVI 最大值合成法的缺陷,一些研究提出了针对火灾迹地的时间序列数据合成的方法,如 NIR/Albedo 最小值合成法(Minimum Value Composite)^[18]、地表温度/亮度温度最大值合成法(Maximum Surface/Brightness Temperature Composite)^[16],以及温度最大值、反射率最小值和传感器天顶角最小值混合的合成方法(包括 NIR 波段反射率前三个小值中温度最大值合成法、温度前三个大值中 NIR 最小值合成法、温度前三个大值中传感器最小天顶角合成法

等^[17])。在上述各种合成方法比较研究中,NIR/Albedo 最小值合成法和最大温度值合成法被认为是较有效的合成方法^[16-17]。然而,在以上合成方法中,NIR/Albedo 最小值合成法有可能会选择云的阴影,表面温度/亮度温度最大值合成法有可能受到日映(Sunglint)、温度较高的裸地等因素的干扰,从而影响到合成图像的质量和火灾迹地的识别。

以上时间序列数据合成方法所使用到的指标,如 NDVI 最大值、NIR 最小值、地表温度最大值等,尽管能在一定程度上突出火灾迹地,但都不是火灾迹地所独有的性质,因此在合成图像上不能完全保留火灾迹地。此外,由于 MODIS 具备中空间分辨率(250—1000m)、较广的光谱覆盖范围(0.62—14.385 μm ,共 36 个波段)以及强大的动态监测能力(每天两次覆盖全球),因此在识别火灾迹地方面与 NOAA 相比具有很大的优势。

鉴于上述研究意义和存在的问题,本文在分析草原区域火灾迹地的光谱特征之后,构建了一个反映火灾迹地特征的指数 GEMIB;基于该指数提出了 5 种基于 GEMIB 最大值的合成方法;最后,为了快速准确地识别火灾迹地,发展了一套基于火点和区域增长的火灾迹地自动识别方法。以 2003 年 5 月中蒙草原火灾为实例,利用 MODIS 时间序列数据,分别验证了新指数 GEMIB、时间序列数据合成方法及火灾迹地自动识别算法。

2 研究区域和数据

本文的研究区域位于中国和蒙古境内的草原区(图 1),属大陆性温带草原气候,年平均温度—2—2 $^{\circ}\text{C}$,年降水量约 300mm。由于枯草丰厚,春秋季节干旱少雨,风力强劲加上地势平坦,该区域历来为草原火灾频发的区域,给畜牧业造成了巨大损失^[19]。2003 年 5 月 21 日该区域发生了较大的草原火灾,火灾首先从蒙古境内开始并蔓延到中国境内,5 月 23 日中国境内的明火被完全扑灭,但蒙古境内火灾一直延续到 5 月 31 日。

本研究使用的数据是搭载于 Terra 卫星上的 MODIS 数据。使用了 MODIS 的 1—7 波段(空间分辨率为 500m),以及第 20、21、31 波段(空间分辨率 1km)数据。MODIS 数据的时间跨度为 2003 年 5 月 20 日至 5 月 31 日(图 2)。原始 Level 1B MODIS 数据经过几何纠正和辐射纠正之后,生成了表观反射率数据(波段 1—7)和亮度温度(Brightness

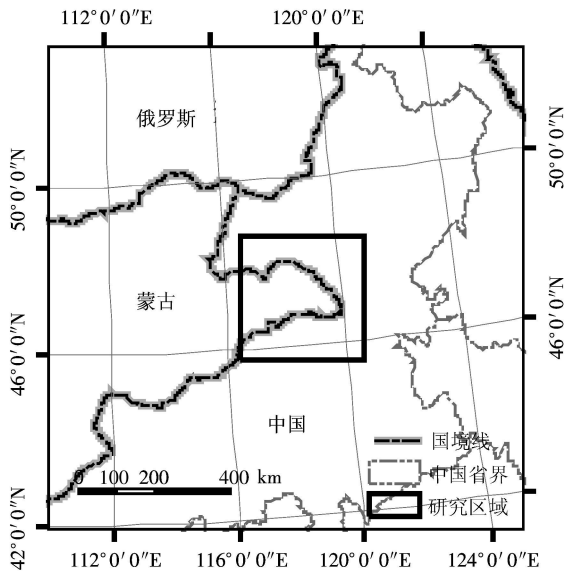


图 1 研究区域(中蒙边境)

