

文章编号: 1007-4619(2007)04-0601-08

# 利用 ASTER 热红外遥感数据开展 岩石化学成分填图的初步研究

陈 江<sup>1</sup>, 王安建<sup>2</sup>

(1. 沈阳地质矿产研究所, 辽宁 沈阳 110032 2. 中国地质科学院, 北京 100037)

**摘 要:** ASTER 遥感成像仪的发射提供了廉价的多光谱热红外数据, 是热红外遥感数据的一个重要来源。ASU 热红外光谱库提供了多种矿物的热红外发射率波谱的同时, 还提供了矿物的化学成分即氧化物含量的分析结果。把 ASU 波谱库的矿物波谱重采样至 ASTER 各热红外波段, 对矿物的波谱进行波段比值处理, 与各矿物成分进行相关分析, 选择波段比值与各氧化物含量最大相关系数, 进行对数模拟, 从而可以确定出发射率光谱与化学成分的数量关系。本文分别对  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  进行了数值分析及公式模拟。统计是根据各矿物做出的, 模拟公式同样适用于岩石, 进而可以在遥感热红外数据中得以应用。在四川省西范坪矿区利用模拟公式对  $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  三种氧化物进行了岩石填图, 在野外大部分得到了证实; 利用  $SiO_2$  进行了硅化蚀变带填图, 在异常带内发现了砂岩型铜矿化。

**关键词:** ASTER 热红外; 岩石化学; 填图  
**中图分类号:** TP79 **文献标识码:** A

## The Pilot Study on Petrochemistry Components Mapping with ASTER Thermal Infrared Remote Sensing Data

CHEN Jiang, WANG An-jian

(1. Shenyang Institute of Geology and Mineral Resources, Liaoning Shenyang 110032 China  
2. Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037 China)

**Abstract:** ASTER has thermal infrared bands and provides a potential to lithological mapping on the earth. The ASU thermal spectral library consists of thermal infrared emission spectra of pure minerals with an emphasis on common rock-forming minerals. Each mineral spectrum is accompanied by physical and compositional information. The mineral spectra are resampled to ASTER thermal bands and the band ratios are analyzed with the oxide components correlation coefficients. To select the maximum correlation coefficient and create the simulation formula on the emissivity spectra ratios and the component, then the relationship between the spectra and the component is established. The  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$  components formula are established differently. The statistics was done by the minerals and it can be applied to the rocks and the ASTER imageries. To use the simulation formula in the Xifanping copper deposit area and use the  $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  contents to lithology mapping, most areas were validated. By using  $SiO_2$  contents to classify the silica zone, sandstone-type copper mineralization was found in the anomaly zone.

**Key words:** ASTER thermal infrared; petrochemistry mapping

收稿日期: 2006-09-01; 修订日期: 2006-10-30

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目 (编号: 2003BA61ZA-05) 和中国地质科学院博士后研究基金资助。

作者简介: 陈 江 (1971—), 男, 2002 年博士毕业于东北大学地质普查与勘探专业。研究领域为 3S 技术在地质学方面的应用。已发表  
论文 10 多篇。E-mail: hajt@163.com

## 1 引 言

在遥感领域, 8.0—14.0 $\mu\text{m}$ 的热红外波段是重要的大气窗口, 在对地观测系统中具有重要的应用价值。由于许多造岩矿物在热红外波段具有特征的光谱发射率带, 因此可以用来进行岩石、矿物的识别和分类。

早在 1959年 Lyor就对红外吸收波谱进行了研究, 发现岩石的波谱特征与矿物成分有关<sup>[1]</sup>。随后热红外发射光谱学逐渐形成一个重要技术得以应用。一些学者相继研究了岩石光谱与岩石成分的关系, 将其应用于航空、航天遥感领域<sup>[2-7]</sup>。

Thomson等证实了混合矿物产生的光谱是各个矿物光谱的线性加和<sup>[8]</sup>。这个结果在 Lyor<sup>[1]</sup>的著作中曾经加以推测, 但当时未能得以证实。1998年 Ramsey等扩展了 Thomson等的工作, 利用线性回归函数把矿物混合物分解为矿物端元及它们的丰度<sup>[9]</sup>。Ramsey等对矿物颗粒混合物的实验室光谱进行了系统的线性波谱分解实验, 结果表明, 在矿物颗粒大于 60 $\mu\text{m}$ 时遵循线性混合规律, 当颗粒小于 60 $\mu\text{m}$ 时则偏离线性规律。

