

我国西北沙源区地表热红外发射率特征分析

胡菊咏, 唐世浩*, 董立新, 张勇
(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要:用 102 F 测量了西北沙源区各类型地表的发射率. 将测量结果与 ASTER JHU 波谱库数据对比, 显示了测量结果的可靠性和必要性. 分析结果表明, 不同地表类型发射率差异显著, 同种类型地表发射率因物理特征不同会呈现规律性差异, 发射率在时间尺度上具有稳定性. 测量的沙源区发射率数据及分析结果对沙尘暴相关研究有重要意义.

关键词:沙尘暴; 野外测量; 热红外; 发射率
中图分类号:TP722.5 **文献标识码:**A

Analysis of thermal infrared emissivity for sand dust source regions in northwest China

HU Ju-Yang, TANG Shi-Hao*, DONG Li-Xin, ZHANG Yong
(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Various types of surface emissivities for dust source regions in northwest China were measured by 102F. The comparison between field measured spectra and the ASTER JHU spectral library data showed the reliability and necessity of the field measurement. The analysis results showed that emissivity had significant differences for different types of land surface. The regular differences in emissivity for the same type surface were related to the different physical characteristics. The emissivity was relatively stable on the time scale. The measurement and analysis of the emissivity data for the sand dust source regions provide important information for sandstorm related researches.

Key words: sandstorm, field measurement, thermal infrared, emissivity

PACS: 93.85.Pq, 93.30.Db

引言

沙尘暴是大风与沙尘结合产生的灾害性天气^[1], 会给自然环境和社会经济带来巨大危害^[2]. 我国沙尘天气主要发生于北方地区, 其中新疆的塔克拉玛干沙漠和内蒙的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠及毛乌素沙地等是沙尘暴和沙尘天气发生的高频区^[3], 这些区域也是我国华北地区沙尘暴的主要源地^[1]. 监测沙源区地表状况对沙尘暴的发生条件、防治规划等分析研究有重要意义^[4].

地表发射率是描述地表红外辐射特性的基本参数, 它不仅依赖于地表物体的组成成分, 而且与物体的表面状态(表面粗糙度等)及物理性质(介电常数、含水量、温度等)有关^[5]. 国内外学者对土壤和沙地研究显示, 土壤参数的变化对热红外发射率变化有重要影响, 二者更具有明显相关性^[6-8], 并可通过发射率数据反演土壤粒径^[9]、含水量和含沙量^[7]. 测量沙源区地表热红外发射率可为地表含水量及构成组分等特性研究提供依据, 与气象资料结合用于土地沙化、起沙监测等沙尘暴各项监测. 同¹

收稿日期:2012-08-23, 修回日期:2013-04-02

Received date: 2012-08-23, revised date: 2013-04-02

基金项目: 十一五科技支撑计划重点项目(2008BAC40B05); 公益性行业(气象)科研专项(GYHY20090622、GYHY201106014、GYHY201306077、GYHY200906036); 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA120900); 国家自然科学基金(41171275)

Foundation items: Supported by Eleven Five Science and Technology Support Program key Project(2008BAC40B05), Public Sector (Meteorological) Scientific Research Projects (GYHY20090622、GYHY201106014, GYHY201306077, GYHY200906036), National Programs for High Technology Research and Development of China (863 Program) (2012AA120900), and National Natural Science Foundation of China(41171275)

作者简介 (Biography): 胡菊咏(1987-), 女, 湖北安陆人, 硕士, 主要从事热红外遥感定量反演, E-mail: hujy@cma.gov.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: tangsh@cma.gov.cn

时,也为沙尘定量遥感中监测算法和预报模式的改进提供参数支撑,而此方面数据大规模获取和分析鲜见报道.本文用热红外辐射仪 102 F 测量了内蒙、新疆及甘肃等地沙源区多种类型地表的发射率,比较测量结果与 ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) JHU (Johns Hopkins University) 波谱库中同类型地表的数据以证实测量结果的可靠性.对比分析不同地表类型发射率的特征,不同地区沙地发射率的异同,以研究地表发射率与地表特征的关系,同时研究地表发射率在时间尺度的变化情况.

