

文章编号:0253-9993(2012)12-2053-07

# 煤田火区自然地物热红外发射率光谱测量及其特征

夏 军<sup>1,2</sup>,塔西甫拉提·特依拜<sup>1,2</sup>,张 飞<sup>1,2</sup>,蔡忠勇<sup>3</sup>,魏 军<sup>3</sup>,姬洪亮<sup>1,2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院,新疆 乌鲁木齐 830046;2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830046;3. 新疆煤田灭火工程局,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘 要:**利用傅里叶变换红外光谱仪对新疆水西沟煤田火区自然地物进行发射率光谱测量,采用平滑光谱迭代法对温度和发射率进行分离反演,得到精确的地物温度和发射率,对 7 种典型自然地物热红外发射率光谱特征进行分析,并选择 ASTER 影像 5 个热红外波段进行数据模拟。结果表明:① 波长在 8~13 μm,地物热红外发射率光谱特征存在明显差异,尤其是在 8.5~10.0,11.3 和 12~13 μm 处,可作为识别不同地物的特征波段;② 发射率光谱在 ASTER 影像 5 个热红外波段变化趋势呈现明显区别,在遥感影像对火区地物信息的提取研究中具有实际应用价值;③ 得到的地物发射率为火区地表温度的反演提供了精确的参数,可以提高温度反演的精度。

**关键词:**煤田火区;地表温度;傅里叶变换红外光谱仪;发射率;平滑光谱迭代法

**中图分类号:**TD75 **文献标志码:**A

## Thermal infrared emissivity spectrum and its characteristics of natural surface objects in coalfield fires area

XIA Jun<sup>1,2</sup>, TASHPOLAT · Tiyip<sup>1,2</sup>, ZHANG Fei<sup>1,2</sup>, CAI Zhong-yong<sup>3</sup>, WEI Jun<sup>3</sup>, JI Hong-liang<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. Key Laboratory of Oasis Ecology under Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Xinjiang Coal Fire Fighting and Engineering Bureau, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** The Fourier transform infrared spectrometer was used to measure the emissivity of natural surface objects in Shuixigou coalfield fires area of Xinjiang. The smooth spectral iterative method was used to separate the temperature and emissivity, and the accurate temperature and emissivity of the surface objects were obtained. The thermal infrared emissivity spectral characteristics of seven typical types natural surface objects were analyzed, and five ASTER thermal infrared bands were selected to conduct the data simulation. The results show that: ① The characteristics of thermal infrared emissivity spectrum show distinct differences in wavelength range of 8~13 μm, especially in 8.5~10, 11.3 and 12~13 μm. Therefore these bands can be used as identifying characteristics of different bands; ② Emissivity spectrum shows a characteristic difference at five ASTER thermal infrared bands, it is practically useful in the process of using remote sensing images to extract information for surface objects in coalfield fires areas; ③ The emissivity can provide surface temperature retrieval with a precise parameter, so as to improve precision of temperature retrieval.

**Key words:** coalfield fires area; surface temperature; fourier transform infrared spectrometer; emissivity; ISSTES (Iterative Spectrally Smooth Temperature/Emissivity Separation Algorithm, ISSTES)

中国煤炭资源储量居世界第一,但很多煤田却饱受火灾的困扰。我国的煤田自燃多分布于干旱少雨

的北方,累计已烧毁煤炭达 42 亿 t 以上<sup>[1]</sup>。新疆煤田火灾最为严重,占整个北方地区的 65% 以上<sup>[2]</sup>,每

收稿日期:2011-12-05 责任编辑:张晓宁

基金项目:新疆维吾尔自治区科技支撑计划资助项目(201033122);国家自然科学基金资助项目(40961025,40901163)

作者简介:夏 军(1982—),男,四川乐山人,博士研究生。E-mail: xiajun5518@163.com。通讯作者:塔西甫拉提·特依拜,教授,博士生导师, E-mail: Tash@xju.edu.cn。

年燃烧损失煤炭 1 500 多万 t<sup>[3]</sup>,其中新疆中部煤火风险极高<sup>[4]</sup>。煤田自燃不仅造成自然资源的严重浪费,也对生态环境造成很大的负面影响,更是直接威胁到煤矿的安全开采。在煤田防火、灭火工作中,火源位置和着火区范围的圈定无疑对灭火工作的成败起关键作用,长期以来一直是煤田防火、灭火研究中的难点和热点问题,至今还没有一种十分有效的通用方法<sup>[5]</sup>。

