

火线轮廓参数卫星遥感定量提取方法

覃先林¹, 杨飞^{1,2}, 祖笑峰¹, 张子辉³, 李增元¹

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所 国家林业局林业遥感与信息技术实验室,北京 100091;

2. 中国传媒大学,北京 100024;

3. 国家林业局森林防火预警监测信息中心,北京 100714)

摘要:对 Landsat TM/ETM+ 数据进行抽样统计分析基础上,把 Landsat TM/ETM+ 的红外、短波红外和近红外等波段数据相结合,采用窗口动态阈值算法构建燃烧区识别模型;在此基础上,为定量生成火线轮廓参数,通过连通性判断、空洞填充、小斑块去除和边缘细化等图像处理方法对识别的燃烧区进行处理;并在 ENVI 4.8 + IDL 语言环境下,实现了基于 Landsat TM/ETM+ 数据自动生成火线轮廓参数算法处理过程的程序化。结果表明,总体判对率为 86.44%,总体误判率为 13.56% (其中漏判率为 1.77%,错判率为 11.79%);该方法可满足林火扑救中对火线轮廓参数定量宏观监测的应用需求。

关键词:卫星遥感技术;森林火灾;火线轮廓;林火扑救

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A

Quantitative extraction of fine contour parameters for forest fire using satellite remote sensing

QIN Xian-Lin¹, YANG Fei^{1,2}, ZU Xiao-Feng¹, ZHANG Zi-Hui³, LI Zeng-Yuan¹

(1. State Laboratory for Remote Sensing and Information Techniques, Institute of Forest Resource Information Technique, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Communication University of China, Beijing 100024, China;

3. Information Center of Forest Fire Prediction and Monitoring, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: To fulfil quantitative monitoring of fire line contour (location, length and area) for forest fire prevention and suppression, the algorithm for fire identification have been developed using dynamic thresholds of window combining the images obtained in thermal band, short wave infrared band and near infrared band of Landsat TM/ETM+. In order to get the quantitative result of fire line contour, the identified fire image has been processed by a series method such as the connectivity identification, hole filling, little speckle elimination and edge smooth. An automatic fire line contour identification program has also been developed using Landsat TM/ETM+ images in ENVI 4.8 + IDL condition. The method and program have been validated by selected typical forest fires which had taken place in northeast forest region of China and Амурская область of far east region of Russian. The validation results showed that the total accurate percent is 86.44%, the total false percent is 13.56% (the total omission is 1.77% and the commission is 11.79%). So, the methodology can be satisfied the need to knowing the fire line contour parameters for forest fire prevention and suppression operation.

Key words: satellite remote sensing technique, forest fire, fire line contour, fire suppression

PACS: 07.07.df

收稿日期:2013-06-17,修回日期:2014-09-28

Received date: 2013-06-17, revised date: 2014-09-28

基金项目:国防科工局重大专项项目(21-Y30B05-9001-13/15);民用航天预研项目“基于多源空间数据的森林火灾综合监测技术与应用示范”

Foundation items: Supported by the State Administration of Science, Technology and Industry for National Defence, P. R., China (21-Y30B05-9001-13/15), Pre-Research Foundation Commercial Aerospace Industry Project “Forest fire integrated monitoring techniques and application demonstration based on multi-resources spatial data”

作者简介(Biography):覃先林(1969-),男,四川南溪人,副研究员,博士,硕士生导师,主要从事植被变化及林火预警监测技术研究。

E-mail: noaags@caf.ac.cn; qxl9157@126.com

引言

随着航天遥感技术和遥感应用技术的发展,目前,NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)、Terra/Aqua MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)、风云(FY)和环境减灾小卫星等具有中低空间分辨率、高时间分辨率特性的传感器已成为我国日常森林防火监测业务中的一种重要监测技术手段,在我国的森林草原火情监测和森林火灾预防扑救中起到了重要的作用。