1 测量原理

8~14 μm 热红外波段,不考虑太阳辐射,大气辐射传输方程为:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) \tau_{\lambda}(\theta_v) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{a\tau\lambda} \downarrow \tau_{\lambda}(\theta_v) + L_{a\tau\lambda} \uparrow, \quad (1)$$

式中 λ 为波长, ε_{λ} 为波谱发射率, T_s 为地表温度, B_{λ} 为黑体的波谱辐射亮度, $\tau_{\lambda}(\theta_v)$ 为观测天顶角 θ_v 方向大气波谱透过率, $L_{a\tau\lambda} \downarrow$ 为大气向下波谱辐射, $L_{a\tau\lambda} \uparrow$ 为大气向上的波谱辐射.

用红外光谱仪测量地表时探测器距离地面高度在 1 m 以内,根据 MODTRAN 模拟结果,在 8~14 μm 内,该距离下大气的上行辐射小于探测器接收的总辐射能量的 0.5%,大气透过率近乎为 1,因此可忽略这两项^[10].那么用光谱仪观测时,式(1)可简化为:

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T_s) + (1 - \varepsilon_{\lambda}) L_{a\tau\lambda} \downarrow. \quad (2)$$

因此,若用光谱仪对地测量辐射时,已知地表温度和同步大气下行长波辐射,便可用下式计算地表发射率:

$$\varepsilon_{\lambda} = (L_{\lambda} - L_{a\tau\lambda} \downarrow) / (B_{\lambda}(T_s) - L_{a\tau\lambda} \downarrow). \quad (3)$$

2 西北沙源区热红外发射率测量实验

2.1 实验区域

实验分三次进行,2010 年 4 月 8~22 日从呼和浩特出发,途经库布齐沙漠、东胜区、毛乌素、巴丹吉林沙漠、民勤、青土湖、拐子湖等地,最后回到银川,测量了沙漠、盐碱地、戈壁及枯萎草地等多种地表类型的发射率数据.2011 年 6 月 5~8 日分别测量了位于塔克拉玛干沙漠腹地的新疆塔中东、西、西南及东南方向沙漠的发射率,并测量了塔中到若羌途中盐碱地、瓦石峡戈壁滩、干涸的塔河河床等的发射率.2010 年和 2011 年连续两年的 8 月,测量了位于

甘肃敦煌的中国遥感卫星辐射校正场中心点的发射率.所有测点分布如图 1 所示.

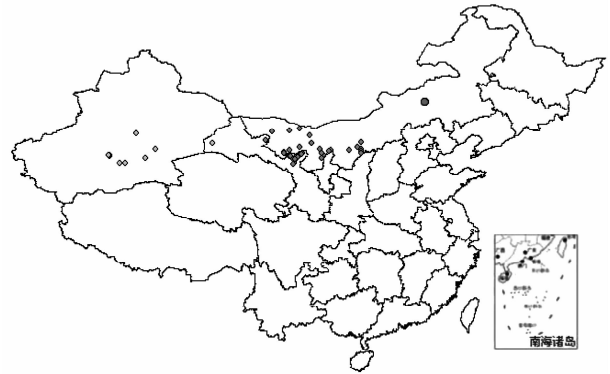


图 1 测点分布图

Fig. 1 The distribution map of the measured points

2.2 发射率测量

选择地势平坦,地表大面积均匀的区域,测量时间选择正午太阳高度角缓慢变化时、清晨、傍晚或夜晚无太阳影响时,在近地表无风无云,地表温度较稳定情况下,开展地表发射率测量实验.

实验系统由光谱仪、漫反射板和点温计组成.光谱仪选择的是由美国 D&P 公司生产的便携式傅里叶变换热红外光谱仪 102 F,工作温度范围为 15~35 $^{\circ}\text{C}$.光谱范围为 2~16 μm ,选择 6 cm^{-1} 的光谱分辨率(还可选 12 或 24 cm^{-1}),标配 1" 口径镜头(视场角 4.8 $^{\circ}$),也可选 2"(2.4 $^{\circ}$)、4"(1.2 $^{\circ}$)、6"(0.8 $^{\circ}$) 镜头,配有相应的冷热校准黑体,可校准温度范围是 3~85 $^{\circ}\text{C}$.102 F 还配有热稳定的干涉仪,嵌入式计算机等,可用蓄电池汽车点烟器或市电供电.漫反射板选择由 Labsphere 公司生产的在铝制的底板上镀上漫反射金薄膜的板,在近红外、中红外和热红外波段具有 95%~98% 反射率,且有很好的朗伯性^[11].

