

## 机载热红外多光谱数据定标与温度反演

张维安<sup>1</sup>, 陈博临<sup>2</sup>

(1. 洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;  
2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:** 设计了热红外航空遥感实验, 对获取的热红外图像进行了定标, 用发射率归一化方法反演了地物的温度和发射率光谱, 探讨了利用地物热红外光谱识别地物的可行性. 结果表明, 基于热红外多光谱数据的发射率归一化方法可以有效地反演地物温度和发射率光谱, 所反演的发射率光谱可以比较有效地应用于地物的识别, 尤其是对于土壤不同性状的探测识别可以取得良好的结果.

**关键词:** 热红外; 多光谱; 数据定标; 温度反演

**中图分类号:** TP732.2 **文献标识码:** A

## Temperature inversion and recognition of ground objects infrared multispectral data

ZHANG Wei-An<sup>1</sup>, CHEN Bo-Lin<sup>2</sup>

(1. Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China;  
2. School of OptoElectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** We derived object temperature from emissivity spectrum using the emissivity normalized method and discussed the feasibility of recognizing objects using ground object thermal infrared spectra. The results show that the emissivity normalized method based on thermal multispectral data can invert object temperature and emissivity spectrum efficiently. It means that inversion of emissivity spectra can be effectively applied in feature recognition, especially for different soil properties.

**Key words:** thermal infrared, multispectral, data calibration, temperature inversion

**PACS:** 07.07.Df

### 引言

热红外波段作为地物光谱特征重要覆盖区域和遥感的主要大气透过窗口, 可使在基于反射光谱的光学遥感中不可探测的物质性状能够被探测, 具有自己独特的优势. 地物的发射率光谱可以在一定程度上反映地物的表面形态和内部结构. 然而, 近些年来对地物发射率光谱的研究主要集中在实验室和地面实际测量, 以及少量卫星数据 (如 ASTER 卫星热红外图像)<sup>[1-6]</sup> 的分析应用上, 而且主要集中在地质调查方面<sup>[7-10]</sup>.

高质量的传感器是获取高质量的遥感数据的前提. 目前, 包括美国、欧盟在内的多个国家和组织都在进行相关成像传感器的研制. 中科院上海技术物理研究所研制的热红外多光谱成像仪达到了一定的先进水平, 该成像仪共有 8 个热红外波段, 辐射量化位数 16 bit, 像元分辨率 2 mrad.

本文利用该成像仪在甘肃省兰州市榆中县进行航空遥感实验, 对获取的热红外图像进行了定标, 然后对成像数据采用发射率归一化温度反演模型, 反演了地物的温度和发射率光谱, 同时分析了测区典型地物的热红外波段发射率光谱信息差异性和指示特征.

## 1 航空遥感实验

### 1.1 实验区简介

榆中测区位于甘肃省兰州市东南 20 km, 地理位置为, 东经 104°04' ~ 104°09'、北纬 35°49' ~ 35°52', 测区有大片农田、城镇、少量林地、水体, 属大陆性气候, 干旱少雨, 地面植被稀疏. 测量示意图见图 1.

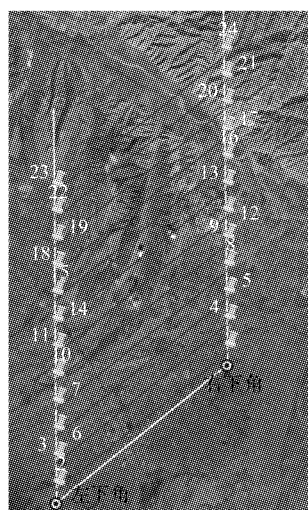


图 1 测区位置和遥感航线图  
Fig. 1 Sketch map of researched area and airborne remote sensing trajectory

### 1.2 实验设计

采用热红外多光谱成像仪在上午 10:00 至 12:00 扫描获取日航数据. 该成像仪采用单元摆扫成像模式, 飞行相对航高 1 000 m, 地面成像空间分辨率约为 2 m, 扫描视场角 60°, 单航带的成像幅宽约为 727 m; 飞行时同步进行高低温黑体定标测试, 记录于图像每一行最前端的 20 个像元和最后端的 20 个像元.