自二十世纪七十年代初,国内外学者研究形成了多种火的检测^[1-8]和过火区制图算法^[9-11],并应用于全球/区域的火情监测、过火区制图和森林火灾受害程度评价^[12-16]。这些火情监测算法模型大多是基于中低空间分辨率、高时间分辨率的卫星数据,为满足对火的探测需求而采用中波红外(中心波长约4 μm)与远红外(中心波长约11 μm)相结合构建,而对于森林火灾扑救中急需的燃烧区的位置、长度、面积等火线轮廓特征定量提取技术考虑较少;目前仅查阅到 Ononye 等^[17]曾用航空可见/热红外影像(Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer, AVIRIS)、付迎春等^[18]曾用 MODIS 数据进行火线提取方法的文献。他们主要利用影像构建的光谱指数,通过边缘检测的图像处理方法提取出过火区边界得到火线周长,并预测火的蔓延方向;这种方法没有利用热红外通道对高温敏感的特性,并结合燃烧像元在短波红外波段和可见光波段的反射率差异构建定量估测模型,直接对燃烧像元进行识别,并估测火线的位置、周长和面积,因而会出现在过火区边界上已没有燃烧像元,却被生成为火线的现象。10多年来,我们利用卫星数据监测我国及周边地区的火情,发现大多森林火灾在中低空间分辨率的卫星影像(如NOAA、MODIS、FY等,热红外通道的星下点空间分辨率约1KM)仅表现出点特征信息,而在中高空间分辨率卫星影像(如SPOT-5、Landsat TM/ETM+等)则较好地表征出燃烧火线具有的线面特征。覃先林等^[19]利用具有100多个波段的天宫卫星数据,分析发现明火不仅在热红外影像上表现明显,而在短波红外影像上也比较明显,但目前的林火识别模型中极少使用短波红外波段。美国的Landsat TM/ETM+及Landsat 8卫星数据中都设置了两个短波红外通道(中心波长分别约1.65 μm 、2.12 μm),其空间分辨率都为30 m,其中心波长约2.12 μm 的影像可较好地反映正在燃烧中的森林火场火线轮

廓^[20]。当森林火灾、尤其是重特大森林火灾发生时,由于植被、地形、风向等影响,常常会出现多个火线齐头并进蔓延的情形,在卫星影像上也会看到多个不连接的燃烧区,如果采用手工勾绘的方式获得这些火线的长度、面积等信息,通常比较繁琐和较难实现。利用具有中高分辨率特性的Landsat TM/ETM+卫星数据开展火线轮廓快速定量提取等技术方法研究,对于了解火情动态发展、实现森林火灾燃烧状态实时定量监测、制定科学指挥扑救决策等均具有十分重要的应用价值。

1 研究区

研究区选在我国东北林区和俄罗斯远东地区的阿穆尔州,东北林区大约在东经115°05'~135°02',北纬38°40'~53°30'之间,是我国森林火险重点区;俄罗斯远东地区阿穆尔州大约位于东经119°27'~134°40',北纬48°45'~55°39',近十年的卫星影像上几乎每年都发现了该区域有大火发生。

2 数据源

选用中等空间分辨率的Landsat TM/ETM+数据,作为森林火灾扑救中火线轮廓定量提取方法研究的卫星数据源。从美国地质调查局(USGS)共选取了近10年内20景覆盖我国东北林区及俄罗斯阿穆尔州区域内正在燃烧火场的Landsat TM/ETM+L2级数据。USGS对该级数据已进行过辐射校正、几何校正,并将热红外波段重采样为与多光谱数据相同空间分辨率(30 m)等处理。

由于Landsat TM/ETM+有两个热红外波段,其中6H为高增益波段,高温饱和点约347 K;6L为低增益波段,高温饱和点约为322 K。本文关于火线轮廓监测属于对异常高温进行探测,因此,选择了Landsat TM/ETM+第6波段的高增益波段进行燃烧区判别。Landsat TM/ETM+主要技术参数见表1。