实验前需在 102 F 的杜瓦瓶中注满液氮,让探测器充分制冷.望远镜装在仪器前部接口锁住后,将仪器装在三脚架上,镜头离地面 1 m 以内.给仪器接通电源、鼠标后即可开机.根据环境温度和样品温度设置冷、热黑体温度,冷黑体比环境温度稍低、热黑体比样品温度稍高.由于黑体升温比降温容易,故先定标冷黑体,后进行热黑体定标.一般开始时每 10 min 黑体定标一次,之后可减少定标次数,但每次开机测量前都需定标.

定标后可先采集大气下行长波辐射数据.将漫反射金板放置于被测地表位置,在其与环境热平衡后用点温计测量其温度,向仪器软件中输入金板温

度和反射率,将镜头对准金板快速测量其反射的辐射波谱后便可得大气下行辐射.随后将镜头垂直对准研究地表,快速获取地表辐射波谱.在已知地表温度的情况下可通过式(3)计算发射率.

实验在平坦地势上选择采样点,每片区域根据地表情况选取3~5个采样点,对每个采样点重复测量3次,每次仪器内部平均了8次采样.研究区域特征的地表发射率时,将以上9~15条测量结果取平均值,进而参与地表特性研究.

2.3 地表温度获取

由于自然物体较低的热惯性,较差的热传导能力及粗糙表面,用点温度计直接测量地表温度会存在较大误差,从而导致发射率计算值的不准确^[12].此外,质地、阴影等导致的地表非同温性,使得点温度计测量的地面点的温度与辐射仪视场区域的温度存在一定差异.可采用温度反演算法获取发射率测量同步地表温度.目前主要的算法有最大发射率法、黑体拟合法等,使用最多效果最佳的是光谱平滑算法.

平滑度算法基本思想是对高光谱数据,地物的发射率光谱要比大气的下行辐射平滑得多,精确的地表温度能很好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.给定一个地表温度范围,计算每个温度对应的地表发射率曲线的平滑度指数,具有最小平滑度指数的发射率曲线对应的温度作为地表的温度.已有的平滑度指数有 Borel、Bower 及 Ingram 等提出的各种指数,程洁等^[13]对其比较后表明, Bower 最小均方导数 (mean squared derivative, MSD) 衡量 8~14 μm 发射率曲线的平滑程度指数精度较高,见式(4).故本文选择该平滑度指数通过迭代计算获取同步地表温度.

$$\text{MSD}(T_j) = \frac{1}{N} \sum_{\lambda_i} [\varepsilon(\lambda_i, T_j) - \varepsilon(\lambda_{i-1}, T_j)]^2, \quad (4)$$

式中 $\varepsilon(\lambda_i, T_j)$ 表示当地表温度为 T_j 时波长为 λ_j 处的发射率.

3 发射率测量结果及分析

3.1 测量结果与光谱数据库对比

选择测量的沙地地表发射率,与 ASTER JHU 波谱库谱线对比图,见图2所示.图中三条实线为波谱库中随机挑选的旱成土类 (aridisol) 三个样本的发射率波谱曲线,四条虚线分别是实验测量的四条发射率波谱曲线.对比两种曲线,均在 8~9.5 μm 区间内较低,9.5~10.5 μm 区间内上升,到大于 11 μm 后趋于稳定.本实验测量的发射率波谱与波谱

库中数据在热红外波段趋势一致,且各波长处值较为接近.由此可见,本实验测量方法得到的测量结果具有准确性和可靠性.但同时二者也存在差异,8~9.5 μm 区间本实验测量结果更低.虽然两种地表均是旱成土,但本实验测量的对象是我国西北沙源区,地表特性与波谱库中的采样地表不同.

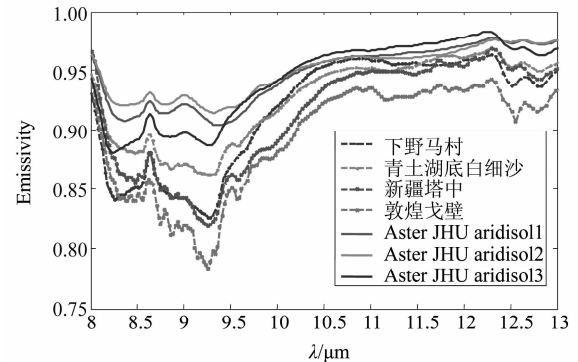


图2 测量结果与 ASTER JHU 光谱库中沙地发射率光谱对比图

Fig. 2 Comparison of measurement results with the sand emissivity spectrum of ASTER JHU spectral library

