

# 热红外遥感定量反演地表岩石的SiO<sub>2</sub>含量

闫柏琨<sup>1</sup>, 刘圣伟<sup>2</sup>, 王润生<sup>1,2</sup>, 甘甫平<sup>2</sup>, 陈伟涛<sup>1</sup>, 杨苏明<sup>2</sup>

YAN Bo-kun<sup>1</sup>, LIU Sheng-wei<sup>2</sup>, WANG Run-sheng<sup>1,2</sup>,

GAN Fu-ping<sup>2</sup>, CHEN Wei-tao<sup>1</sup>, YANG Su-ming<sup>2</sup>

1. 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083;

2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China

**摘要:** 硅酸盐矿物热红外发射率光谱特征与其SiO<sub>2</sub>含量有很好的对应关系。本文以ASU(Arizona State University) JHU(Johns Hopkins University)光谱库为数据源, 研究了硅酸盐矿物发射率光谱克里斯琴森特征(CF-Christensen Features)与SiO<sub>2</sub>含量、SCFM(SiO<sub>2</sub>/(SiO<sub>2</sub>+FeO+MgO+CaO))指数的定量关系, 并与Copper对火成岩的研究结果进行了对比, 二者吻合, 可作为热红外发射率光谱线性混合的佐证。建立了表征硅酸盐矿物SiO<sub>2</sub>含量的SiO<sub>2</sub>指数( $\epsilon_{12}/\epsilon_{13}$ )与SiO<sub>2</sub>含量的定量关系, 在此基础上, 利用ASTER热红外数据对东天山黄山东地区SiO<sub>2</sub>进行了定量反演, 反演结果与地质事实相符。利用反演结果可以对基性超基性岩体进行圈定, 对于寻找与基性超基性岩体有关的铜镍矿床有重要的应用价值。

**关键词:** 热红外; 遥感; SiO<sub>2</sub>含量; 硅酸盐; 矿物; 黄山东地区

中图分类号: P631.8

文献标识码: A

文章编号: 1671-2552(2006)05-0639-05

**Yan B K, Liu S W, Wang R S, Gan F P, Chen W T, Yang S M. Quantitative inversion of the SiO<sub>2</sub> content in surface rocks using thermal infrared remote sensing. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(5): 639-643**

**Abstract:** There is a good correspondence between the thermal infrared emissivity spectral features of silicate minerals and their SiO<sub>2</sub> content. Using the data from the ASU (Arizona State University) and JHU (Johns Hopkins University) spectral databases, the authors studied the quantitative relation of the Christensen features (CF) of the emissivity spectra to the SiO<sub>2</sub> content and SCFM (SiO<sub>2</sub>/(SiO<sub>2</sub>+FeO+MgO+CaO)) index and correlated the research results with Copper's research results derived from igneous rocks. The correlation shows that they are coincident. This is evidence of linear mixing of thermal infrared emissivity spectra. The quantitative relation of the SiO<sub>2</sub> content and the SiO<sub>2</sub> index ( $\epsilon_{12}/\epsilon_{13}$ ) indicating the SiO<sub>2</sub> content. Based on this relation, the ASTER thermal infrared data were used for inversion and retrieval of the SiO<sub>2</sub> content in the Huangshandong area, East Tianshan. The result of inversion conforms to the geological fact. Basic-ultrabasic intrusions can be delineated using the inversion result, so this method has great application value in looking for copper-nickel deposits associated with basic-ultrabasic intrusions.

**Key words:** thermal infrared; quantitative remote sensing; SiO<sub>2</sub> content; silicate; mineral; Huangshandong area

SiO<sub>2</sub>是地壳的主要成分, 其含量是地质体分类及分析其成因演化的重要化学参量, 因此在遥感地质应用中, 人们一直努力寻找光谱特征与矿物岩石中SiO<sub>2</sub>含量的相关关系, 并

以此作为SiO<sub>2</sub>含量遥感定量反演的依据。Si-O键在可见光反射红外波段(0.4~2.5  $\mu\text{m}$ )没有光谱特征, 而在热红外大气窗口(8~12  $\mu\text{m}$ )有强烈的基频振动。研究表明, 岩石矿物的SiO<sub>2</sub>

