

基于 MODIS 影像的森林火灾火线检测方法

付迎春^{1,2}, 袁修孝², 宋 妍², 陈 蜜³, 郭泰圣¹

1. 华南师范大学 地理科学学院, 广东 广州 510631;

2. 武汉大学 遥感信息工程学院, 湖北 武汉 430079;

3. 首都师范大学 教育技术系, 北京 100037

摘 要: 结合归一化火灾差异指数 NDBR(normalized difference burn ratio)和 MODIS 多波段影像梯度边缘分析手段检测火线, 应用 B 样条函数拟合火线并确定火势蔓延方向。为对比验证, 基于火线的 Kriging 插值实现火灾外推预测, 与 30min 后的火灾参考数据目视对比与统计: 火线的预测变化与参考影像基本保持一致, 火灾外推影像的均值和熵约为参考影像的 86%和 81%, 火迹地检测的 Kappa 系数达 80.2%。试验表明, 提出的森林火线特征自动检测方法在动态火灾监测中是可行、有效的。

关键词: MODIS, NDBR, 多波段影像梯度, 火线检测, Kriging 插值

中图分类号: X43/TP79

文献标识码: A

1 引 言

森林火灾的识别对于全球变化和区域生态系统的发展具有重要意义, 应用红外影像检测目标的计算机视觉技术在环境和遥感等领域有广泛的应用前景。目前, 多种传感器具有宽广的红外波段, 如 ASTER、MODIS, 可用于火线特征的提取。其中, MODIS 因具有不同分辨率 (250, 500, 1000m) 的 3 个通道影像、较广的光谱范围(0.62—14.385 μm , 共 36 个波段)以及强大的动态监测能力(每天 2 次覆盖全球)等特点, 广泛用于各种尺度的森林火灾监测。

传统火灾监测的目标主要分为火点(hotspot)和火迹地(burn scar)两类, 通常基于火的热学性质及火灾前后目标的光谱变化特征检测, 包括光谱指数法如 NDVI(Li 等, 2000)、NBR(normalized burn ratio)(Key & Benson, 2002)、NDII (normalized difference infrared index)(Garcia & Chuvieco, 2004)、NDWI (normalized difference water index)(Gao, 1996 ; George & Rowland, 2006)、GEMI (global environment monitoring index) (Pinty, 1992 ; Stroppiana 等, 2002 ; 谭明艳等, 2007)和火灾前后 NDVI 差值法、NDBR 差值法、HANDS 方法(Fraser, 2000)等。植被燃烧后生物量和水份损失将导致相应波段反射率降低, 与未燃烧区

域形成差异。以上方法主要基于背景和燃烧区的对比来识别火迹地从而进行火灾面积的粗略估算。而上述指数一般使用短波和红外波段, 受燃烧产生的烟尘、气溶胶和薄云的影响较为严重, 为此, MODIS 火点亮温识别的改进算法 (Giglio, 2003 ; Wang & John, 2007)通过引入可见光波段构建烟尘、薄云掩膜, 消除其影响的同时提高小火点、闷烧火点和潜在火迹地的识别率。

对于全球频繁发生的火灾区域, 需要发展实时的动态监测技术, 相关研究采用半经验方法(Finney, 2002)、基于流体动力学方法如 radiation(Asensio & Ferragut, 2002)、percolate(Chao & Harinder, 2008)和元胞自动机 CA 方法(Hargrove 等, 2000)等建立火灾蔓延模型, 描述火灾发生、发展至熄灭的动态过程。这些模型多数需要火灾现场多种参数的参与计算, 包括天气、地形和植被可燃性等, 而参数的及时获取是很困难的。因此, 数据驱动的火灾监测系统 DDDAS(dynamic data-driven application system)提出利用目标分割方法在遥感影像中获取模型参数 (Phipps, 1992 ; Darema, 2004 ; Mandel 等, 2005)的方法, 包括火线(火迹地轮廓)和火向(蔓延方向), 为火灾蔓延提供更为及时的火灾预警。

红外遥感影像由于受云、雨、烟雾等随机因素

收稿日期: 2008-01-12; 修订日期: 2008-06-02

基金项目: 国家 973 计划资助项目(编号: 2006CB701302)和教育部长江学者和创新团队发展计划—创新团队资助项目(编号: IRT0438)。

第一作者简介: 付迎春(1976—), 女, 副教授, 2006 年获武汉大学摄影测量与遥感专业博士学位, 现从事航空航天摄影测量和环境遥感研究。Email: fyc266@163.com。