## 2 热红外遥感图像预处理

### 2.1 数据定标

热红外多光谱成像仪安装有两个“黑体”辐射校准源, 校准源的温度可以得到准确的控制. 成像仪镜头沿每一条扫描线按运行方向对准冷校准板 (T1), 然后对地面扫描, 最后再对准热校准板 (T2), 随后该过程有规律重复. 根据这一校准值, 其它的成像仪输出值可以与绝对的辐射亮度建立起联系. 每一个像元的辐射亮度可以用下式计算:

$$\frac{L_{BB2} - L_{BB1}}{DN_{BB2} - DN_{BB1}} = \frac{L_X - L_{BB1}}{DN_X - DN_{BB1}}, \quad (1)$$

其中  $L_{BB1}$  为该行记录的低温黑体所对应的辐射亮度,  $L_{BB2}$  为该行记录的高温黑体所对应的辐射亮度,  $DN_{BB1}$  为该行中低温黑体的 DN 值,  $DN_{BB2}$  为该行中高温黑体的 DN 值, 为像元的辐射亮度,  $DN_X$  为像元的灰度值.

### 2.2 几何校正和航带拼接

热红外多光谱成像仪安装在飞机吊挂口处, 飞机俯仰、侧滚、偏航以及山区高差会引起成像数据几何畸变; 另外, 由于航空遥感扫描带宽有限, 必须将各航带拼接才能实现大区域定量分析. 针对图像的几何畸变, 对成像数据进行了基于 POS 的几何校正, 即首先利用解算的 GPS/IMU 数据得到航空遥感过程中的图像每行数据的外方位元素, 然后基于点中心投影共线方程完成图像的几何校正, 最后再将相邻航带基于控制点进行拼接, 完成图像的几何校正与拼接.

## 3 地物温度与发射率光谱反演

实现温度与发射率分离时不可避免地要引入约束条件和新变量, 这无形中增加了问题的复杂度, 需要更多波段数据支持, 才能使数据量大于或等于未知量的个数, 利于方程求解. 多光谱和高光谱热红外遥感技术的出现使得这些算法的应用成为可能. 基于此种思想, 已有多种温度/发射率分离算法, 大部分是针对 AVHRR、TIMS、MODIS、ASTER 等星载热红外多光谱传感器, 典型算法包括: 参考通道法<sup>[1]</sup>、预分类法<sup>[12-13]</sup>、分裂窗法<sup>[11, 14-15]</sup>、早晚二温法<sup>[16]</sup>、灰体发射率法<sup>[17]</sup>、发射率归一化法<sup>[10]</sup>、温度独立光谱指数法<sup>[18]</sup>、光谱比法<sup>[19]</sup>、 $\alpha$  发射率法<sup>[20]</sup>、平均-最小最大发射率差法<sup>[21]</sup>等.

为了探讨地物发射率光谱反演的可行性, 本文不采用以地物温度反演为主要目标的基于不同波段发射率之间经验关系的方法, 而把重点放在对于地物识别有重要意义的发射率光谱信息 (地物发射率差异) 提取上, 即采用发射率归一化方法. 该方法是对包络法和参考通道法的改进, 它假设对于光谱观测时总存在某个波段, 在此波段上发射率达到已知的最大值  $\varepsilon_{\max}$ , 于是可用发射率为  $\varepsilon_{\max}$  的灰体辐射亮度做包络线, 考虑环境辐射, 公式为:

$$T_\lambda = B^{-1} \left[ \frac{L(\lambda) - (1 - \varepsilon_{\max}) L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})}{\varepsilon_{\max}} \right]$$

$$= \frac{c_2}{\lambda \lg \left\{ \frac{c_1 \varepsilon_{\max}}{\lambda^5 \pi [L(\lambda) - (1 - \varepsilon_{\max}) L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})]} + 1 \right\}}, \quad (2)$$

$$T = \max(T_\lambda) \quad , \quad (3)$$

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{L(\lambda) - L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})}{B(\lambda, T) - L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})} \quad , \quad (4)$$

其中,  $T_\lambda$  为所计算的各个波段的黑体温度,  $B$  为描述黑体辐射的普朗克函数,  $\lambda$  为波长,  $L(\lambda)$  为传感器所接收到的辐射亮度,  $\varepsilon_{\text{max}}$  为事先已知的地物在热红外波段最大的发射率,  $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16}$ ,  $c_2 = 3.7418 \times 10^8$ , 表示所有波段中最高黑体温度,  $L_{\text{atm}\downarrow}(\lambda, T_{\text{atm}})$  为大气下行辐射.