收稿日期: 2005-07-27; 修订日期: 2006-02-22

基金项目: 国土资源调查项目《成像光谱技术在资源勘查中的应用研究》(20022014003)、《岩矿遥感定量化技术研究》(2003048)、国家自然科学基金(40201034)、国土资源部百名优秀青年科技人才计划《高光谱遥感矿物信息探测与红外识别》资助。

作者简介: 闫柏琨(1977-), 男, 在读博士, 从事热红外遥感、高光谱遥感地质应用研究。E-mail: ybk2000@163.com

含量与发射率光谱有一定的对应关系。Lyon<sup>[1]</sup>测得25个火成岩样品(酸性—超基性)的发射率光谱及其SiO<sub>2</sub>含量,结果表明,随着SiO<sub>2</sub>含量的增加,发射率吸收峰会向短波方向偏移。Copper<sup>[2]</sup>以ASTER光谱库(<http://speclib.jpl.nasa.gov>)为数据源研究了从基性到酸性共35个火成岩样品的成分特征与其发射率光谱特征的对应关系,并建立了发射率光谱克里斯琴森特征(CF—Christensen Features)、透射特征(TF—Transparency Features)、CF+TF特征与岩石SiO<sub>2</sub>含量、SCFM(SiO<sub>2</sub>/(SiO<sub>2</sub>+CaO+FeO+MgO))指数<sup>[3]</sup>的统计关系。火成岩SCFM与分异指数有很好的相关关系<sup>[4]</sup>,可以利用这些光谱特征反演火成岩的分异指数。Ninomiya<sup>[5]</sup>利用人工神经网络对ASTER模拟数据进行了SiO<sub>2</sub>含量的定量反演。二宫芳树<sup>[6]</sup>针对ASTER数据提出了可以定性表征硅酸盐SiO<sub>2</sub>含量的光谱指数,并进行了实例研究。CF、TF等光谱特征的研究成果只能应用于热红外高光谱数据,由于目前对地观测中高光谱数据的匮乏,这些成果目前尚难应用于实际。二宫芳树<sup>[6]</sup>建立的ASTER数据SiO<sub>2</sub>光谱指数可应用于实际,但属于定性指数。本文以ASU、ASTER光谱库为数据源对硅酸盐矿物发射率光谱CF特征与其SiO<sub>2</sub>含量、SCFM指数的关系进行了研究,与前人的研究结果进行了对比。同时还以ASU光谱库<sup>[6]</sup>为数据源建立了该指数与SiO<sub>2</sub>含量的统计关系模型,并利用新疆东天山地区ASTER热红外数据进行了实例研究。

## 1 矿物发射率光谱理论简介

图1为硅酸盐大类6.25~25 μm的发射率光谱,8.5~12.0 μm之间最强的吸收特征为Si—O键的不对称伸缩振动所致,该波段位于大气窗口内,是对地遥感中重要的光谱特征。吸收强度相对较小的位于12~18 μm间的特征由Si—O—Si、Si—O—Al、(Si,Al)—O—(Si,Al)对称性振动所致。以下简述矿物热发射率光谱吸收特征RF(Reststrahlen Features)、CF(Christensen Features)、TF(Transparency Features)3个光谱特征的成因<sup>[7]</sup>。

RF特征是与表散射(Surface Scattering)有关的特征。这些波段与矿物内部Si—O振动频率相吻合,矿物吸收系数较大,入射光波与矿物相互作用主要发生在矿物表面,在光波进入矿物内部之前就被发射回去。根据菲涅尔反射定律<sup>[8]</sup>(Frensel reflectance law)与基尔霍夫定律(Kirchhoff's law),在这些波段反射率最大、发射率较小。当矿物粒度减小时,由于多重散射增强,反射率减小,发射率会增大。CF特征是与异常散射(Anomalous Dispersion)有关的光谱特征,位于比剩余特征波长小且发射率最大的位置(图1)。对其可作出如下解释<sup>[9]</sup>,在小于剩余特征波长处矿物折射指数急剧变化的位置(Anomalous Dispersion),折射指数接近于周围环境,后向散射最小,同时吸收也较小,光波容易透过矿物样品而导致反射率最小即发射率最大。TF特征是与体散射(Volume Scattering)有关的光谱特征,介于Si—O振动的波段区域有相对较小的吸收系数,光波较容易进入矿物颗粒内部,散射以体散

