

文章编号: 1001-8166(2005)10-1116-11

## 热红外遥感岩矿信息提取研究进展\*

闫柏琨<sup>1,2,3</sup>, 王润生<sup>3,4</sup>, 甘甫平<sup>4</sup>, 刘圣伟<sup>4</sup>,  
杨苏明<sup>4</sup>, 陈伟涛<sup>3,4</sup>, 唐攀科<sup>1,2,3</sup>

(1·中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083; 2·中国地质大学岩石圈构造、深部过程及探测技术教育部重点实验室, 北京 100083; 3·中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 4·中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要** 热红外遥感是岩矿遥感信息领域起步未久,且表现出巨大潜力的技术手段。从岩矿发射率光谱、数据处理及信息提取技术方法、应用研究<sup>3</sup>个方面对热红外遥感在岩矿信息提取中的研究现状进行了全面总结,在此基础上对其发展难点及趋势进行了讨论,并对其在地质领域的应用前景进行了评估。在数据获取方面,高光谱分辨率数据是应用要求与发展趋势;数据处理方面,对大气影响进行定量评价并力求高精度的大气校正方法是难点与不可避免的问题,大气是影响数据质量的最大因素。岩矿热红外遥感信息机理(矿物发射率光谱特征与机理、光谱混合行为、光谱变异因素)的定性研究取得了一定进展,定量化的研究是发展趋势;在地质领域,因为可以对矿物种类(包括不含水矿物)及含量进行高精度提取的突出优势,不仅在矿产勘探,而且在基础地质研究方面将发挥巨大作用。

**关键词** 热红外遥感, 岩矿信息, 发射率光谱  
**中图分类号** TP72 **文献标识码** A

### 0 引言

自1983年世界上第一台可见光—近红外成像光谱仪(AIS-1)问世以来,成像光谱遥感高速发展,许多国家投入巨资开发成像光谱仪及数据处理方法软件。现今,数据的获取、处理、应用各个环节的技术方法都比较成熟,在矿物填图、资源勘查、环境污染监测中发挥了重要作用,使遥感技术及资源环境应用进入一个全新的发展阶段。但该项技术最大的弱点是其成像光谱区间有限,波长范围大多在400~2500 nm,只覆盖一些含水矿物基频振动的合频与倍频,对于热红外区间振动强度更大的基频振动无法检测,大大限制了其岩矿信息提取的能力。而

热红外遥感正好弥补这一缺陷,能够探测 $Si-O$ 、 $SO_4$ 、 $CO_3$ 、 $PO_4$ 等原子基团基频振动及其微小变化,从而很容易区分识别硅酸盐、硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、氧化物、氢氧化物等矿物<sup>[1]</sup>,从而大大拓宽了遥感矿物识别的广度(矿物大类)与深度(矿物种属)。另外热红外波段发射率光谱混合具有线性混合(面积混合)的特点<sup>[2-6]</sup>,从而避开了一直困扰遥感科学家的光谱非线性混合的难题,使同时精确提取矿物种属及丰度信息成为可能。美国在这一领域投资最大,取得了丰硕成果,开发了一系列传感器,如对火星探测的高光谱热红外光谱仪TES(Thermal Emission Spectrometer)<sup>[7]</sup>、多光谱热红外成像仪THEMIS(Thermal Emission Imaging System)<sup>[8]</sup>,对地观测传

\* 收稿日期 2005-03-11;修回日期 2005-07-01。

\* 基金项目 国家自然科学基金项目“高光谱遥感影像成因矿物学信息定量提取研究”(编号:40201034);国土资源部百名优秀青年科技人才计划项目“国土资源部岩矿遥感信息量化技术研究”(编号:2003048)资助。

作者简介 闫柏琨(1977-),男,山西五台县人,博士研究生,主要从事热红外遥感、高光谱遥感地质应用研究。

E-mail: ybk2000@sohu.com

感器 MODIS<sup>[9-11]</sup> 与 ASTER<sup>[12,33]</sup>、航空高光谱传感器空间增强宽波段阵列光谱仪 SEBASS (Spatially Enhanced Broadband Array Spectrograph System)<sup>[14,25]</sup> 与 MODIS/ASTER 航空模拟器 MASTER (MODIS/ASTER airborne simulator)<sup>[16]</sup> 及热红外多光谱扫描仪 TIMS (Thermal Infrared Multispectral Scanner)<sup>[17-20]</sup>。利用 TES 数据,美国遥感科学家对火星进行了矿物定量填图<sup>[21-26]</sup>,为探求火星演化及水体痕迹提供了佐证<sup>[23,25,27,28]</sup>。可以预见的将来,随着热红外遥感技术的成熟与推广,遥感岩矿信息提取的能力将大大提高,热红外遥感技术将成为对地及地外行星探测与认识的重要手段。

## 1 矿物岩石发射率光谱特征

发射率光谱是表征物体向周围环境辐射本领大小的物理量,矿物岩石发射率光谱与其成分及结构有关,是矿物晶格中原子基团各种振动的反映,热红外波段发射率光谱特征与晶格中原子基团的基频振动有关。

对岩石和矿物热红外发射率光谱行为进行详细透彻的研究是热红外遥感岩矿信息精细定量提取的基础及依据所在,也是热红外遥感发展的重要动力来源之一。目前的研究方法大致可分为辐射传输模型模拟<sup>[29,30]</sup>与实验室实测研究两个方面。前者利用辐射传输模型来计算岩石矿物的发射率光谱,并通过改变模型参数来确定岩石矿物光谱特征与其化学及物理参数的依赖关系,有些模型虽然取得了一定的成功,但就目前的发展水平而言很难应用于遥感反演当中。尽管如此,这仍然是一个极有前景的研究领域,因为成熟稳定的模型有利于人们更好的了解岩石矿物发射率光谱特征的内在决定因素及各种外部变异因素,就像大气传输模型 (MODTRAN<sup>[31]</sup>、6S<sup>[32]</sup>等)使人们更好的了解光波与大气的相互作用一样,从而使岩矿信息的遥感反演真正达到精细与定量的程度。如地物方向发射率 (directional emissivity) 是热红外遥感领域的基本问题,它可能影响到提取的地表温度与发射率的精度<sup>[33,34]</sup>。

利用辐射传输模型模拟计算地物的方向发射率,可能是解决这一基本问题的途径之一<sup>[35]</sup>。后者是通过岩石矿物的热红外光谱和样品的成分、结构、粒度等化学及物理参数进行实测,并对二者进行统计学研究和对比研究,进而发掘岩石矿物光谱特征与其化学及物理参数的内在联系并建立二者的对应关系,来作为遥感反演的依据。