Fig 1 Study area on the border of China and Mongolia

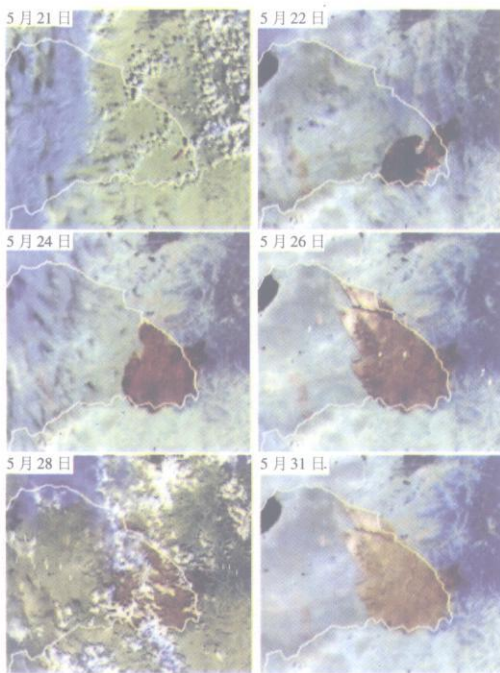


图 2 MODIS草原火灾及火灾迹地面积扩张图 (波段 7, 6, 5作为 RGB)

Fig 2 MODIS data of steppe fire and burn scar expansion (Band 7, 6, 5 as RGB), 21- 31 May, 2003

temperature)数据(波段 21, 22, 31)。研究中使用到的 MODIS波段的属性见表 1。

3 研究方法

3.1 火灾迹地的光谱特征及指数

由于未能及时测量 2003年 5月发生在中蒙边

表 1 MODIS波段的属性

Table 1 Properties of used MODIS bands

波段	波长 1	空间分辨率 /m	信噪比	主要用途
1	620- 670	250 ²	128	陆地 云边界
2	841- 876	250 ²	201	
3	459- 479	500	243	陆地 云性质
4	545- 565	500	228	
5	1230- 1250	500	74	
6	1628- 1652	500	275	
7	2105- 2155	500	110	
21	3. 929- 3. 989	1000 ²	2. 00 ³	地表 云温度
22	3. 929- 3. 989	1000 ²	0. 07 ³	
31	10. 78- 11. 28	1000 ²	0. 05 ³	

- 1. 波段 1- 7, nm; 波段 21, 22, 31, μm ;
- 2. 研究中使用到的数据采样到 500m;
- 3. NE Δ T; Noise-equivalent temperature difference.

境的草原火灾迹地的光谱, 本文根据植被类型图, 在不同日期的 MODIS图像上分别选择了代表不同地表覆盖类型的若干像元, 包括火灾迹地、未燃烧的森林和草地、水体、云、薄云覆盖的迹地等 6 大类, 然后计算了各类地表覆盖的平均表现反射率(图 3)。由图 3 可以看出: (1)迹地和水体反射率较低且曲线平缓, 在近红外到短波红外范围, 迹地的反射率高于水体; (2)在整个光谱区间, 植被和云的反射率都高于迹地, 并且变化较大; (3)在可见光范围内, 迹地与未燃烧的森林、草地具有十分相似的光谱特征, 很难进行区分, 与之相对照, 近红外和短波红外范围上(波段 2和波段 5), 各类地物的反射特征区别最大;

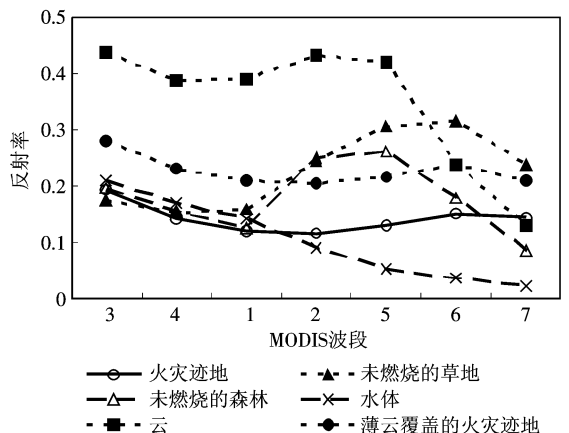


图 3 不同地表覆盖类型在 MODIS 波段 1- 7 的平均反射率
Fig 3 Mean reflectance on MODIS band 1- 7

for different land cover types

植被的燃烧过程表现为在可见光到短波红外范围上反射率的降低,尤其以波段 2 和波段 5 的降低最为显著;(4)薄云覆盖的火灾迹地具有与迹地相似的光谱特征,但受高反射率云的影响,具有相对较高的反射率;(5)各类地物的反射率在波段 7 存在收敛的趋势。上述根据表观反射率得到的火灾迹地与其他地物的光谱特征差异,基本符合 NASA 于 1995 年在巴西利用机载 AVIRIS 的光谱测量结果^[20]。