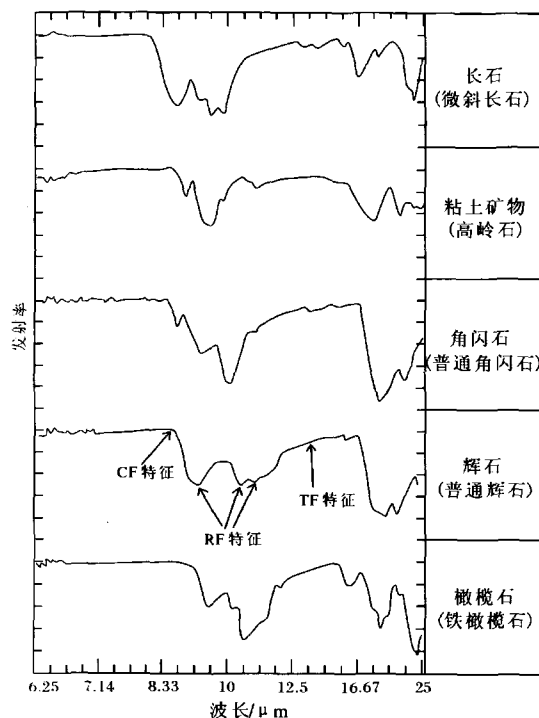


图1 硅酸盐矿物发射率光谱曲线(引自ASU光谱库<sup>[6]</sup>)

Fig.1 Emissivity spectra of silicate minerals

射为主,矿物颗粒变小会导致反射率增加即发射率减小,出现吸收峰<sup>[9]</sup>。石英颗粒减小至约40 μm时会出现特征吸收峰。TF特征对成分有一定的指示作用<sup>[10]</sup>,但本次研究中样品颗粒较大(710~1000 μm),没有透射特征,因此没有考虑该特征与SiO<sub>2</sub>含量的关系。

## 2 硅酸盐矿物SiO<sub>2</sub>含量与光谱特征的关系

本次研究以JHU光谱库与ASU光谱库<sup>[6]</sup>为数据源,光谱库描述见表1。选取JHU光谱库中71个造岩矿物样品、ASU光谱库中67个样品(粒度为710~1000 μm)进行了CF特征与SiO<sub>2</sub>含量、SCFM指数关系的研究(图2、图3),结果见表2。

用于拟合研究的2个光谱库各有优缺点。ASU光谱库中光谱是发射率光谱,而JHU光谱库中光谱是双锥反射率光谱,研究中需用基尔霍夫定律转换为发射率。严格来讲,在热红外定量遥感中,不能利用基尔霍夫定律将双锥反射率光谱

表1 JHU、ASU光谱库属性描述

Table 1 Attributes of JHU and ASU spectral database

	JHU	ASU
光谱测量方法	双锥反射率	发射率
样品状态	块状与粉末	粉末
粒度分级	细粒: 0~74μm	细粒: 250~709μm
	粗粒: 75~250μm	粗粒: 710~1000μm
		极粗: >1mm

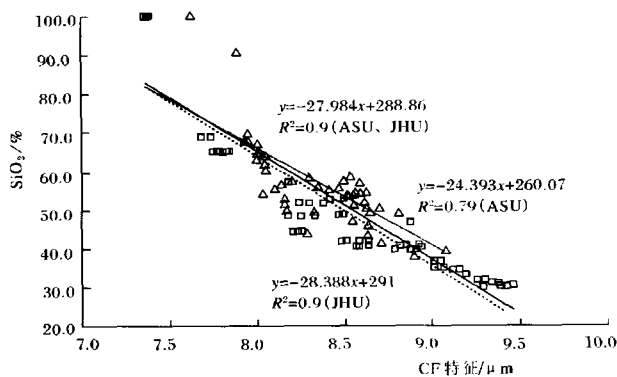
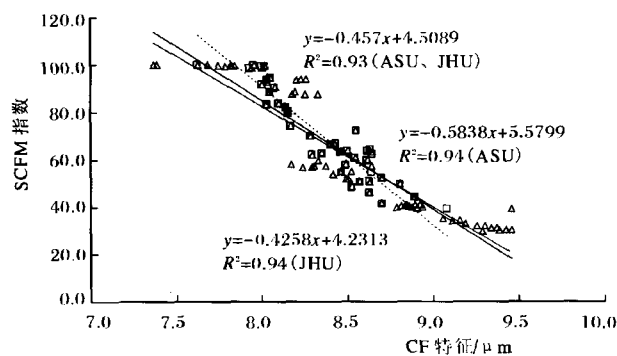
图2 CF特征与SiO<sub>2</sub>含量的关系Fig.2 Relation of CF features and SiO<sub>2</sub> content