### 1.1 岩石矿物发射率光谱形成机理——辐射传输模型

所有的辐射传输模型 (图 1) 都是以 Chandrasekhar 辐射传输方程为基础<sup>[36]</sup>, Chandrasekhar 辐射传输方程<sup>[37]</sup>描述对光具有吸收、散射作用并能向外发射能量的无穷小介质层的光谱行为,各种模型的不同之处在于对辐射传输方程求解时所作的假设简化不同而已。一般来讲,模型分为两部分:对单颗粒光谱行为的描述以及以此为基础的对多颗粒介质光谱行为的描述,描述单颗粒光谱行为的物理量为单次散射反照率 ( $w$ ) 与单次散射相函数 ( $p(g)$ ),常用的求解模型为几何光学模型<sup>[30]</sup> (Geometric Optical Model) 与米氏模型<sup>[30]</sup> (Mie Model): 几何光学模型用于颗粒 (球形或不规则颗粒) 远大于电磁波波长的情况,米氏模型可以计算处理各种大小的颗粒,但严格来说只能用于球形且分散的颗粒。颗粒单次散射反照率、散射相函数与颗粒的形状、大小、折射指数 ( $n^* = n - ik$ ,  $n$ 、 $k$  分别为折射指数的实部与虚部) 有关。矿物折射指数与颗粒形状、大小等物理参数无关,仅与矿物成分及结构有关,是辐射传输模型中的重要输入参数,可以将 Lorentz-Lorenz 散射理论<sup>[38]</sup> (Lorentz-Lorenz dispersion theory) 与非聂耳反射定律<sup>[39]</sup> (Fresnel laws of reflectance) 应用于经过剖光的矿物单晶体发射率光谱来获取<sup>[39,40]</sup>。计算紧密堆积颗粒表面的光谱行为时需要用多次散射模型,常用的有 Hapke 模型<sup>[41]</sup>、Conel 模型<sup>[42]</sup>。Hapke 模型综合考虑了颗粒对光的反射作用与发射作用,因此不仅可以用于热红外波段,同样可以用于可见光与反射红外波段。

就目前的研究水平而言,不可能找到矿物光谱与其内在决定因素 (折射指数  $n^*$ )、变异因素 (颗粒

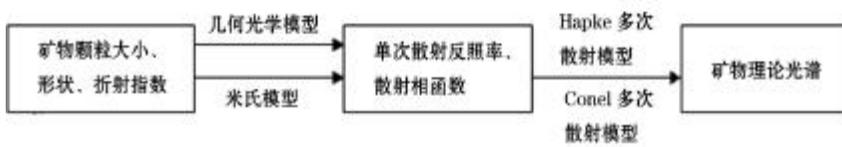


图 1 矿物辐射传输模型概念框图

Fig. 1 Concept diagram of radiative transfer function of minerals

大小、形状、结构、孔隙率、表面粗糙度)之间确定的函数关系,辐射传输模型仅仅是一个近似的函数关系。尽管如此,辐射传输模型使我们对矿物岩石光谱开展定量研究成为可能。Moersch<sup>[41]</sup>利用不同颗粒的石英实测发射率光谱对 Hapke 反射模型<sup>[43-45]</sup>、Hapke 发射模型<sup>[30]</sup>、Mie/Conel 模型<sup>[42]</sup>、Mie/Hapke 模型<sup>[41]</sup>进行了对比研究,结果表明,总体而言 Mie/Hapke 模型能更好的预测石英颗粒大小对其发射率光谱的影响。迄今为止,所有的辐射传输模型都是针对矿物粉末颗粒集合体的,针对固体岩石样品的模型未见报道,其影响因素比矿物粉末颗粒集合体情况可能更复杂,矿物晶体形态、晶体内部解理、岩石结构都可能是不可忽略的光谱变异因素。根据实验室研究,固体岩石样品与粉末颗粒集合体的光谱存在一定的差异<sup>[46]</sup>。目前尚无模型来定量描述这一差异。另外,辐射传输模型反向求解<sup>[47]</sup>也是研究中的薄弱环节。

### 1.2 矿物岩石发射率光谱特征与成分、结构之间关系——实验室实测研究

人们对各种矿物的化学物理参数及其发射率光谱进行了大量的实测研究,总结出与矿物成分、结构相关的光谱特征,从而奠定了现今热红外遥感岩矿信息提取的基础。目前有 2 个较完善的光谱库可供使用——ASU 光谱库<sup>[1]</sup>与 ASTER 光谱库(<http://speclib.jpl.nasa.gov>),光谱库中包括样品光谱及其物理与化学特征的描述,前一个光谱库中只有矿物光谱,其优势是其中光谱都为发射率光谱,后者包含矿物、岩石及人造地物,收录样品种类齐全,但其中光谱为反射率光谱,应用时需要用基尔霍夫定律将其转换为发射率光谱,会引入一定误差,甚至会成为定量遥感的障碍。图 2 为各矿物大类的代表性的光谱曲线<sup>[1]</sup>,由图可知,各矿物大类间的光谱差异较大,容易区分识别。硅酸盐在 850 ~1 200 /cm 与 400 ~600 /cm 之间分别有 2 个宽缓复杂的复合吸收峰;硫酸盐在 1 150 /cm 处有一特征吸收峰;磷酸盐在 550 ~650 /cm 之间有一弱的双吸收峰,在 1 000 ~1 150 /cm 之间有一强的双吸收峰;碳酸盐在 1 500 /cm 处有一宽吸收峰,在 900 cm 处有一窄吸收峰;氧化物在 400 ~800 /cm 之间有一宽缓的双吸收峰;卤化物在 1 150 ~1 500 /cm 之间有一宽缓的双吸收峰。相对于矿物大类间的区分识别,矿物亚类间的区分识别难度要大的多,图 3 为岛状到架状硅酸盐亚类的光谱曲线,可以看出,从岛状到架状硅酸盐 850 ~1 200 /cm 之间的吸收峰位置逐渐向短波方向

移动,这是由于矿物晶格中连接  $SO_4$  四面体的桥氧增加  $S-O$  化学键增强的缘故<sup>[19]</sup>,由于各亚类间差异较小,因此区分识别相对于矿物大类识别更困难,再加上硅酸盐的 2 个吸收谱带复杂多变,更增加了识别难度。Lane<sup>[48]</sup>对无水碳酸盐的光谱特征进行了详细研究,总结了方解石、菱镁矿、菱铁矿、菱锰矿、菱锌矿、白云石及镁菱锰矿等亚种的光谱特征并认为方解石、菱镁矿、菱铁矿、菱锰矿、菱锌矿、白云石等矿物可以在 10 /cm 的光谱采样率条件下加以识别,方解石与菱锰矿的谱带位置十分相似,需要在更高的光谱采样率(2 /cm)条件下加以识别。Hamilton<sup>[49]</sup>对辉石的光谱特征进行了系统研究,结果表明,根据吸收特征(*reststrahlen features*)的位置、个数、深度等特征不仅可以区分斜方辉石与单斜辉石,而且可以分辨 2 个大类中的主要端元。由于传感器分辨率以及各种噪声的影响,有些实验室可以识别的微小光谱差异现今难以在实际应用中识别出来。

Cooper<sup>[46]</sup>对火山岩(从超基性到酸性)光谱特征与其成分关系进行了实验室研究,光谱克里斯琴森频率(*christiansen features*)、透射特征(*transparen-*

