

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*

肖青^{1,2)} 柳钦火¹⁾ 李小文^{1,3)} 陈良富¹⁾ 刘强¹⁾ 辛晓洲¹⁾

⁽¹⁾中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室,北京,100101;

⁽²⁾核工业北京地质研究院遥感重点实验室,北京,100029;

⁽³⁾北京师范大学遥感和GIS研究中心,北京,100875)

摘要 基于光谱平滑的温度/发射率迭代算法,提出热红外发射率光谱的野外测量与反演方法;分析了不同组分、粒径及含水量土壤的热红外发射率变化规律.结果表明,在8~9.5 μm 波长范围内土壤的发射率随 SiO_2 含量的增加而降低,随含 H_2O 量的增加而增大;在11~13 μm 波长范围内土壤的发射率基本保持不变.基于此分析结果,提出利用热红外光谱数据反演土壤含沙量和含水量的方法.

关键词 热红外,发射率,土壤,含水量.

A FIELD MEASUREMENT METHOD OF SPECTRAL EMISSIVITY AND RESEARCH ON THE FEATURE OF SOIL THERMAL INFRARED EMISSIVITY *

XIAO Qing^{1,2)} LIU Qin-Huo¹⁾ LI Xiao-Wen^{1,3)} CHEN Liang-Fu¹⁾
LIU Qiang¹⁾ XIN Xiao-Zhou¹⁾

⁽¹⁾LARSIS, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China;

⁽²⁾Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China;

⁽³⁾Center for Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract An experiment method is suggested to measure the surface spectral emissivity in field based on iterative spectrally smooth temperature-emissivity separation (ISSTES) algorithm. A deliberately designed experiment is carried out to study the relationship of the spectral emissivity of soil with different grain size, different sand and water content. The results show that emissivities become lower when sand content increase and higher when water content increase in 8~9.5 μm region; In 11~13 μm region, the variance of emissivity is not obvious. Accordingly, a method is suggested for retrieving sand content and water content of soil with multispectral thermal infrared observation.

Key words thermal infrared, emissivity, soil, moisture.

引言

由于地表结构复杂、发射率未知,发射率是制约温度反演精度的主要因素之一,如何通过地面被动测量分离反演出红外发射率一直是一个难题.本文在光谱平滑的温度发射率迭代反演算法 ISSTES (Iterative spectrally smooth temperature-emissivity separation) 的基础上^[1],设计了一种热红外发射率光谱的

野外测量与反演方法.

近年来,许多人为了不同的应用目的,开展了土壤热红外光谱的测量试验^[2~5].但土壤热红外发射率的实验测量及其变化规律仍缺乏完整系统的研究.土壤的热红外发射率因组分的不同而略有变化. SiO_2 是土壤中的主要矿物成分之一, SiO_2 在8~9.5 μm 波段具有非常强的吸收特征,称之为 reststrahlen 特征光谱,土壤的热红外发射率光谱特征在8~9.5

* 国家重点基础研究发展规划(批准号 G2000077900)资助项目,北京市自然科学基金(批准号 8001003)重点资助项目
稿件收到日期 2002-04-22,修改稿收到日期 2002-12-24

* The project supported by the China's Special Funds for Major State Basic Research Project (No. G2000077900), Key Program of Beijing Natural Science Foundation (No. 8001003)
Received 2002-04-22, revised 2002-12-24

μm 波段受 SiO_2 含量的影响最大. 其它对波谱特征产生影响的因素还有有机质含量、含水量和土壤粒径等. Salisbury^[4] 等对土壤类型及热红外发射率特点进行了初步分析, 讨论了土壤有机质含量、土壤含水量等因素与红外波谱的关系, 并利用土壤粒径与热红外发射率的相关性, 提出了利用先进的星载热发射与反射辐射计 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) 的波段比值反演土壤粒径的方法. Salisbury^[4] 等人的分析基于不同的土壤样品, 分析结果易受土壤样品组分变化的影响. 为更好地分析各组分含量对红外波谱变化的影响, 我们通过分别控制单一参量的变化, 对土壤的 SO_2 含量、粒径、土壤水分含量等参量与热红外发射率之间的关系进行了分析, 结果显示红外发射率特征与各参量的变化具有很好的相关性. 在此基础上本文提出了利用 ASTER 等多波段的热红外遥感数据, 反演土壤含水量、土壤粒径和土壤含沙量的方法.