对于煤田自燃的机理、条件、特征和模型方面,国内外已经进行了长期的研究<sup>[6-8]</sup>,为煤火的探测和治理提供了理论基础。近 50 年来,电法、磁法、地质雷达法、测氦气法、遥感等方法已广泛应用于煤田火区的探测<sup>[9-13]</sup>。张建民等<sup>[14]</sup>对地下煤火研究与治理方面的进步和成果进行了总结。遥感技术具有大面积同步观测的能力,其热红外波段不仅能有效地识别地下煤层自燃在地表形成的热异常区,而且能提高烧变岩信息提取的准确度,因此利用卫星或者航空热红外遥感技术可以实现对煤田火区的普查和动态监测<sup>[15-17]</sup>。利用热红外遥感影像进行地表温度反演的主要方法有:ASTER TES 算法<sup>[18]</sup>、分裂窗算法<sup>[19]</sup>、单窗算法<sup>[20]</sup>等,它们都需要地表比辐射率(即发射率)作为输入参数,因此获得精确的地表比辐射率是地表温度反演和地物信息提取的关键。

本文采用 102F 型便捷式傅里叶变换红外光谱仪对新疆水西沟煤田火区主要的 7 种典型自然地物(煤、煤渣、岩石、烧变岩、土壤、煤焦油土和草地)进行发射率测量,采用平滑光谱迭代法实现温度和发射率的分离反演,重点对不同地物热红外发射率光谱特征进行分析,并对 ASTER 影像 5 个热红外波段进行数据模拟,以此对热红外发射率光谱在煤田火区地物识别和特征判读中的应用进行探讨。该研究将有助于提高煤田火区地物信息提取的准确性和温度反演的精度,在煤田灭火工作、煤矿安全开采和煤田环境保护方面具有实际意义。

## 1 原理与方法

### 1.1 热红外发射率光谱的测量原理

根据基尔霍夫定律,在热辐射平衡条件下,物体在任何波长的辐射都等于发射和反射的总和。不透明物体的发射率  $\varepsilon_s(\lambda)$  和反射率  $R(\lambda)$  之和为 1<sup>[21]</sup>,即

$$\varepsilon_s(\lambda) = 1 - R(\lambda) \quad (1)$$

由辐射传输理论可知,对于自然地物,由于环境因素的影响,包括大气吸收、大气辐射以及物体表面对周围物体辐射能量和太阳入射能量的反射。不考

虑发射率的方向性,在样品温度  $T_s$  下,传感器探测到的总的辐射信号表达式<sup>[22]</sup>为

$$L_s(\lambda) = B(\lambda, T_s) \varepsilon_s(\lambda) \tau + L_{UWR}(\lambda) + L_{DWR}(\lambda) \times [1 - \varepsilon_s(\lambda)] \tau + \{I_{sol}(\lambda) \tau_{sol} [1 - \varepsilon_s(\lambda)] \tau / \pi\} \quad (2)$$

式中,  $L_s(\lambda)$  为传感器探测到的样品和环境辐射的总和;  $B(\lambda, T_s)$  为黑体辐射出射度,可以根据普朗克黑体辐射公式求得;  $\tau$  为传感器与目标之间的大气透过率;  $\tau_{sol}$  太阳与目标之间的大气透过率;  $L_{UWR}(\lambda)$  为大气上行辐射亮度;  $L_{DWR}(\lambda)$  为大气下行辐射亮度;  $I_{sol}(\lambda)$  为太阳入射的辐射照度。

在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  的热红外光谱范围内,假定地表为朗伯表面,大气下行热辐射各向同性,卫星所接收到的光谱辐射则为太阳、大气和地物目标 3 者光谱辐射相互作用的总贡献<sup>[23]</sup>。根据 MODTRAN 模式的模拟结果,在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段范围内,目标到传感器距离小于 1 m 时,  $L_{UWR}(\lambda)$  小于探测器接收总辐射能量的 0.5%,  $\tau$  近乎为 1,因此在利用光谱仪进行近地表探测时,可以忽略这两项因素的影响<sup>[24]</sup>。Salvaggio 等<sup>[25]</sup>研究了太阳入射能量  $I_{sol}(\lambda)$  随波长变化的趋势,太阳的入射能量随波长的增加而迅速减小,在 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  波段其辐射能量近似等于 0,即太阳的入射能量相对于自然地物的辐射能量可以忽略。因此,在  $T_s$  时,传感器探测到的光谱辐射亮度可近似表示为

$$L_s(\lambda) = \varepsilon_s(\lambda) B(\lambda, T_s) + [1 - \varepsilon_s(\lambda)] L_{DWR}(\lambda) \quad (3)$$