矿物是由一种或多种氧化物组成的, 矿物的发射率波谱与矿物的化学成分之间是否有某种相关关系呢? 如果这种相关关系确实存在, 则可以对发射率光谱与氧化物含量进行函数模拟。在实际的地质体中, 组成岩石的矿物颗粒大部分大于 60 $\mu\text{m}$ , 因此大部分满足线性组合的规律。按照 Ramsey的理论<sup>[9]</sup>, 其模拟函数如果适用于矿物 (大于 60 $\mu\text{m}$ ), 那么其模拟函数也应该适用于岩石中的氧化物含量的确定, 进而可以确定岩石成分。这为利用热红外遥感数据进行化学成分填图奠定了理论基础。

## 2 矿物发射率光谱与化学成分的关系

亚利桑那州立大学地质系的行星探索实验室建立了 ASU红外光谱波谱库 (<http://es.asu.edu/speclib/>), 该波谱库包含 150多个纯矿物的热红外波谱 (2000—380 $\text{cm}^{-1}$ ), 主要是一些常见的成岩矿物, 包括硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐及氧化物等。同时还附带有物理性质和化学成分的数据库。其中的化学成分分析主要是氧化物含量分析。所分析的矿物粒径大多在 710—1000 $\mu\text{m}$ 。ASU波谱库中提供了矿物的波谱, 并且还提供了矿物的氧化物

含量, 这就为波谱与化学成分之间的分析提供了可能。

ASIER(空间高级热发射和反射辐射计)属于高级多光谱遥感成像仪。它在可见光和热红外范围内有 9个光谱波段, 在热红外有 5个波段, 热红外波段的分辨率为 90 $\text{m}$ 。

根据 ASIER的热红外波段的波长范围来选择波谱库中各矿物的相应波谱位置。对于 ASIER波段 10 其波数为 1207.2 $\text{cm}^{-1}$ , 在 ASU波谱库中对应的最接近的波数是 1207.24 $\text{cm}^{-1}$ ; ASIER第 11波段的波数为 1150.24 $\text{cm}^{-1}$ , 在 ASU波谱库中对应的最接近的波数为 1159.03 $\text{cm}^{-1}$ ; ASIER第 12波段的波数为 1101.46 $\text{cm}^{-1}$ , ASU波谱库中对应的最接近的波数为 1101.17 $\text{cm}^{-1}$ ; ASIER第 13波段的波数为 937.63 $\text{cm}^{-1}$ , ASU波谱库中对应的最接近的波数为 937.25 $\text{cm}^{-1}$ ; ASIER第 14波段的波数为 886.45 $\text{cm}^{-1}$ , ASU波谱库中对应的最接近的波数为 887.11 $\text{cm}^{-1}$ 。

将这 5个波长范围所对应的发射率值归类。对其中的  $\text{SiO}_2$  含量大于 0的 75种矿物化学成分数据 (由电子探针测得的氧化物含量) 的矿物发射率进行各种可能的波段比值处理, 并利用其波段比值与化学成分进行相关分析, 得到的相关系数见表 1。

### 2.1 热红外波段比值与 $\text{SiO}_2$ 含量的关系

对于  $\text{SiO}_2$  来说, 与  $\text{SiO}_2$  含量相关系数较大的几个波段比值为:  $E_{13}/E_{10}$  的相关系数为 0.403759  $E_{14}/E_{11}$  为 0.399201  $E_{13}/E_{12}$  为 0.471548  $E_{13}/E_{11}$  为 0.38719  $E_{14}/E_{10}$  为 0.42359  $E_{14}/E_{12}$  为 0.4937。这些发射率比值与  $\text{SiO}_2$  含量相关系数中较大的有  $E_{14}/E_{12}$   $E_{13}/E_{12}$   $E_{14}/E_{10}$   $E_{13}/E_{10}$  几个。为了使这些波段与  $\text{SiO}_2$  含量的相关系数达到最大, 可以重新进行波段组合。经过几种不同的组合试验, 得出  $E_{13} \times E_{14} / (E_{10} \times E_{12})$  为最佳的波段组合, 与  $\text{SiO}_2$  含量的相关系数达到 0.49885。其波段比值与  $\text{SiO}_2$  含量的二维散点图如图 1所示。

运用最小二乘匹配法的对数函数进行数值模拟, 其函数为:

$$\text{SiO}_2\% = 28.760503921704 \times \lg(6.560448646402 \times E_{13} \times E_{14} / (E_{10} \times E_{12}))$$