影响,通常具有对比度低、边缘模糊和噪声大的特点。基于统计特性阈值的常规红外影像分割方法(包括简单统计法(SIS)、类间方差法(OTSU)、矩量保持法(MOM)、最小误差法(MINE)、最大熵方法(ENT)及类间距离(方差)比最大准则(MRV)(温佩芝等, 2007),其应用前提是有效滤除噪声和随机因素的干扰,因而不适用于红外遥感影分割像处理。Ononye (2005)、Ambrose & Ononye(2007)针对机载 AVIRIS 的火迹地火线提取研究表明,结合多波段红外影像的边缘分割方法比单波段影像处理能得到更好的结果。

鉴于上述研究意义和存在的问题,同时可见光辅助红外波段有助于提高 MODIS 火点识别算法的有效性。本文在分析反映活火强度的 MODIS 光谱指数构造方法的基础上,发展了融合可见光、红外波段的多波段火迹地目标分割算法,并提出利用 B 样条进行分段火线的光滑拟和,求取火线的蔓延方向,实现火线自动提取的流程。为了验证火线、火向动态变化的有效性,应用 Kriging 方法进行火迹地外推预测及预测精度分析的实验,通过大兴安岭地区的 MODIS 林火影像分析实例,验证火线自动提取流程及相关影像处理方法的有效性。

2 研究区域与数据

研究区域选取在中俄边境的黑龙江大兴安岭(图 1)。该地区于 2004-10-12 发生火灾,火灾区位于东经 125°—135°、北纬 46°—52°的范围。由于森林茂密、地形复杂,加之秋季干燥、风力强劲,大火波及大兴安岭市、黑河市、伊春市等 6 个地区,火灾一直延续到 10 月 21 日才被扑灭。本试验选取了 2004-10-17 的两个时相影像作为实验数据,其特点是火势较大且清晰、云影响较小。图 1 上 1、2 区域的燃烧时间较长、范围较广,其间零落分布着火点。

本文使用了 Terra MODIS 3 个通道数据,1—2

波段(分辨率为 250m), 3—7 波段(分辨率为 500m)和 16, 17, 21, 31 波段(分辨率为 1km)的数据,数据属性见表 1。原始 MODIS Level 1B 数据经过几何纠正和辐射校正后,可见光波段生成反射率数据,红外波段生成亮温数据。

表 1 可用于火情监测的 EOS/MODIS 通道列表

通道号	波长/ μm	分辨率/m	电磁波谱范围	用途
1	0.62—0.67	250	可见光—红光	陆地/云, 烟雾
2	0.84—0.87			
6	1.62—1.65	500	近红外光	陆地/云, 海洋水色/生物
7	2.10—2.13			
16	0.86—0.88	1000	可见光	海洋彩色/叶绿素/生物化学
17	0.89—0.92			
20	3.66—3.84		短/中波红外	地面/云温度, 火点探测
21	3.92—3.98			
31	10.7—11.2		远(热)红外	

3 研究方法

对于火迹地火线的提取,一般是从光谱指数中识别火迹地,然后进行边缘检测,即火线检测。通常采用归一化植被指数 NDVI 来估算火迹地,Key (2002)针对 Landsat TM 数据的研究表明归一化火灾差异指数 NDBR 比 NDVI 能更好地区分活火与过火区,并能提取火线的变化和很好地描述火迹地的强度图。基于多波段影像组合比单一波段能提供更为丰富的边缘细节特性,本文提出利用多波段影像梯度来提取火线,通过与 NDBR 火迹地叠置以获得分段活火线,利用火线是类似椭圆的二次曲线特性(Finney, 1998),采用 B 样条拟合分段火线以求取火线法线方向,实现火线、火势蔓延的自动提取流程;最后,基于火线特征和 Kriging 空间统计原理进行火灾迹地外推插值预测,并对比参考数据分析预测的统计信息和误差(Kappa 系数)以验证方法的可行性。

3.1 光谱指数

Key 使用式(1)、式(2)计算 NDVI 和 NDBR 2 种指数,选用 TM 的近红外波段 4 通道(0.76—0.90 μm)和短波红外波段 7 通道(2.08—2.35 μm)计算 NDBR,而 Loboda 选用 MODIS 的 2 通道和 7 通道计算 NDBR(2007)。试验发现,MODIS 数据的 7 通道易受烟雾影响,图 1 中的 1 区和 2 区就属于此种情况,而且植被与裸地易混淆。因此,有必要试验适合 MODIS 的 NDBR 指数计算的最佳波段,方法是选取研究区 6 种地表类型:植被、裸地、烟雾、低、中、