将式(3)变换,得到样品在  $T_s$  时的样品发射率为

$$\varepsilon_s(\lambda) = \frac{L_s(\lambda) - L_{DWR}(\lambda)}{B(\lambda, T_s) - L_{DWR}(\lambda)} \quad (4)$$

其中,  $L_s(\lambda)$  和  $L_{DWR}(\lambda)$  通过红外光谱仪测量获得。

### 1.2 自然地物温度和发射率的分离反演方法

自然地物具有较低的热惯性、较差的热传导能力以及粗糙的表面,直接测量很难得到物体表面的真实温度,最终导致发射率计算的较大误差,因此必须采用间接的测量方法,即通过物体的辐射亮度数据来反演地物的温度和发射率<sup>[26]</sup>,但这本质上又是一个病态问题。无论光谱细分到何种程度,都属于由  $N$  个方程组成的方程组求解  $N+1$  个未知数的问题<sup>[27]</sup>。近年来通常是根据一定的假设和近似,构造多余观测变量,或者减少待反演参数,形成了多种提取发射率的算法,如发射率归一化法<sup>[28]</sup>、平均-最小最大发射率差方法<sup>[29]</sup>、光谱平滑迭代法<sup>[30]</sup>等。其中,光谱平滑迭代法对于自然地物温度和发射率的分离反演精

度较高<sup>[27,31-32]</sup>。

光谱平滑迭代法(Iterative Spectrally Smooth Temperature/Emissivity Separation Algorithm, ISSTES)最早是由 Borel<sup>[30]</sup>通过分析地物光谱与大气吸收线之间的关系提出的。其基本思想是:对于高光谱数据,地物的发射率光谱要比大气的下行辐射平滑得多,精确的地表温度能够很好地消除地表发射率光谱中的大气吸收线,得到一个较为平滑的地表发射率光谱。给定一个地表温度初值,以初值为基础,以一定的温差间隔产生一个温度分布范围,计算每一个温度对应的地表发射率曲线的平滑度指数。Ingram 等<sup>[33]</sup>在对 ISSTES 算法的模型误差和对噪声的敏感性进行分析后,将平滑度指数  $S$  定义为

$$S = \sum_{j=2}^{N-1} \left( \varepsilon_j - \frac{\varepsilon_{j-1} + \varepsilon_j + \varepsilon_{j+1}}{3} \right)^2 \quad (5)$$

其中, $j$  为波段序号; $\varepsilon_j$  为某一地表温度对应的第  $j$  波段的发射率; $N$  为波段总数。优化的过程就是寻找使得平滑度指数  $S$  为最小时地物发射率曲线对应的温度,将该温度作为地表的最佳估计温度,最后由式(4)计算得到地表发射率曲线。ISSTES 方法最大的特点是它利用了大气下行辐射光谱的特征,而不是象其他方法那样千方百计地消除或减弱大气的影

## 2 热红外发射率光谱的野外测量

### 2.1 研究区概况

水西沟煤田火区位于新疆维吾尔自治区昌吉回族自治州吉木萨尔县西南 20 km,东经 88.975 8°,北纬 43.940 8°,坐落于天山东段北麓、准葛尔盆地南缘,总体地形呈南高北低,海拔在 1 040 ~ 1 158 m,属中温带大陆干旱气候,年平均气温约 7 °C,最高气温约 37 °C,最低气温约 -29 °C,日照 2 862 h,降水 327 mm,蒸发量 1 866.4 mm,无霜期 149 d。

火区主要为构造剥蚀低山丘陵地形和洪积台地,基岩出露较好,地震烈度为 6 ~ 8 度。火区北部表现为 20 ~ 30 m 深的塌陷,煤层顶底板直立;火区南部,煤层倾角变缓,表面反潮,有煤焦油析出,露头区有芒硝结晶,火区中段可听到呼呼着火声,多处可见明火和白烟。火区地物类型主要有煤层露头、燃烧后的煤渣、岩石、烧变岩、土壤、植被等。

### 2.2 野外测量

根据式(5)可知,要得到发射率,需要对样品辐射亮度和大气下行辐射亮度进行测量。采用美国 Design & Prototypes 公司生产的 102F 型便携式傅里叶变换红外光谱仪对其进行测量。整个光谱测量系统主要由红外光谱仪、微型计算机、漫反射金板(发