1 热红外光谱的野外测量方法

1.1 原理与方法

地表的热红外辐射亮度 $L_\lambda(\theta, \phi)$ 可以表示为

$$L_\lambda(\theta, \phi) = \tau_\lambda(\theta, \phi)\varepsilon_\lambda(\theta, \phi)B_\lambda(T) + L_{\lambda\alpha\uparrow}(\theta, \phi) + \tau_\lambda(\theta, \phi) \int_{2\pi} f_\lambda(\theta, \phi, \theta', \phi') L_{\lambda\alpha\downarrow}(\theta', \phi') \cdot \cos\theta' d\Omega'. \quad (1)$$

式(1)中下标 λ 代表不同的波长或等效中心波长, $\varepsilon_\lambda(\theta, \phi)$ 为地面目标在天顶角为 θ , 方位角为 ϕ 时的方向发射率, $B_\lambda(T)$ 是地表温度为 T 时的普朗克黑体辐射函数, $\tau_\lambda(\theta, \phi)$ 是 (θ, ϕ) 方向的大气透过率, $L_{\lambda\alpha\uparrow}(\theta, \phi)$ 为地表与观测者之间大气的上行辐

射, $f_\lambda(\theta, \phi, \theta', \phi')$ 是地表对大气下行辐射的二向性反射分布函数, $L_{\lambda\alpha\downarrow}(\theta', \phi')$ 是 (θ', ϕ') 方向上的大气下行辐射, $d\Omega'$ 为 (θ', ϕ') 方向微分立体角. 在地面测量时, $L_{\lambda\alpha\uparrow}(\theta, \phi)$ 项可以忽略, 且 $\tau_\lambda(\theta, \phi) \approx 1$. 如果天空下行辐射相对于方位角各向同性, 则大气下行辐射可表示为等效的下行辐射:

$$\overline{L_{\lambda\alpha\downarrow}} = 2 \int_0^{\pi/2} L_{\lambda\alpha\downarrow}(\theta') \cos\theta' \sin\theta' d\theta'. \quad (2)$$

根据 Kirchhoff 定律 $\rho(\theta, \phi) = 1 - \varepsilon(\theta, \phi)$, $\rho(\theta, \phi)$ 为方向半球反射率. 则地面测量时, 传感器的入瞳辐射亮度可以近似表示为

$$L(\theta, \phi) = \varepsilon(\theta, \phi)B(T) + [1 - \varepsilon(\theta, \phi)] \overline{L_{\lambda\alpha\downarrow}}. \quad (3)$$

由式(3)可以得到发射率的表达式:

$$\varepsilon(\theta, \phi) = \frac{L(\theta, \phi) - \overline{L_{\lambda\alpha\downarrow}}}{B(T) - \overline{L_{\lambda\alpha\downarrow}}}. \quad (4)$$

从式(4)可知发射率测量过程中需把握两个关键问题: 一是大气下行辐射或环境辐射的精确测量; 二是测准物体表面温度. 为解决这两方面问题, 我们在分析现有测量方法的基础上, 利用高精度的傅立叶红外光谱测量仪, 并采用热红外反射板对环境辐射进行了测量, 同时利用 ISSTES 算法进行了温度和反射率的分离反演.

1.2 野外测量系统

整个光谱测量系统主要由红外光谱仪、计算机、铝反射板以及黑体等组成. 红外光谱仪的波段范围为 $0.75 \sim 19.5 \mu\text{m}$, 光谱分辨率分别为 1、2、4、8 或 16cm^{-1} .