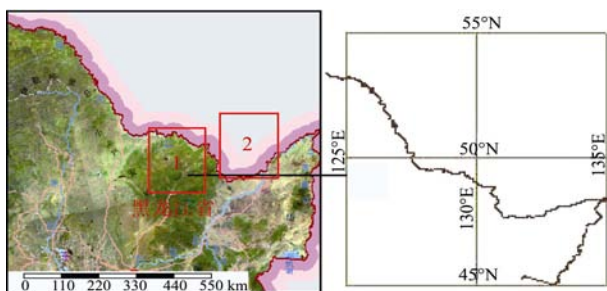


图 1 研究区域
(中俄边境,火灾区域为 1 和 2)

高三级燃烧强度区域的像素, 验证指数值可分关系(图 2)。其中, NDVI 采用波段 1 和波段 2 按式(1)计算, NDBR 采用 Loboda 的 2 通道和 7 通道按式(2)计算, NDBR_MOD 采用波段 6(短波红外)和波段 31(长波红外)按修改公式(3)计算。图 2 表明, 修改的 NDBR 指数对于各种地表具有较好的区分性, 并且烟雾影响近似为零, 基于 2/7 波段的 NDBR 指数难于区分低烧区、烟雾和裸地像素, 而 NDVI 则在多个区域都有重叠。因此, 修正的 NDBR 指数能较好地提取火迹地, 减少了噪声的干扰。有鉴于此, 本文提出公式(3), 并选取了适合计算 NDBR 的 MODIS 波段是 6 和 31 波段。

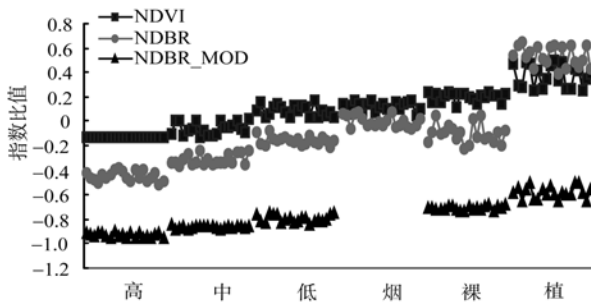


图 2 NDVI/NDBR 指数关系图

$$\text{NDVI} = \frac{R_{\text{nir}} - R_{\text{red}}}{R_{\text{nir}} + R_{\text{red}}} \quad (1)$$

$$\text{NDBR} = \frac{R_{\text{nir}} - R_{\text{swir}}}{R_{\text{nir}} + R_{\text{swir}}} \quad (2)$$

$$\text{NDBR_MOD} = \frac{R_{\text{swir}} - R_{\text{lwir}}}{R_{\text{swir}} + R_{\text{lwir}}} \quad (3)$$

式中, R_{nir} , R_{red} , R_{swir} , R_{lwir} 分别是近红外波段、红波段、短红外波段和长波红外波段的反射率。

3.2 多波段影像梯度边缘检测

如前所述, 梯度影像可以反映像元灰度在空间上的对比和突变, 为避免单一红外影像检测问题(目标对比差、边缘模糊等)。基于三波段影像边缘检测算法(Saber, 1997), 本文发展了计算多波段影像梯度的方法。

设多波段影像集合为 $I = [I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n]$, 其中 I_i 表示第 i 波段, n 为波段数, 点 (i, j) 的梯度矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial I_1}{\partial u} & \frac{\partial I_1}{\partial v} \\ \frac{\partial I_2}{\partial u} & \frac{\partial I_2}{\partial v} \\ \dots & \dots \\ \frac{\partial I_n}{\partial u} & \frac{\partial I_n}{\partial v} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里, (u, v) 是点 (i, j) 的空间坐标, 梯度幅值计算为

$$D^T D = \begin{bmatrix} p_{ij} & t_{ij} \\ t_{ij} & q_{ij} \end{bmatrix} \quad (5)$$

矩阵(5)的最大特征值是

$$\lambda_{ij} = \frac{1}{2} \left[(p_{ij} + q_{ij}) + \sqrt{(p_{ij} + q_{ij})^2 - 4(p_{ij} \times q_{ij} - t_{ij}^2)} \right] \quad (6)$$

其中,

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial I_k}{\partial u} \right)^2 \quad (7)$$

$$q_{ij} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial I_k}{\partial v} \right)^2 \quad (8)$$

$$t_{ij} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{\partial I_k}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial I_k}{\partial v} \right) \quad (9)$$

