第18卷 第2期 2018年1月
1671—1815(2018)002-0312-08

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

Vol. 18 No. 2 Jan. 2018

引用格式:王鹏举, 潘 军, 蒋立军, 等. 林火目标遥感多光谱识别指数构建方法研究[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 312—319
Wang Pengju, Pan Jun, Jiang Lijun, et al. Method of remote sensing multispectral recognition index construction for forest fire[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 312—319

林火目标遥感多光谱识别指数构建方法研究

王鹏举[1] 潘 军[1*] 蒋立军[1] 邢立新[1] 刘 畅[2] 王 婷[1] 王昱淞[3]
(吉林大学地球探测科学与技术学院[1],长春 130026;吉林农业大学中药材学院[2],长春 130118;中国人民解放军31693部队[3],哈尔滨 150036)

摘 要 针对现有高温目标识别方法中波段筛选、识别指数构建缺少数学定量评判指标的问题,以内蒙古大兴安岭地区一次森林火灾为例,选用 Landsat 8 OLI 遥感影像数据进行林火目标多光谱识别指数构建方法的研究。研究发现,基于方差分析原理的"可分性度量"指标可作为高温目标识别方法研究中波段筛选、识别指数构建的数学定量评判指标,改进以往识别方法的定性分析方式。在区分林火目标与其他地物过程中,上述数学定量评判指标均具有遥感目标识别与分类的物理意义;其分类适宜性对林火目标的识别与提取具有重要作用。经过验证分析,利用"可分性度量"评判指标筛选出的适宜火点识别指数,在实际分类中效果良好、精确度较高,与理论结果相吻合。

关键词 林火 遥感 可分性度量 多光谱 火点识别指数
中图法分类号 TP751; **文献标志码** B

在环境监测、灾害预警、资源调查等工作中,利用遥感信息技术识别高温目标(林火、火山喷发、油井火炬、金属冶炼厂、煤层自燃等)具有重要作用[1]。以往,高温目标遥感信息提取中主要采用中、热红外数据[2];但由于其受大气、背景、空间分辨率的影响,在对局地高温目标地物异常提取中难以达到良好效果。近年来,已有学者提出利用短波红外数据进行高温目标识别与提取[3];目前已有的高温目标识别方法主要有阈值法[4]、归一化火点指数法(NDFI)[5]、马氏距离法[6]、波段组合法[7]、因子分析法[8]等。通过研究发现,部分识别方法中涉及的波段选取仅是通过经验法或定性分析,缺少客观地定量分析。如何确定适宜区分高温目标的特征波段,以及何种识别指数适宜提取高温目标成为新的研究问题。本文利用可分性度量指标对 Landsat8 OLI 数据进行波段筛选以及构建识别指数等研究,从而实现精确识别和提取高温目标信息的目的。

1 可分性度量及波段筛选原理

1.1 可分性度量

方差分析[9]是依据数据的变化特征、通过划分数据差异来源来分析变量间关系的一种分析方法,主要用来研究分类型自变量与数值型因变量之间的关系。方差分析中数据误差来源主要有两种:一是系统误差,即获得数据的条件不同引起的误差,也称组间离差,用变量在各组的均值与总均值之偏差平方和表示;二是随机误差,即同一条件下由偶然因素引起的误差,也称组内离差,用变量在各组的均值与该组内变量值之偏差平方和的总和表示。其方法是检验总体间差异(组间离差、系统误差)与总体内差异(组内离差、随机误差)的关系[10]。

在实际工作中,常会遇到各组观测数据的构成并非是 $n \times m$ 型的矩阵,每组数据包含不同个数的观测点,本文引入可分性度量评价指标,具体算法表述如下:

$$\bar{x} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j} x_{ij};\quad k = \sum_{j=1}^{m} n_j \tag{1}$$

$$\overline{x_j} = \frac{1}{n_j}\sum_{i=1}^{n_j} x_{ij};\quad j = 1,2,\cdots,m \tag{2}$$

式中,$\bar{x}$、$\overline{x_j}$ 分别为数据的总均值和各组均值;x_{ij} 表示第 j 类样本的第 i 个样品点;n_j 表示第 j 类样本的样品点总个数。因此

$$Q_e = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}(x_{ij} - \overline{x_j})^2;\quad j = 1,2,\cdots,m \tag{3}$$

$$Q_A = \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n_j}(x_j - \bar{x})^2 \tag{4}$$

式中,Q_e 为组内离差平方和;Q_A 为组间离差平方和。

2017年6月20日收到

第一作者简介:王鹏举(1990—),男,硕士研究生。研究方向:地图学与地理信息系统。E-mail:pengjujiayou@126.com。
* 通信作者简介:潘 军(1971—),男,副教授。研究方向:遥感与地理信息系统。E-mail:panj@jlu.edu.cn。

观察单变量因素 A(波段或指数)的影响是否显著需要通过假设检验来确定组间离差平方和是否显著大于组内离差平方和，其基本思路和步骤如下。

(1)以 $x_j \sim N(\mu_j,\sigma^2)$；$j=1,2,\cdots,m$ 为前提作出如下假设：$H_0:\mu_1=\mu_2=\cdots=\mu_m$，即假设各组均值相等。