1.3 大气下行辐射的计算

为准确测量大气下行辐射 $\overline{L_{\lambda\alpha\downarrow}}$, 我们同步测量漫反射铝板的辐射量, 铝板的法线方向半球反射率

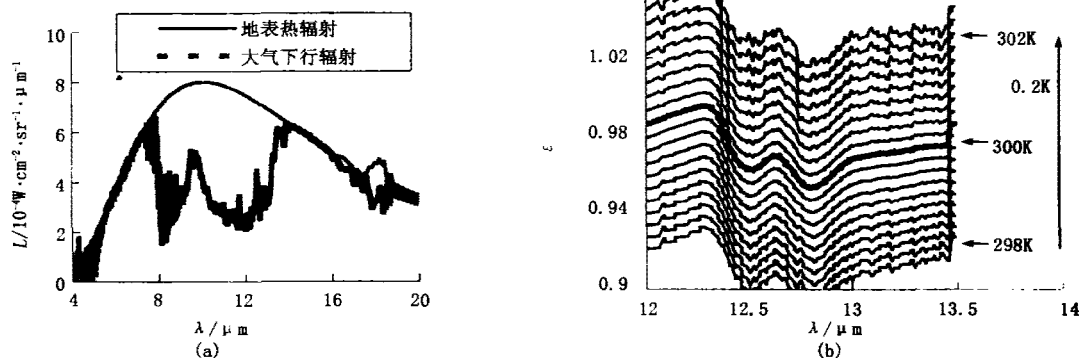


图 1 (a) 实测的土壤与大气下行辐射亮度曲线; (b) 不同模拟温度下得到的发射率曲线
 Fig. 1 (a) The field measured spectral radiance of soil and atmosphere; (b) Surface spectral emissivity retrieved under the assumption of different temperature

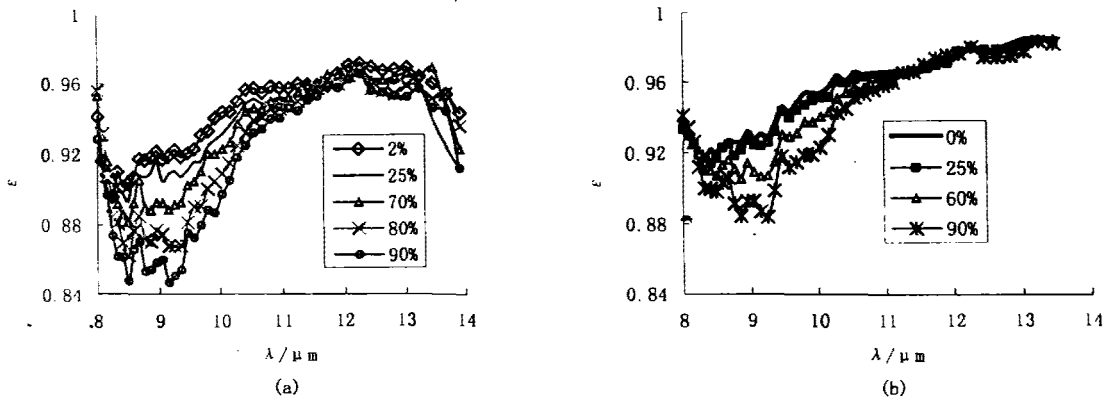


图2 不同含沙量土壤的发射率光谱(a),(b)分别为2类土壤
Fig.2 Spectral emissivity of soil with different SiO₂ content (a),(b) represent two kinds of soil samples

ρ_{atu} 通过实验室测量得到. 参照式(3),对反射铝板测量接收的总辐射 $L^{atu}(0)$ 可以表示为

$$L_{atu}(0) = \epsilon_{atu}(0)B(T_{atu}) + \rho_{atu}(0)\bar{L}_{a\downarrow} \quad (5)$$

式(5)右边第一项是温度为 T_{atu} 铝板的热红外辐射, 由于 $\epsilon_{atu}(0) < 5\%$, 因此这一项在总辐射中所占比例很小,但不能被忽略. T_{atu} 可以由点温计的观测得到.