图3 CF特征与SCFM指数的关系

Fig.3 Relation of CF features and SCFM index

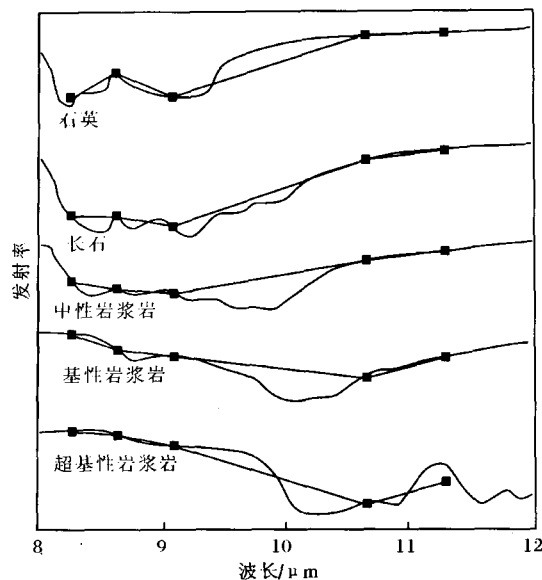
图4 代表性岩石的光谱发射率曲线<sup>[9]</sup>

Fig.4 Emissivity spectra of representative rocks

以上的研究成果只能用于热红外高光谱数据,对于多光谱ASTER数据来说,上述研究成果无法应用,只能另辟途径。图4是石英、长石、岩石(中性—超基性)的发射率光谱及重采样到ASTER热红外波段的光谱,显而易见,随着SiO<sub>2</sub>含量的减小,波段12(8.925~9.275 μm)与波段13(10.25~10.95 μm)发射率之间的关系呈规律的变化,波段13发射率相对于波段12呈减小的趋势,因此波段12与波段13的发射率比值( $\epsilon_{12}/\epsilon_{13}$ )可作为表征SiO<sub>2</sub>含量的指数,即SiO<sub>2</sub>指数。本文利用ASU光谱库中矿物样品的发射率光谱数据及其对应的化学分析数据建立了SiO<sub>2</sub>指数( $\epsilon_{12}/\epsilon_{13}$ )与SiO<sub>2</sub>含量的统计关系(图5)。矿物

转换为发射率光谱,而应该用半球方向反射率光谱,从这一点来讲,ASU光谱库优于JHU光谱库,但考虑到这2种测量方法对CF特征影响较小,拟合过程中未将JHU光谱库排除在外。虽然ASU光谱库有光谱质量方面的优势,但造岩矿物相对匮乏,不可避免地影响了拟合结果的准确性,而JHU光谱库造岩矿物相对齐全,是其优于ASU光谱库之处。从拟合结果(表2)来看,ASU光谱库拟合结果与Cooper拟合结果相差较大,可能是由于造岩矿物缺乏所致,用ASU、JHU光谱库来共同拟合可以弥补这一不足,其拟合结果同Cooper拟合结果<sup>[2]</sup>一致(表2)。JHU矿物粉末样CF-SiO<sub>2</sub>线性拟合斜率和截距分别为-30.471与309.15, Copper火成岩粉末样线性拟合的斜率和截距分别为-29.8与296, JHU矿物块样CF-SiO<sub>2</sub>线性拟合斜率和截距分别为-29.304与295.99, Copper火成岩块样线性拟合的斜率和截距分别为-28.7与280, 单矿物拟合结果与岩石拟合结果一致,间接证明了热红外发射率光谱具有线性混合<sup>[9]</sup>的特点。

表2 光谱CF特征与SiO<sub>2</sub>含量、SCFM指数的相关关系Table 2 Correlation of CF features with the SiO<sub>2</sub> content and SCFM index