(2)当原假设 H_0 成立时，可分性度量评价指标

$$F=\frac{Q_A/f_A}{Q_e/f_e}\sim F[f_A,f_e] \tag{5}$$

式(5)中，f_A 为 Q_A 的自由度，$f_A=m-1$；f_e 为 Q_e 的自由度，$f_e=k-m$。

(3)给定信度 α(一般可取 0.1、0.05、0.01)，查表求临界值 $F_\alpha(f_A,f_e)$，计算式(5)中左边的 F 值，若 $F>F_\alpha(f_A,f_e)$，则在信度 α 下拒绝原假设 H_0，认为单变量因素 A 影响显著，即各组均值不等；否则接受 H_0。

以单个波段的两类地物区分为例，当波段 Bi 和波段 Bj (i 和 j 均为遥感卫星图像波段量，$i,j=1,2,\cdots,7$) 的统计量 F 值均大于 $F_\alpha(f_A,f_e)$时，认为波段 Bi 和 Bj 均影响显著。如图 1 所示，若 $F_{Bi}>F_{Bj}$或 $F_{Bi}\gg F_{Bj}$，则表明波段 Bi 更具有区分两类地物 p、q 的优势。利用此方法，可以对比分析不同波段、不同指数区分火点与常温地物的适宜性。

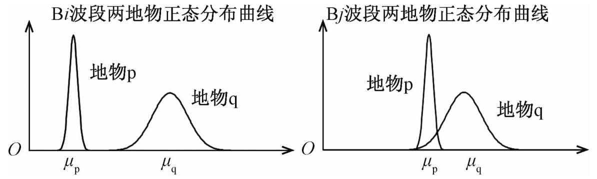

图 1　Bi、Bj 波段两地物正态分布曲线

Fig. 1　The normal distribution curve of Bi and Bj bands in two kinds of objects

1.2　波段筛选原理

通过可分性度量评价指标可以分析数据误差的来源，将造成因变量差异的因素进行分类，筛选出需要研究的因子，将提取的这些因子重新组合形成新的评价指数，利用新的评价指数从遥感数据中提取感兴趣信息。在遥感图像上，各地物在不同波段显示出不同的波谱反射特性，利用上述评判指标，能够进行各类地物之间在不同环境(即波段与指数)下可区分性的评价。同一环境下对同类地物多个像元点之间的差异称为组内离差，不同地物间的数据差异称为组间离差。例如，各类地物训练样本共十类，遥感数据包含七个波段，其中火点包含的 N 个像元点在每个波段之间的差异为组内离差，火点与其他训练样本在每个波段之间的差异为组间离差。如果火点与其他样本在某个波段的组间离差显著大于火点在该波段的组内离差，则可以认为该波段影响显著，否则该波段的影响不显著。影响显著的波段是能够有效筛选出可以区分火点与其他训练样本的特征波段，利用这些特征波段构建火点识别指数，经非线性组合建立对火点目标识别具有特定意义的定量参数，即通过差值、比值以及和差比的复合形式构建火点识别指数，对构建的火点识别指数再次进行可分性度量分析，筛选组间离差显著大于组内离差的火点识别指数，同时分析研究不同火点识别指数适宜区分的训练样本，最后对选定的适宜火点识别指数提取效果进行分析验证。

2　研究区概况及数据分析

研究区位于内蒙古大兴安岭地区，植被覆盖度高，属于寒温带大陆性季风气候。2015 年 6 月 18 日 18 时 30 分，奇乾林业局奇乾林场发生森林火灾，起火原因判断为雷击引发，6 月 20 日凌晨 4 时外围明火被扑灭。研究数据选用该地区 2015 年 6 月 19 日的 Landsat8 OLI 数据，对基础数据进行了辐射定标、FLAASH 校正等一系列预处理，并通过裁剪得到研究区图像(图 2)。

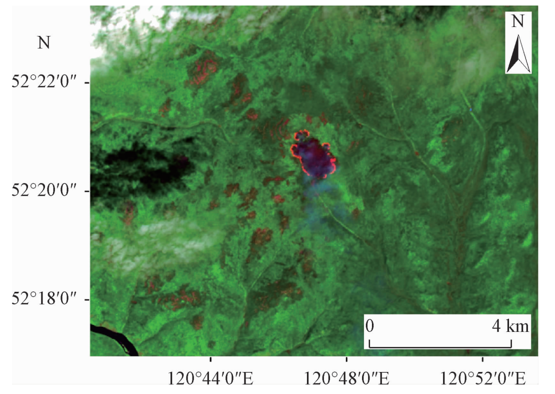

图 2　研究区 Landsat8 OLI 遥感影像 7(R)5(G)3(B)

Fig. 2　Remote sensing image of study area composed of Landsat8 OLI 7(R)5(G)3(B)

研究区内主要包含火点、灌木、火烧迹地、林地和水体共 5 类地物，为进一步探究火烧迹地的新旧、林地的阴阳坡以及云等对研究的影响，对遥感影像解译时将其进行更细致的划分。解译分类结果主要为火点、灌木、火烧迹地(旧)、火烧迹地(新)、林地(阳坡)、林地(阴坡)、林地(云阴影)、水体、云(浓厚)和云(稀薄)共 10 类训练样本。检验 10 类训练样本的 J-M 距离和散度，实验结果表明，训练样本的可分离性满足要求。经统计分析得出研究区内各类训练样本“视反射率”[5]的均值曲线(图 3)。