因此多波段影像的边缘梯度幅值计算公式

$$\|D_{ij}\| = \sqrt{\lambda_{ij}} \quad (10)$$

3.3 B 样条拟合火线

通过多波段梯度边缘提取得到的分段火线需要进一步处理。B 样条是借助控制点(影像中的高梯度幅值火点像素)拟合或逼近有序数据点的曲线, 在有序数据点中内插节点并使其拟合误差最小。因此, 最小二乘拟合法常用来实现 B 样条曲线拟合, 并有很好的噪声抑制作用(Chica-Olmo, 2000; Schneider & Eberly, 2003)。鉴于此, 本文提出应用 B 样条拟合火线火向方法: 前述步骤提取的火点作为分段火线的控制点, 使用最小二乘法在其邻域窗口的像元中内插节点, 通过控制点或节点拟合相对连续和完整的火线, 并过控制火点的法线求火的动态蔓延方向。因此, 基于 B 样条拟合的火线不仅反映了火势变化的本质, 同时能准确地求取火向。根据椭圆形火线的经验模型, 按式(11)的二次多项式进行计算。

$$f = \sum_{i=0}^2 a_i x^i \quad (11)$$

这里, 采用最小二乘方法解算式(11)中的系数 a_i , 并且计算通过每个控制点的法线方程

$$y = m(x - x_i) + y_i \quad (12)$$

式中, 系数 m 是样条曲线某点上的方向导数

$$m = -1.0 / \nabla f \quad (13)$$

表示过曲线两点来计算法线方向, 在火灾影像中指向火蔓延方向。

3.4 基于 Kriging 的火迹地外推预测

应用 Kriging 方法验证火线和火向动态变化的有效性, 通过火线及其上高梯度幅值火点的邻域像元推测下一时刻火点, 并进一步预测火灾的蔓延。

由于空间自相关的广泛存在, 传统的内插法大多不能准确地估计出不同空间位置的未测点值。Kriging 是根据半方差分析所提供的空间自相关程度的信息进行插值, 可以对未测点给出最优无偏估计(冯益明等, 2004; 金绍华等, 2006), 而且能同时提供估计值的误差和精确度。采用半方差函数刻画随机变量在空间分布上的差异, 基于球的半方差函数图表示在图 3, 半方差数学表述为:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left\{ 1.5 \frac{h}{a} - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right\}, & h \leq a \\ c_0 + c, & h > a \end{cases} \quad (14)$$

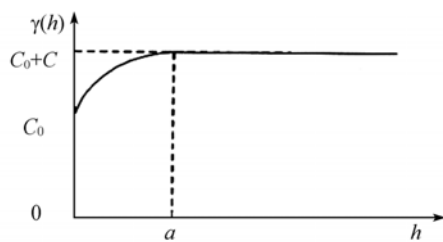


图 3 半方差图的 3 个参数

在半方差图 3 中的 3 个基本参数, (1) 块金方差 C_0 (nugget variance), 当 $h=0$ 时, 在纵轴上的截距; (2) 阈值(sill): 最大的 $\gamma(h)$ 值, 是空间上随机变量的先验方差; (3) 变程(range): 实际中, 将 $|h| \geq a$, $C(h) = 0$ 时的间距 a 定义为变程, 它给出了随机变量在空间上自相关性的尺度; 阈值与块金方差之差 C 表示由于数据中存在的空间自相关性引起的方差变化范围, 变程则表示了空间内插的极限距离, 在 a 范围内的内插是有意义的。

至此, 通过本文发展的自动提取火线或火势蔓延方向的流程如图 4:

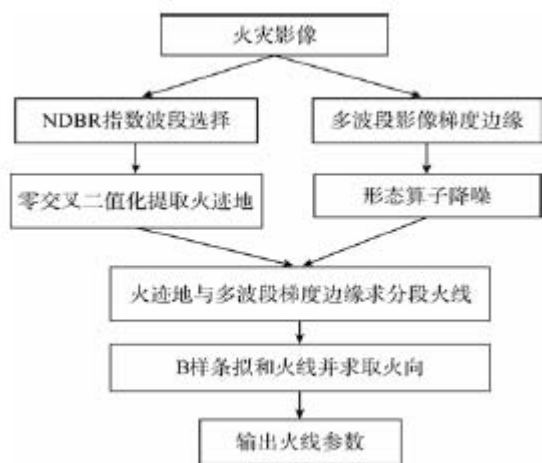


图 4 火线火向提取流程

4 试验结果与分析

4.1 多波段影像梯度边缘检测

首先进行多波段影像梯度分析提取火线。根据 MODIS 数据用途和单波段红外影像效果的目视对比, 排除易受烟雾影响的短波波段(如 1, 3, 4, 5 波段等), 选择具有明显目标对比度的 2, 6, 16, 17 波段组合, 4 个波段影像的火迹地与背景对比度明显依次增强。按式(4)—式(10)提取的多波段影像梯度边缘检测结果与单一 16 波段的 sobel 算子提取火线对比结果见图 5。