射率约为 0.04)以及黑体等组成,仪器光谱分辨力为  $4 \text{ cm}^{-1}$ ,光谱响应范围为 2 ~ 16  $\mu\text{m}$ 。

测量时间为 2011 - 07 - 31—08 - 01T 9:00—12:00,天气晴朗,微风小于 2 级,气温 15 ~ 35 °C。大气下行辐射通过测量低发射率的漫反射金板得出,金板温度采用红外线热电偶温度计测量。测量时使用液氮对仪器进行冷却。为了尽量减小大气上行辐射对测量结果的影响,测量时传感器距离目标应小于 1 m。由于风力和太阳照射等外部条件会引起仪器内部温度的变化,导致信号出现漂移现象,影响测量的精度。因此需要定时进行黑体的标定,一般 10 ~ 20 min 定标一次,而且每次测量应该尽量在较短的时间内完成。

## 3 结果与讨论

### 3.1 自然地物表面温度和发射率的分离反演

采用 ISSTES 方法对煤田火区自然地物的温度和发射率进行分离。图 1 为由不同温度(在计算时须将摄氏温度换算为开尔文温度)根据 ISSTES 方法模拟计算出的一组土壤发射率曲线。在 8 ~ 13  $\mu\text{m}$  波段内,温度从 26 °C 升至 28 °C,每两条相邻曲线温度间隔为 0.2 °C,可以看出,每条曲线平滑程度是不同的。根据式(5)分别计算每条曲线的平滑指数,如图 2 所示。温度在 26.8 °C 和 27 °C 时,发射率曲线平滑度指数较小,分别为  $0.303 \times 10^{-5}$  和  $0.308 \times 10^{-5}$ ,而且非常接近,相比而言,在 26.8 °C(图 1)时整体平滑程度更好,因此,将该温度作为土壤样品的最佳估计温度。如果将模拟温度的间隔减小至 0.1 °C 或者更小,还可以得到更加接近真值的样品估计温度。

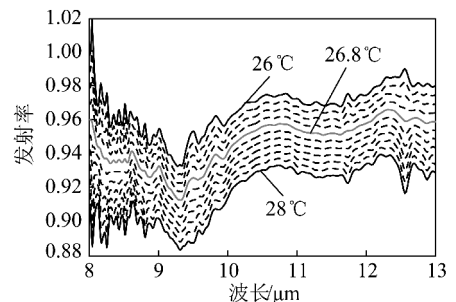


图 1 不同模拟温度下的土壤发射率曲线  
Fig. 1 Emissivity curves under the simulation of different temperature

根据 ISSTES 法反演得到的最佳估计温度,利用普朗克黑体辐射公式求得  $B(\lambda, T_s)$ ,再代入式(4)计算得到地物的发射率。该发射率可以为地表温度的反演方法提供精确的参数,从而提高地表温度反演的精度,准确提取出火区的温度异常区域。

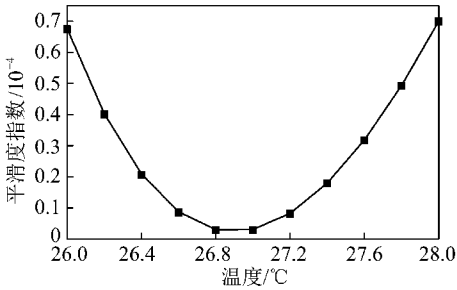


图2 不同模拟温度下的土壤发射率曲线的平滑度指数

Fig.2 Smoothness indexes of soil emissivity curves under the simulation of different temperature

### 3.2 煤田火区自然地物发射率光谱特征分析

物体的发射率与物体的表面状态(包括物体表面温度、表面粗糙度、表面物质组分、结构、水分和表面颜色等)有关。自然地物成分复杂,而且表面粗糙,颜色有差异,受热不均而且热传导率不同,导致热辐射能力有所差异。图3显示了草地、岩石、烧变岩、土壤、煤焦油土、煤和煤渣7类地物的发射率光谱曲线,可以看出曲线差别比较明显。

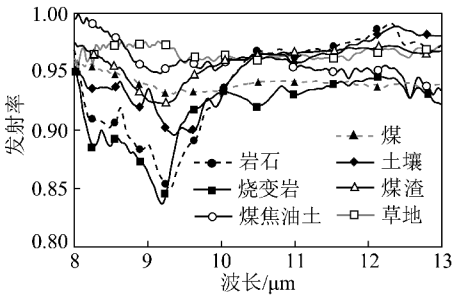


图3 不同地物发射率光谱曲线

Fig.3 Emissivity spectral curves for different surface object

该研究区岩石主要是沉积岩,沉积岩经过长时间煤火的高温灼烧或者炙烤,部分转变成烧变岩,与烧变岩石的发射率光谱曲线形状特征非常相似。在8~12 μm波段,岩石和烧变岩都呈现出典型的石英矿物特征。由于受Si—O键伸缩振动引起的不对称强二重谱带影响,岩石和烧变岩在8.5 μm和9.3 μm附近出现强烈的吸收发射谷,在11.3 μm附近,岩石、烧变岩、土壤和煤焦油土存在较明显的发射谷,这是CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>基团内部基谱振动引起的残余辐射谱带。在12~13 μm,还有两个吸收强度相对较小的发射谷,主要由Si—O—Si, Si—O—Al, (Si, Al)—O—(Si, Al)等共价键的对称性振动所致。在10.1~13.0 μm,烧变岩发射率明显低于其他类型地物,主要是因为高温改变了岩石表面结构和性质,水分降低。