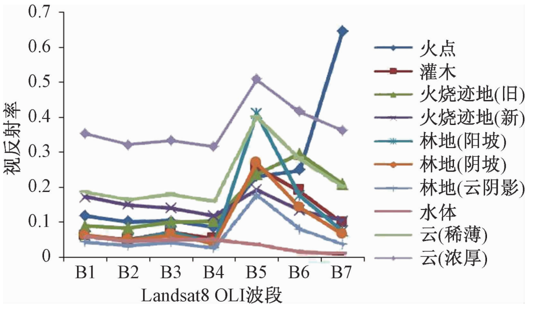

图 3 10 类训练样本“视反射率”曲线

Fig. 3 Ten types of training samples “apparent reflectivity” curve

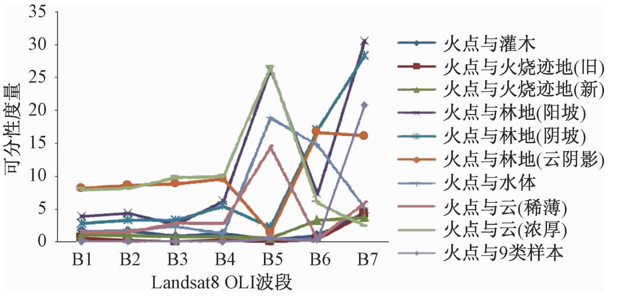

图 4 火点与其他训练样本的可分性度量曲线

Fig. 4 The separable measure curve of fire points and other training samples

从图 3 中可以看出，火点在第 7 波段的视反射率均值明显高于其他训练样本，云（浓厚）整体视反射率较高，其余训练样本在第 7 波段视反射率均小于 0. 3。观察第 5、6、7 波段不难发现，除火烧迹地（旧）在第 6 波段有上升外，其余训练样本在第 5、6、7 波段的视反射率均表现为下降趋势，唯独火点视反射率呈现显著上升。利用式（5）计算整体 10 类训练样本七个波段的可分性度量指标，显示整体区分 10 类训练样本最优波段是第 5 波段（B5），其余依次是第 6 波段（B6）、第 7 波段（B7）、第 4 波段（B4）、第 3 波段（B3）、第 2 波段（B2）、第 1 波段（B1）。

3 火点识别指数建立及选取

3. 1 波段的筛选及最优波段的确定

为筛选能够区分高温目标（火点）与常温地物（灌木、火烧迹地、林地等）的特征波段，以火点和灌木区分为例，统计可分性度量指标显示第 7 波段区分火点与灌木效果最好，并且明显优于其他波段。观察第 7 波段的灰度图像可以看出火点极为明亮，灌木却呈暗灰色，目视解译能够明显区分火点和灌木。由 OLI 数据波段性能得知，第 7 波段（2. 11 ~ 2. 29 μm）对于高温目标具有较强的识别能力，因此认为第 7 波段能够有效区分火点和灌木，可作为区分火点和灌木的特征波段。

按照上述筛选方法对火点与火烧迹地（新）、火点与林地（阳坡）、火点与水体等情况逐一单独分析以及火点与其他 9 类训练样本作为整体进行分析，结果显示，对于上述十类情况，区分高温目标（火点）与常温地物的特征波段主要是 B5、B6、B7，其中 B5 可有效区分火点与云（稀薄）、云（浓厚），B6 可有效区分火点与林地（云阴影）、水体，B7 可有效区分火点与灌木、火烧迹地（旧）、火烧迹地（新）、林地（阳坡）、林地（阴坡）以及火点与整体九类常温训练样本的区分（图 4）。

为研究建立火点识别指数的最优波段，分别将火点与其他 9 类训练样本以及 9 类训练样本整体分别进行可分性度量指标计算，同时对结果排序分析。本文选择前三名的统计结果作为选择构建火点识别指数的最优波段，前三名概率统计中 B5、B6、B7 尤为突出，三个波段概率统计和占前一名总概率的 100%、前两名总概率的 85%、前三名总概率的 70%，因此选择 B5、B6、B7 作为构建火点识别指数的最优波段。