这样可以计算 ASIER热红外遥感数据的发射率波段比值, 利用上述公式计算出其相应的  $\text{SiO}_2$  含量。

表 1 主要的发射率波段比值与氧化物含量之间的相关系数(数据来源于 ASU 波谱库, 分析样品 75 个)

Table 1 The coefficient among the main emissivity spectra ratios and the oxide components (data resampled and collected from ASU spectral library, and 75 samples were analyzed)

	E14/E10	E10/E10	E13/E10	E12/E10	E10/E12	E10/E11	E14/E11	E11/E14	E13/E11	E11/E13	E13/E12	E12/E13	E12/E11	E11/E12	E14/E12
E14/E10	1														
E10/E14	-0.9455436	1													
E13/E10	0.9498234	-0.8712109	1												
E10/E13	-0.8657575	0.8909996	-0.9367925	1											
E12/E10	0.2578012	-0.3565804	0.221858	-0.2806077	1										
E10/E12	-0.2346599	0.3223704	-0.2075798	0.263579	-0.9728508	1									
E10/E11	-0.3141518	0.1207831	-0.3818332	0.1958143	-0.1753336	0.2384358	1								
E14/E11	0.9123355	-0.9573831	0.8288847	-0.8389993	0.2555048	-0.2054192	0.0928165	1							
E11/E14	-0.8447255	0.9503382	-0.7503528	0.8196074	-0.2708804	0.2163626	-0.191142	-0.9795396	1						
E13/E11	0.8799554	-0.899161	0.9121669	-0.9484598	0.2212225	-0.1795337	0.0197806	0.9328727	-0.8994984	1					
E11/E13	-0.7853141	0.8650764	-0.8326536	0.9472993	-0.201237	0.1624494	-0.1253324	-0.8866543	0.8956729	-0.97079	1				
E13/E12	0.7177947	-0.5827292	0.7764043	-0.6722144	-0.4306336	0.4525132	-0.2168321	0.6158924	-0.5342949	0.702668	-0.6356569	1			
E12/E13	-0.5870679	0.5454346	-0.6840181	0.7116723	0.4708967	-0.4747513	0.0247423	-0.5759161	0.5505796	-0.7078843	0.7292129	-0.9186696	1		
E12/E11	0.1104238	-0.2928535	0.0459176	-0.1878029	0.8961169	-0.8500179	0.2774932	0.291208	-0.3488015	0.22606	-0.254053	-0.521009	0.468733	1	
E11/E12	-0.0470078	0.2327292	0.0101148	0.140085	-0.8999191	0.8907445	-0.223331	-0.2060359	0.2700928	-0.1466687	0.1856349	0.5921446	-0.5205996	-0.983903	1
E14/E12	0.7781133	-0.6656167	0.7481896	-0.6268529	-0.3947757	0.4253329	-0.1582026	0.7060827	-0.6343663	0.6912997	-0.6111523	0.9606488	-0.8459076	-0.4606792	0.5394561
SiO <sub>2</sub>	0.4235939	-0.326008	0.4037591	-0.3103618	-0.2026573	0.1387492	-0.0475864	0.3992007	-0.3195008	0.3871904	-0.3121152	0.4715478	-0.4120756	-0.1983063	0.2093625
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.1979178	-0.2905879	0.1430498	-0.2254084	0.151565	-0.0252807	0.3885714	0.3791362	-0.4095173	0.3277941	-0.3564399	0.0892887	-0.1199011	0.3102057	-0.208112
FeO	-0.052905	0.0280161	0.0202027	-0.0584445	0.2258584	-0.196618	-0.1754175	-0.1121886	0.0903863	-0.0298321	0.0073714	-0.1183141	0.1001777	0.1288062	-0.1384466
MgO	-0.2705665	0.2810853	-0.3571243	0.4196579	-0.1214107	0.0586781	-0.0527348	-0.3102302	0.2948961	-0.4218087	0.4406267	-0.2624278	0.321784	-0.138284	0.0765495
CaO	-0.328181	0.3865462	-0.2721836	0.2827388	-0.1143238	0.0509746	-0.129181	-0.4065422	0.4216727	-0.3536331	0.3295466	-0.2108076	0.1712725	-0.1600639	0.1061207
Na <sub>2</sub> O	0.2485504	-0.341389	0.1688824	-0.234303	0.3149645	-0.2577598	0.3885914	0.4425474	-0.4517636	0.3641593	-0.358066	-0.033934	-0.0066174	0.4855132	-0.4213203
MnO	-0.0451774	0.0362678	0.0628779	-0.0989689	-0.0074523	-0.0101959	-0.1335253	-0.0943953	0.0838774	0.0291177	-0.0485343	0.053406	-0.0899018	-0.0677339	0.0445182