根据火灾迹地的光谱特征,许多研究提出了反映火灾迹地特征的指数和识别火灾迹地的方法。较为常用的指数有:NDVI BAI(Burn Area Index)^[21], NDII(Normalized Difference Infrared Index)^[21] [相似的指数如 SWVI(Short Wave Vegetation Index)^[22]和 NDWI(Normalized Difference Water Index)^[23]], NBR(Normalized Burn Ratio)^[24], V β T^[25], GEMI(Global Environment Monitoring Index)^[26, 27]等。这些指数的定义可见本文附录。上述指数一般都利用植被燃烧后生物量和水分损失所导致的相应波段反射率降低的特征,因此对火灾迹地有较好的识别能力,森林区域的实验研究也取得了较为满意的结果。但应该看到上述指数一般使用波长较短的波段,受燃烧产生的烟尘、气溶胶和薄云的影响较为严重;同时,由于草原区域植被覆盖率较低,土壤背景值影响更为显著,再加上植被的水分含量较低,因此,在草原区域利用上述指数能否区分迹地还有待进一步验证。

Li 等人利用机载 AVIRIS 测量的森林区域燃烧前后 400—2500nm 的表观反射率光谱曲线,发现利用 MODIS 的 1.24 μ m (波段 5)和 2.13 μ m 波段 (波段 7)可以较好地区分出燃烧和未燃烧的像元^[28]。考虑到上述两波段波长较长,受到烟尘、气溶胶和薄云的影响相对较弱,本文也选用这两个波段构建火灾迹地指数。

研究表明,GEMI 指数能有效减少土壤背景干扰,增强指数对植被的敏感性^[26],GEMI 指数非常适于检测稀疏植被区域在火灾前后的变化^[27]。经过修正的 GEMI 指数 (GEMI β)将 GEMI 中的红光波段替换为 NOAA /AVHRR 的第 3 波段来提取火灾迹地也取得了令人满意的结果^[25]。因此,基于 GEMI 指数,并根据 MODIS 第 5 波段上各类地物的反射特征区别最大的特点,本文提出了反映火灾迹地光谱特征的指数 GEMIB (Global Environment Monitoring Index-Burn scar)。GEMIB 将 GEMI 中的红光 (RED) 波段和近红外 (NIR) 波段分别替换为 MODIS 的第 5 波段和第 7 波段,即:

$$GEMIB = \eta(1 - 0.25\eta) \frac{\rho_5 - 0.125}{1 - \rho_5} \quad (1)$$

其中

$$\eta = \frac{2(\rho_7^2 - \rho_5^2) + 1.5\rho_7 + 0.5\rho_5}{\rho_7 + \rho_5 + 0.5} \quad (2)$$

式中, ρ_5 和 ρ_7 分别为 MODIS 第 5 和第 7 波段的反射率。由上述 GEMIB 指数定义,计算图 2 所示地表覆盖类型的 GEMIB 指数,火灾迹地的 GEMIB 指数值为 0.34,薄云覆盖的迹地的 GEMIB 指数值为 0.27,而未燃烧的森林和草地的 GEMIB 指数值分别为 0.09 和 -0.05,水体和云的 GEMIB 指数值分别为 0.17 和 -0.51。相对于火灾迹地,其他地物的 GEMIB 指数值较小,故可以有效地分离火灾迹地和其他地物。同时,GEMIB 指数还具有抗大气和土壤背景值干扰的优点。

3.2 时间序列数据合成方法

由于 GEMIB 指数能够很好地区分火灾迹地与植被、云和水体,因此将 GEMIB 最大值作为一种新的合成规则。同时结合 NIR 最小值和温度最大值,建立了 4 种混合合成方法。为了评价和比较基于 GEMIB 指数的合成方法,还使用了其他 3 种合成方法。以下是 8 种合成方法的介绍。

方法 1: GEMIB 最大值合成法

GEMIB 指数能够强化火灾迹地的光谱特征,区分火灾迹地与植被、云、水体等,因此采用 GEMIB 最大值合成法可以有效地保留火灾迹地的特征,避免由于迹地植被的恢复造成的迹地信息减弱。

方法 2: NIR 最小值合成法

由于植被燃烧后在 NIR 波段的反射率会急剧下降,因此使用 NIR 最小值合成法可以保留火灾迹地的信息^[16]。NIR 最小值合成法可以减少云污染的影响^[12],但同时也有可能选择了云的阴影^[13]。Albedo 最小值合成法原理基本上与 NIR 最小值合成法类似,其合成结果也相似,故本文不另做比较。

方法 3: 温度最大值合成法

由于植被燃烧后地表裸露,植被蒸散降低将导致地表温度升高^[29],同时燃烧后地表残留的碳也增强了地表能量吸收功能,因此表面温度/亮度温度最大值合成法可以保留火灾迹地的信息^[16]。这里采用的是 11 μ m 处 31 波段的亮度温度 (T_b) 最大值合成法。