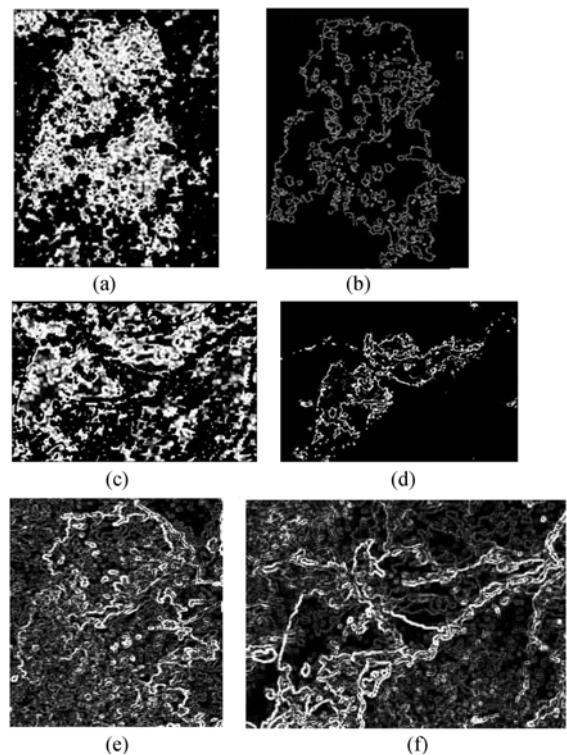


图 5 多波段梯度边缘图和形态算子降噪处理结果
研究区 1 结果(a), (b); 研究区 2 结果(c), (d); sobel 算子提取的 16 波段边缘结果(e), (f)

图 5 说明, 多波段影像梯度法可以有更丰富的边缘细节和更完整的轮廓边缘图(图 5(a), (c)), 经过形态算子进一步增强边缘信号和降低噪声, 并融合不同分辨率影像数据提高了边缘定位精度。本文使用了 250m 的 2 波段、500m 的 6 波段、1000m 的 16、17 四个波段组合, 融合提取 250m 的多波段梯度光滑火线图(图 5(b), (d)); 对单一波段采用 sobel 算子只能提取得到不完整的边缘(图 5(e), (f)); 火线上高梯度幅值火点是当前正在燃烧的活火点, 连续的火线表示正在燃烧和燃烧较为完整的区域, 而分段的边线表示不连续的低梯度幅值火点; 研究区 1 的燃

烧程度不一致, 左下角为燃烧不充分区域, 提取得到断续的边缘; 而区域 2 的燃烧程度一致, 提取的火线也较为完整和平滑。

4.2 NDBR 火迹地与多波段梯度边缘提取火线

按式(3)计算得到的研究区 2 的 NDBR 指数见图 6(a)。如前所述, 通过组合 NDBR 指数与多波段影像梯度可以进一步确定火线, 为后续确定火向。本文采用零交叉二值化方法来提取 NDBR 火迹地见图 6(b), 0 表示为非火迹地点, 255 表示为火点。同时将多波段梯度边缘二值化, 二者取交后对于同时在 NDBR 指数和多波段梯度边缘图上灰度值为 255 的点必然是火迹地火点, 遍历后得到如图 6(d)所示的分段火线(取其中一段示意), 所得结果简洁而又真实地反映了火线变化。

4.3 B 样条拟合光滑火线

对图 6(d)根据式(11)一式(13)进行 B 样条拟合处理得到光滑火线如图 7(a), 求取该条火线的法线如图 7(b)。

4.4 火迹地外推预测分析

对所选区域进行 Kriging 插值, 采用内部缺失内插(图 7(b)中 1)和边缘(图 7(b)中 2)外推插值结合的方

法, 取火线上高梯度火点的 11×11 邻近窗口像元参考插值, 最终总体插值精度达 85.2%。将所提火线、火向及 Kriging 插值火区叠置在原图与 30min 后火灾参考影像上, 得到图 8 的直观结果。图 8(a)中火区边缘的深色区域是预测部分, 分析表明火线平缓部分(右下角)相应外推变化小, 火线变化快区域(如中上部弯曲处)相应外推变化快, 与该区高梯度幅值点密集、火向集中特点相应, 并且像元的指数值较低表示其燃烧强度较高; 在图 8(b)中, 外推结果与 30min 后参考影像叠置, 可以看出二者在火线平缓部分基本吻合, 而在火线变化快的部分有差距, 但火线的整体变化与实际影像基本保持一致。如上节所述, Kriging 用于边缘外推时精度有所下降, 并且要求在一定误差和变程范围内插值。经反复试验, 确定插值有效变程范围是 873.20m。