图 2 为榆中航空遥感数据中的一个区域图像, 主要为裸露耕地、玉米地、居民点等, 图 2(a) 为全色图像, 图 2(b) 为用热红外三个波段合成的假彩色图像. 对比图 2(a)、图 2(b) 发现, 图 2(b) 的可区分性明显增加, 不同地物由于温度与反射率差异的耦合效应, 形成了不同的辐射亮度曲线, 显示为不同的颜色, 明显反映出不同地物的热力学特征和地物的内部结构特征.

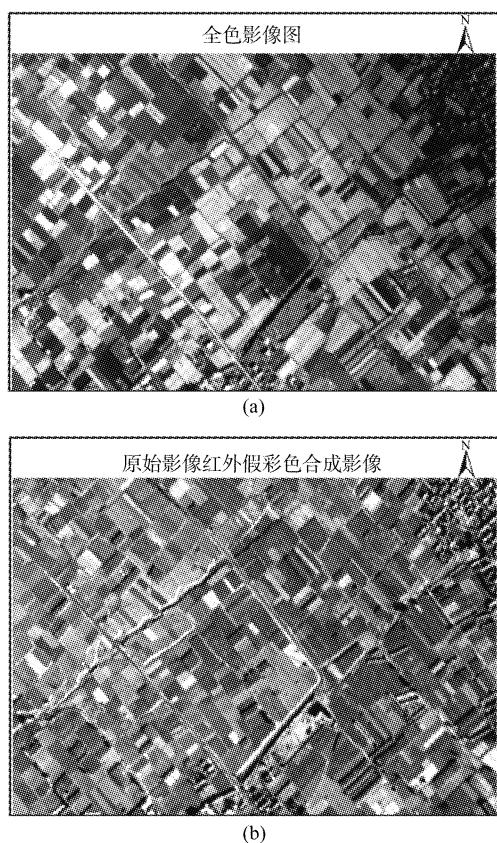


图 2 实验测区的全色图像和热红外伪彩色合成图像 (a) 全色图像, (b) 三波段假彩色合成图像  
Fig. 2 Full-color image and thermal infrared false color image for the survey area (a) Panchromatic image, and (b) pseudocolor image synthesized by three bands images

图 3 是用发射率归一化方法反演的温度图像, 区域内最低温度为  $6.5^\circ\text{C}$ , 最高温度为  $20.9^\circ\text{C}$ , 符合当时当地各类地物的温度分布特征. 如表 1 所示, 经过与实测的地物温度验证, 所反演的温度误差为  $0.5^\circ\text{C}$ .

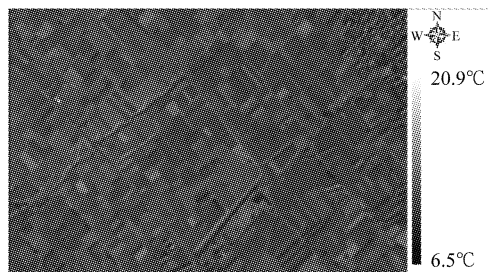


图 3 基于发射率归一化方法反演的温度图像  
Fig. 3 Temperature image inverted from infrared data with the emission normalized method

表 1 土壤表面温度反演精度

Table 1 Retrieval accuracy of soil surface temperature

编号	实测温度/ $^\circ\text{C}$	反演温度/ $^\circ\text{C}$	误差/ $^\circ\text{C}$
1	12.1	12.6	0.5
2	10.5	10.1	-0.4
3	11.2	11.9	0.7
4	11.8	11.1	-0.7
5	10.8	10.7	-0.1
6	11.9	11.9	0
7	11.4	11.7	0.3
8	11.5	10.8	-0.7
9	11.5	11.9	0.4
10	10.7	10.1	-0.6
标准差			0.5