方法 4: NDVI 最大值合成法 (MVC NDVI)

NDVI 最大值合成法的目的是为了保持植被的

最佳信息,因此并不适于火灾迹地的合成。考虑到 NDVI 最大值合成法是当前最普遍使用的合成方法,NOAA /AHVRR、SPOT /VGT、MODIS 等都有 MVC NDVI 的合成数据产品,许多提取火灾迹地的研究(如 HANDS^[11])也采用 MVC NDVI 的数据。因此,这里使用 MVC NDVI 方法作为一种评价的参考。

方法 5: GEM-IB 前三大值中 NIR 最小值合成法

该方法结合了 GEM-IB 最大值和 NIR 最小值合成法,是一种混合的合成方法。其过程为首先选择 GEM-IB 的前三大值,保证迹地的光谱特征并去除部分云及云的阴影,然后选择 NIR 最小值,再次减少云的影响。

方法 6: NIR 前三小值中 GEM-IB 最大值合成法

该方法与方法 5 相对应。

方法 7: GEM-IB 前三大值中温度最大值合成法

该方法结合 GEM-IB 最大值和温度最大值合成法优点。温度最大值可以去除云、云的阴影,但有可能保留日映或温度较高的裸地。结合 GEM-IB 最大值则可以消除这些影响。

方法 8: 温度前三大值中 GEM-IB 最大值合成法

该方法与方法 7 相对应。

3.3 火灾迹地自动识别

3.3.1 MODIS 火点探测

本文使用 MODIS 火灾产品 (MODIS fire product) 提供的火点探测方法进行火点提取^[30]。该算法综合了多波段固定阈值和背景阈值两种算法的优点,使用 MODIS 在 $4\mu\text{m}$ 和 $11\mu\text{m}$ 附近的亮度温度,分别以 T_4 和 T_{11} 表示。 T_4 由波段 21 和波段 22 计算,其中波段 21 的饱和值为 500K,波段 22 的饱和值为 331K。由于波段 22 噪声较小(见表 1),因此尽量使用波段 22 来计算 T_4 ,如果 $T_4 > 331$ 则改用波段 21。 T_{11} 由波段 31 计算,其饱和值为 400K。对于白天的 MODIS 数据,火点像元必须至少满足以下条件之一:

- (1) $T_4 > 360\text{K}$ 或
- (2) $\{T_4 > \text{mean}(T_4) + 3\text{SD}(T_4) \text{ 或 } T_4 > 330\text{K}\}$ 和 $\{T_4 - T_{11} > \text{median}(T_4 - T_{11}) + 3\text{SD}(T_4 - T_{11}) \text{ 或 } T_4 - T_{11} > 25\text{K}\}$

式中, mean 、 median 和 SD 分别代表背景窗口的均值、中值和标准差(背景阈值)。背景窗口使用 21×21 的窗口。根据以上算法首先判断出各日的火点像元,然后将这些火点像元累加起来生成火点合成

图像。该图像将作为迹地种子点用于后续计算。

3.3.2 自动识别火灾迹地流程

本文发展了一套基于火点和 GEM-IB 指数的火灾迹地自动识别方法,其基本假设是:火点周围区域是最有可能形成迹地的区域,这些区域上 GEM-IB 指数的统计特征代表迹地的基本特征。根据草原火灾的扩散规律,该假设基本合理。该假设的成立不仅为获得火灾迹地的统计特征提供了途径,而且由于使用火点周围像元动态获得火灾迹地的统计特征,火灾迹地统计特征的提取完全依赖于图像本身,不需要人为设定阈值。

基于上述假设所实现的火灾迹地自动识别程序流程如图 4 所示。其设计思想基于常用的种子点扩散算法。具体而言,首先根据火点分布,提取火点周围一定窗口内 GEM-IB 高值像元,计算这些像元 GEM-IB 指数的均值和标准差作为火灾迹地的统计特征值;然后,以这些像元为种子点沿 8 个方向逐步向外扩散,并计算各扩散像元周围一定窗口内 GEM-IB 指数的均值和标准差,计算所得到的均值和标准差与火灾迹地的统计特征值进行比较。如果其均值和标准差与火灾迹地的统计特征值相接近,该扩散像元判断为火灾迹地并作为种子点继续向外扩散;如果其均值和标准差与火灾迹地的统计特征值相比变化较大,该扩散像元判断为非迹地并停止向外扩散。上述过程通过程序循环控制实现。