表1 Landsat TM/ETM+主要技术参数
Table 1 Mainly parameters of Landsat TM/ETM+

波段	波长范围/ μm	空间分辨率/m	主要用途	备注
1	0.45~0.52	30×30	区分土壤和植被等	
2	0.52~0.60	30×30	区分人为特征	
3	0.63~0.69	30×30	植被、火烧迹地识别等	
4	0.76~0.90	30×30	植被、火烧迹地识别等	
5	1.55~1.75	30×30	植被健康、云、雪等识别	
6	10.4~12.5	60×60	植被、热异常等	USGS已将其处理为30 m×30 m
7	2.08~2.35	30×30	植被含水量、土壤等	
8	0.50~0.90	15×15		仅ETM+具有

3 研究方法

通过对选取的 Landsat TM/ETM + 影像抽样分析,建立燃烧像元识别模型,并对识别出的燃烧区进行孔洞填充、小斑块去除、矢量化等处理,实现从 Landsat TM/ETM + 影像中自动生成火线轮廓(位置、长度及面积)、解决森林火灾预防扑救的技术需求.其主要的技术流程如图 1 所示.

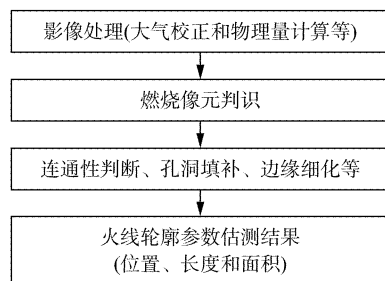


图 1 森林火灾火线轮廓提取技术流程示意图

Fig. 1 Flowchart of forest fire line contour extraction

3.1 影像处理

对 Landsat TM/ETM + 影像进行的处理主要包括大气校正、反射率和亮温计算等.

从影像附带的头文件中分别得到各个波段的增益值与偏移量,计算得到各通道的辐射亮度值;利用 ENVI4.8 软件的 FLAASH 大气校正模块对经辐射亮度值计算后的数据进行大气校正处理,将 Landsat TM/ETM + 的可见近红外和短波红外的辐射亮度转换为地表反射率.对于 Landsat TM/ETM + 的热红外波段的亮温按“式(1)”计算.

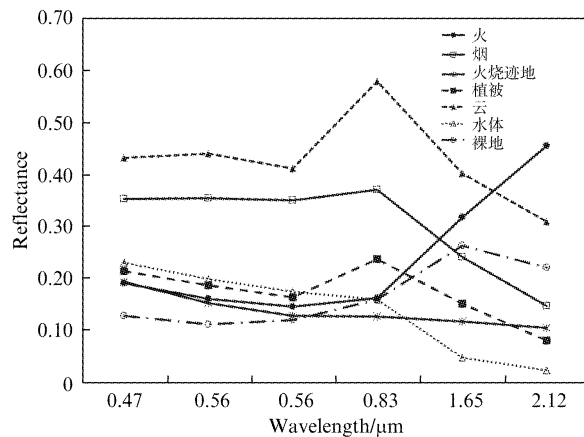
$$T_{\lambda} = \frac{K_1}{\ln\left[1 + \frac{K_2}{B_{\lambda}}\right]}, \quad (1)$$

式中 T 为亮温值, K_1 和 K_2 为发射前预设的常量,对于 Landsat 5 TM 数据, $K_1 = 1260.56 \text{ K}$, $K_2 = 60.776 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$; 对于 Landsat 7 ETM + 数据, $K_1 = 1282.71 \text{ K}$, $K_2 = 66.609 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, B_{λ} 为大气校正后的辐射亮度值.