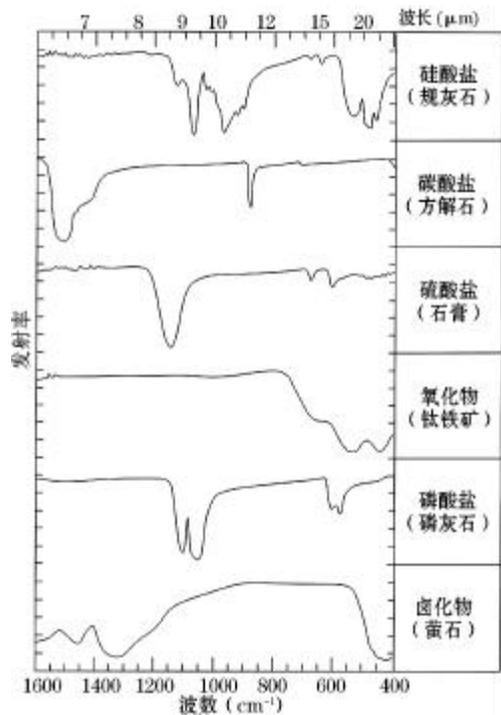


图 2 矿物大类发射率光谱曲线<sup>[1]</sup>  
Fig.2 Mineral class emissivity spectra<sup>[1]</sup>

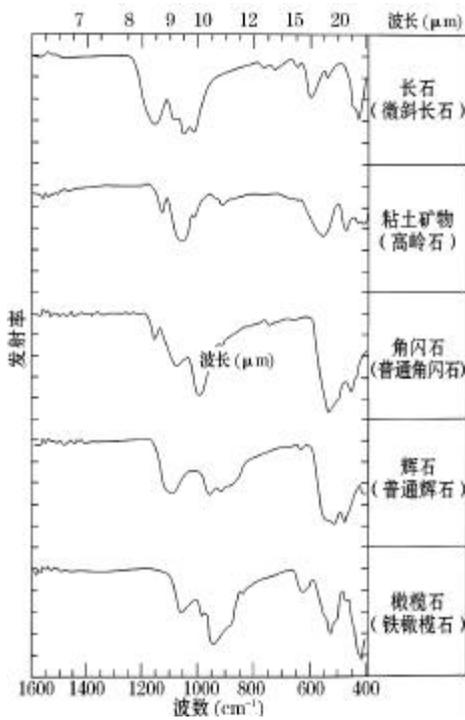


图 3 硅酸盐亚类发射率光谱曲线<sup>[1]</sup>

Fig. 3 Major silicate subclass emissivity spectra<sup>[1]</sup>

cy features)与岩石 SiO<sub>2</sub> 含量、DI 指数、SCFM 指数存在较好的线性关系,利用这两个参数可以对火山岩进行大类(酸性、中性、基性、超基性)划分。

矿物发射率光谱不仅能够反映其成分特征,而且能够反映矿物结构的变化,用于矿物同质多像变体的探测识别。如 Michalski<sup>[50]</sup> 研究了磷石英、方石英、石英、柯石英、蛋白石的发射率光谱,尽管其成分一致,结构不一致导致的光谱差异很明显(图 4)。对火星探测时如果能识别出石英的这些同质多像变体,对理解火星火山作用与演化很有帮助。

### 1.3 矿物岩石发射率光谱的变异因素

矿物岩石变异因素包括粒度、形状、表面粗糙度、结晶方位、空气压力、地表温度梯度、矿物遭受的冲击压力等。只有充分理解这些因素对光谱特征造成的影响,才可能在实际应用中充分考虑并剔除这些干扰因素,提高矿物识别的准确性与精度。

很早人们就注意到了矿物粒度对其发射率光谱曲线的影响(图 5<sup>[51]</sup>),之后一直不断对其进行研究和解释<sup>[52-54]</sup>,矿物粒度大于 60 μm 时,RF(Reststrahlen Features)仅仅随粒度变小而变浅,其形状并

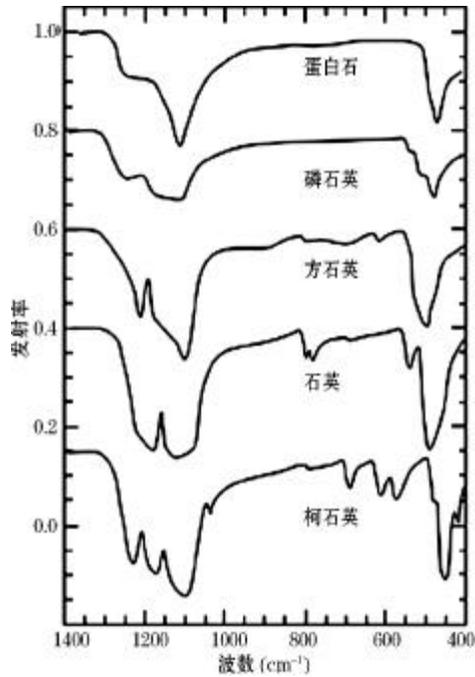


图 4 石英多型发射率光谱<sup>[50]</sup>

Fig. 4 Emissivity spectra of silica polymorphs<sup>[50]</sup>

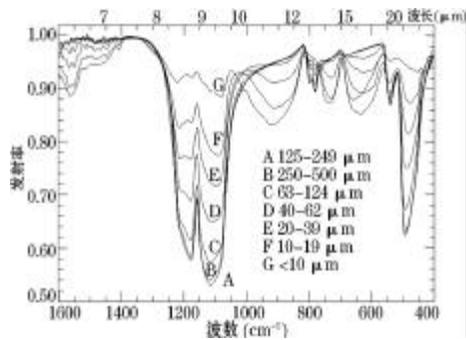


图 5 光谱特征随粒度变化图<sup>[51]</sup>

Fig. 5 Corresponding diagram of spectral characteristic and granularity<sup>[51]</sup>

不发生变化,粒度小于 60 μm 时,RF 形状也会发生变化,这是因为在 RF 波段,吸收系数(折射指数虚部)较大,散射以表散射为主,粒度减小,颗粒前向散射增强,从而导致发射率增加。CF(Christiansen Features)并不随粒度的变化而变化。在 TF(Transparency Features)波段,吸收系数相对较小,散射以体散射为主,当矿物颗粒减小到一定程度时,后向散射增强,TF 特征开始出现并随着粒度变小而变深。

除了进行定性研究外,人们还利用辐射传输模型对此进行了定量研究<sup>[41,55]</sup>。针对岩石表面粗糙度对发射率光谱的影响提出了有效发射率的概念<sup>[56]</sup> ( $\epsilon_{\text{eff}} = 1 - (1 - \epsilon)^{(\tau_{\text{count}} + 1)}$ ),  $\tau_{\text{count}}$  为岩石表面小洞坑壁反射次数), 微观尺度 (~0.2 波长) 与宏观尺度粗糙度都会使光谱对比度 (spectral contrast) 减少, 这就是图像光谱与野外地面光谱相对于室内样品光谱来说光谱对比度变小的原因, 会导致一些矿物的漏提。矿物结晶方位不同, 光学常数亦有很大差异, 因此发射率光谱曲线差异也非常大<sup>[51]</sup> (图 6), 在实际应用中, 矿物颗粒一般随机排列, 因此, 这一影响因素一般不予考虑。由于空气压力的变化, 矿物相对于外界环境的折射率就会发生变化, 从而改变其光谱特征, 在真空条件下, CF 会得到加强并向短波方向移动<sup>[46]</sup>。