4 结果分析

4.1 火灾迹地指数的评价

采用区分度 (Discriminability) 指标,对包括 GEM-IB 指数在内的上述各指数进行评价。这里采用常用的归一化距离 (Normalized distance) 作为区分度指标,评价以上指数在火灾迹地识别中的优劣^[21,31]。首先从各指数图像中目视选取火灾迹地与非迹地区域,分别计算其均值和标准差,然后根据下式计算归一化距离:

$$D = \frac{|\bar{X}_b - \bar{X}_n|}{\sqrt{(\text{SD}_b)^2 + (\text{SD}_n)^2}} \quad (4)$$

式中, \bar{X}_b 和 \bar{X}_n 分别为迹地与非迹地区域的平均值, SD_b 和 SD_n 分别为迹地与非迹地区域的标准差。归一化距离越大,表明迹地与非迹地的区别越明显,指数设计越好。

从 2003 年 5 月 20 日至 5 月 31 日的 MODIS 数据中选取了质量较好的 5 月 22 日, 24 日, 26 日, 30

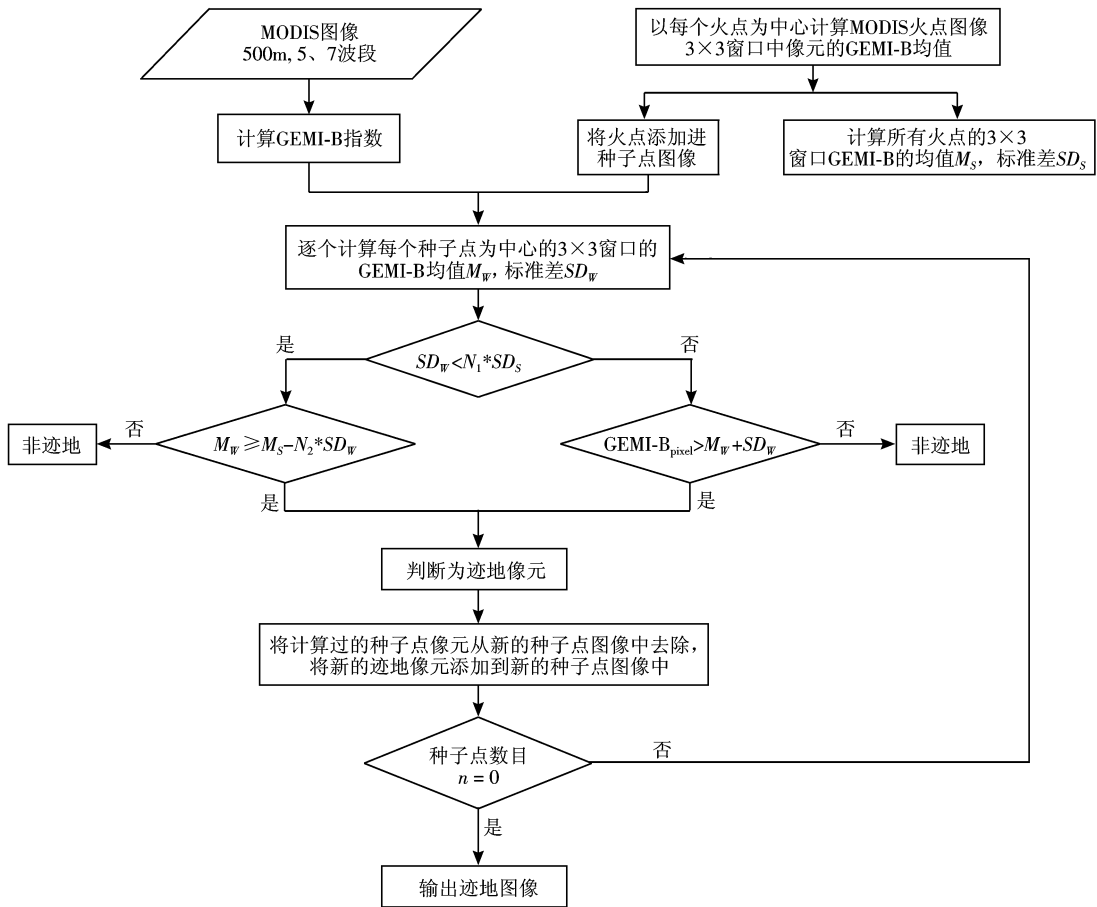


图 4 基于火点和 GEMI-B 指数的火灾迹地自动识别流程图

Fig 4 Flow chart of burn scar detection based on hotspots and GEMI-B index

日和 31 日共 5 幅图像, 分别计算了 BAI NDII VβT GEMI GEMI-B 及 NDVI 指数, 然后根据所选取火灾迹地与非迹地区域计算归一化距离。所得到的区分度(归一化距离)见表 2。从归一化距离来看, GEMI-B 的每日图像的区分度都较高, 具有最好的区分度, 其次为 VβT GEMI NDII 和 NDVI 而 BAI 的区分度最低。高区分度说明 GEMI-B 指数与其他指数相比更适合在草原地区提取火灾迹地。