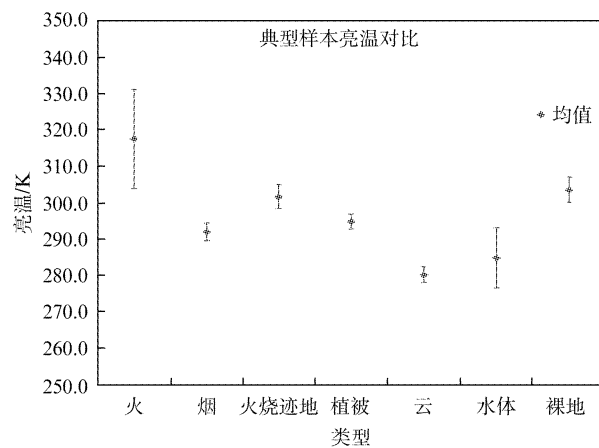
3.2 数据分析

为得到利用 Landsat TM/ETM + 检测明火的方法,从选取的 20 景 Landsat TM/ETM + 影像中选取 15 景,通过对影像中的明火、火烧迹地、烟、植被、云、水体和裸地等典型类别进行抽样统计分析,构建燃烧像元识别模型;剩余的 5 景影像用于精度评价.

其中:共选取了 420 个正在燃烧的未饱和火点像元、火烧迹地为 1134 个像元、烟为 1033 个像元、植被为 637 个像元、云为 514 个像元、水为 904 个像元、裸地 360 个像元.部分分析结果如图 2 所示.同时,以火点为中心,截取不同大小(从 3 到 25 的窗口进行分析,发现采用 21×21 窗口可有效获得中心像元与背景间的差异.所以本文在后面进行明火判断时采用 21×21 窗口).



(a)



(b)

图 2 典型类别在 Landsat TM/ETM + 影像上分析结果 (a) 反射波段光谱分析结果, (b) 波段 6 平均亮温分析结果

Fig. 2 The analysis results of typical types using Landsat TM/ETM + images (a) The results of spectral analysis of reflectance bands, (b) The mean of bright temperature of band 6

3.3 燃烧像元识别

Landsat TM/ETM + 缺少 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外波段,不能直接利用基于 AVHRR、MODIS 等传感器的中红外和远红外相结合的火点识别算法.由图 2 可以看出 Landsat TM/ETM + 影像中明火的反射率在波段 7 明显比其它地物都高;而在波段 5 中,明火的反

射率与其它类别的值间有交叉,表明波段7比波段5对地面热源反映更加敏感;在波段6的高增益通道,明火的亮温均值比选取的其余6种样本的亮温均值都高. 试验分析结果表明,利用 Landsat TM/ETM+的波段4、波段6、波段7等波段进行组合,可有效地判识出燃烧区.

检测中为减少程序运行时间,通过设置潜在火点,并以其为中心的 21×21 像元区域为窗口,用窗口内潜在火点像元与背景像元(窗口内其它像元)统计值进行比较,判断出燃烧像元.

当像元值满足条件“式(2)”时,则该像元被设置为潜在火点.

$$\begin{cases} P_{74} \geq 1.0 \\ T_6 > 297k \end{cases}, \quad (2)$$

其中 P_{74} 为波段7与波段4的反射率比值; T_6 为第6波段的亮温值.

当潜在火点满足条件“式(3)”时,则该像元为燃烧像元;并将燃烧像元标识为1,非燃烧像元标示为0.

$$\begin{cases} R_{74} \geq R_{74b} + \text{Max}(3\delta R_{74b}, 0.5) \\ R_7 > R_{7b} + \text{Max}(3\delta\rho_{7b}, 0.05) \\ T_6 > T_{6b} + \delta T_{6b} - 4 \end{cases}, \quad (3)$$

其中 R_{74} 为潜在火点像元的波段7与波段4的反射率比值; R_{74b} 为背景像元的 R_{74} 平均值; δR_{74b} 为背景像元 R_{74} 的标准差; R_7 为潜在火点在波段7的反射率; R_{7b} 为背景像元在波段7反射率的平均值; δR_{7b} 为背景像元在波段7的标准方差; T_6 为第6波段的亮温值; T_{6b} 为背景像元在第6波段的亮温均值; δT_{6b} 为背景像元第6波段的亮温标准差.