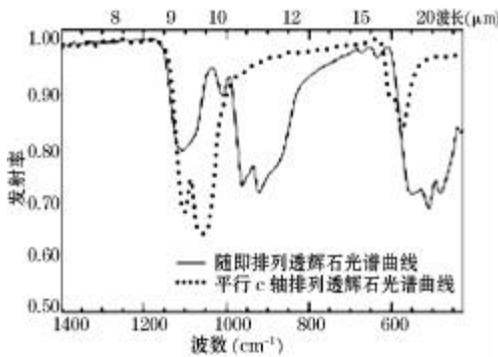


图 6 不同结晶方位光谱特征对比图<sup>[51]</sup>

Fig.6 Correspond diagram of mineral crystal orientation and spectral characteristic<sup>[51]</sup>

## 2 数据处理与信息提取技术方法

热红外传感器接收到的辐射亮度值是大气作用、地表温度、地表发射率三者的函数, 是三者复杂耦合的结果(式 1)。对于岩石信息提取而言, 大气效应完全是干扰因素, 应该予以剔除。地表发射率与温度信息当中, 发射率是岩石信息提取的基础, 是重中之重, 因此, 高精度的提取地表发射率是岩石信息提取的首要任务, 也是岩石信息提取深度与精度的决定性因素。整个数据处理可分为 3 个流程: 大气效应校正、地表相对发射率的提取或发射率与温度的同步提取、基于地表发射率与温度的岩石信息提取。基于发射率的信息提取是岩石信息提取的主要内容, 而基于温度提取的信息相对有限。

$$L^{\text{sensor}}(\lambda) = \epsilon(\lambda) B(\lambda, T) +$$

$$L^{\text{down}}(\lambda) + L^{\text{up}}(\lambda) \quad (1)$$

式中:  $L^{\text{sensor}}$  为卫星传感器入瞳处的辐射亮度值;  $\epsilon(\lambda)$  为地表发射率;  $B(\lambda, T)$  为普朗克黑体辐射函数;  $\tau(\lambda)$  为大气透过率;  $L^{\text{down}}(\lambda)$  为大气下行辐射;  $L^{\text{up}}(\lambda)$  为大气上行辐射。

### 2.1 大气效应校正

要提取地面信息就要对遥感数据进行大气校正, 对于对地遥感而言就是对影像逐像元求解  $\epsilon(\lambda)$ 、 $L^{\text{down}}(\lambda)$ 、 $L^{\text{up}}(\lambda)$  3 个参数的过程, 一般而言, 第二项为大气下行辐射对总辐射亮度值的贡献, 一般为 1% ~ 3%<sup>[57]</sup>。目前常用的方法是基于辐射传输模型 (MODTRAN、LOW TRAN、6S 等) 的数值解法, 模型的求解需要输入大气温度廓线、湿度廓线、大气分子含量、气溶胶参数等大气状态参数, 求解误差有 2 个来源: 大气状态参数误差、模型误差。已有研究表明<sup>[18,58]</sup>, 如果用地面实测大气参数作为模型输入参数, 大气校正精度较高, 因此主要误差来源为大气状态参数误差, 模型误差可忽略不计。然而, 在大多数情况下大气参数难以进行地面实测, 在全球遥感中更是如此, 所以只能用卫星遥感数据来反演大气参数, 但目前反演精度有限, MODIS 系列卫星反演的大气温度误差在  $\pm 1 \sim \pm 2$  之内, 大气湿度相对误差在  $\pm 20\% \sim \pm 10\%$  之内, 而且在可以预见的将来没有提高精度的可能性<sup>[57]</sup>。这样, 如何利用低精度的大气参数来进行高精度的大气校正成为必须解决的问题。以目前的发展水平来看, 大气校正误差仍然是 MODIS 与 ASTER 陆地温度与发射率反演的主要误差来源。在对地外行星 (月球、火星) 探测中, 由于其大气状况了解甚少, 难以用数值模型的方法进行大气校正, 而是用光谱解混与比值的方法<sup>[21,59]</sup>。在火星亮区 (brightness region), 运用光谱解混技术进行大气校正, 认为传感器接收到的辐射光谱是地面光谱与大气光谱的线性混合, 通过线性解混技术求出大气光谱与地面光谱各自的比重, 进而剔除大气影响。对于火星暗区 (darkness region), 由于地面光谱比重较小, 利用线性解混技术进行大气校正精度较差, 这时就与邻近的亮区光谱进行比值运算消除大气影响, 结果是两个区域地面光谱的比值。该方法要求两个区域大气状态大致一致且大气上行辐射较小, 通道透过率较大, 对地观测中该法不适用, 因为大气上行辐射较大 (湿度较大时可达辐射亮度值的 60%<sup>[60]</sup>)。

### 2.2 地表发射率与温度信息提取

对遥感数据进行大气校正之后, 得到的数据仍

是地表发射率与温度耦合的结果,需要剔除温度信息或者进行发射率与温度的分离。核心困难是根据遥感数据的  $N$  个通道只能建立包含  $N$  个方程的方程组,而未知数却有  $N+1$  个( $N$  个通道的发射率值与地表温度),实际上是一个不定解的病态反演问题。除此之外,辐射亮度值与温度之间为非线性关系,也增加了求解难度。为此,提出了多种方法进行近似反演,可分为 3 个方面:相对发射率(发射率谱)反演、反射率与温度同步反演、温度反演。在岩矿信息提取中,温度为次要信息,因此其反演方法及进展不再赘述。