表 2 各种指数图像的区分度(归一化距离)

Table 2 Discriminability (normalized distance) of each index

	BAI	NDII	VβT	NDVI	GEMI	GEMI-B
2003-05-22	0.142	0.745	1.644	1.598	2.121	1.845
2003-05-24	0.160	1.951	2.646	1.369	2.901	2.639
2003-05-26	0.035	1.718	2.210	1.296	1.757	2.522
2003-05-30	0.534	1.633	1.718	1.127	1.007	1.751
2003-05-31	0.800	0.950	2.057	1.263	1.340	3.009
平均值	0.334	1.399	2.055	1.330	1.825	2.353

4.2 合成结果及合成方法评价

使用 2003 年 5 月 20 日至 5 月 31 日的 MODIS 时间序列数据, 利用上述 8 种合成方法, 得到了 8 幅合成的 MODIS 1-7 波段数据(图 5, 其中棕色区域为火灾迹地区域)。目视检查这 8 幅合成图像, 可以发现: NDVI 最大值法(方法 4)合成的图像几乎没有迹地像元, 其他 7 幅合成图像中都有面积大致相当的迹地区域, 但温度最大值合成法(方法 3)合成图像中有较大的火灾迹地区域丢失。

合成数据的评价采用 Chuvieco 等提供的以下指标^[17]:

(1) 区分度(Discriminability)

合成图像首先是为了保持火灾迹地的特征, 以利于区分火灾迹地与非迹地。区分度指标由式(4)所示的归一化距离来代表。

(2) 干扰的比例

合成图像中应该尽量去除尘、云的阴影、数据丢

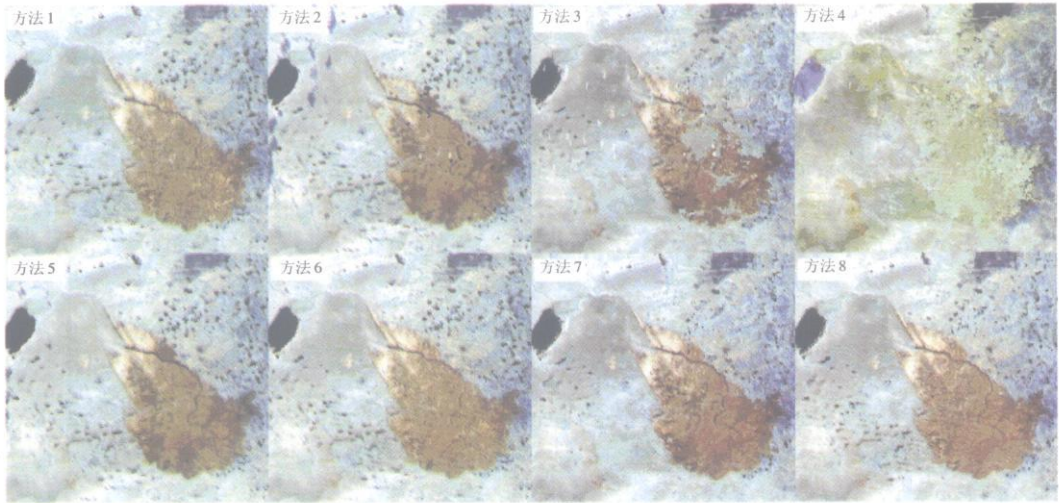


图 5 各种合成方法得到的 2003 年 5 月下旬合成图像 (波段 7, 6, 5 作为 RGB)

Fig 5 Composite images by each composite method (Band 7, 6, 5 as RGB), 20-31 May, 2003

失等干扰因素,因此采用该指标来表示合成图像的质量。这里统计了合成图像中云和云的阴影占图像总面积的比例。

(3) 空间一致性 (Spatial Coherency)

由于合成的过程是逐个像元进行选择的,相邻像元可能选择不同时间来进行合成,因此合成图像在空间上可能会形成斑块。好的合成图像在空间上应该具有较好的连续性和一致性,尽量减少斑块效应。使用纹理 (Texture) 分析的方法可以量化空间一致性指标,这里使用了 3×3 窗口计算出的 Homogeneity 纹理特征来代表空间一致性。分别计算了每种合成图像中所有波段的 Homogeneity 纹理特征,然后取平均值来代表该合成图像的空间一致性。

(4) 传感器天顶角 (Sensor Zenith)