3.4 连通性判断

通过式(3)判断出来的是单个火点像元,要生成火线,需要将判识出的单个二值化燃烧像元进行连通性分析. 采用连通成分标记法进行区域合并,像素值为1表示为燃烧像元,像素值为0为非燃烧像元. 对图像连通区域的标识采用8连通判别算法,其标识过程如下:

第一步 以检测出的各个火点像元为中心,分别进行连通性判别. 首先判断是否为已标识过的火点像元,如已标识过,则不再进行标识处理. 对于未标识过的火点像元,先判断是否为边缘像元,若不是边缘像元,则采用顺时针方向,从左到右,从上到下逐个扫描其 3×3 邻域8个方向的像元;若是边缘像元,则只判断有像元方向的像元.

第二步 若待标识的火点周围8个方向的像元

都不为火点,则把该像元标号加1,且此像元值仍为1,并结束该点周围像素的标识.

第三步 若搜索到某方向像素为火点,则将该方向的点标记为与中心点相同的标号,将其值设为1,并以该点为搜索中心,搜索其8个方向的像元是否是火点像元,如果某方向是火点像元,则将其标识为相同的标号,值设为1;如果不是火点像元,则将其标号加1,值设为1. 如此循环搜索,直到所有火点像元均被进行标识.

3.5 孔洞填充

通过“二值化”得到的图像中往往存在孔洞.“孔洞”定义为封闭区域内的黑色背景区域. 对空洞去除采用区域填充法,即从边界内的一个属于火的像元种子点(记为 p)开始,用1填充,所有非边界(背景)点标记为0. 对区域填充过程按式(4)从 p 开始做迭代运算.

$$X_k = (X_{k-1} \oplus B) \cap A^c \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (4)$$

式中, B 为 3×3 的“十”字形结构元素;当 $X_k = X_{k-1}$,则算法在迭代的第 k 步结束. 这时, X_k 和 A 的并集包含填充区域的内部和它的边界.

3.6 小斑点去除

为了去除孤立的小斑点,动态设置一个窗口($3 \times 3, 5 \times 5, \dots$),通过处理窗口内的值,使得小于阈值个数的像元值被窗口中像元个数最多的值替换. 基于连通区域面积阈值化的噪声消除与轮廓提取的思想,把图像中每一个连通的区域看作是一个集合,再对每一个集合进行具体分析. 算法过程如下:

对每一个孔洞填充处理后的连通区域,统计其像元个数;利用阈值对图像进行过滤,超过阈值的连通区域被完整的保留下来,像元个数少于阈值的则被删除.

3.7 边缘细化

为减少火线边缘毛刺问题,采用B-样条平滑法,对小斑点去除处理后的图像进行平滑处理. 该算法描述为:给定 $n+1$ 个控制点 P_0, P_1, \dots, P_n 和一个节点向量 $\mathbf{U} = \{t_0, t_1, \dots, t_m\}$, j 次B样条曲线由这些控制点和节点向量 t 按“式(5)”进行定义.

$$C(t) = \sum_{i=0}^n S_{i,j}(t) P_i, \quad (5)$$

其中 j 为次数, $S_{i,j}(t)$ 是 p 次B-样条基函数; P_i 对应于一个节点 t_i 的曲线上的点, $C(t)$ 被称为节点.

3.8 火线轮廓参数确定

火线轮廓参数主要包括火线区域中心位置、火线边界的长度和火线区域面积等三个参数.