### 2.2.1 相对发射率的反演

在地表岩矿信息的提取当中,最有用的信息是发射率的波形特征,即相对发射率。为此,先后提出多种方法来提取地表相对发射率,包括独立于温度的波谱指数法<sup>[61]</sup>(TISI 法—Temperature-Independent Spectral Indices for Two Channels)和参考波段法<sup>[62]</sup>(REF 法—Reference Channel Method)、发射率归一化法<sup>[63]</sup>(NOR 法—Emissivity Normalization Method)、发射率重归一化法<sup>[64]</sup>(RE 法—Emissivity Renormalization Method)、比值法<sup>[65]</sup>(SR 法—Spectral Ratio Method)、ADE 法<sup>[66]</sup>(Alpha Derived Emissivity)和加权比值法<sup>[67]</sup>(Weighted Ratio Method)等。独立于温度的波谱指数法、参考波段法、发射率归一化法、发射率重归一化法都是以某一波段为基准并人为设定其发射率值来计算其它波段相对于该基准的发射率。参考波段法对所有像元都规定某一波段发射率为定值,这样对影像内某些地物来说不尽合理,可能会造成发射率谱形歪曲变形。独立于温度的波谱指数法、发射率归一化法、发射率重归一化法对此作了一定改进,首先逐像元求取最大发射率所在波段,然后对该波段发射率设定定值并以此为基准计算其它波段相对发射率,最大发射率所在波段求取方法是首先假设各波段发射率均为 1,并计算各波段亮温,最大亮温所在波段即最大发射率所在波段。ADE 法是对普朗克公式进行近似(忽略普朗克公式分母中的“ $-1$ ”项)的基础上,并加入经验关系推导而出的,推导过程较复杂,详见文献<sup>[68,69]</sup>。加权比值法是先对某个像元的各波段求和,然后求均值,最后让此像元的各个波段进行加权以后分别与此像元的均值相比以消除温度信息,来求取相对发射率。Li<sup>[64]</sup>对上述 6 种方法利用模拟数据与 TMS 数据进行了对比评价,认为 6 种方法对仪器误差、定标误差都不敏感,但对大气校正误差(大气过校正

时)均很敏感,但相对而言,TISI 与 NOR 略优于其它方法。对上述各种方法进行综合评价,对其在反射率光谱谱形保真性、对各种地物的适用性、对误差噪声的敏感性等诸方面的优劣对比的研究尚未见报道。

### 2.2.2 发射率与温度同步反演

对于多光谱数据,目前有 3 种方法用于发射率与温度的同步反演:昼—夜法<sup>[61-71]</sup>(Day-Night Method)、温度发射率分离法<sup>[72]</sup>(TES-Temperature/Emissivity separation)及灰体发射率法<sup>[73]</sup>(Graybody Emissivity Method)。昼—夜法是计算同一地区白天与晚上的独立于温度波谱指数 TISI<sub>ic</sub>(其中一个波段位于中红外区,一个波段位于热红外区),并得出地表发射率,之后用劈窗算法得出地表温度,是 MODIS 温度产品的官方算法。温度发射率分离法是在不定解方程组的基础上添加经验关系式(式 2),从而使方程组封闭,是 ASTER 陆地温度与发射率分离的官方算法。

ASTER 温度与发射率分离使用的是混合的方法,首先用发射率归一化法(NEM—Normalized Emissivity Method)粗略估算地面温度( $T$ )与相对发射率,并通过反复迭代来最大限度消除大气下行辐射影响,通过迭代过程也可以灵活调整最大发射率的人为设定值来提高相对发射率反演精度,之后利用比值法(Ratio Algorithm)来计算光谱(相对发射率比值)最大最小差 MMD (Min-Max Difference),然后用 MMD 与最小发射率( $\epsilon_{\min}$ )的统计关系式(式 2)计算最小发射率从而求出地表的绝对发射率。TES 反演结果精度主要受 2 个因素制约:大气校正精度与发射率经验关系式的可靠性。数值模拟研究表明<sup>[74]</sup>,TES 反演温度误差一般小于 1.5 K,发射率误差一般小于 0.015,精度分别为 0.4 K 与 0.03。值得提出的是,式 2 是基于植被、土壤、雪、岩石、矿物等各类地物且针对 ASTER 传感器的经验关系式,对于不同的传感器应拟合相应的经验关系式来提高反演精度<sup>[75]</sup>。

$$\epsilon_{\min} = 0.994 - 0.687 \times \text{MMD}^{0.737} \quad (2)$$

式中: $\epsilon_{\min}$ 为发射率光谱的最小值;MMD 为发射率光谱最大值与最小值的差值。

灰体发射率法思想是找到一个温度使 2 个波段有相等的发射率( $\epsilon_1 = \epsilon_2$ )。该方法只适用于灰体地物,对大部分岩矿地物来说并不适用,另外该方法还有一个缺点是对仪器噪声非常敏感。所以该方法应用并不广泛。

由于热红外高光谱数据光谱采样率大,每一个

像元都有一条连续的光谱曲线,针对高光谱数据的这一优势,提出了 ISSTES<sup>[76]</sup> (Iterative Spectrally Smooth Temperature/Emissivity Separation) (图 7) 方法来对高光谱数据进行温度发射率分离计算,该方法基本假设是地物发射率光谱都是光滑曲线。该方法首先计算一系列的光谱曲线,每一条曲线对应一个假设的地表温度,然后从这一系列曲线中找出最光滑的曲线作为地物光谱曲线,对应的温度就是地面温度。该方法认为不光滑的曲线是因为所设的温度与地面实际温度不一致导致曲线中加入了大气的影响从而使曲线出现了锯齿现象。研究表明<sup>[76]</sup>除了极个别的矿物光谱曲线本身不够光滑之外,绝大多数的矿物发射率光谱满足这一方法的假设。当噪声太大以致于将光谱中大气的影响淹没时,该方法失效,因为这时难以从曲线族中找出最光滑的曲线。Paul Ingram<sup>[76]</sup>研究了该方法对 SEABASS 数据的抗噪能力,认为信噪比(SNR)150:1 是其下限。

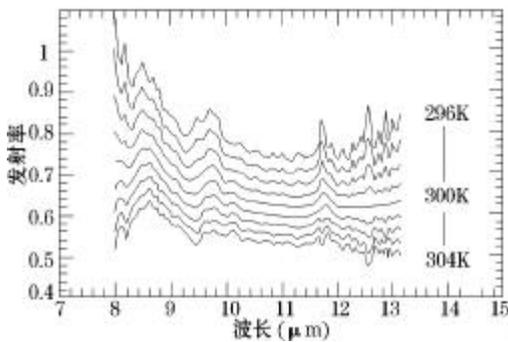


图 7 ISSTES 法大气校正概念图<sup>[76]</sup>

Fig. 7 Concept diagram of ISSTES atmospheric correction method<sup>[76]</sup>

### 2.3 基于地表发射率的岩矿信息提取

从热红外遥感数据中提取(相对)发射率之后,就可据此进行矿物分布及其含量填图,技术方法及整个流程完全可以借鉴可见光—近红外高光谱的技术方法及漏斗形的数据处理流程及多光谱数据的处理方法<sup>[77]</sup>。唯一的区别是鉴于热红外遥感光谱线性混合的特点,只要光谱分辨率允许,处理过程中可以更好的应用线性解混技术来提取岩矿信息<sup>[6, 21, 22, 78, 79]</sup>。矿物热红外发射率光谱的混合行为为线性混合,其原因是相对于其它波段矿物的吸收系数较高,这是岩矿信息提取中热红外发射率光谱优于可见光及短波红外之处,利用线性解混技术可以对矿物进行定量识别。Ramsey<sup>[79]</sup>对矿物颗粒混