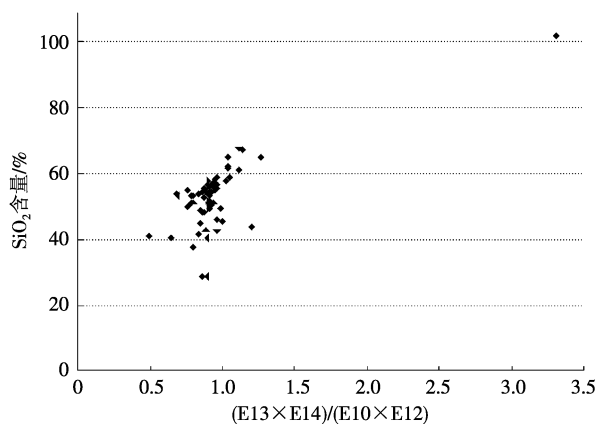


图 1 波段发射率组合比值与  $\text{SO}_2$  含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 1 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and  $\text{SO}_2$  components

## 2.2 热红外波段比值与 $\text{CaO}$ 含量的关系

与  $\text{CaO}$  含量相关性较大的波段比有:  $E_{10}/E_{14}$  相关系数为 0.3865462,  $E_{11}/E_{14}$  的相关系数为: 0.4216727。因此选择波段 11 与波段 14 的发射率比值与  $\text{CaO}$  的含量进行函数模拟, 其散点图如图 2 所示, 模拟函数为:

$$\text{CaO}\% = -83.739959176861 \times \log(0.754550730507 \times E_{11}/E_{14})$$

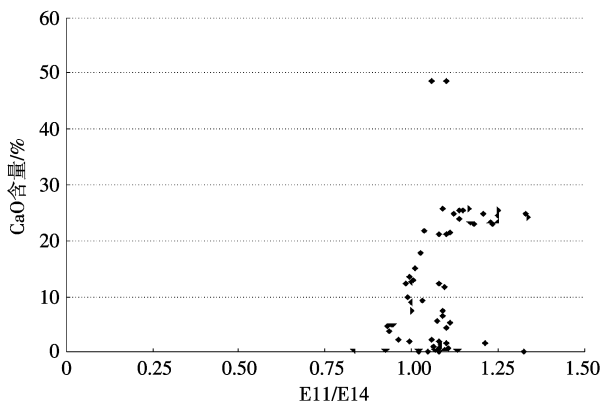


图 2 波段发射率组合比值与  $\text{CaO}$  含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 2 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and  $\text{CaO}$  components

## 2.3 热红外波段比值与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量的关系

与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量相关系数较大的波段比值有:  $E_{10}/E_{11}$  为 0.3885714,  $E_{14}/E_{11}$  为 0.3791362,  $E_{13}/E_{11}$  为 0.3277941,  $E_{12}/E_{11}$  为 0.3102057。从

这些波段比值可以看出与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量有关的波段比值中相关系数较高的几个均是分母为  $E_{11}$ 。因此可以对这些数据进行组合, 用  $(E_{14} + E_{13} + E_{12} + E_{10}) / (4 \times E_{11})$  将此波段组合比值与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量进行相关系数分析, 得到相关系数为 0.5094 大大提高了相关性。对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量与  $(E_{14} + E_{13} + E_{12} + E_{10}) / (4 \times E_{11})$  值进行散点图投影 (图 3), 并做函数模拟, 得到模拟公式如下:

$$\text{Al}_2\text{O}_3\% = -70.740388525018 \times \log(0.799119279501 \times (E_{14} + E_{13} + E_{12} + E_{10}) / (4 \times E_{11}))$$

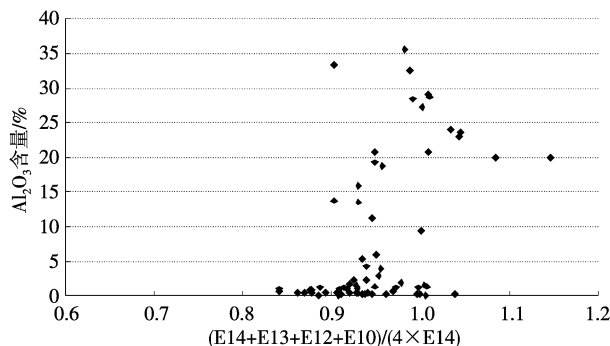


图 3 波段发射率组合比值与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 3 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  components