根据反演的反射率图像, 采用决策树分类方法提取了不同的地物类型. 决策树分类是按照一定的规则把遥感数据集逐级往下细分以得到具有不同属性的子类别. 分类决策树由一个根节点、一系列内部节点和终极节点组成每一个内部节点只有一个父节点和两个或多个子节点. 决策树分类方法结构清晰、易于理解、实现简单, 比较适合于专家分析、判断和修正. 在应用决策树分类时, 各个节点的判定规则根据事先目视判读确定. 图 4(a) 为图 4(b) 中不同地物类别的所有像元的平均发射率光谱曲线, 将地物分为居民区、植被、土壤、白色地块及其他共 5 类, 分类结果基本反映了研究区域的土地利用分布. 图 4(c) 为地面实时照片. 从图 4(a) 可以看出在 1~6 波段, 不同地物类型的发射率光谱差异比较大. 一般来说, 白色地块的发射率最大, 土壤的次之, 植被的发射率最小.

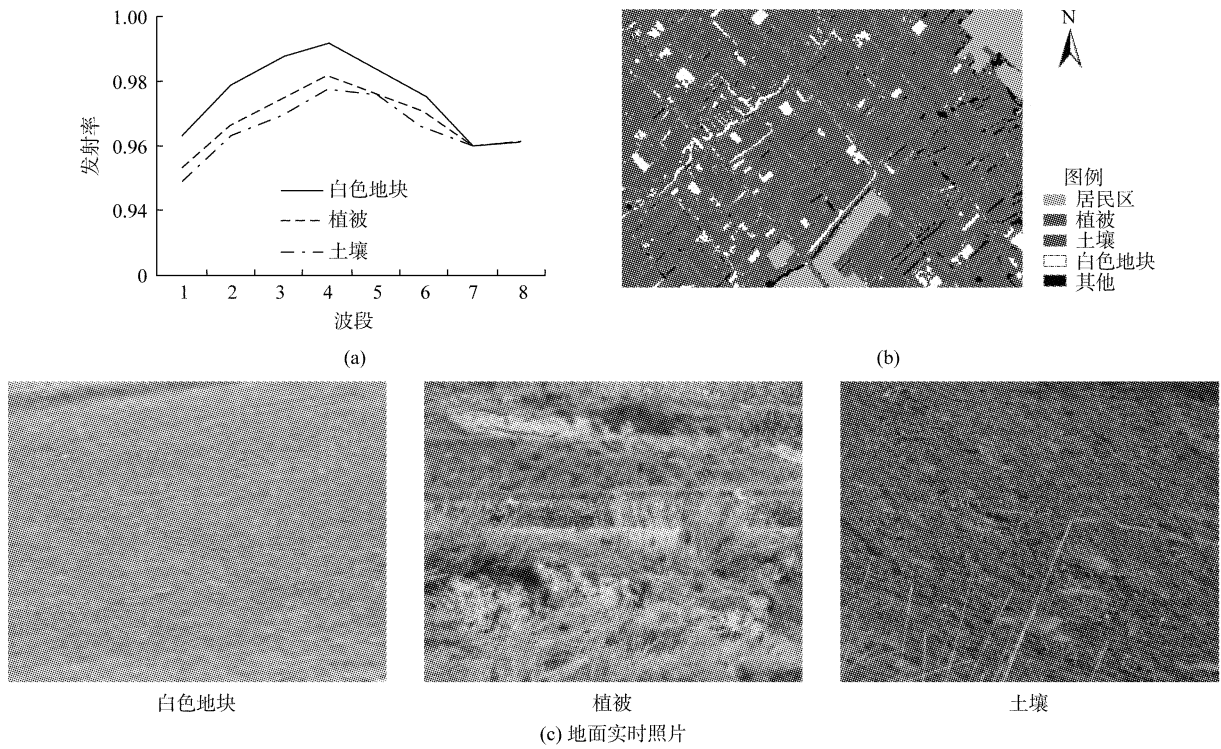


图 4 基于反射率曲线的分类结果图 (a) 典型地物不同波段发射率, (b) 分类结果, (c) 地面实时照片  
 Fig. 4 Classification of ground objects by emissivity with different features. (a) Emissivity of typical landmarks in different bands, (b) classification results, and (c) Photos of ground objects