3.2 不同地物类型地表发射率

三次实验测量的地物类型多样,有沙地、盐碱地、裸土及草地等.选择新疆塔克拉玛干沙漠、新疆且末盐碱地、内蒙阿拉善裸土和内蒙东胜区西草地的发射率光谱显示,不同地物类型发射率光谱特性各不相同,从图3中可见,区别主要体现在 8~11 μm 波段.地物发射率在 8~9.5 μm 间有明显波谷,不同地物波谷形状及谷深不同,其中沙漠在此波段内的发射率明显低于其他地物,植被的最高.9.5~11 μm 区间发射率会上升,不同地物上升速率不同,草地最为平稳,沙漠上升速度最快,其次是盐碱地和裸土.

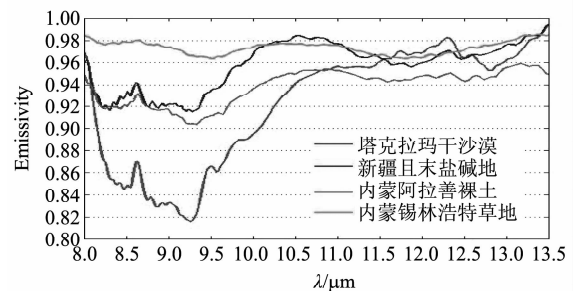


图3 不同地物类型发射率光谱

Fig. 3 Emissivity spectra of different types of surface

3.3 不同地区同种沙地发射率

沙地是沙尘暴研究的重要地物类型,实验测量

了西北沙源区多处沙地的发射率。

图 4 所示的是库布其沙漠、巴丹吉林沙漠、青土湖、拐子湖及塔中附近塔克拉玛干沙漠的发射率波谱图。图中各条曲线在 8 ~ 13 μm 波段内趋势一致,发射率大小差异主要表现在 8 ~ 10 μm 范围内,可达 0.1 以上,大于 10 μm 后的波段范围内差异较小。

在 8 ~ 10 μm 范围内,图中天蓝色曲线所示的青土湖底白细沙发射率最高,红色曲线所示的新疆塔中沙漠的发射率其次,随后依次是库布其沙漠、青土湖沙地,绿色曲线所示的巴丹吉林沙漠拐子湖地区发射率最低。实验测取沙地发射率的同时,霍文等采集了各测点的地表样本,对比分析在新疆和内蒙多处沙地采集的样本粒径,研究结果显示^[14],图 4 中发射率对应测点的沙粒平均粒径塔中最小,库布其沙漠其次,巴丹吉林沙漠拐子湖最大。由此可见,测量的发射率曲线在 8 ~ 10 μm 范围内的高低与实验测量的粒径大小规律一致。

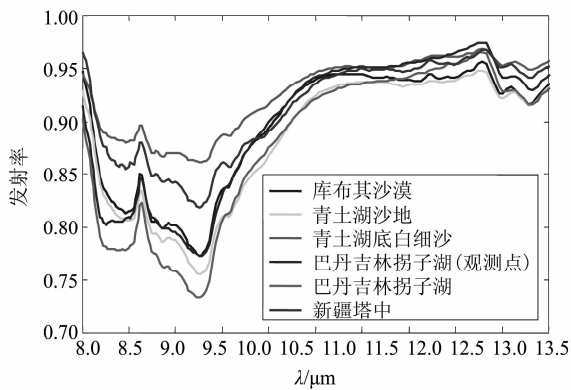


图 4 不同地域沙地发射率波谱图
Fig. 4 Sand emissivity spectra in different places

图 5 所示为位于塔中东部、西南部以及东南部塔克拉玛干沙漠的发射率的波谱图。图中三条曲线无论波谱谱型还是各波长发射率的值差异都较小,在 8 ~ 10 μm 范围内相似度仍较高。霍文等对塔中地区塔克拉玛干沙漠的采样点粒径分布分析得,此地区的外汇性沙源极少,均一性较高^[14]。沙地采样研究的粒度特征结果,与发射率曲线对塔中地区粒径分布特点的特征一致。