	CF-SiO <sub>2</sub> 关系	CF-SCFM关系
ASU光谱库	$y = -24.393x + 260.07$ $R^2 = 0.6225$	$y = -0.5838x + 5.5799$ $R^2 = 0.882$
JHU光谱库	$y = -28.388x + 291$ $R^2 = 0.851$	$y = -0.4258x + 4.2313$ $R^2 = 0.8786$
JHU块样	$y = -29.304x + 295.99$ $R^2 = 0.8238$	$y = -0.4764x + 4.6731$ $R^2 = 0.8233$
JHU粉末样	$y = -30.471x + 309.15$ $R^2 = 0.8467$	$y = -0.4055x + 4.0543$ $R^2 = 0.8277$
ASU、JHU光谱库	$y = -27.984x + 288.86$ $R^2 = 0.805$	$y = -0.4574x + 4.5089$ $R^2 = 0.8652$
Cooper火成岩粉末 <sup>[2]</sup>	$y = -29.8x + 296$ $R^2 = 0.772$	$y = -0.47x + 4.53$ $R^2 = 0.827$
Cooper火成岩块样 <sup>[2]</sup>	$y = -28.7x + 280$ $R^2 = 0.555$	$y = -0.45x + 4.28$ $R^2 = 0.594$

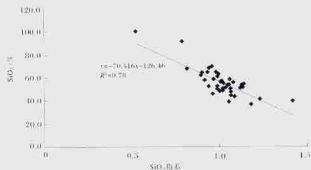


图5 矿物SiO<sub>2</sub>指数与SiO<sub>2</sub>含量的关系

Fig.5 Relation between the normalized  $\text{SiO}_2$  index and  $\text{SiO}_2$  content.

热红外光谱遵循线性混合的特点<sup>[8]</sup>,因此拟合时采用线性拟合,拟合关系式为 $y=-70.416x+126.46$ ,复相关系数 $R^2$ 为0.6142。

### 3 应用实例

利用ASTER数据 $\text{SiO}_2$ 指数与 $\text{SiO}_2$ 含量的定量关系(图5)反演了新疆天山黄山东地区 $\text{SiO}_2$ 含量,并利用地质图对反演结果进行了初步验证(图6)。研究区气候干燥,水质酸,是研究的地理地区。就大地构造背景而言,研究区位于北山华力西地向斜褶皱带东端,觉罗塔格复向斜南翼。研究区出露地层有下古生代统满苏群、中石炭统杨柳沟组,为已遭受层序变形的火山-沉积岩系,普遍统核相岩组,为已遭受层序变形的火山-沉积岩系,普遍统核相岩组。岩体有石英英闪云母花岗岩、闪长岩、辉长岩。构造以近东西走向者为主。

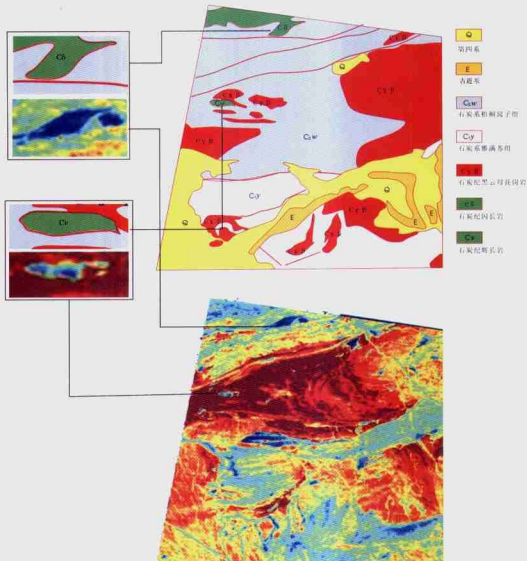


图6 SiO<sub>2</sub>含量反演结果与地质图对比

Fig.6 Comparison between the results of inversion of the  $\text{SiO}_2$  content and geological map

ASTER热红外数据的处理流程为:首先利用MODTRAN4.0标准大气计算试验区的大气上行辐射、大气下行辐射、大气透过率等大气参数,并进行大气校正;然后用发射率归一化法(Emissivity Normalization Method)提取地表相对发射率。

由图6可知,反演结果与地质图有很好的一致性。花岗岩、花岗岩化地层、古近系、第四系SiO<sub>2</sub>含量较高。2个SiO<sub>2</sub>低值区(图中蓝色区域)与地质图吻合很好,分别与石炭纪闪长岩、辉长岩有关。反演的闪长岩的SiO<sub>2</sub>平均含量约为54%,辉长岩的SiO<sub>2</sub>平均含量约为57%,反演的SiO<sub>2</sub>绝对含量与各岩类的正常SiO<sub>2</sub>含量相吻合。由以上分析可知,反演结果与地质事实吻合,SiO<sub>2</sub>高值区对应酸性岩类,低值区对应中基性岩类,利用反演结果可以进行岩类划分圈定。结果表明,利用ASTER热红外数据进行SiO<sub>2</sub>含量的定量反演是可行的,是一项很有意义且需要深入研究工作。