合物的实验室光谱进行了系统的线性解混试验,结果表明,矿物颗粒大于 60 μm 时遵循线性混合规律,而矿物颗粒小于 60 μm 时光谱混合偏离线性规律。线性解混技术可以准确确定端元组分多达 15 种的混合物中各端元的含量,其精度可达 5vol%。Wyatt<sup>[78]</sup>利用线性解混技术对陆地及火星火山岩的矿物组成与化学组成进行了反演,并将结果应用于火山岩的分类命名。将反演矿物与电子探针扫描成像结果进行了对比,平均标准偏差为 4.8vol%。说明线性解混技术是热红外遥感岩矿信息提取的有力工具。

## 3 应用研究

人们对热红外遥感岩矿信息提取的研究探索没有局限于实验室,而是以实验室研究成果为基础,开展了卓有成效的应用工作,为对地外行星及对地探测做出了特有的贡献,以下从对火星及对地两方面介绍最新研究进展。

### 3.1 火星全球矿物定量填图

Bandfield<sup>[21]</sup>利用 TES (Thermal Emission Spectrometer) 高光谱热红外数据提取出火星表面角闪石、碳酸盐、赤铁矿、高 Ca 辉石、低 Ca 辉石、钾长石、橄榄石、斜长石、石英、玻璃、硫酸盐等 11 种矿物种类及其分布、含量,其中硅酸盐对研究火星起源演化是重要的基础数据,赤铁矿、碳酸盐、硫酸盐是研究火星水体的存在及演化的重要数据。提取方法使用光谱线性解混技术,端元组分光谱来自 ASU 光谱库<sup>[1]</sup>。

### 3.2 对地岩矿信息提取

相对于对火星观测,热红外遥感在对地观测中的应用要薄弱的多, Lawrence<sup>[80]</sup>利用 ASTER 数据在加利福尼亚地区进行了岩性分类识别,结果表明 ASTER 热红外数据可以识别出 AVIRIS 数据无法识别的以石英为主的岩石、花岗闪长岩、中基性岩,但是 ASTER 数据波段有限,难以精确提取矿物含量。Vaughan<sup>[81]</sup>利用 SEABASS 高光谱热红外数据在内华达州里诺进行了矿物填图, JPL、ASU、USGS 光谱库的线性混合光谱与影像光谱吻合很好,证明了线性解混技术的可行性。同时,研究表明对于光谱特征相近的矿物,高光谱的识别能力并没有比多光谱表现出太多的优势,研究区石英、明矾石、玉髓的识别比较困难,因为三者的光谱特征相似,并且是伴生出现,更加大了识别难度。丑晓伟等<sup>[82]</sup>利用 TIMS 数据在塔里木盆地进行了地层分类识别试验,利用去

相关拉伸技术压制地表温度信息,突出发射率信息来达到区分岩性的目的,区分出了灰岩、粘土岩、泥灰岩、钙质粉砂岩等不同岩性。金浩等<sup>[83]</sup>同样利用 TIMS 数据达到区分不同岩性的目的。这些研究是利用合成图像的色调差异来区分岩性,属于定性研究应用。二宫芳树等<sup>[84]</sup>提出了提取石英指数、碳酸盐指数、 $S_{D_2}$  含量指数可用来进行半定量反演,提取矿物及化学成分的相对含量。傅碧宏<sup>[85]</sup>对塔里木盆地典型沉积岩样品的红外光谱进行了测定,对光谱特征及其成因作了总结。

#### 4 讨 论

通过对岩矿热红外遥感信息机理、数据处理及信息提取方法、应用研究等各方面研究进展的综合分析,可以对热红外遥感岩矿信息提取发展趋势、前景中的技术重点与难点得出以下认识:

(1) 不同矿物基频振动都可以在发射率光谱得到体现,矿物岩石发射率光谱大大拓宽了遥感岩矿信息提取的广度与精度,在光谱分辨率足够高的情况下,矿物含量分解提取可能达到很高的精度,实验室研究与火星全球矿物定量填图有力证明了这一点。对地观测中,热红外遥感应用较少的主要原因是数据源的匮乏,高光谱分辨率数据的获取是发展趋势与应用要求,如果矿物含量的提取精度达到一定要求,从矿产资源勘查到基础地质制图方面都有广阔的应用前景,可以节约大量的野外工作量,大幅度提高工作效率。热红外成像光谱与可见光—反射红外成像光谱技术结合将使遥感在地质领域的应用迈上一个新的台阶。

(2) 在数据处理与信息提取方面,主要障碍在于大气影响,精确评价大气对数据质量与信息提取结果的影响并力求较好的大气校正方法是重点与难点。另外,地物(相对)发射率的反演算法很多,但对这些算法在光谱保真性、大气校正误差敏感性、噪声敏感性、对各种地物的适用性等诸方面进行综合定量评价也尤为重要。

(3) 岩矿发射率光谱信息机理仍然是最重要与最具挑战性的课题,发射率光谱特征与成分、结构的对应关系仍需深入研究,辐射传输模型的研究虽然取得了很大进展,仍有诸多问题有待解决,如模型反求解、固体岩石样品模型,另外模型精度仍需进一步提高。辐射传输模型应该在解决地物方向发射率、矿物粒度及孔隙度等对发射率光谱的影响行为、光谱解混等热红外遥感基本问题中发挥积极作用。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Lyon R J P. Analysis of rock spectra by infrared emission (8 ~ 25  $\mu\text{m}$ ) [J]. *Economic Geology*, 1965, 60: 745-750.
- [3] Gillespie A R. Spectral mixture analysis of multispectral thermal infrared images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42: 137-145.
- [4] Crown D A, Pieters C M. Spectral properties of plagioclase and pyroxene mixtures and the interpretation of lunar soil spectra [J]. *Icarus*, 1987, 72: 492-506.
- [5] Thomson J L, Salisbury J W. The mid-infrared reflectance of mineral mixtures (7 ~ 14  $\mu\text{m}$ ) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1993, 45: 1-13.
- [6] 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.
- [7] Christensen P R, Anderson D L, Chase S C, et al. Thermal emission spectrometer experiment: The Mars Observer Mission [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97: 719-734.
- [8] Smith M D, Bandfield J L, Christensen P R, et al. Thermal Emission Imaging System (THEMIS) infrared observations of atmospheric dust and water ice cloud optical depth [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(E11): 5115-5124.
- [9] <http://modis.gsfc.nasa.gov/>
- [10] 刘闯,葛成辉. 美国对地观测系统(EOS)中分辨率成像光谱仪(MODIS)遥感数据的特点与应用[J]. *遥感信息*, 2000, (3): 45-48.
- [11] Barnes W L, Pagano T S, Salomonson V V. Prelaunch characteristics of the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) on EOS-AM1 [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 1088-1100.
- [12] <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>
- [13] Abrams M. The advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER): Data products for the high resolution imager on NASA's Terra platform [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(5): 847-859.
- [14] Hackwell J A, Warren D W, Bongiovanni P, et al. LWIR/MWIR imaging hyperspectral sensor for airborne and ground-based remote sensing [J]. *Imaging Spectrometry*, SPIE, 1996, 2819: 102-107.
- [15] Kirkland L E, Herr K C, Keim E R, et al. First use of an airborne thermal infrared hyperspectral scanner for compositional mapping [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 80: 447-459.
- [16] Hook S J, Myers J J, Thomas K J. The MODIS/ASTER airborne simulator (MASTER)—A new instrument for earth studies [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 76: 93-102.