由于卫星影像中的火线是由许多像元构成,通常表现为不规则的曲面. 火线位置按曲面火场的中心坐标为标记. 中心坐标 (x_0, y_0) 由式(6)计算.

$$\begin{aligned} \bar{x}_0 = \bar{x} &= \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} x_i \\ \bar{y}_0 = \bar{y} &= \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{m-1} y_i \end{aligned}, \quad (6)$$

式中, (x_i, y_i) 为图像中的火点对应的像素位置坐标; $i=0, 1, \dots, (n-1)$; $j=0, 1, \dots, (m-1)$.

火线边界的长度按围绕燃烧区的外边界像元总数乘上单个像元边长来计算;而火线的面积则通过统计火线边界内部(也包括边界上)的燃烧像素总数乘上单个像元面积,即按式(7)求出火线区域内面积.

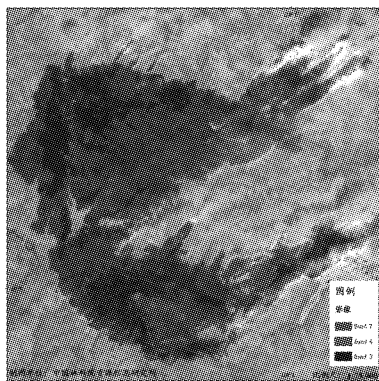
$$A = N \times S, \quad (7)$$

其中, A 为火线总面积; N 为燃烧像元总数; S 为单个像元面积.

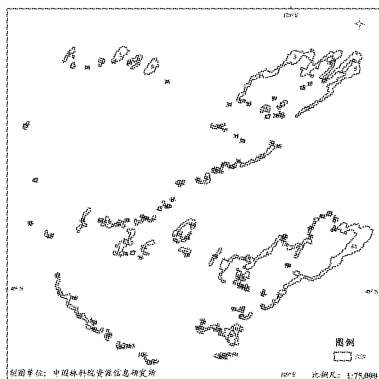
4 结果与分析

4.1 结果

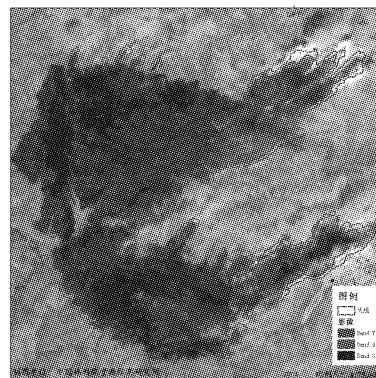
利用 ENVI4.8 + IDL 开发语言,将节 3.3 ~ 3.8 所叙算法过程编程实现流程化,并利用 Landsat TM/ETM + 对算法程序进行测试,所得的部分火线检测结果如图 3 和表 2 所示.



(a)



(b)



(c)

图 3 利用 Landsat ETM + 影像提取火线结果示意图 (a) 合成影像, (b) 提取的火线, (c) 火线与影像叠合 (黑龙江省逊克县, 2009 年 4 月 29 日)

Fig. 3 The extracted results of fire line contour using Landsat ETM + images (a) RGB image, (b) extracted fire line, and (c) extracted fire line is combined with RGB image (Xunke county, Heilongjiang province of China; Apr. 29, 2009)

表 2 利用 Landsat ETM + 影像火线估算结果*
Table 2 The estimation results of fire line contour using Landsat ETM + images

代号 Code	中心经度/(°) Central longitude	中心纬度/(°) Central latitude	火线长度/m Length of fire line contour	火线面积/m ² Area of fire line contour
1	128.388	48.604	3 922.57	93 600.0
2	128.354	48.603	2 052.79	51 300.0
3	128.496	48.598	16 855.65	421 200.0
4	128.528	48.601	3 935.88	98 100.0
5	128.524	48.603	1 692.79	40 500.0
6	128.537	48.600	4 918.97	117 900.0
7	128.357	48.602	4 59.41	11 700.0
8	128.398	48.601	2 547.35	63 900.0
9	128.407	48.598	2 307.35	56 700.0
10	128.375	48.600	1 084.26	29 700.0
11	128.393	48.600	784.26	20 700.0
12	128.410	48.598	1 695.81	43 200.0