由于 MODIS 的轨道高度为 703km,而扫描宽度为 2330km,最大观测天顶角可达到近 60° 。观测角度越小,越靠近星下点 (Nadir) 的像元所受大气干扰越小,几何精度越高。因此好的合成方法应该尽可能地选择靠近星下点的时期像元。MODIS Level 1B 数据中带有传感器天顶角数据,单位为度,空间分辨率为 1km,经过几何纠正、重采样到 500m 之后,与 MODIS 1-7 波段同时进行合成,最后再统计合成图像中传感器天顶角的平均值。

(5) 综合指数

将以上指标标准化到 $[0, 1]$ 区间,分别给予权重,按照下式计算出综合指数 $F^{[17]}$:

$$F = 2nD - 0.5nC + nT - nA \quad (5)$$

式中, D 为区分度, C 为云和云的阴影的覆盖度, T 为平均纹理, A 为平均传感器天顶角, n 表示标准化参数。由于区分度直接关系到合成图像识别火灾迹地的能力和准确性,因此给定其权重值为 2。

表 3-表 5 为 8 种方法得到的合成图像中以上指标的统计值。

从以上对各种方法得到的合成图像的统计结果可以看出,对于区分度指标, GEM1B 前三大值中 NIR 最小值合成法 (方法 5) 的效果最好,其次为 NIR 前三小值中 GEM1B 最大值合成法 (方法 6) 和 GEM1B 最大值合成法 (方法 1),表明 GEM1B 最大值法能有效地提高合成数据识别火灾迹地的能力。对于纹理特征,温度最大值合成法 (方法 3) 得到的图像最平滑。对于干扰数据的比例, GEM1B 前三大值中温度最大值合成法 (方法 7) 的云和云的阴影的比例最小。仔细观察图 5,可以发现在 GEM1B 最大值合成图像上 (方法 1, 方法 5-8), 火灾迹地斑块中没有出现云和云的阴影。对于传感器天顶角,温度最大值合成法 (方法 3) 的天顶角最小。综合地来看,混合合成方法中的 GEM1B 前三大值中 NIR 最小值合成法 (方法 5) 的合成效果最佳。

4.3 火灾迹地自动识别结果分析

根据合成方法的评价结果,选择 GEM1B 前三大值中 NIR 最小值合成法的结果图像,利用自动识别方法提取合成图像上的火灾迹地 (图 6)。表 6 为使用合成方法 5 的图像所识别迹地的误差矩阵 (地面参考为 Landsat TM 数据),使用方法 5 合成图像

表 3 各种合成图像的区分度

Table 3 Discriminability between burn scar and steppe land derived from each composite image

波段	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5	方法 6	方法 7	方法 8
1	0.314	0.689	0.012	0.538	0.730	0.406	0.064	0.001
2	1.628	2.573	0.413	0.819	2.555	2.146	1.341	1.157
3	0.269	0.094	0.045	0.159	0.327	0.425	0.283	0.319
4	0.113	0.030	0.004	0.154	0.454	0.119	0.054	0.084
5	1.536	0.489	0.253	0.231	2.161	1.762	1.590	1.844
6	0.849	0.340	0.148	0.184	1.167	0.910	0.871	1.036
7	0.060	0.019	0.028	0.186	0.145	0.064	0.063	0.025
均值	0.681	0.605	0.129	0.325	1.077	0.833	0.609	0.638

表 4 各种合成图像的空间一致性纹理特征

Table 4 Mean texture (homogeneity) index derived from each composite image

波段	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5	方法 6	方法 7	方法 8
1	0.491	0.490	0.915	0.713	0.476	0.430	0.894	0.840
2	0.492	0.490	0.845	0.626	0.472	0.452	0.831	0.782
3	0.505	0.856	0.894	0.875	0.842	0.795	0.858	0.784
4	0.498	0.878	0.892	0.896	0.865	0.817	0.863	0.803
5	0.387	0.813	0.815	0.816	0.807	0.776	0.809	0.782
6	0.438	0.781	0.806	0.809	0.779	0.772	0.797	0.776
7	0.522	0.737	0.758	0.771	0.735	0.730	0.751	0.729
均值	0.476	0.721	0.847	0.787	0.711	0.682	0.829	0.785

表 5 各种合成图像的干扰面积比例、传感器天顶角和综合指标

Table 5 Disturbance-effected area ratio, sensor zenith and the comprehensive index derived from each composite image

指标	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4	方法 5	方法 6	方法 7	方法 8
干扰的比例 /%	1.293	2.159	0.634	0.455	0.853	0.970	0.416	0.542
传感器天顶角	27.054	16.340	13.286	17.667	15.747	15.744	13.182	13.718
综合指数	-0.087	0.970	0.981	0.960	2.356	1.725	2.013	1.874

表 6 使用合成方法 5 的合成图像识别迹地的误差矩阵

Table 6 Error matrix of burn scar detection using composite image from composite method 5