为了说明基于火线预测效果的有效性和质量, 这里采用均值、方差、熵及火迹地精度等指标对火区插值进行统计, 对比的均值、方差与熵结果见表 2。根据火迹地误差矩阵(表 3), 火迹地像元的外推 Kappa 系数达 80.2%。说明相对于 30min 后的参考影像, 外推范围火区像元识别有效性达 80.2%, 这些像元的均值、方差及熵则分别反映了火迹地的光谱信息量及影像信息量的大小。统计表明, 火迹地

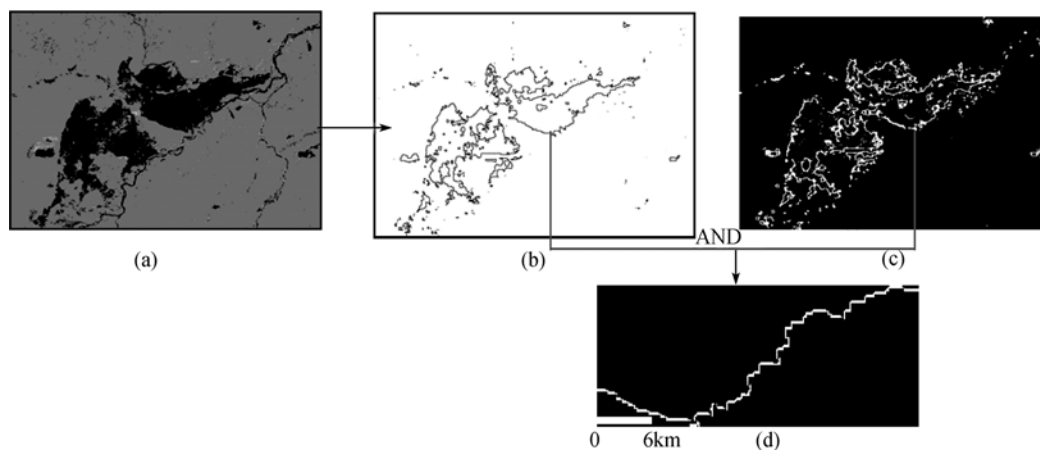


图 6 NDBR 与多波段梯度边缘组合提取火线

(a) NDBR 影像; (b) 零交叉二值化后的 NDBR 火迹地; (c) 多波段梯度边缘火线; (d) 对二者求交后得到的光滑火线

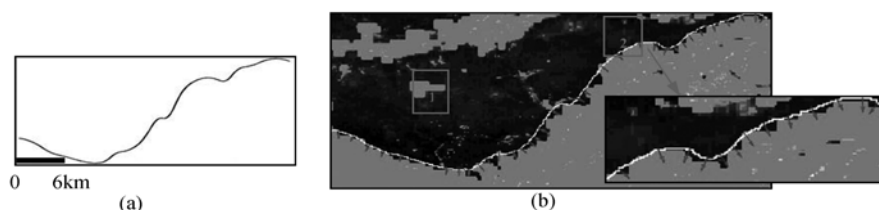


图 7 B 样条拟合和曲线

(a)对图 6(d)的 B 样条拟合的结果; (b)拟合火线火向与 NDBR 火迹地叠置

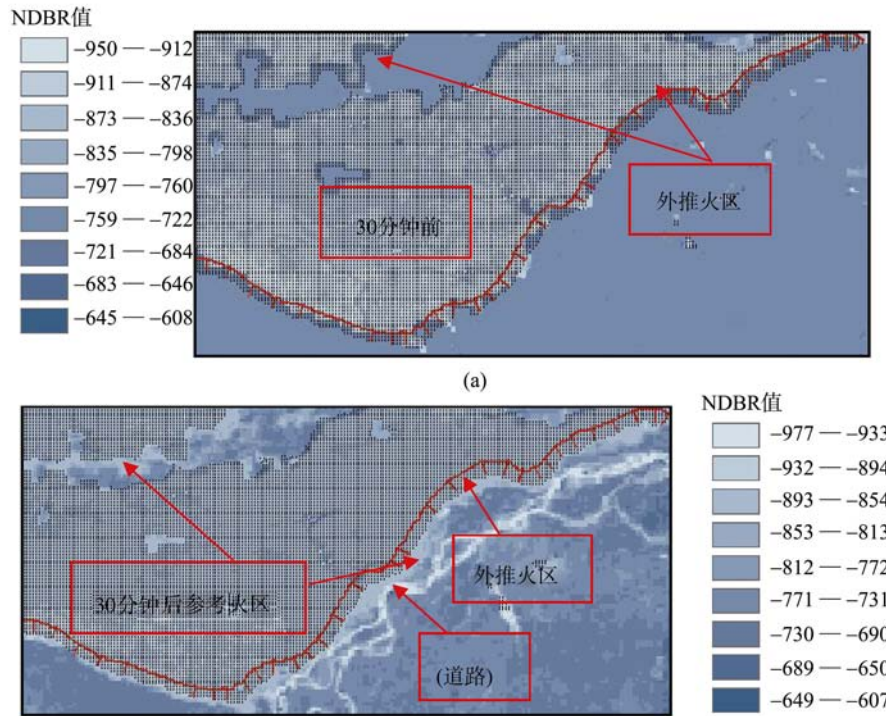


图 8 基于 Kriging 的火迹地预测验证

(a) 外推插值结果与前期影像叠置; (b) 外推插值结果与后期影像叠置

表 2 外推预测统计

	均值	方差	熵
外推预测火区	-801.6	42	12.6
30 分钟后参考影像	-926.2	51	15.4

表 3 外推预测火迹地识别的误差矩阵

		外推预测影像		总和
		火烧迹地	非火烧迹地	
参考影像	火烧迹地	38362	7307	45669
	非火烧迹地	8881	24462	33343
	总和	47243	31769	79012