3. 2 火点识别指数的构建

结合归一化火点指数（NDFI），本文主要是使用差值、比值以及和差比等形式进行计算，经非线性组合建立对火点目标识别具有特定意义的定量参数。主要有如下组合。

（1）差值火点识别指数：B7 － B5；B7 － B6；B6 － B5。

（2）比值火点识别指数：B7/B5；B7/B6；B6/B5。

对比值指数作以 10 为底的对数运算，得到三种对数火点识别指数，结果分别记为：

$\lg(B7) - \lg(B5)$；

$\lg(B7) - \lg(B6)$；

$\lg(B6) - \lg(B5)$。

（3）两波段复合火点识别指数：

$(B7 - B6)/(B7 + B6)$；

$(B7 - B5)/(B7 + B5)$；

$(B6 - B5)/(B6 + B5)$。

（4）三波段复合火点识别指数：

$(B7 - B6 - B5)/(B7 - B6 + B5)$；

$(B7 + B6 - B5)/(B7 + B6 + B5)$；

$(B7 - B5 - B6)/(B7 - B5 + B6)$；

$(B7 + B5 - B6)/(B7 + B5 + B6)$；

$(B6 - B5 - B7)/(B6 - B5 + B7)$；

$(B6 + B5 - B7)/(B6 + B5 + B7)$。

通过偏度和峰度对火点识别指数正态分布情况进行检验，当 $|r1| < 3 * \mathrm{Sqrt}(6/N) = 0.6255$、$|r2| < 3 * \mathrm{Sqrt}(24/N) = 1.2511$（其中 N 为火点样本个数）

同时满足时符合正态分布，检验结果（表 1）表明，两波段和三波段复合火点识别指数正态性较好，对称分布明显，陡缓程度与正态分布相同；差值火点识别指数正态性一般，偏度和峰度存在不同时满足和都不满足的情况；比值火点识别指数中（B7/B6）正态性较好，另外两种指数正态性较差，取对数后除 lg（B6）－lg（B5）外整体接近于正态分布。由于偏度和峰度检验较为严格且需要观测数据较大，对于本文火点样本有限的情况，近似地认为上述火点识别指数整体接近于正态分布，满足数据分析要求。

3.3　火点识别指数的筛选

火点识别指数选取原则主要从两方面出发，一方面是 10 类训练样本作为整体进行筛选，筛选出差值、比值以及复合火点识别指数等各类中较适宜的火点识别指数，最后再进行综合选择；另一方面是单独筛选，将火点与其他 9 类训练样本以及 9 类训练样本的合集依次利用可分性度量指标进行统计分析，可以有效得到识别火点与各类常温地物相对应的适宜火点识别指数。

3.3.1　整体筛选适宜指数

通过比较可分性度量评价指标（图 5），可以看出效果较好的火点识别指数主要分布在两波段和三波段复合指数以及对数指数，差值和比值指数效果一般，部分三波段复合指数效果不佳。其中效果较好的火点识别指数依次是（B7 － B6）/（B7 + B6）、lg（B7）－lg（B6）、（B7 － B6 － B5）/（B7 － B6 + B5）、（B6 + B5 － B7）/（B6 + B5 + B7）、（B7 － B5）/（B7 + B5）和 lg（B7）－lg（B5）。

3.3.2　单独筛选适宜指数

利用波段筛选原理，以火点识别指数为单位，研究分析火点与每一类训练样本的适宜指数，构建的 18 种火点识别指数区分火点与其他样本的可分性度量指标进行对比分析（表 2），每一行的最大值表示各指数最适宜区分的两地物类型，每一列的最大值表示两地物区分时最适宜的火点识别指数。例如，根据可分性度量指标显示，火点识别指数 B7 － B6 在区分火点与林地（阳坡）、林地（阴坡）时效果较好，区分火点与火烧迹地（新）、水体时容易误判。在实际分类效果中，利用火点识别指数 B7 － B6 识别火点时，能够正确区分火点与灌木、火烧迹地（旧）、林地（阳坡）和林地（阴坡），但同时也存在误判，误判对象主要为火烧迹地（新）、水体以及部分林地（云阴影）和云（浓厚），识别结果恰好与其对应的可分性度量指标吻合。

表 1　各火点识别指数偏度峰度

Table 1　The skewness and kurtosis of the fire point identification index

火点识别指数	偏度（$\|r1\|$）	峰度（$\|r2\|$）	火点识别指数	偏度（$\|r1\|$）	峰度（$\|r2\|$）
B7 － B5	1.066 0	0.854 6	（B6 － B5）/（B6 + B5）	1.160 3	1.481 7
B7 － B6	0.914 5	0.491 7	（B7 － B5）/（B7 + B5）	0.060 8	0.768 7
B6 － B5	2.001 6	7.078 0	（B7 － B6）/（B7 + B6）	0.426 0	0.032 9
B6/B5	2.557 2	10.744 7	（B7 － B6 － B5）/（B7 － B6 + B5）	0.316 8	0.378 9
B7/B5	1.398 3	1.871 5	（B7 + B6 － B5）/（B7 + B6 + B5）	0.228 8	0.794 2
B7/B6	0.451 3	0.011 4	（B7 － B5 － B6）/（B7 － B5 + B6）	0.795 4	0.321 5
lg（B7）－lg（B6）	0.17	0.19	（B7 + B5 － B6）/（B7 + B5 + B6）	0.360 2	0.075 3
lg（B7）－lg（B5）	0.45	0.40	（B6 － B5 － B7）/（B6 － B5 + B7）	0.040 3	0.410 5
lg（B6）－lg（B5）	1.29	2.21	（B6 + B5 － B7）/（B6 + B5 + B7）	0.029 5	0.632 0