1.4 温度与发射率的分离反演

由于地表温度与发射率的反演中, N 个波段上的测量, 总存在 $N + 1$ 个未知量(1个地表温度和 N 个波段的发射率值), 形成的欠定方程组不具备解析解. 现有的反演方法是在某种假设的前提下组成 $N + 1$ 个方程, 使方程组完备而得到温度和发射率, 但这些假设随测量条件和应用领域的不同, 其合理性和适应性也不尽相同. 本文针对红外高光谱测量数据, 基于 ISSTES 算法对温度和高光谱发射率进行了分离反演. 该算法是通过研究红外高光谱分辨率测量的结果与大气吸收线之间的关系提出的. 因为地表热辐射值包含了地表反射的大气下行辐射, 可通过估计和不断优化地表温度, 使得到的地表红外发射率曲线达到最大平滑.

图1(a)是在顺义实际测量的地表辐射与大气辐射的对比图, 在 λ 介于 $8 \sim 14\mu\text{m}$ 之间时, 大气的下行辐射由于有众多辐射吸收线的存在, 曲线很不规则. 图1(b)是在不同温度下模拟计算的一组土壤发射率曲线, 最底一条曲线对应的模拟温度为 298K , 最上一条曲线对应的模拟温度为 302K , 相邻曲线之间的温度间隔 0.2K . 可以看出, 不同的温度下, 模拟得到的发射率光谱曲线的平滑程度是不同的, 其中最平滑的粗线为优化地表温度与实际地表温度(300K)相等时的结果, 曲线的平滑度 S 可以由下式度量:

$$S = \sum_{i=2}^{N-1} \left\{ \epsilon_i - \frac{\epsilon_{i-1} + \epsilon_i + \epsilon_{i+1}}{3} \right\} \quad (6)$$

式(6)中 N 为波段数, ϵ_i 为第 i 波段的发射率. 优化地表温度的过程就是使 S 值最小, 即: $dS(T')/dT' \cong 0$. 则由地表温度 T' 根据式(4)获得地物的发射率光谱.

我们在实验中所用的 BOMEN 傅立叶变换红外光谱仪光谱分辨率为 1cm^{-1} , 用此光谱分辨率模拟计算了噪声对反演精度的影响. 当噪声小于 1.5

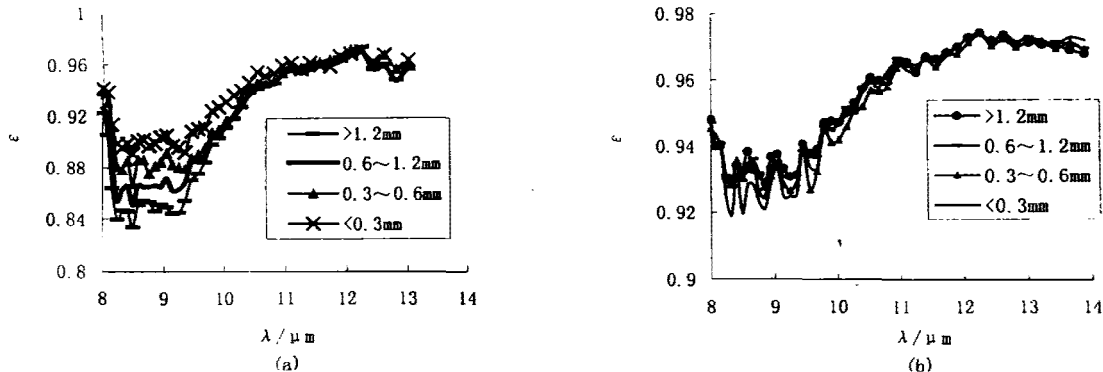


图3 不同粒径的沙子和土壤发射率光谱(a)SO₂沙子 (b)土壤
Fig.3 Spectral emissivity of sand and soil with different particle size (a)SO₂ sand (b)soil