沙质土壤含有部分SiO<sub>2</sub>,也表现出石英相似的特征,两个发射谷分别出现在8.8 μm和9.5 μm附近,但深度不及岩石和烧变岩。在11.3 μm附近也

存在一个较明显的发射谷,但在12~13 μm虽然发射率开始减小,虽然有两处微弱的波动,但并未形成明显的发射谷。

煤焦油土表层覆盖有从地下裂隙析出的煤焦油和水汽,土壤湿度大,发射率较高,虽然在9.3 μm附近也有单个轻度吸收的发射谷,但强度远小于土壤、岩石和烧变岩。在11.3 μm和12~13 μm,表现出与岩石和烧变岩相似的特征。

煤的组成是以有机质为主体,除主要的碳外,还有少量的氢、氧、氮和硫。在8~10 μm只出现了极小强度的吸收。在9.5~13.0 μm,煤的发射率比较稳定,曲线较为平滑,煤经过不同程度的氧化燃烧,残留从黑色到白色的煤渣,除了燃烧后的煤灰和未燃烬的碳外,还有一些琐碎的经高温烧变的岩石,表面粗糙程度和紧实度很不均匀,其发射率光谱特征介于煤和土壤之间。在9.3 μm附近有吸收谷,而且波谷较宽。在10~13 μm,煤渣的发射率光谱曲线也较平滑,发射率也相对稳定。

草地具有植被发射率光谱的部分特征,在8.3~9.3 μm具有较高发射率,但因为植被覆盖度较低,在12~13 μm出现两个明显的波谷。

可见,不同地物在8~13 μm具有不同的发射率光谱特征,根据地物表面性质,如粗糙度和SiO<sub>2</sub>、水分和CO<sub>2</sub>等成分含量,尤其是在8.5~10.0, 11.3和12~13 μm波段范围内,出现明显的差异。根据典型地物发射率光谱曲线特征,可以利用高光谱热红外影像进行地物识别和特征判读。

### 3.3 ASTER 数据模拟及其发射率光谱特征

ASTER 传感器有5个热红外通道,空间分辨率为90 m。在8~12 μm,根据地物发射辐射差别,可以区分不同地物,为利用热红外遥感数据研究地物特性提供了条件。表1为ASTER的5个热红外波段(B10~B14)和从样品发射率数据中取出的相对应波段。

表1 模拟 ASTER 热红外通道数据选取波段

Table 1 Bands to simulate ASTER thermal infrared

channel data		μm
波段	ASTER 波段	模拟选取波段
B10	8.125~8.475	8.126~8.473
B11	8.475~8.825	8.482~8.815
B12	8.925~9.275	8.927~9.272
B13	10.250~10.950	10.251~10.943
B14	10.950~11.650	10.959~11.636

由于各类地物样品发射率波谱变化复杂,且不是

线性变化,不能直接对其求取平均。分别对 B10 ~ B14 模拟选取波段范围内的样品发射率进行拟合,得到波长和发射率的函数,再求函数的积分平均值,这样每类地物均可得到模拟 ASTER 热红外数据 B10 ~ B14 通道上的 5 个值。图 4 为研究区 7 类典型地物发射率数据模拟 ASTER 热红外波段的光谱特征。可以看到,B10 ~ B12,除草地略微上升外,其他 6 类地物均是下降趋势,其中煤的变化较为平缓,而煤焦油土和煤渣几乎呈直线平滑下降;B12 ~ B13,草地有所降低,煤和煤焦油土只有轻微的上升,其他 5 类地物均呈现出较为剧烈的上升,特别是岩石和烧变岩;B13 ~ B14,煤焦油土有所下降,而烧变岩略微上升,其他 5 类地物均基本稳定。总体来看:在 B12 波段处,草地表现为峰点,其他地物均是谷点;煤整体变化平缓;岩石和烧变岩形状相似,但岩石发射率整体大于烧变岩;草地和煤焦油土发射率相对较高,岩石和烧变岩较低;除煤焦油土和烧变岩外,其余 5 类地物在 B13 波段处几乎交于一点。