- [17] Kahle A B, Goetz A F H. Mineralogic information from a new airborne thermal infrared multispectral scanner [J]. *Science*, 1983, 222: 24-27.
- [18] Colic, Caselles V, Valor E. Validation of temperature-emissivity separation and split-window methods from TIMS data and ground measurements [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 85: 232-242.
- [19] Sabine C, Realmuto V J, Taranik J V. Quantitative estimation of granitoid composition from thermal infrared multispectral scanner (TIMS) data, Desolation Wilderness, northern Sierra Nevada, California [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (B3): 4261-4271.
- [20] Hook S J, Karstrom K E, Miller C F, et al. Mapping the Piute Mountains, California, with thermal infrared multispectral scanner (TIMS) images [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994, 99 (B8): 15605-15622.
- [21] Bandfield J L, Hamilton V E, Christensen P R. A global view of Martian surface composition from MGS-TES [J]. *Science*, 2000, 287: 626-630.
- [22] Hamilton V E, Christensen P R, McSween H Y, et al. Determination of Martian metacrite lithologies and mineralogies using vibrational spectroscopy [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 (E11): 25593-25603.
- [23] Christensen P R, Bandfield J L, Clark R N, et al. Detection of crystalline hematite mineralization on Mars by the Thermal Emission Spectrometer: Evidence for near-surface water [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (E4): 6239-642.
- [24] Christensen P R, Bandfield J L, Smith M D, et al. Identification of a basaltic component on the Martian surface from Thermal Emission Spectrometer data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (E4): 6099-621.
- [25] Christensen P R, Morris R V, Lane M D, et al. Global mapping of Martian hematite mineral deposits: Remnants of water-driven processes on early Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106 (E10): 23873-23885.
- [26] Gaddis L R, Staid M I, Johnson J R, et al. Mineral mapping in Valles Marineris, Mars: A New Approach to Spectral Demixing of TES data [R/OL]. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1956.pdf> 2003.
- [27] Burt D M, Kirkland L E, Adams P M. Barite and Celestine Detection in the Thermal Infrared-Possible Application to Determination of Aqueous Environment on Mars [R/OL]. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2004/pdf/2085.pdf> 2004.
- [28] Farand W H, Gaddis L R. Analysis of MGS TES Data over Acidalia Planitia and Cydonia Mensae: Compositional Evidence for Hydrovolcanic Activity? [R/OL]. <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2003/pdf/1601.pdf> 2003.
- [29] Hapke B. Combined Theory of Reflectance and Emissance Spectroscopy [A]. In: *Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition* [C]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993: 31-41.
- [30] Hapke B. *Theory of Reflectance and Emissance Spectroscopy* [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [31] Anderson G P, Aron L W. The MODTRAN 2/3 report & LOW TRAN 7 mode [R]. Prepared by Ontar Corporation for Phillips Laboratory, Geophysics Directorate, 1996.
- [32] Vermate E F, Tanré D, Deuzé J L, et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35 (3): 675-686.
- [33] Dozier J, Warren S G. Effect of viewing angle on the thermal infrared brightness temperature of snow [J]. *Water Resource Research*, 1982, 18: 424-434.
- [34] Gumann G G. Global data on land surface parameters from NOAA AVHRR for use in numerical climate models [J]. *Journal of Climatic*, 1994, 7: 670-680.
- [35] Wald A E, Salisbury J W. Thermal infrared direction emissivity of powdered quartz [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (B12): 24665-24675.
- [36] Moersch J E, Christensen P R. Thermal emission from particulate surfaces: A comparison of scattering models with measured spectra [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (E4): 7465-7477.
- [37] Chandrasekhar S. *Radiative Transfer* [M]. Dover, New York, 1960.
- [38] Spitzer W G, Kleinman D A. Infrared lattice bands of quartz [J]. *Physical Review*, 1961, 121 (5): 324-335.
- [39] Lane M D. Midinfrared optical constants of calcite and their relationship to particle size effects in thermal emission spectra of granular calcite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, 104 (E6): 14099-14108.
- [40] Wenrich M L, Christensen P R. Optical constants of minerals derived from emission spectroscopy: Application to quartz [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101 (B7): 15921-15931.
- [41] Moersch J E, Christensen P R. Thermal emission from particulate surfaces: A comparison of scattering models with measured spectra [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100 (E4): 7465-7477.
- [42] Conel J. Infrared emissivities of silicates: Experimental results and a cloudy atmosphere model of spectral emission from condensed particulate medium [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74 (6): 614-634.
- [43] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy 1, Theory [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86: 3039-3054.
- [44] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy, 3, Correction for macroscopic roughness [J]. *Icarus*, 1984, 59: 41-59.
- [45] Hapke B. Bidirectional reflectance spectroscopy, 4, The extinction coefficient and the opposition effect [J]. *Icarus*, 1986, 67: 264-280.
- [46] Copper B L, Salisbury J W, Killen R M. Midinfrared spectral features of rocks and their powders [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107 (E4): 1-19.
- [47] Shkuratov Y, Starukhina L, Himmann H. A model of spectral albedo of particulate surfaces: Implications for optical properties of