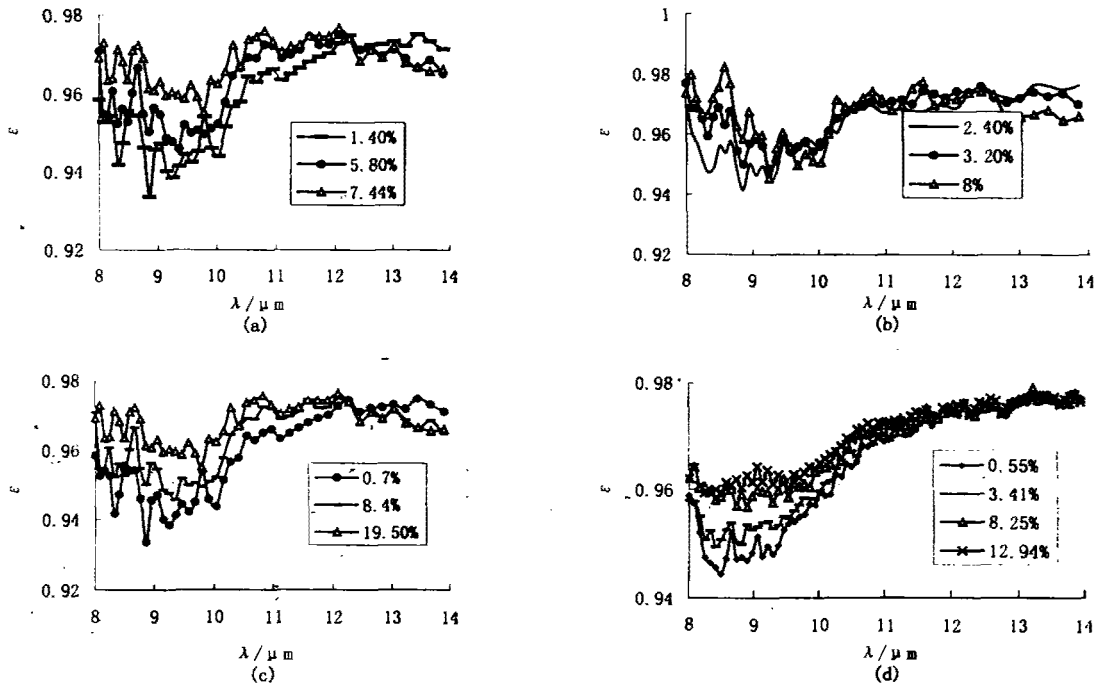


图4 不同含水量的土壤发射率光谱(a),(b),(c)和(d)分别代表4种不同类型土壤
 Fig.4 Spectral emissivity of soil with different water content (a),(b),(c) and (d) represent 4 kinds of soil samples

$\times 10^{-5} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ (等效于信噪比大于 200: 1)时,该算法可以获得优于 0.6K 的反演精度 (实际光谱仪的标定精度优于 $2.0 \times 10^{-6} \text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),发射率的反演精度优于 0.01.

2 土壤参量与红外发射率光谱相关性分析

为了研究土壤参量与红外发射率的相关关系,我们对土壤样品进行了如下处理:一是将取自北京顺义实验区的 2 种土壤样品与取自顺义潮白河河滩中的 SO_2 沙子,在筛选后统一粒径下进行混合,形成不同沙子含量的土壤系列样品;二是利用一组不同

孔径筛子(4~120 目)对土壤进行筛选,形成不同粒径的土壤样品系列;三是选择 3 种类型的土壤,经过水量调配、静置,形成不同含水量的土壤样品系列.我们用上节所述的方法对这些土壤样品进行了红外发射率光谱的测量和反演,并分析了土壤参量与红外发射率光谱之间的关系.