	被评价的图像			
	火烧迹地	非火烧迹地	总和	
参考图像	火烧迹地	32308	1197	33505
	非火烧迹地	861	48756	49617
总和	33169	49953	83122	

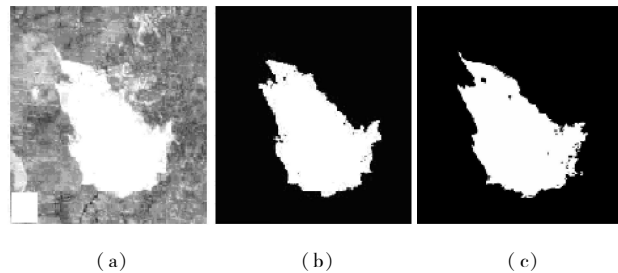


图 6 基于合成图像的火灾迹地的自动识别结果

(a) 方法 5 合成图像的 GEM-1B 图像; (b) 方法 5 合成图像的火灾迹地自动识别的结果图像; (c) 根据 2003 年 6 月 2 日 TM 图像提取的火灾迹地 (图像重采样到 500m)

Fig 6 The result of burn scar detection using composite image

(a) GEM-1B image calculated from the composite image using composite method 5; (b) Burn scar detection result from composite image by automated burn scar detecting method

(c) burn scars detected from Landsat TM data (resampled to 500 m)

迹地自动识别的总体精度达到 97%, Kappa 系数为 0.948 表明本文提出的合成方法能有效减小单日数据中云、云的阴影、气溶胶、偏离星下点的观测、随机噪声等干扰因素的影响,保留迹地的特征,提高迹地提取精度。

- 264—280.
- [14] Holben B N. Characteristics of Maximum-value Composite Images from Temporal AVHRR Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **7**: 1417—1434.
- [15] Potter C S, Brooks V. Global Analysis of Empirical Relations between Annual Climate and Seasonality of NDVI [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **19**(15): 2921—2948.
- [16] Barbosa P M, Pereira J M C, Gregoire J M. Compositing Criteria for Burned Area Assessment Using Multispectral Low Resolution Satellite Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **65**: 38—49.
- [17] Chuvieco E, Ventura G, Martin M B, et al. Assessment of Multitemporal Compositing Techniques of MODIS and AVHRR Images for Burned Land Mapping [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, **94**: 450—462.
- [18] Kaufman Y J. The Atmospheric Effect on Remote Sensing and its Correction [A]. Asrar G. *Theory and Applications of Optical Remote Sensing* [C]. Wiley, New York, 1989.
- [19] Liu G X, Su H, Li S L. The Summarization on the Fire Accident of Grassland in Inner Mongolia [J]. *Grassland of China*, 1999, **4**: 76—78. [刘桂香, 苏和, 李石磊. 内蒙古草原火灾概述 [J]. *中国草地*, 1999, **4**: 76—78.]
- [20] Kaufman Y J, Kleidman R, King M D. SCAR-B Fires in the Tropics: Properties and Remote Sensing from EOS-MODIS [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**: 893—902.
- [21] Garcia M, Chuvieco E. Assessment of Potential of SAC-C/MMRS Imagery for Mapping Burned Areas in Spain [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **92**: 414—423.
- [22] Fraser R H, Li Z, Landry R. SPOT Vegetation for Characterizing Boreal Forest Fires [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(18): 3525—3532.
- [23] Gao B C. NDWI: A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 257—266.
- [24] Key C H, Benson N C. The Normalized Burn Ratio: a Landsat TM Radiometric Index of Burn Severity Incorporating Multi-temporal Differencing (WEB). 1999. (<http://nrm.sr.usgs.gov/research/nbr.htm>).
- [25] 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 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **69**: 253—263.
- [26] Pinty B, Verstraete M M. GEMI: A Non-linear Index to Monitor Global Vegetation from Satellites [J]. *Vegetation*, 1992, **101**: 15—20.
- [27] Stroppiana D, Pincock S, Pereira J M C, et al. Radiometric Analysis of SPOT-Vegetation Images for Burn Area Detection in Northern Australia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**: 21—37.
- [28] Li R, Kaufman Y J, Hao W M, et al. A Technique for Detecting Burn Scar Using MODIS Data [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, **42**(6): 1300—1308.
- [29] Goward S N, Cruickshanks G D, Hope A S. Observed Relation between Thermal Emission and Reflected Spectral Radiance of a Complex Vegetated Landscape [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, **18**: 137—146.
- [30] Justice C O, Giglio L, Korontzi S, et al. The MODIS Fire Products [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 244—262.
- [31] Kaufman Y J, Remer L A. Detection of Forests Using Mid-IR Reflectance: An Application for Aerosol Studies [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, **32**(3): 672—683.