- the Moon[J]. *Icarus*, 1999, 137: 235-246.
- [48] Lane M D, Christensen P R. Thermal infrared emission spectroscopy of anhydrous carbonates[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(E11): 25 581-25 592.
- [49] Hamilton V E. Thermal infrared emission spectroscopy of the pyroxene mineral series[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(E4): 9 701-9 716.
- [50] Michalski J R, Kraft M D, Diedrich T, et al. Thermal emission spectroscopy of the silica polymorphs and considerations for remote sensing of Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(19): PLA2-1 - PLA2-4.
- [51] Hamilton V. Overview of TIR spectroscopy[EB/OL]. <http://tes.asu.edu/TESwrkshop/Hamilton1.pdf>, 2004.
- [52] Salisbury J, Estes J. The effect of particle size and porosity on spectral contrast in the mid-infrared[J]. *Icarus*, 1985, 64: 586-588.
- [53] Salisbury J, Wald A. The role of volume scattering in reducing spectral contrast of forest strahlen bands in spectra of powdered minerals[J]. *Icarus*, 1992, 96: 121-128.
- [54] Salisbury J, Hapke B, Estes J. Usefulness of weak band in midinfrared remote sensing of particulate planetary surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 702-710.
- [55] Henderson B, Jakosky B, Randal C A. Monte Carlo model of polarized thermal emission from particulate planetary surfaces[J]. *Icarus*, 1992, 99: 51-62.
- [56] Kirkland LE, Herr K C, Adams P M. Infrared stealthy surfaces: Why TES and TEMIS may miss some substantial mineral deposits on Mars and implications for remote sensing of planetary surfaces[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(E12): 5 137-5 151.
- [57] Xu Xiru, Liu Qinhua, Chen Jiayi. The remote sensing of land surface temperature[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(2-3): 248-253. [徐希儒, 柳钦义, 陈家宜. 遥感陆面温度[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(2-3): 248-253.]
- [58] Coll C, Caselles V, Rubio E. Temperature and emissivity separation from calibrated data of the digital airborne imaging spectrometer[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2000, 76: 250-259.
- [59] Bandfield J L, Christensen P R, Smith M D. Spectral dataset factor analysis and endmember recovery: Application to analysis of Martian atmospheric particulates[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(E4): 5 573-9 587.
- [60] Li Z L, Becker F, Stoll M P. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 197-214.
- [61] Becker F, Li Z L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1990, 32: 17-33.
- [62] Kahle A B, Madura D P, Scha J M. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: Analysis for geological applications[J]. *Applied Optics*, 1980, 19: 2 279-2 290.
- [63] Gillespie A R. Lithologic Mapping of Silicate Rocks Using TIR in The TIR Data Users Workshop[Z]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, JPL Publication 1985-86-38.
- [64] Li Z L, Becker F, Stoll M P. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 69: 197-214.
- [65] Watson K. Spectral ratio method for measuring emissivity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42: 113-116.
- [66] Hook S J, Gabel A R, Green A A, et al. A comparison of techniques for extracting emissivity information from thermal infrared data for geological studies[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42: 123-135.
- [67] Chen Shupeng, Tong Qingxi, Guo Huadong. Study on Mechanism of Remote Sensing Information[M]. Beijing: Science Press, 1998. 190-192. [陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998. 190-192.]
- [68] Kealy P S, Gabel A R. Estimation of emissivity and temperature using alpha coefficients[A]. In: Proceedings of the Second TIR Workshop[C]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, JPL Publication 1990-90-55.
- [69] Liu Zhiwu, Dang Anrong, Lei Zhidong, et al. A retrieval model of surface temperature with ASTER data and application study[J]. *Progress in Geography Science*, 2003, 22(5): 507-514. [刘志武, 党安荣, 雷志栋, 等. 利用 ASTER 遥感数据反演陆面温度算法及应用研究[J]. 地理科学进展, 2003, 22(5): 507-514.]
- [70] Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1992, 42: 117-121.
- [71] 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: 980-996.
- [72] Gillespie A R, Rokugawa S, Matsunaga T, et al. A temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflectance Radiometer (ASTER) images[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36: 1 113-1 126.
- [73] 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: 681-695.
- [74] Gillespie A R, Rokugawa S, Hook S J, et al. Temperature/Emissivity Separation Algorithm Theoretical Basis Document, Version 2.4[R/OL]. <http://asterweb.jpl.nasa.gov/>, 2004.
- [75] Zhang Xia, Zhang Bing, Zheng Lanfen, et al. Study on the retrieval of emissivity spectra from airborne thermal infrared data[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2000, 19(5): 361-365. [张霞, 张兵, 郑兰芬, 等. 航空热红外多光谱数据的地物发射率谱信息提取模型及其应用研究[J]. 红外与毫米波学报, 2000, 19(5): 361-365.]
- [76] Ingram P M, Muse A H. Sensitivity of iterative spectral synthesis temperature/emissivity separation to algorithmic assumptions and measurement noise[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Re-*

- Remote Sensing, 2001, 39(10): 2158-2167.
- [77] Yan Shouxin, Zhang Bing, Zhao Yongchao, et al. Summarizing the technical flow and main approaches for discrimination and mapping of rocks and minerals using hyperspectral remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004, 19(1): 52-63. [燕守勋, 张兵, 赵永超, 等. 高光谱遥感岩矿识别填图的技术流程与主要技术方法综述[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(1): 52-63.]
- [78] Wyatt M B, Hamilton V E, McSween H Y, et al. Analysis of terrestrial and Martian volcanic compositions using thermal emission spectroscopy: 1. Determination of mineralogy, chemistry and classification strategies [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E7): 14711-14732.
- [79] Ramsey M S, Christensen P R. Mineral abundance determination: Quantitative deconvolution of thermal emission spectra [J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(B1): 577-596.
- [80] Rowan L C, Mars J C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 350-366.
- [81] Vaughan R G, Calvin W M, Taranik J V. SEBASS hyperspectral thermal infrared data: Surface emissivity measurement and mineral mapping [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 85: 48-63.
- [82] Chou Xiaowei, Fu Bihong, Zheng Jianjing. Extraction and analysis of lithostratigraphic information from thermal infrared multispectral scanner imagery in arid region [J]. Chinese Science Bulletin, 1994, 39(18): 1693-1695. [丑晓伟, 傅碧宏, 郑建京. 干旱区热红外遥感多光谱遥感岩石地层信息提取与分析方法研究[J]. 科学通报, 1994, 39(18): 1693-1695.]
- [83] Jin Hao, Tong Qingxi, Zheng Lanfen, et al. The study of imaging spectrometer (MAIS) and thermal infrared multispectral scanner (TIMS) techniques for geological mapping [J]. Remote Sensing of Environment China, 1994, 9(2): 138-144. [金浩, 童庆喜, 郑兰芬, 等. 成像光谱和热红外多光谱技术地质制图研究[J]. 环境遥感, 1994, 9(2): 138-144.]
- [84] Ninomiya Y, Fu Bihong. Extracting lithologic information from ASTER multispectral thermal infrared data in the northeastern Pamirs [J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(1): 22-30. [二宫芳树, 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.]
- [85] Fu Bihong. Study and recent advances of remote sensing petrology [J]. Advances in Earth Science, 1996, 11(3): 252-258. [傅碧宏. 遥感岩石学的研究及其进展[J]. 地球科学进展, 1996, 11(3): 252-258.]

## PROGRESSES IN MINERALS INFORMATION EXTRACTION USING THERMAL REMOTE SENSING

YAN Bo-kun<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Run-sheng<sup>3, 4</sup>, GAN Fu-ping<sup>4</sup>, LIU Sheng-wei<sup>4</sup>,  
YANG Su-ming<sup>4</sup>, CHEN Wei-tao<sup>3, 4</sup>, TANG Pan-ke<sup>1, 2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Key Laboratory of Lithosphere Tectonics and Lithoprobeing Technology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences Beijing 100083, China; 4. China Aero-Geophysical Survey & Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Thermal remote sensing is a promising technique that develops for not a long time in remote sensing of minerals. The technique development is summarized comprehensively in terms of minerals emissivity spectra characteristic, data processing, information retrieval and application. On the basis of this summarization, the development difficulties are discussed and applications for geology are predicted. Obtaining hyperspectral data is development direction; Atmosphere is a dominating factor that affects data quality, and high precision atmosphere correction must be resolved. Quality research of emissivity spectra mechanism has gained some advances, and quantitative research is development direction. Because minerals class (include minerals containing no water) and contents are retrieved by the technique, it can be applied not only on mine exploration but also on basic geological research.

**Key words:** Thermal remote sensing; Minerals information; Emissivity spectra.