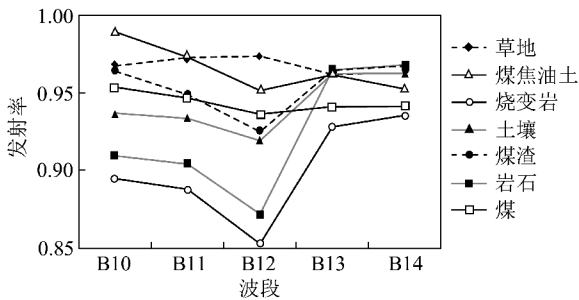


图 4 模拟 ASTER 热红外波段的发射率光谱特征  
Fig. 4 Emissivity spectral characteristic to simulate ASTER thermal infrared bands

可见,根据对模拟 ASTER 热红外波段数据的发射率光谱特征分析得出,该研究区自然地物在 ASTER 热红外波段范围内有较为明显的特征差异,特别是 B11 ~ B12 ~ B13。为了进一步定量描述不同地物的变化,采用“B11 ~ B12 + B13 ~ B12”波段运算值表征地物发射率在 B11 ~ B12 ~ B13 的累积变化程度,草地、岩石、土壤、煤焦油土、煤、煤渣、烧变岩 7 类地物在 B11 ~ B12 ~ B13 的累积变化程度依次为: -0.012 7, 0.125 4, 0.057 6, 0.031 6, 0.015 4, 0.063 8, 0.110 8, 即岩石 > 烧变岩 > 煤渣 > 土壤 > 煤焦油土 > 煤 > 草地,其中草地为负值,表示总体呈减小趋势;其余 6 类地物均呈增加趋势;岩石变化程度最大,而煤变化程度最小。因此,ASTER 热红外波段数据提取地物信息(如识别地物类型、反演地物温度、水份和发射率等)是完全可行的。通过对煤、煤渣、岩石、烧变岩、土壤和植被等的热红外发射率光谱特征

识别,不仅可以区分煤田火区不同地物,而且还可以对地下煤火燃烧的程度作出客观的判断,为煤火燃烧趋势的预测提供科学参考。

## 4 结 论

(1) 研究区 7 种典型自然地物(煤、煤渣、岩石、烧变岩、土壤、煤焦油土和草地) 8 ~ 13  $\mu\text{m}$  发射率光谱特征存在明显不同。由于地物表面粗糙度不一致,  $\text{SiO}_2$ 、水分和  $\text{CO}_2$  等含量也有不同,尤其是在 8.5 ~ 10.0, 11.3 和 12 ~ 13  $\mu\text{m}$ , 发射率光谱特征出现明显的差异,可作为识别不同地物的特征波段。

(2) 7 种典型自然地物在 ASTER 5 个热红外波段对应的发射率光谱特征也存在较为明显的区别,在 B11 ~ B12 ~ B13 的累积变化程度大小关系为: 岩石 > 烧变岩 > 煤渣 > 土壤 > 煤焦油土 > 煤 > 草地,从而定量说明了利用热红外遥感技术进行地物识别的可行性。

(3) 通过对煤田火区自然地物发射率光谱的测量,为火区地表温度的反演提供了精确的地表比辐射率参数,从而提高温度反演的精度,并实现温度异常区域的准确提取。

煤田火区自然地物由于受地下煤火高温影响,鉴于火源深度和介质的不同,在地表表现为不同的温度差异,其地物组成和结构也会有所变化。通过对火区不同自然地物热红外发射率光谱特征的深入分析,为通过遥感技术实现火区地物信息的提取(如地物类型识别、特征地物的判读等)、火源位置和范围的圈定、发展趋势的预测提供科学依据和辅助决策。今后的工作重点在结合卫星或者航空热红外高光谱数据,提高煤田火区地表温度反演的精度和地物识别的准确度,在煤田灭火、煤矿安全开采和煤田环境保护工作中发挥科学指导作用。

## 参考文献:

- [1] 管海晏, Ganderen J L van, 谭永杰, 等. 中国北方煤田自燃环境调查与研究 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1998.  
Guan Haiyan, Ganderen J L van, Tan Yongjie, et al. Investigation and research on coalfields environment of spontaneous combustion in Northern China [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1998.
- [2] 谭永杰. 中国煤田自燃灾害及其防治对策 [J]. 煤田地质与勘探, 2000, 28(6): 8-10.  
Tan Yongjie. Disaster and control of spontaneous combustion in coal field, China [J]. Coal Geology & Exploration, 2000, 28(6): 8-10.
- [3] 蔡忠勇, 魏 军. 新疆煤田火灾现状及应对措施 [J]. 中国煤炭, 2008, 34(10): 93-94.  
Cai Zhongyong, Wei Jun. Coal field fires in Xinjiang: its current state, challenges and countermeasure [J]. China Coal, 2008, 34