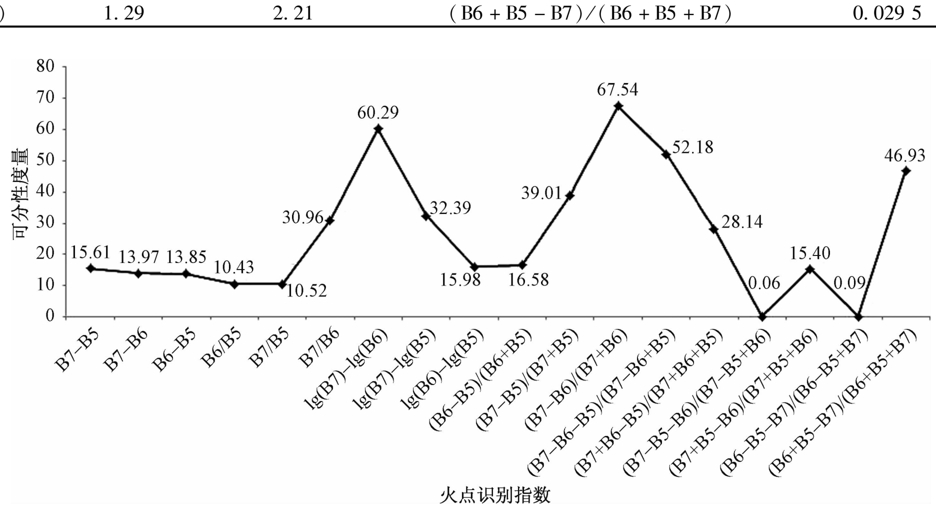

图 5　各火点识别指数可分性度量对比

Fig. 5　The comparison of the separable measure of fire point identification index

表 2 十类情况下各火点识别指数的可分性度量

Table 2 The separable measure of fire point identification index in ten cases

火点识别指数	火点与灌木	火点与火烧迹地(旧)	火点与火烧迹地(新)	火点与林地(阳坡)	火点与林地(阴坡)	火点与林地(云阴影)	火点与水体	火点与云(稀薄)	火点与云(浓厚)	火点与9 类样本
B7 - B5	4.81*	4.33	3.13	48.37*	30.95*	12.87	2.50	11.75	10.32	30.10
B7 - B6	5.26*	8.21*	3.39	34.45*	27.90*	12.52*	3.11	10.63	10.03	91.61
B6 - B5	1.69*	0.29	1.18*	46.27*	21.53*	7.33*	0.33*	9.65*	5.61*	2.85*
B6/B5	1.29*	0.17	1.36*	27.32*	17.75*	11.32*	4.06*	3.45*	1.80*	4.16*
B7/B5	3.57	3.49	2.63	26.40	22.54	12.05	3.40	6.90	6.10	51.62
B7/B6	11.59*	15.08*	7.28*	80.00*	68.96*	35.72*	9.04*	19.69*	17.67*	100.73*
lg(B7) - lg(B6)	43.57*	37.83*	17.48*	297.69*	253.77*	105.28*	29.31*	45.86*	39.73*	32.53*
lg(B7) - lg(B5)	20.89*	6.72	10.94	178.25*	140.13*	62.18*	26.63*	28.82*	20.66*	14.48
lg(B6) - lg(B5)	2.22	0.25	2.51	56.03*	33.48*	19.22*	13.04*	6.27	2.58	3.65
(B6 - B5)/(B6 + B5)	2.28*	0.26*	2.57*	58.46*	34.67*	20.47*	12.34*	6.44*	2.65*	3.77*
(B7 - B5)/(B7 + B5)	29.79*	7.47*	15.31*	259.17*	201.22*	94.64*	35.97*	39.92*	28.47*	18.25*
(B7 - B6)/(B7 + B6)	56.84*	46.68*	21.56*	379.19*	325.50*	131.66*	38.44*	55.30*	48.95*	33.59*
(B7 - B6 - B5)/(B7 - B6 + B5)	68.38*	78.67*	23.57*	253.95*	253.15*	104.88*	30.59*	62.36*	52.22*	51.17*
(B7 + B6 - B5)/(B7 + B6 + B5)	18.37*	2.47	11.70	172.52*	127.40*	56.56*	38.22*	30.24*	19.05*	9.89
(B7 - B5 - B6)/(B7 - B5 + B6)	0.00	2.35	0.12	2.28*	3.58*	0.19*	103.17*	0.04	15.41	0.00
(B7 + B5 - B6)/(B7 + B5 + B6)	20.44*	37.52*	8.73*	6.79	22.42*	3.03	0.99	26.40*	27.67*	3.42
(B6 - B5 - B7)/(B6 - B5 + B7)	0.00	0.25	0.11	7.23*	7.53*	0.41*	241.51*	0.03	3.47	0.01
(B6 + B5 - B7)/(B6 + B5 + B7)	25.35*	16.80*	13.78*	204.80*	165.75*	82.52*	25.07*	36.77*	28.95*	33.52*

注：* 代表实际分类效果中区分正确。

对上述指数逐一分析，各指数实际分类效果与其对应可分性度量指标能够基本吻合。其中，火点识别指数 B7/B6、lg(B7) - lg(B6)、(B7 - B6)/(B7 + B6)、(B7 - B5)/(B7 + B5)、(B7 - B6 - B5)/(B7 - B6 + B5)、(B6 + B5 - B7)/(B6 + B5 + B7)识别效果较好，不存在大面积误判情况。火点识别指数 B6 - B5、B6/B5 和(B6 - B5)/(B6 + B5)显示区分火点与其他地物效果较好且不存在误判情况，其主要原因是由于识别提取的点数较少，区分火点的同时未能较好的提取火点。另外，其余各指数均存在不同程度的误判情况。