综上,图 4 和图 5 中发射率曲线的特征,和实地采样对粒度特征分析后的结果一致。因此,沙地发射率的波谱曲线可以正确反映粒径特征。

3.4 地表发射率时间变化情况

通过在敦煌戈壁连续 5 天内三次对同一地点发

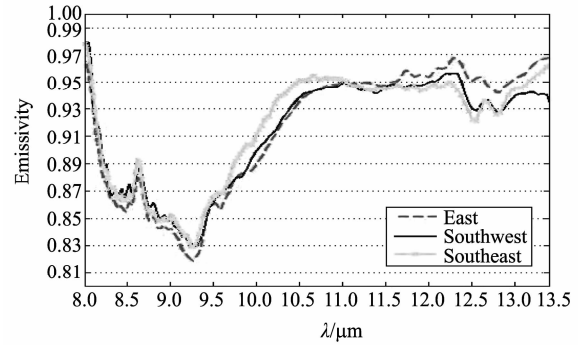


图 5 塔中周边不同地区沙地发射率波谱图
Fig. 5 Sand emissivity spectra in different areas surrounding Tazhong

射率的测量,对比测量结果如图 6 示,三条测量曲线差异极小,趋于一致。同时将对同一地点于 2010 年的测量结果与 2011 年结果对比,结果如图 7 示。图中红色曲线为 2011 年三次测量结果,蓝色曲线为 2010 年两次测量结果,两种颜色曲线仅存在较小差异。2011 年 6 月的暴雨对场地地表特性造成了一定影响,但地表发射率变化仍不大。由此可见,敦煌地表在时间尺度上较为稳定。

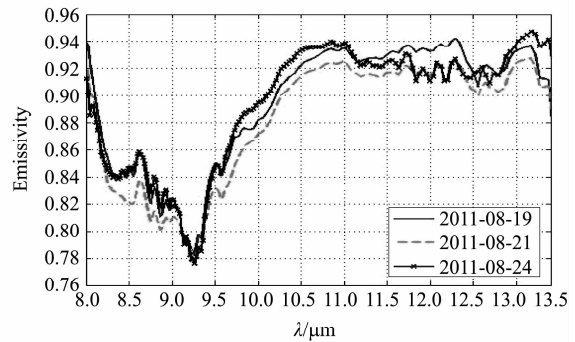


图 6 2011 年三天测量的发射率波谱
Fig. 6 Three emissivity spectra measured in three days in 2011

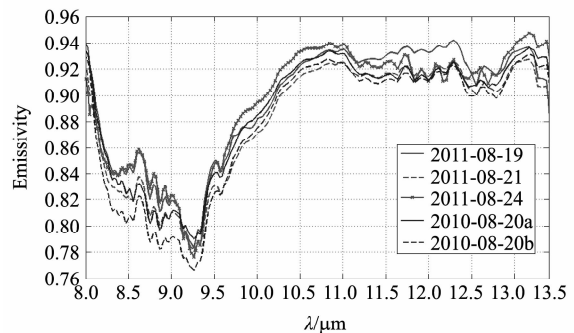


图 7 2011 年与 2010 年敦煌戈壁发射率测量结果对比图
Fig. 7 Comparison of Gobi surface emissivity at Dunhuang measured in 2011 and 2010

4 结论

测量研究沙源区地表发射率可用于地表特性分析,对沙尘暴各项研究具有重要意义.本实验用 102 F 热红外光谱仪测量了西北沙源区内蒙古、新疆及甘肃等地多种地表的发射率.对比实验测量的与 ASTER JHU 光谱库中早成土类型的发射率波谱,谱型相似,显示了测量数据的可靠性.同时测量与波谱库数据的局部差异,显示了我国西北部沙源区地表与波谱库中采样地表的差异性,说明了实际测量采集发射率的必要性.

实验测量了多种地表类型的发射率,不同类型间发射率在 8 ~ 11 μm 波段有显著差异,8 ~ 9.5 μm 波段波谷形状和谷深不同,沙漠此波段发射率最低,植被最高,9.5 ~ 11 μm 波段发射率上升速度不同,沙漠最快.不同类型地表发射率在热红外波段存在规律,可用于通过地表发射率的特性研究地表类型.

对比研究新疆和内蒙不同地区沙地发射率,8 ~ 9.5 μm 范围内有较大差异,新疆塔中发射率较内蒙各沙地高.实地采集沙地样品研究显示,新疆沙地粒径较内蒙小.说明 8 ~ 9.5 μm 波段内发射率的大小与沙粒粒径的大小存在关系.新疆塔中不同区域沙地发射率相似度极大,反映的地表特性与沙地采样分析结果一致,均显示此区域地表较均一.

分析于敦煌中国遥感卫星辐射校正场中心的戈壁地表发射率不同时间的测量结果,对比结果显示该地表的发射率随时间变化差异较小,证明了戈壁地表在时间尺度上的稳定性.