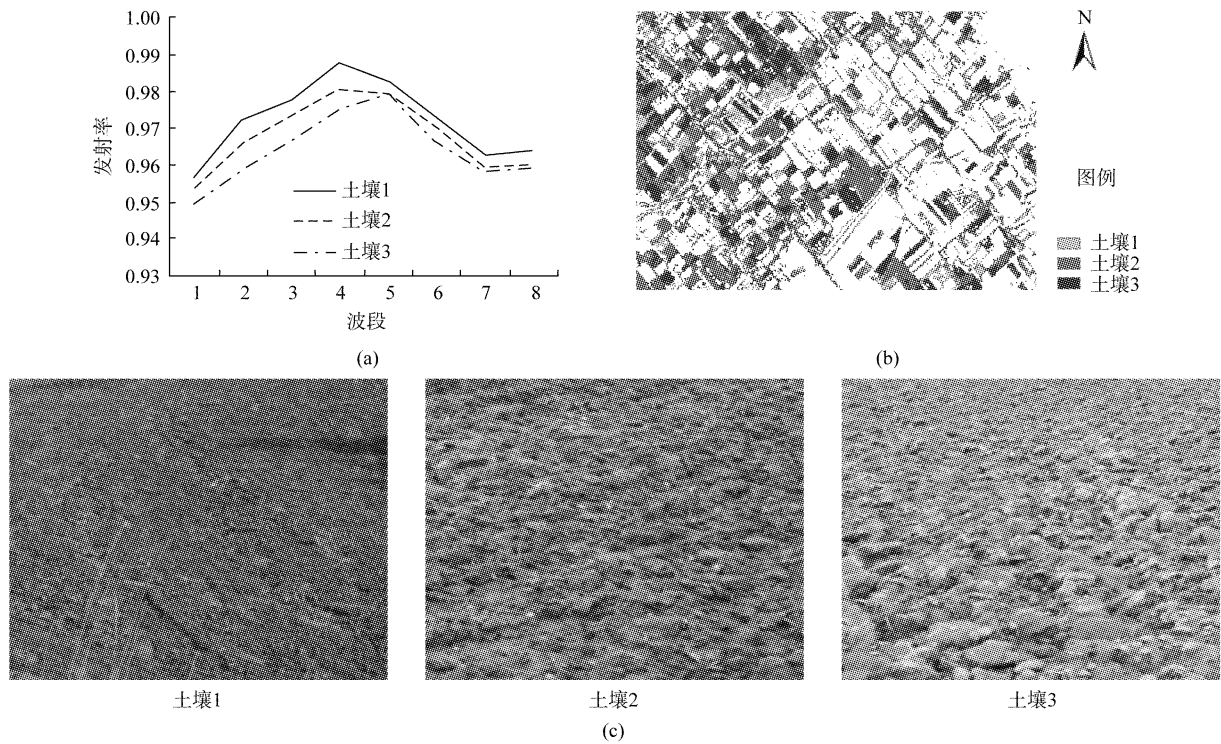


图 5 基于土壤发射率识别不同性质土壤 (a) 不同性质土壤的不同波段发射率, (b) 分类结果, (c) 地面实时照片  
 Fig. 5 Identification of different soil based on soil emissivity (a) Emissivity in different soils in different bands, (b) classification results, and (c) photos of the grounds

图 5(a) 和 (b) 为根据发射率光谱曲线提取的不同性质的土壤的结果图。虽然在土地利用的类别

上同是土壤, 由于土壤矿质、有机质、含水量、表面形态(受耕作管理影响)等理化性质的不同, 也会导致

土壤的发射率光谱曲线有差异(图 5a). 图 5b 的结果充分说明可以利用土壤理化性质对发射率光谱的影响来识别土壤的类型.

#### 4 结果与讨论

提高地表温度反演精度一直是热红外遥感领域所关注的问题,但是从几十米到几公里分辨率的遥感图像像元很难满足同温同质条件. 从本文所开展的航空遥感实验可以看出,提高光谱分辨率和空间分辨率不仅有助于地表温度的反演,而且还能根据地物发射率光谱曲线识别地物、分辨目标. 另外,在假定了热红外传感器对热红外辐射的响应是线性的情况下,对热红外图像进行了定标,而实际的传感器响应是否完全是线性的,随着光谱分辨率的提高传感器的响应能否保持线性都需要进一步的研究.