#### 4 讨论与结论

研究表明,矿物发射率光谱CF特征与SiO<sub>2</sub>含量、SCFM指数的相关关系与前人对火成岩的研究结果一致,可作为热红外发射率光谱线性混合的佐证,该关系可以作为高光谱热红外遥感数据反演地表岩石SiO<sub>2</sub>含量的依据。对于多光谱热红外数据ASTER而言,可以通过建立SiO<sub>2</sub>含量与SiO<sub>2</sub>指数( $\epsilon_{12}/\epsilon_{13}$ )之间的关系来定量反演地表岩石的SiO<sub>2</sub>含量。

东天山黄山东地区岩石SiO<sub>2</sub>含量反演结果与地质事实相符,地质图中的中基性岩体对应于SiO<sub>2</sub>低值区,该方法对于中性—超基性岩体的圈定很有效,且对寻找与基性超基性岩体有关的铜镍矿床有重要的应用价值。

研究中有诸多环节尚需进一步改进,改进后反演的精度会进一步提高。首先,反演中最基本的关系式(SiO<sub>2</sub>指数与SiO<sub>2</sub>含量的关系)来自于光谱库,光谱库的样品并不能代表研究区的实际情况(研究区的矿物组成及粒度、地表状况等)。另外,该光谱库中石英样品只有1个,岛状及链状硅酸盐样品也较少,同样也是影响反演精度的一个不可忽视的因素,后续工作中可以针对工作区的地质情况来建立针对本工作区的统计关系模型;其次,本次反演中ASTER热红外数据的大气校正采用MODTRAN4.0准标大气,若采用研究区探空气象资料(如大气温度、湿度廓线等)可以进一步改进大气校正精度与反演精度;最后,本次研究中使用的是相对发射率,如果运用绝对发射率也会改进反演的精度。

对于湿润多雨的地区,地表水分对发射率影响很大,该模型反演精度可能会降低,应该重新建立适合于研究区不同地表状况的关系式。本研究区全部由硅酸盐矿物组成,没有考虑碳酸盐、硫酸盐等矿物大类的影响,这些矿物在热红外波段有不同于硅酸盐矿物的明显的光谱特征<sup>[6]</sup>,在反演SiO<sub>2</sub>含量之前,应首先将其剔除。

致谢:南京大学田庆久老师对后续改进工作提出很好的建议,中国科学院地理研究所李召良老师在使用MODTRAN4.0方面曾给予指导,在此一并表示感谢!

#### 参考文献:

- [1] Lyon R J P. Analysis of rock spectra by infrared emission (8~25 $\mu$ m)[J]. *Economic Geology*, 1965, 60(4): 745-750.
- [2] Copper B L, Salisbury J W, Killen R M. Mid-infrared spectral features of rocks and their powders[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(E4): 1-19.
- [3] Walter L S, Salisbury J W. Spectral characterization of igneous rocks in the 8 to 12 $\mu$ m region [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94(B7): 9203-9213.
- [4] Ninomiya Y. Quantitative estimation of SiO<sub>2</sub> content in igneous rocks using thermal infrared spectral with a neural network approach[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 684-691.
- [5] 二官芳树,傅碧宏.帕米尔东北缘ASTER多光谱热红外遥感数据的岩性信息提取[J]. *新疆地质*, 2003, 21(1): 22-30.
- [6] Christensen P R, Bandfield J L, Hamilton V E. A thermal emission spectral library of rock-forming minerals[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(E4): 9735-9739.
- [7] Salisbury J W. Mid-infrared spectroscopy: Laboratory data[A]. In: *Remote geochemical analysis: elemental and mineralogical composition*[M]. London: Cambridge University Press, 1993. 79-96.
- [8] Salisbury J W, Walter L S. Thermal infrared(2.5-13.5 $\mu$ m) spectroscopic remote sensing of igneous rock types on particulate planetary surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989, 94: 9192-9202.
- [9] Hamilton V E, Wyatt M B, Mcsween H Y. Analysis of terrestrial and Martian volcanic composition using thermal emission spectroscopy: 2. Application to Martian surface spectral from the Mars global surveyor thermal emission spectrometer[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(E7): 14733-14746.