2.1 SO_2 沙子含量对土壤红外发射率的影响

图 2(a)和(b)分别是 2 种不同土壤的红外发射率光谱随含沙量的变化情况,从图 2 可以看出,2 组实验的结果是一致的:随着土壤含沙量的增加,在 $8 \times 9.5 \mu\text{m}$ 光谱范围内的发射率有明显下降;相对而

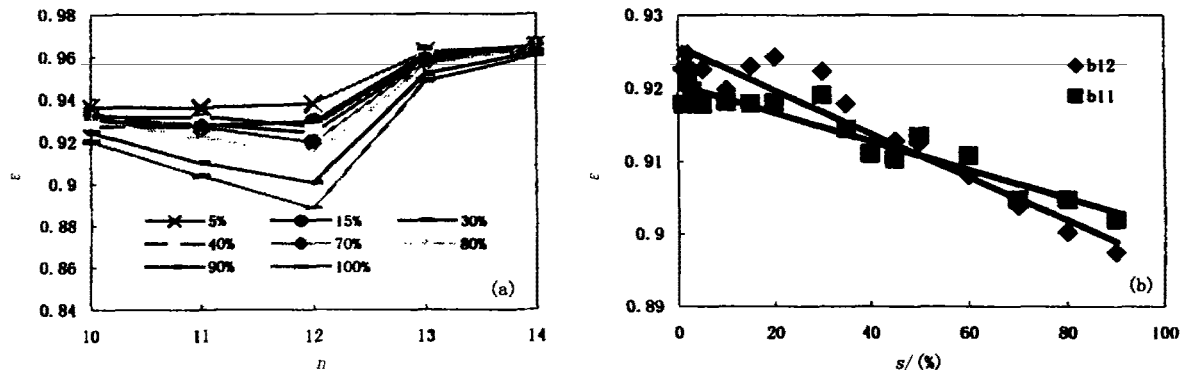


图5 不同含沙量土壤的 ASTER 波段发射率(a)ASTER 10~14 五个波段;(b)ASTER 第十一、十二波段
 Fig.5 Emissivities of soil with different sand contents for ASTER band (n is the band number, w is the sand contents)
 (a)The bands between 10~14 of ASTER (b)The eleventh and twelfth band of ASTER

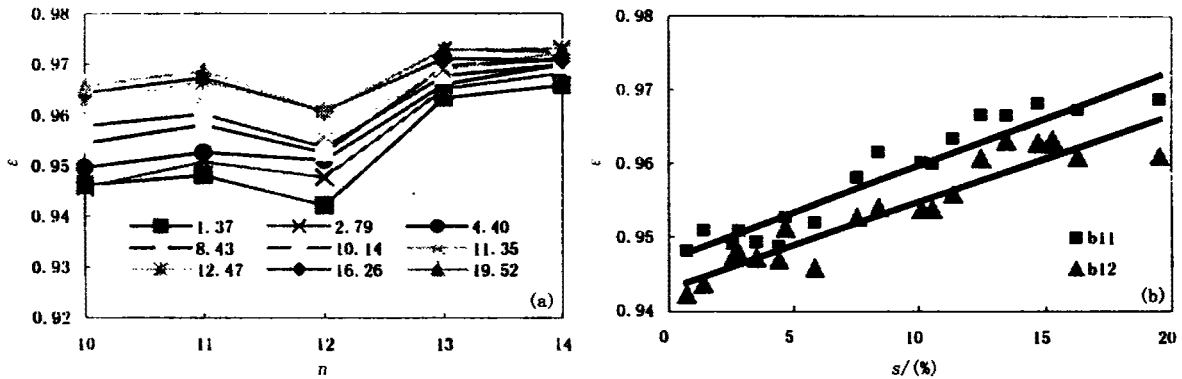


图6 不同含水量土壤的波段发射率(n 代表 ASTER 的波段值, w 为含水量)(a) ASTER 10~14 五个波段;(b) ASTER 第十一、十二波段

Fig. 6 Emissivity of soil with different water contents for ASTER band number (n is the band number, w is the water contents) (a) The bands between 10~14 of ASTER (b) The eleventh and twelfth band of ASTER

言,11~13 μm 的红外光谱基本保持不变。

2.2 粒径对红外发射率光谱的影响

图3 是不同粒径的沙子和土壤样品的红外发射率光谱,图3(a)表明沙子的红外发射率特征光谱随其粒径的减小而有规律地增加,但图3(b)中土壤的红外发射率光谱随粒径变化不是很明显。