4.2 精度评价

利用选取的未参与模型构建的 5 景 Landsat TM/ETM + 数据,包括 2004 年 10 月 15 日 ETM + P118r24(F1)、2006 年 5 月 28 日 ETM + P120r24(F2)、2009 年 4 月 29 日 ETM + P117r26(F3)、2009 年 5 月 24 日 ETM + P116r26(F4)和 2011 年 7 月 17 日 TM p124r17(F5),对本文的火线提取技术方法和算法程序进行检验.

由于缺少森林火灾发生时真实的火线资料,也较难通过勾绘的方式得到影像中的每条火线边界来进行检测结果验证,因此,将通过程序提取的火线轮

廓检测结果与原始影像直接进行叠合(如图3(c)),通过目视判断两者间燃烧区是否符合,采用

判对率、漏判率、误判率和判错率^[6]对本文火线检测方法的精度进行评价,评价结果见表3。

表3 精度验证结果

Table 3 Results of validation

影像代码 Code of Image	总像元数 Total pixels	判对像元数 Correct pixels	判错像元数 False pixels		判对率 Correct percent/(%)	判错率 False percent/(%)		总和 Total
			漏判像元数 Omission pixels	误判像元数 Commission pixels		漏判率 Omission percent	误判率 Commission percent	
F1	1 777	1 492	23	262	83.97	1.29	14.74	16.03
F2	1 718	1 549	12	157	90.16	9.14	0.70	9.84
F3	1 329	1 116	22	191	83.97	1.66	14.37	16.03
F4	1 143	1 045	22	76	91.43	1.92	6.65	8.57
F5	1 200	993	48	159	82.75	4.00	13.25	16.25
合计 Total	7 167	6 195	127	845	86.44	1.77	11.79	13.56

从表3所选5景影像验证精度结果来看,采用本文方法提取出的火线区域的判对率都在80%以上,判错率都低于17%,应该说本文的方法可适用于森林火灾扑救中宏观定量掌握火场燃烧现状的需求;但从表3可以看出,每个验证结果数据中都存在着一定漏判像元和误判像元的情况,结合验证过程发现误判像元主要出现在火场的边界像元上,火场越大,误判像元数会越多。究其原因,一个原因是本文算法为得到封闭边界而将小斑点像元进行合并处理带来;另一个原因是大火场向四周热辐射范围会比小火场更大,更易出现边缘热效应现象,从而造成误判。

5 结论

通过对Landsat TM/ETM+影像中典型类别抽样分析,利用其热红外通道、短波红外通道和近红外数据相结合来构建燃烧区判识模型;对检测出的燃烧像元进行连通性判断、孔洞填充、小斑块去除和边缘细化等处理后,估算出火线的中心位置、长度和面积等特征参数,并用程序将这些处理过程实现算法软件化,从而实现了利用Landsat TM/ETM+影像快速定量提取森林火灾扑救中火线轮廓参数的技术需求。

通过目视分析提取的火线与原始影像的叠合结果图(图3)进行验证,结果表明,火线提取结果与实际火区吻合较好,基本符合实际情况。由表3对选取的5个实验区验证结果可以看出该方法在这5个验证区的火线提取中的判对率都在80%以上,判错率都在17%以内;总体判对率达到86.44%,总体判错率为13.56%;表明本方法具有一定的可靠性,该方