将火点以外的其余九类训练样本作为整体与火点进行区分，若某一火点识别指数可分性较好，则直接有利于火点的识别和提取，不会存在对某类地物误判的情况。各指数区分火点与 9 类样本整体的可分性度量指标显示，能够较好区分火点的识别指数主要是 B7/B6、B7 - B6、B7/B5、(B7 - B6 - B5)/(B7 - B6 + B5)、(B7 - B6)/(B7 + B6)、(B6 + B5 - B7)/(B6 + B5 + B7)和 lg(B7) - lg(B6)。实际分类结果表明，除 B7 - B6 和 B7/B5 外，其他火点识别指数能够较正确区分火点与 9 类样本整体，不存在某类地物误判情况，与其可分性度量指标恰好吻合。

本文的研究目的主要是选择适宜的火点识别指数以提取火点目标，如若存在某种训练样本与火点难以被选取的适宜火点识别指数区分时，可利用其他的火点识别指数进行辅助区分，最终准确提取火点信息。

3.3.3 筛选结果

通过火点识别指数不同的筛选方式以及区分火点的不同形式，本文认为最适宜火点识别指数为(B7 - B6 - B5)/(B7 - B6 + B5)，备选火点识别指数为(B7 - B6)/(B7 + B6)、lg(B7) - lg(B6)、(B7 - B5)/(B7 + B5)和(B6 + B5 - B7)/(B6 + B5 + B7)。

4 火点识别指数效果评价

4.1 火点识别指数提取效果

参考前人设定阈值的方法，根据概率论原理，由于林火的火点识别指数接近于正态分布，故参照背景与异常划分的原理，取均值加减 2 倍标准差作为林火高温目标的识别阈值(表 3)。对比该地区不同时期的遥感图像可以得知，适宜火点识别指数及备选指数的提取点数及提取效果较能反映真实情况(图 6)。

4.2 识别精度分析

精度分析方法是以人工目视解译的火点作为标准的火点，将适宜火点识别指数提取的火点与之进行对比，详细分析正确率 P、漏判率 R，同时利用正确率和漏判率的调和平均值 M 来综合进行精度评价[11]，M 值越高，表示其火点识别指数性能越好。

表 3　适宜火点识别指数提取阈值

Table 3　Extraction threshold of suitable fire point recognition index

火点识别指数	Mean	Stdev	阈值	提取点数
(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)	0.188 3	0.270 1	−0.351 9	200
(B7 − B6)/(B7 + B6)	0.418 8	0.099 5	0.219 9	207
lg(B7) − lg(B6)	0.392 8	0.104 9	0.183 0	213
(B7 − B5)/(B7 + B5)	0.434 3	0.160 5	0.113 2	211
(B6 + B5 − B7)/(B6 + B5 + B7)	−0.114 6	0.152 0	0.189 4	209

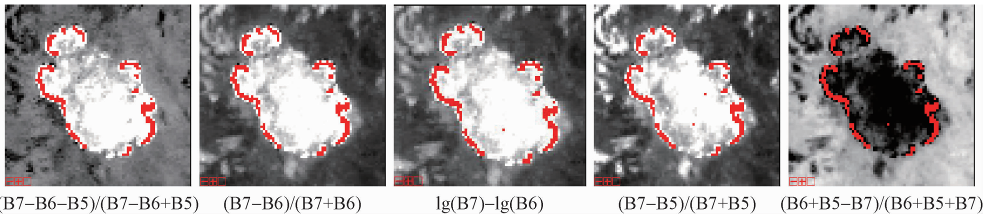

图 6　适宜火点识别指数提取效果

Fig. 6　Extractioneffect of suitable fire point recognition index

$$M = 2P(1 - R)/(P + 1 - R) \tag{6}$$

式(6)中,P 是火点识别指数提取的真正火点个数占提取火点总数的比率;R 是火点识别指数未提取的真正火点占标准火点的比率。

经目视解译标准火点共 218 个,分别与适宜火点识别指数(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)提取的火点以及备选指数(B7 − B6)/(B7 + B6)、lg(B7) − lg(B6)、(B7 − B5)/(B7 + B5)、(B6 + B5 − B7)/(B6 + B5 + B7)提取的火点进行对比分析(表 4)。将适宜火点识别指数(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)提取的 200 个火点与标准火点对比分析,其中 198 个火点与标准火点重合,有 20 个火点未能识别提取,对这 20 个火点逐一分析,发现这 20 个火点均是分布在燃烧区与未燃烧区过渡区域,波谱曲线与其他大部分火点略有不同,这是由于像元点内常温地物与高温地物混合所致。其中有 2 个火点为错判点,均临近于燃烧区内侧,受周边火点的影响其第 7 波段的反射率较高以至于错判为火点。