- (10):93-94.
- [4] 武建军,刘晓晨,蒋卫国,等.新疆地下煤火风险分布格局探析[J].煤炭学报,2010,35(7):1164-1171.  
Wu Jianjun, Liu Xiaochen, Jiang Weiguo, et al. Spatial analysis of risk for underground coal fire in Xinjiang, China[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(7):1164-1171.
- [5] 唐庆兵,李大心,樊武义.综合物探方法在煤田采空区圈定和着火区调查中的应用研究[J].地质科技情报,2001,20(3):9-10.  
Tang Qingbing, Li Daxin, Fan Wuyi. Synthetic method of georadar and one meter geothermometry for the determination of the mined region and area on fire in a coal field[J]. Geological Science and Technology Information, 2001, 20(3):9-10.
- [6] 李唐山,周心权,谷红军.煤田露头自燃火风压数值的理论分析[J].煤炭学报,2005,30(5):737-740.  
Li Tangshan, Zhou Xinquan, Gu Hongjun. Theoretical analysis of numerical value of the spontaneous combustion fire-heating air pressure for coalfield outcrop[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(5):737-740.
- [7] 曾强,王德明,蔡忠勇.煤田火区裂隙场及其透气率分布特征[J].煤炭学报,2010,35(10):1670-1673.  
Zeng Qiang, Wang Deming, Cai Zhongyong. The distribution of fissures/cracks and its permeability with coal fire zones[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(10):1670-1673.
- [8] 张国枢,谢应明,顾建明.煤炭自燃微观结构变化的红外光谱分析[J].煤炭学报,2003,28(5):473-476.  
Zhang Guoshu, Xie Yingming, Gu Jianming. Infrared spectral analysis of microstructure change during the coal spontaneous oxidation[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5):473-476.
- [9] 杨峰,彭苏萍,马建伟,等.乌达煤田地下燃烧状况雷达探测谱分析算法[J].煤炭学报,2010,35(5):770-775.  
Yang Feng, Peng Suping, Ma Jianwei, et al. Spectral analysis for ground penetrating radar surveys of the underground coal fire in Wuda Coal Mine[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(5):770-775.
- [10] 宁靖,张建民,宁书年.磁导成像方法研究及在宁夏汝箕沟煤田火区探测中的应用[J].煤炭学报,2001,26(3):225-229.  
Ning Jing, Zhang Jianmin, Ning Shunian. Study on magnetic digital imaging and its application of coal fire detection in Rujigou coal field, China[J]. Journal of China Coal Society, 2001, 26(3):225-229.
- [11] 赵耀江,邬剑明.测氡探火机理的研究[J].煤炭学报,2003,28(3):260-263.  
Zhao Yaojiang, Wu Jianming. Study on mechanism of detecting underground fire by Radon measurement technique[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(3):260-263.
- [12] Saraf A K, Prakash A, Sengupta S, et al. Landsat-TM data for estimating ground temperature and depth of subsurface coal fire in the Jharia coalfield[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(12):2111-2124.
- [13] 蒋卫国,武建军,顾磊,等.基于遥感技术的乌达煤田火区变化监测[J].煤炭学报,2010,35(6):964-968.  
Jiang Weiguo, Wu Jianjun, Gu Lei, et al. Change monitoring in Wuda coalfield fire area based on remote sensing[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(6):964-968.
- [14] 张建民,管海宴,曹代勇,等.中国地下煤火研究与治理[M].北京:煤炭工业出版社,2008.  
Zhang Jianmin, Guan Haiyan, Cao Daiyong, et al. Underground coal fires in China: origin, detection, fire-fighting, and prevention[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2008.
- [15] Gangopadhyay, Prasun K, Maathuis B, et al. ASTER-derived emissivity and coal-fire related surface temperature anomaly: a case study in Wuda, North China[J]. International Journal of Remote Sensing, 2005, 26(24):5555-5571.
- [16] Prakash A, Gens R, Vekerdy Z. Monitoring coal fires using multi-temporal night-time thermal images in a coalfield in north-west China[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(14):2883-2888.
- [17] Van Genderen, Xiangmin Zhang L, Kroonenberg, et al. A method to evaluate the capability of Landsat-5 TM band 6 data for sub-pixel coal fire detection[J]. International Journal of Remote Sensing, 1997, 18(15):3279-3288.
- [18] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emissivity and reflection radiometer (ASTER) images[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(4):1113-1126.
- [19] Price J C. Land surface temperature measurements from the split window channels of the NOAA7 advanced very high resolution radiometer[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89(D5):231-237.
- [20] Qin Z, Karnieli A, Berliner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(18):3719-3746.
- [21] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. Applied Optics, 1965, 4(7):767-773.
- [22] Carl S, Craig J M. Comparison of field and laboratory collected mid-wave and longwave infrared emissivity spectra data reduction techniques[J]. SPIE, 2001, 4381:550-558.
- [23] Hook S J, Kahle A B. The micro fourier transform interferometer ( $\mu$ FTIR)—A new field spectrometer for acquisition of infrared data of natural surfaces[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(3):172-181.
- [24] Borel C C. Iterative retrieval of surface emissivity and temperature for a hyperspectral sensor[J]. First JPL Workshop Remote Sensing of Land Surface Emissivity, 1997, 6:1-7.
- [25] Carl S, Craig J M. Methodologies and protocols for the collection of midwave and longwave infrared emissivity spectra using a portable field spectrometer[J]. SPIE, 2001, 4381:539-548.
- [26] 王珩,盘毅,李华,等.基于快速傅里叶红外光谱仪的自然地物光谱发射率测量[J].红外技术,2009,31(4):210-214.  
Wang Hui, Pan Yi, Li Hua, et al. Measuring spectral emissivity of natural objects with FTIR[J]. Infrared Technology, 2009, 31(4):210-214.
- [27] 张勇,李元,戎志国,等.中国遥感卫星辐射校正场陆表热红外发射率光谱野外测量[J].光谱学与光谱分析,2009,29