的预测光谱信息量与参考影像比值达 86%，信息量为 81%，所作预测结果在整体上反映了下一时刻的火势和火向,对燃烧强度的区分则稍弱些，从而证明了提取火线和火向方法的正确性。

5 结 论

(1) 根据 MODIS 多光谱波段特征，选择使用短波红外 6 波段和长波红外 31 波段构建 NDBR 指数用以识别火迹地，研究表明 NDBR 指数比 NDVI 指数能更好地区分火迹地燃烧强度，选择适合的波段计算指数有助于提高火迹地识别精度。

(2) 发展了可见光、红外结合的多波段影像梯度边缘检测算法，融合 MODIS 多通道、多波段提高了空间分辨率，相对单波段的传统边缘检测，该方法能提高火线检测的准确性并有效降低噪声；根据火线呈椭圆二次曲线特性，提出采用 B 样条的最小二乘方法拟合分段火线，并支持进一步获取光滑火线和利用其上的高梯度幅值火点求取火向，实现了不需要经验阈值和参数条件下，基于遥感影像自动提取火线火向的流程。

(3) 根据火灾影像的空间自相关特性，提出将 Kriging 方法用于火灾的外推预测，与 30min 后参考影像目视对比，基于火线的预测影像与参考影像保持一致的变化；统计指标对比，外推火点像元的有效性和信息量均达到较高精度，验证了火灾动态参数获取方法和流程是有效、可行的。

(4) 火线和火向提取精度对参考影像是有依存性的，本文参考 30min 后影像取得了好的精度，表明本文方法能实现火灾动态的及时预警，将该方法应用到相关模型中的研究有待后续展开。

REFERENCES

- Asensio M and Ferragut L. 2002. On a wildland fire model with radiation. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, 54: 137—157