#### 5 结论

开展了热红外航空遥感实验和温度与发射率反演实验,结果表明,应用高空间分辨率的热红外多光谱遥感图像不仅可以较精确地反演地物温度,而且可以同时反演地物的发射率光谱曲线,获得了实验区高空间分辨率的地表温度和发射率图像;利用地物的发射率曲线可以识别地物,通过数据处理获得了不同性状土壤的分类结果,表明土壤的发射率光谱可在一定程度上反映土壤的表面形态和内部结构;温度和发射率光谱反演的误差主要来源于仪器的定标误差,即仪器的光谱响应函数不是理想的矩形函数,使得地物的最大发射率波长在仪器所具有的热红外波段上并没有很好的体现出来,也就是不满足发射率归一化方法的约束条件.

#### REFERENCES

- [1] Kahle A B, Rowan L C. Evaluation of multispectral middle infrared aircraft images from lithologic mapping in the east Tonic Mountains[J]. *Utah Geology*, 1980, **8**:234-239.
- [2] Clark R N, Roush T L. Reflectance spectroscopy. Quantitative analysis techniques for remote sensing applications [J]. *J. Geophys. Res.* 1984, **89**: 6329-6340.
- [3] Lane M D, Christensen P R. Thermal infrared emission spectroscopy of anhydrous carbonates [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, **102**: 25592-25851.
- [4] Cocks T, Jensen R, Stewart A, et al. The HyMap airborne hyperspectral sensor: the system, calibration and performance [C]. In *Schaepman M, Schlö pfer D., Itten K. I. Proceeding of the first EARSeL workshop on imaging spectroscopy, Zurich*. 1998:37-43.
- [5] Kruse F A, Boardman J W, Lefkoff A B, et al. The AIG/HyVista 1999 USA HyMap Group Shoot: Overview and Analysis Example [C]. In *Proceeding IGASS 2000. Honolulu, Hawaii*. 2000.
- [6] Price J C. Land surface temperature measurements from split windows channel of NOAA 7 advanced very high resolution radiometer [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89** (D5):7231-7237.
- [7] Kahle A B, Goetz A F H. Mineralogic information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner [J]. *Science*, 1983, **222**:24-27.
- [8] Gillespie A R, Kahle A B, Palluconi F D. Mapping alluvial fans in Death Valley, California, using multichannel thermal infrared images [J]. *Geophysical Research Letter*, 1984, **11**:1153-1156.
- [9] Kahle A B, Palluconi F D, Christensen P R. *Thermal emission spectroscopy: Application to the Earth and Mars. Ch. 5 in Remote Geochemical Analysis* [M]. Elemental and Mineralogical Composition. Cambridge University Press, 1993.
- [10] Gillespie A R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS [C]. In *The TIMS Data User's Workshop*. JPL Publication, 1985:29-44.
- [11] Minnett P J. On the use of synthetic 12m data in a split-window retrieval of sea-surface temperature from AVHRR measurements [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1986, **7**:1887-1891.
- [12] ABE K, YAMAMOTO K, QI Cun-Yang. Sea surface temperature estimation using infrared radiometer data of Himawari satellite [J]. *Meteorological Science and Technology* (阿布胜宏,山本孝二,祁纯阳. 利用“葵花”卫星红外辐射资料计算海面温度. *气象科技*). 1981, **S2**:11-16.
- [13] Ottle C, Vidal-Madjar D. Estimation of land surface temperature with NOAA9 data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **40**:27-41.
- [14] Wan Z. MODIS land2surface temperature algorithm theoretical basis document (LST ATBD) [D]. Version 1, Contract No. NAS5 31370. 1999.
- [15] Wan Z, Dozier J. A generalized split window algorithm for retrieving land2surface temperature from space [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(4): 892-905.
- [16] Wan Z, Li Z L. A physics-based algorithm for retrieving land surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, **35**(4): 980-996.
- [17] Barducci A, Pippi I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the “grey body emissivity” method [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34**(3):681-695.
- [18] Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, **32**(1):17-33.
- [19] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**(2):113-116.
- [20] Kealy P S, Gabella R. Estimation of emissivity and temperature using alpha coefficients [C]. *Proceedings of 2nd TIMS Workshop*, JPL Publication 90-55, 1990:11-15.
- [21] Matsunaga T. A temperature2emissivity 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.