本实验测量的西北沙源地地区发射率可为相关研究和模式提供了准确可靠的数据.且经分析得不同地表类型的热红外发射率存在规律,沙地的发射率可反映粒径大小等地表特征,地表发射率随时间变化的差异不大.因此,可通过沙源区地表发射率的测量研究地表特性,同时也可通过监测地表发射率监测地表特性的变化,对土地沙化、起沙监测等各项沙尘暴监测有十分重要的意义.

REFERENCES

- [1] YE Du-Zheng, CHOU Ji-Fan, LIU Ji-Yuan, *et al.* Causes of sand-stormy weather in northern China and control measures[J]. *Acta Geographica Sinica* (叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策. *地理学报*), 2000, **55**(5):513-521.
- [2] SHI Guang-Yu, ZHAO Si-Xiong. Several scientific issues of studies on the dust storms[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (石广玉, 赵思雄. 沙尘暴研究中的若干科学问题. *大气科学*), 2003, **27**(4):591-605.
- [3] QUAN Lin-Sheng, SHI Shao-Ying, ZHU Ya-Fen, *et al.* Temporal-spatial distribution characteristics and causes of dust-day in China[J]. *Acta Geographica Sinica* (全林生, 时少英, 朱亚芬, 等. 中国沙尘天气变化的时空特征及其气候原因. *地理学报*), 2001, **56**(4):477-485.
- [4] FAN Yi-Da, SHI Pei-Jun, LUO Jing-Ning. Advances in studying dust storm using remote sensing[J]. *Advance in Earth Sciences* (范一大, 史培军, 罗敬宁. 沙尘暴卫星遥感研究进展. *地球科学进展*), 2003, **18**(3):367-373.
- [5] ZHAO Ying-Shi. *The Principle and method of analysis of remote sensing application*[M]. Beijing: Science Press (赵英时. *遥感应应用分析原理与方法*. 北京: 科学出版社), 2003.
- [6] Buettner K J K, Kern C D. The determination of infrared emissivity of terrestrial surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1965, **70**(6):1329-1337.
- [7] XIAO Qing, LIU Qin-Huo, LI Xiao-Wen, *et al.* A Field measurement method of spectral emissivity and research on the feature of soil thermal infrared emissivity[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (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. *红外与毫米波学报*), 2003, **22**(5):373-378.
- [8] HUANG Qi-Ting, SHI Zhou, PAN Gui-Ying, *et al.* Characteristics of thermal infrared hyperspectra and prediction of sand content of sandy soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (黄启厅, 史舟, 潘桂颖, 等. 沙质土壤热红外高光谱特征及其含沙量预测研究. *光谱学与光谱分析*), 2011, **31**(8):2195-2199.
- [9] Salisbury J W, Daria D M. Infrared (8 ~ 14 μm) remote sensing of soil particle size[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, **42**(2):157-165.
- [10] Christoph C B. First JPL workshop on remote sensing of land surface emissivity[C], JPL, May, 1997: 6.
- [11] ZHANG Yong, LI Yuan, RONG Zhi-Guo, *et al.* Field measurement of Gobi surface emissivity spectrum at Dunhuang calibration site of China[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (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. *光谱学与光谱分析*). 2000, **29**(5):1213-1217.
- [12] WANG Hui, PAN Yi, LI Hua, *et al.* Measuring spectral emissivity of natural objects with FTIR[J]. *Infrared Technology* (王珩, 盘毅, 李华, 等. 基于快速傅里叶红外光谱仪的自然物光谱发射率测量. *红外技术*). 2009, **31**(4):210-214.
- [13] CHENG Jie, XIAO Qing, LIU Qin-Huo, *et al.* Effects of smoothness index on the accuracy of iterative spectrally smooth temperature/emissivity separation algorithm [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics* (程洁, 肖青, 柳钦火, 等. 平滑度指数对光谱迭代平滑温度发射率分离算法精度的影响分析. *大气与环境光学学报*), 2007, **2**(5):376-380.
- [14] HUO Wen, HE Qing, YANG Xing-Hua, *et al.* The research on grain size characteristic of desert in north of China[J]. *Research of Soil and Water Conservation* (霍文, 何清, 杨兴华, 等. 中国北方主要沙漠沙尘粒度特征比较研究. *水土保持研究*). 2011, **18**(6):6-11.