表 4　适宜火点识别指数识别精度

Table 4　Recognition accuracy of suitable fire point recognition index

火点识别指数	提取点数	P/%	R/%	M/%
(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)	200	99.00	9.17	94.74
(B7 − B6)/(B7 + B6)	207	96.62	8.26	94.12
lg(B7) − lg(B6)	213	94.84	7.34	93.74
(B7 − B5)/(B7 + B5)	211	95.26	7.80	93.71
(B6 + B5 − B7)/(B6 + B5 + B7)	209	96.65	7.34	94.61

适宜火点识别指数(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)保持较高正确率的同时其漏判率也很高,通过调和平均值 M 综合评价,该火点识别指数性能最好,与可分性度量理论结果能够吻合,同时另外四种指数 M 值也同样较高,具有一定识别提取火点的能力。

4.3　温度反演分析

根据能量守恒原理,结合黑体辐射定律、维恩位移定律,在已经设定的模型假定条件下,通过理论推导的方法,得到了短波红外遥感高温目标温度反演物理模型[12,13]:

$$T = \frac{hc}{\lambda k}\{\ln\{2\pi hc^2\varepsilon S\{\lambda^5[\rho_0 E - \rho E(1 - S) - (1 - \varepsilon)ES]\}^{-1} + 1\}\}^{-1} \tag{7}$$

式(7)中,h 是 Plank 常量,$h = 6.63 \times 10^{-34}$ Js;c 是真空中的光速,$c = 3 \times 10^8$ m/s;λ 为波长,$\lambda = 2.201$ μm;k 是玻尔兹曼常数,$k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K;ε 是高温目标发射率,目前估算较为困难,无法用光谱仪测定,因此用黑体近似替代,$\varepsilon = 1$;由于林火面积大,覆盖区域大于单个像元面积 30 m × 30 m,视面积比为 1,$S = 1$;ρ_0 是高温混合像元视反射率;ρ 是常温地物反射率,用高温目标周围常温目标像元代替,$\rho = 0.091\,3$;E 是穿过大气后的太阳辐照度,$E = T_\theta E_0 \cos\theta / d_s^{\,2}$。其中,$T_\theta$ 是大气透过率,本文用 MODTRAN 近似估算 $T_\theta = 0.918\,2$;E_0 是大气上界太阳辐照度,$E_0 = 77.971\,18$ W·m^{-2}·μm^{-1};θ 是太阳天顶角,$\theta = 31.122\,6°$;d_s 是日地天文单位距离,$d_s = 1.016\,087$。

通过模型计算最适宜火点识别指数(B7 − B6 − B5)/(B7 − B6 + B5)提取的火点温度(图 7),从温

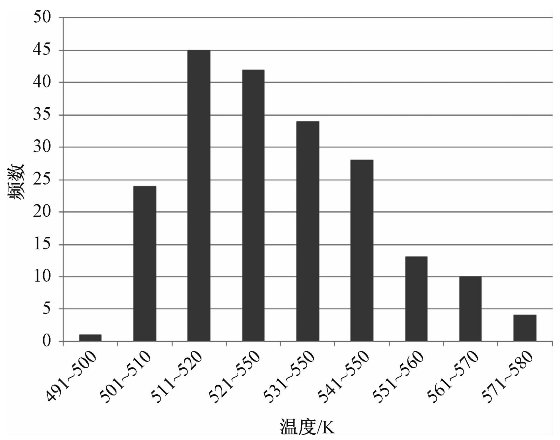

图 7　温度反演结果

Fig. 7　The results of temperature inversion

度反演结果分布情况来看,大部分火点温度介于 501 ~580 K 之间,个别火点温度介于 491 ~500 K。物理模型中面积比 S 假设为 1,识别温度为 491 ~580 K 之间,但由于实际着火面积不保证能充满整个 30 m×30 m 的像元,所以实际温度要高于模型反演温度,能够说明选取的最适宜火点识别指数(B7－B6－B5)/(B7－B6＋B5)提取的火点是相对准确的。

5　结论

(1)基于方差分析原理的"可分性度量"指标可作为高温目标识别方法研究中波段筛选、识别指数构建的数学定量评判指标,改进以往识别方法的定性分析方式,有助于对高温目标识别方法的进一步研究。

(2)利用可分性度量评判指标构建的火点识别指数均具有遥感目标识别与分类的物理意义,其分类适宜性对火点目标的精确识别具有重要作用。

(3)研究表明,利用可分性度量指标筛选出适宜区分火点的特征波段分别为 NIR、SWIR1 和 SWIR2。利用特征波段构建火点识别指数,确定适宜火点识别指数为(B7－B6－B5)/(B7－B6＋B5),备选指数为(B7－B6)/(B7＋B6)、lg(B7)－lg(B6)、(B7－B5)/(B7＋B5)和(B6＋B5－B7)/(B6＋B5＋B7)。

(4)经精度验证分析,适宜火点识别指数(B7－B6－B5)/(B7－B6＋B5)的识别正确率为 99%,备选指数(B7－B6)/(B7＋B6)、lg(B7)－lg(B6)、(B7－B5)/(B7＋B5)和(B6＋B5－B7)/(B6＋B5＋B7)的正确率为 96.62%、94.84%、95.26% 和 96.65%,精确度较高,可以用于高温目标的识别。同时经温度反演分析,适宜火点识别指数(B7－B6－B5)/(B7－B6＋B5)大部分火点温度介于 500 ~580 K 之间,能够说明该指数提取的火点是相对准确的,与上述结果吻合。