法可满足林火扑救中对火线位置、长度和面积定量检测的需求。

References

- [1] Justice C O, Giglio L, Korontzi S, et al. The MODIS fire products[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 244 - 262.
- [2] Kaufman Y J, Ichoku C, Korontzi S, et al. Fire and smoke observed from the earth observing system MODIS instrument-production, and operational use [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(8): 1765 - 1781.
- [3] Giglio L, Descloitres J, Justice C O, et al. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, **87**: 273 - 282.
- [4] Kelh  V, Rauste Y, H ME T, et al. Combining AVHRR and ATSR satellite sensor data for operational boreal forest fire detection[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(8): 1691 - 1708.
- [5] QIN Xian-Lin, YI Hao-Ruo. A method to identify forest fire base on MODIS Data[J]. *Fire Science*, [覃先林, 易浩若. 基于MODIS数据的林火识别方法研究. *火灾科学*], 2004, **13**(2): 83 - 89.
- [6] QIN Xian-Lin, ZHANG Zi-Hui, LI Zeng-Yuan. An automatic forest fire identification method using HJ-1B IRS data [J]. *Remote Sensing Technology and Application* [覃先林, 张子辉, 李增元. 一种利用HJ-1B红外相机数据自动识别林火的方法. *遥感技术与应用*], 2010, **25**(4): 700 - 706.
- [7] XIAO Xia, SONG Wei-Guo, WANG Yan, et al. An improved method for forest fire spot detection based on variance between-class[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* [肖霞, 宋卫国, 王彦, 等. 基于类间方差的MODIS森林火灾火点检测方法. *光谱学与光谱分析*], 2010, **30**(8): 2065 - 2068.
- [8] QIN Xian-Lin, ZHANG Zi-Hui, LI Zeng-Yuan. An automatic forest fires identification methodology using FY3A/B VIRR Images [C]. *WIT Transactions on Ecology and The Environment*, 2012, 158, © 2012 WIT Press, 101 - 111.
- [9] Miller J D, Yool S R. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data[J]. *Remote Sensing of Environ-*

- ment, 2002, **82**: 481–496.
- [10] Giglio L, van der Werf G R, Randerson J T, *et al.* Global estimation of burned area using MODIS active fire observations[J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2006, **6**: 957–974.
- [11] Giglio L, Loboda T, Roy D P, *et al.* An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, **113**: 408–420.
- [12] ZHAO Xian-Wen. *Monitoring and assessment of remote sensing on forest fire—Theory and technology application* [M]. Beijing(赵宪文. 森林火灾遥感监测评价: 理论及技术应用. 北京: 中国林业出版社), 1995.
- [13] French N H F, Kasischke E S, Hall R J, *et al.* Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results[J]. *International Journal of Wildland Fire*, 2008, **17**: 443–462.
- [14] 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**: 3690–3707.
- [15] Sunderman S O, Weisberg P J. Remote sensing approaches for reconstructing fire perimeters and burn severity mosaics in desert spring ecosystems[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, **115**(9): 2384–2389.
- [16] Carmen Q, Alfonso F M, Alfred S, *et al.* Estimation of area burned by forest fires in Mediterranean countries: A remote sensing data mining perspective[J]. *Forest Ecology and Management*, 2011, **262**: 1597–1607.
- [17] Ononye A E, Vodacek A, Saber E. Automated extraction of fire line parameters from multispectral infrared images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2007, **108**: 179–188.
- [18] FU Ying-Chun, YUAN Xiu-Xiao, SONG Yan, *et al.* Automatic extraction of forest fire line using MODIS data by multi-spectral image gradient technique[J]. *Journal of Remote Sensing*[付迎春, 袁修孝, 宋妍, 等. 基于 MODIS 影像的森林火灾火线检测方法. *遥感学报*], 2009, **3**: 535–548.
- [19] QIN Xian-Lin, ZHU Xi, YANG Fei, *et al.* Sensitivity spectral range analysis for fire status information identification using hyper-spectrum images of TG-01[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*[覃先林, 朱曦, 杨飞, 等. 天宫一号高光谱数据探测火情状态敏感谱段分析. *光谱学与光谱分析*], 2013, **33**(7): 1908–1911.
- [20] <http://landsat.usgs.gov/index.php>