- (5):1213-1217.
- Zhang Yong, Li Yuan, Rong Zhiguo, et al. Field measurement of gobi surface emissivity spectrum at Dunhuang calibration site of China [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2009, 29 (5): 1213 - 1217.
- [28] Gillespie A R. Lithologic mapping of silicate rocks using tims[J]. Pasadena CA, 1986:29-44.
- [29] Matakunaga T A. A temperature-emissivity separation method using an empirical relationship between the mean, the maximum, and the minimum of the thermal infrared emissivity spectrum[J]. Journal of Remote Sensing Society of Japan, 1994, 14(2):230-241.
- [30] Borel C C. Surface emissivity and temperature retrieval for a hyper-spectral sensor[A]. Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium[C]. 1998, 1:546-549.
- [31] 肖 青, 柳钦火, 李小文, 等. 热红外发射率光谱的野外测量方法与土壤热红外发射率特性研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(5):373-378.
- Xiao Qing, Liu Qinhuo, Li Xiaowen, et al. A field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity[J]. Journal of Infrared and Milimeter Waves, 2003, 22(5):373-378.
- [32] 程 洁, 肖 青, 李小文, 等. 土壤发射率光谱提取算法的对比研究[J]. 遥感学报, 2008, 12(5):699-706.
- Cheng Jie, Xiao Qing, Li Xiaowen, et al. Algorithm research of soil emissivity extraction[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(5): 699-706.
- [33] Ingram P M, Muse A H. Sensitivity of iterative spectrally smooth temperature/emissivity separation to algorithmic assumptions and measurement noise[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(10):2158-2167.

## 欢迎订阅 2013 年《Journal of Coal Science & Engineering (China)》杂志

《Journal of Coal Science & Engineering (China)》(煤炭学报英文版)是由中国煤炭学会主办、面向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护、煤炭经济研究等方面的科研成果和学术论文。

《Journal of Coal Science & Engineering (China)》是向世界传播我国煤炭科技的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科技成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。2009 年与国际著名的出版商德国 Springer 公司正式进行版权合作,由其独家代理海外发行。本刊被英国机电工程师学会(IEE)出版的 INSPEC 文摘数据库收录(Ei InspecWeb, 工程索引网络版),也被 Elsevier 公司的二次文献数据库 Scopus 收录。2012 年获中国科协“学会能力提升专项优秀国际科技期刊奖”资助。

《Journal of Coal Science & Engineering (China)》和《煤炭学报》是中国煤炭学会主办的两个学术刊物,它们具有不同的刊登内容和各自的特点。《Journal of Coal Science & Engineering (China)》为季刊,每期 112 页,每册国内订价 28 元,全年总订价 112 元。订阅者可直接和本编辑部联系,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部 邮政编码:100013

联系电话:(010)84262930-806

联系人:王婉洁

E-mail:mtxbwj@tom.com, mtxb@vip.163.com