参　考　文　献

1　袁　悦,潘　军,邢立新,等. 基于 Fisher 两类判别的高温目标精确识别方法. 科学技术与工程,2015;15(9):109—113
Yuan Yue,Pan Jun,Xing Lixin, *et al*. Identification of high temperature targets based on Fisher two types discrimination. Science Technology and Engineering, 2015; (9):109—113

2　朱怀松,刘晓锰,裴　欢. 热红外遥感反演地表温度研究现状. 干旱气象,2007;(2):17—21
Zhu Huaisong, Liu Xiaomeng, Pei Huan. Summary on retrieval of land surface temperature using thermal infrared remote sensing. Arid Meteorology, 2007;25 (2):17—21

3　Pan J, Xing L X, Wen J C, *et al*. Inversion method study on short wave infrared remote sensing data high temperature surface feature temperature. Image and Signal Processing. 2009; (2): 1—4

4　Flannigan M D, Haar T H V. Forest fire monitoring using NOAA satellite AVHRR. Canadian Journal of Forest Research, 1986; 16(5): 975—982

5　朱亚静,邢立新,潘　军,等. 短波红外遥感高温地物目标识别方法研究. 遥感信息, 2011;(6):33—36,41
Zhu Yajing, Xing Lixin, Pan Jun, *et al*. Method of identifying high-temperature target using shortwave infrared remote sensing data. Remote Sensing Information, 2011;(6):33—36,41

6　于一凡,潘　军,邢立新,等. 基于马氏距离的遥感图像高温目标识别方法研究. 遥感信息, 2013; 28(5):90—94
Yu Yifan, Pan Jun, Xing Lixin, *et al*. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on Mahalanobis distance. Remote Sensing Information, 2013;28(5):90—94

7　孔祥生,苗　放,刘鸿福,等. 遥感技术在监测和评价土法炼焦污染源中的应用. 成都理工大学学报(自然科学版),2005;32(1): 92—96
Kong Xiangsheng, Miao Fang, Liu Hongfu, *et al*. Application research of remote sensing technique in monitoring pollution source by digenous coke-production. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition),2005;32(1): 92—96

8　Yu Y, Pan J, Xing L, *et al*. Identification of high temperature targets in remote sensing imagery based on factor analysis. Journal of Applied Remote Sensing, 2014; 8(1):1—8

9　贾　婧. 方差分析概述. 商业文化, 2008; (7):219
Jia Jing. The overview of variance analysis. Business Culture, 2008; (7):219

10　纪宏金,时艳香,陆继龙. 地球化学数据统计分析. 长春: 吉林大学出版社,2014
Ji Hongjin, Shi Yanxiang, Lu Jilong. The analysis of geochemical data statistics. Changchun: Jilin University Press, 2014

11　何　阳,杨　进,马　勇,等. 基于 Landsat-8 陆地卫星数据的火点检测方法. 红外与毫米波学报, 2016; 35(5):600—608
He Yang, Yang Jin, Ma Yong, *et al*. A method for fire detection using Landsat-8 data. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2016; 35(5):600—608

12　于一凡. 短波红外遥感高温目标温度反演模型研究. 长春: 吉林

大学, 2014
Yu Yifan. The study of high-temperature targets temperature retrieval model in shortwave infrared remote sensing. Changchun: Jilin University, 2014

13 Yu Y, Xing L, Pan J, *et al*. Study of high temperature targets identification and temperature retrieval experimental model in SWIR remote sensing based Landsat-8. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016; 46:56—62

Method of Remote Sensing Multispectral Recognition Index Construction for Forest Fire

WANG Peng-ju[1], PAN Jun[1*], JIANG Li-jun[1], XING Li-xing[1], LIU Chang[2], WANG Ting[1], WANG Yu-Song[3]

(College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University[1], Changchun 130026, China; College of Chinese Medicine Materials, Jilin Agricultural University[2], Changchun 130118, China; Unit 31693 of PLA[3], Harbin 150036, China)

[**Abstract**] Aiming at the problem of lack of mathematical quantitative evaluation index in band selection and identification index of existing high temperature target recognition method, a forest fire in Daxing'anling area of Inner Mongolia is taken as an example. Landsat8 OLI remote sensing image data are used to study the multispectral identification index of forest fire target. It is found that the "separable measure" index based on the variance analysis principle can be used as a mathematical quantitative evaluation index for the selection of the band in the high temperature target recognition method and the qualitative analysis method of the previous identification method. In the process of distinguishing between forest fire targets and other objects, the mathematical quantitative evaluation indexes all have the physical meaning of remote sensing target recognition and classification, and its classification suitability plays an important role in the identification and extraction of forest fire targets. After verification and analysis, the appropriate fire point identification index selected by the "separable measure" index is effective and accurate in the actual classification, which is consistent with the theoretical results.

[**Key words**] forest fire　remote sensing　separable measure　multispectral　fire point identification index