2.3 含水量对土壤红外发射率光谱的影响

图4 是对不同含水量土壤样品的热红外发射率光谱观测结果,图4 表明,4 种土壤样品在不同含水量下红外发射率的变化规律是相似的。在8~9.5 μm 范围内随含水量的增加,红外发射率有不同程度的增大,而在11~13 μm 之间基本保持不变,不同类型的土壤含水量有不同的饱和值。对4 类土壤样品的分析结果显示,当土壤的含水量趋近于饱和时,随含水量的增加红外发射率光谱变化的幅度不是很明显。由于物体的发射率取决于物体自身的吸收系数和复折射指数,水在8~13 μm 范围内具有较高的吸收系数和发射率(>0.98),因此,当土壤含水量增加时,土壤的发射率也增加,但其变化的幅值因土壤的组成与状态而各异。当土壤含水量达到一定程度(饱和)后,土壤红外发射率光谱特征不再有明显的变化。

3 ASTER 通道发射率值与土壤物理系数的关系

ASTER 有5 个热红外波段(参数见表1)。我们利用 ASTER 通道响应函数,结合图4 中(c)类土壤的发射率测量数据模拟计算了其波段发射率值,并分析了它与土壤参量之间的关系。

表1 ASTER 的热红外波段

Table 1 The thermal bands of ASTER

波 段	光谱范围(μm)
10	8.125~8.475
11	8.475~8.825
12	8.925~9.275
13	10.25~10.95
14	10.95~11.65

图5 为土壤的红外 ASTER 波段发射率与不同沙子比例的关系,图5(b)中 b11 表示第十一波段,b12 表示第十二波段,沙子含量与发射率之间具有很好的线性关系。

图6(a)为图5 中(a)类土壤 ASTER 第10~14 波段不同含水量的土壤发射率变化状况,图6(b)为 ASTER 第十一、十二波段土壤发射率含水量变化状况。图6 表明,土壤发射率随含水量的增加而增加,但当含水量到一定量值时,发射率的变化幅度减弱。ASTER 第十一、十二波段与土壤含水量都具有很好的线性关系,相关系数达到89%。

图7(a)为 ASTER 土壤波段发射率比值与土壤含沙量的关系,图7(b)为 ASTER 发射率比值随含水量的变化情况,结果表明,和图5(b)、6(b)中波段发射率相比,第十一波段发射率比值与含沙量和含水量的线性关系几乎没有变化,而第十二波段的比值与含沙量和含水量的相关关系有所提高,相关系数分别由0.898 和0.884 增至0.926 和0.902。

综合图5、6 和7 的结果可以看出,红外发射率值与土壤的含沙量及含水量之间具有很好的线性关系(线性相关系数优于0.90),可以根据这种线性关系利用 ASTER 图像反演土壤含沙量和含水量等参数。