- Ambrose E and Ononye. 2007. Automated extraction of fire line parameters from multispectral infrared images. *Remote Sensing of Environment*, **108**: 179—188
- Chao L and Harinder H. 2008. Comparison of spatially explicit forest landscape fire disturbance models. *Forest Ecology and Management*. **254**: 499—510
- Chica-Olmo M. 2000. Computing geostatistical image texture for remotely sensed data classification. *Computers and Geosciences*, **26**(4), 373—383
- Darema F. 2004. Dynamic data driven applications systems: A new paradigm for application simulations and measurements. Bubak M, Dick G van Albada, Soot P M A and Dongarra J J. Computational Science 4th International Conference, Krakow, Poland, June, Proceedings: Part III Lecture Notes in Computer Science series. Heidelberg: Springer Berlin Press
- Finney M A. 2002. Fire growth using minimum travel time methods. *Canadian Journal of Forest Research*, **32**: 1420—1424
- Fraser R H, Li Z and Cihlar J. 2000. Hotspot and NDVI differencing synergy (HANDS): a new technique for burned area mapping over boreal forest. *Remote Sensing of Environment*, **74**: 362—376
- Finney M A. 1998. Fire area simulator—model development and evaluation. USDA Forest Service Research Paper. RMRS RP-4
- Feng Y M, Lei X D and Lu Y C. 2004. Interpretation of pixel-missing patch of remote sensing image with kriging interpolation of spatial statistics. *Journal of Remote Sensing*, **8**(4): 317—322
- Giglio L, Descloitres J, Justice C O and Kaufman Y J. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*, **87**(2): 273—282
- Garcia M and Chuvieco E. 2004. Assessment of potential of SAC2C /MMRS imagery for mapping burned areas in Spain. *Remote Sensing of Environment*, **92**: 414—423
- Gao B C. 1996. NDWI a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**: 257—266
- George C, Rowland C, Gerard F and Balzter H. 2006. Retrospective mapping of burnt areas in central Siberia using a modification of the normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, **104**, 346—359
- Hargrove W W, Gardner R H and Turner M G, Romme W H and Despain D C. 2000. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecology Model*, **135**: 243—263
- Jin S H and Yu B. 2006. Research on approximation method on marine magnetic anomaly. *Hydrographic Surveying and Charting*, **26**(2): 6—8
- Key C and Benson N. 2002. Measuring and remote sensing of burn severity. USGS Wildland Fire Workshop. Livingston, USGS Press.
- Li Z, Nadon S, Cihlar J and Stock B. 2000. Satellite-based mapping of canadian boreal forest fires: evaluation and comparison of algorithms. *International Journal of Remote Sensing*, **21**(16), 3071—3082
- Loboda T and O'Neal K J. 2007. Regionally adaptable DNBR-based algorithm for burned area mapping from MODIS Data. *Remote Sensing of Environment*. **109**: 429—442
- Mandel J, Bennethum L, Chen M and Janice L. 2005. Towards a dynamic data driven application system for wildfire simulation. Sunderam V S, van Albada G D, Soot P M A and Dongarra J J. Computational Science, Berlin, Springer Press
- Ononye A, Vodacek A, Wang Z and Li Y. 2005. Mapping of active fire area by image gradient techniques. Remote Sensing for Field Users. Proc. 10th Biennial USDA Forest Service Remote Sensing Applications Conference. Salt Lake City, ASPRS Press
- Pinty B and Verstraete M M. 1992. GEM I: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetation*, **101**: 15—20
- Phipps M J. 1992. From local to global: the lesson of cellular automata. Angelis De, D L, and Gross L J. Individual Based Models and Approaches in Ecology: Populations, Communities and Ecosystems. Routedledge, Chapman and Hall, New York, **1**: 165—187
- Stroppiana D, Pinnock S, Pereira J M C and Gregorie JM. 2002. Radiometric analysis of SPOT-VAGETATION images for burnt area detection in northern australia. *Remote Sensing of Environment*, **81**: 21—37
- Saber E, Tekalp M and Bozdagi G. 1997. Fusion of color and edge information for improved segmentation and edge linking. *Image and Vision Computing*, **15**: 769—780
- Schneider P J and Eberly D H. 2003. Geometric Tools for Computer Graphics. Morgan Kaufmann Press
- Tan M Y, Chen Z X, Cao X, Chen J, J Yang W and Gu Z H. 2007. Burn scar mapping in steppe using MODIS data. *Journal of Remote Sensing*, **11**(3): 342—352
- Wang W T and John J. 2007. An improved algorithm for small and cool fire detection using MODIS data: a preliminary study in the southeastern united states. *Remote Sensing of Environment*. **108**: 163—170
- Wen P Z and Wu C K. 2007. New method of edge and invariant feature extraction for IR image. *Opto-Electronic Engineerin*, **34**(4): 1—6

附中文参考文献

- 冯益明, 雷相东, 陆元昌. 2004. 应用空间统计学理论解译遥感影像信息“缺失”区. *遥感学报*, **8**(4): 317—322
- 金绍华, 于波. 2006. 海洋磁力异常逼近方法研究, *海洋测绘*, **26**(2): 6—8
- 谭明艳, 陈仲新, 曹鑫, 陈晋, 杨伟, 辜智慧. 2007. 利用MODIS 数据识别草原火灾迹地的方法研究. *遥感学报*, **11**(3): 342—352
- 温佩芝, 吴成柯. 2007. 一种模糊红外目标边缘和不变特征提取方法. *光电工程*, **34**(4): 1—6