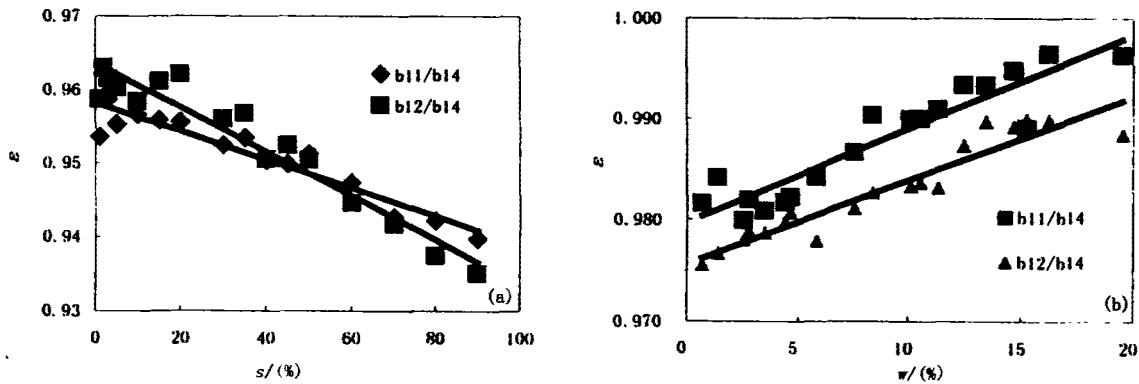


图7 土壤热红外波段发射率比值随土壤成分的变化(图中 s 为含沙量, w 为含水量, R 为波段发射率比值)(a) ASTER 波段发射率比值随含沙量的变化;(b) ASTER 波段发射率比值随含水量的变化

Fig. 7 Emissivity ratio of soil with different component content (a) Emissivity ratio of ASTER thermal band with soil sand content; (b) Emissivity ratio of ASTER thermal band with water content.

4 总结

本文在光谱平滑的温度/发射率迭代反演算法的基础上,设计了一种热红外光谱的野外测量方法,误差分析和实验结果表明,该方法是可行的.与通过改变环境辐射测量地物红外波谱的方法相比,该方法野外测量方便,易于操作,且避免了因改变环境辐射带来目标物表面温度变化而可能引起的发射率测量误差.

通过控制单一参量的变化,对北京顺义几种典型土壤和沙子的热红外光谱进行了测量.分析结果表明,随土壤含沙量的增加,在 $8 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 波段范围内土壤的发射率值下降,而在 $11 \sim 13 \mu\text{m}$ 之间基本保持不变.随含水量的增加,在 $8 \sim 9.5 \mu\text{m}$ 波段范围内土壤发射率值增加,但在水分达到一定量值时,发射率不再变化.

分析了 ASTER 热红外通道发射率与土壤物理参量之间的相关性,发现 ASTER 波段发射率与土壤含沙量、粒径、含水量之间有良好的线性关系.基于这一关系,可利用 ASTER 多波段的热红外遥感数据来反演土壤含沙量、土壤粒径和土壤含水量,从而使热红外多波段数据在全球变化的研究中发挥更大的作用.

REFERENCES

[1] Ingram P M, Henry M A. Sensivity of iterative spectrally smooth temperature/emissivity separation to algorithmic assumptions and measurement noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, **39**(10): 2158—2167
 [2] Rubio E, Caselles V, Badenas C. Emissivity measurements of several soils and vegetation types in the $8 \sim 14 \mu\text{m}$ wave

band; analysis of two field methods. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **59**: 490—521
 [3] Salisbury J W, D' Aria D M. Emissivity of terrestrial materials in the $8 \sim 14 \mu\text{m}$ atmospheric windows. *Remote Sensing of Environment*, **42**: 83—110
 [4] Salisbury J W, D' Aria D M. Infrared ($8 \sim 14 \mu\text{m}$) remote sensing of soil particle size. *Remote sensing of Environment*. 1992, **42**: 157—165
 [5] Nerry F, Labed J, Stoll M P. Spectral properties of land surfaces in the thermal infrared, 1. Laboratory measurements of absolute spectral emissivity signatures. *Journal of Geophysical Research*, 1990, **95**(B5): 7027—7044
 [6] Hook S J, Gabell G A. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geological studies. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**: 123—135
 [7] Kealy P S, Hook S J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data; implication for recovering land surface temperature. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**: 1155—1164
 [8] Labed J, Stoll M P. Spatial variability of land surface emissivity in the thermal infrared band; spectral signature and effective surface temperature. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **38**: 1—17
 [9] Snyder W C, Wan Z W. Surface temperature correction for active infrared reflectance measurements of natural materials. *Applied Optics*, 1996, **35**(13): 2216—2220
 [10] Becker F. The impact of spectral emissivity on the measurements of land surface temperature from a satellite. *International Journal of Remote Sensing*, 1987, **8**(10): 1509—1522
 [11] Li Z L, Becker F. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **69**: 197—214
 [12] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, **36**: 1113—1126