## 2.4 热红外波段比值与 $\text{MgO}$ 含量的关系

与  $\text{MgO}$  含量相关系数较高的几个波段比值有:  $E_{14}/E_{13}$  为 0.277894,  $E_{10}/E_{13}$  为 0.4196579,  $E_{11}/E_{13}$  为 0.4406267,  $E_{12}/E_{13}$  为 0.321784。在这些波段比值中, 最高的波段比值为  $E_{11}/E_{13}$ 。波段比值与  $\text{MgO}$  含量散点图如图 4 所示。对  $\text{MgO}$  含量与  $E_{11}/E_{13}$  波段比值进行函数模拟, 得到模拟公式如下:

$$\text{MgO}\% = 58.481251280883 \times \log(1.192021124149 \times E_{11}/E_{13})$$

## 2.5 热红外波段比值与 $\text{K}_2\text{O}$ 含量的关系

$\text{K}_2\text{O}$  的分析数据中只有 31 个样品大于 0 其他数据均等于 0 在这些数据中, 最大值为 9.73 另一较大值为 9.3 其他值均较小。对这 31 个样品的  $\text{K}_2\text{O}$  含量与各波段比值做相关分析, 其中相关系数较大的有  $E_{10}/E_{13}$  为 0.586744,  $E_{10}/E_{12}$  为 0.808246,  $E_{13}/E_{12}$  为 0.637062,  $E_{11}/E_{12}$  为 0.811646,  $E_{14}/E_{12}$  为 0.653294,  $E_{11}/E_{12}$  与  $\text{K}_2\text{O}$

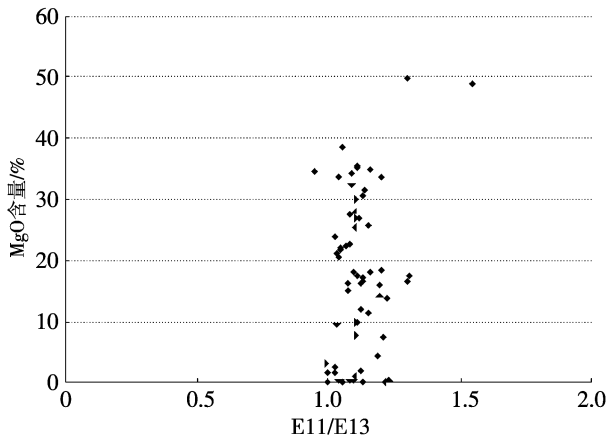


图 4 波段发射率组合比值与 MgO 含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 4 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and MgO components

含量的相关系数最大, 因此选择 E11/E12 进行函数模拟。数据散点图如图 5 所示, 其模拟公式为:

$$K_2O\% = 19.788390394093 \times \log(1.004368798834 \times E_{11}/E_{12})$$

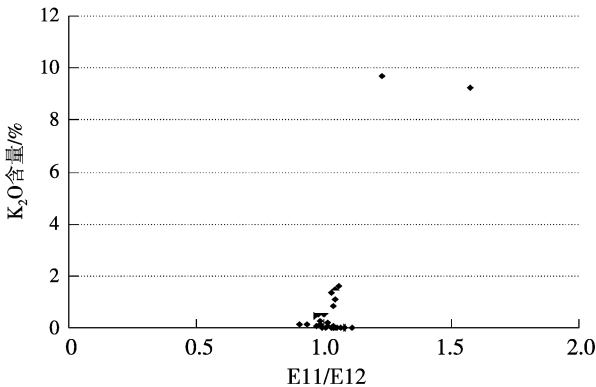


图 5 波段发射率组合比值与 K<sub>2</sub>O 含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 5 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and K<sub>2</sub>O components

### 2.6 热红外波段比值与 Na<sub>2</sub>O 含量的关系

把波谱库中所有 Na<sub>2</sub>O 含量值大于 0 (66 个分析数据) 的数据的波段比值与 Na<sub>2</sub>O 含量进行相关分析, 分析结果见表 2 与 Na<sub>2</sub>O 含量相关系数波段比值较大的有: E10/E14 为 0.42 E14/E10 为 0.51, E14/E11 为 0.57 E13/E11 为 0.51, E12/E11 为 0.52 从波段比值可以看出, E11 与 Na<sub>2</sub>O 的含量有着重要的关系。经过不同波段比值的试验, 发现利用 (E14 + E13 + E12) / (3 × E11) 比值与 Na<sub>2</sub>O 含量

进行相关分析, 具有 0.58994 的相关系数。比值与 Na<sub>2</sub>O 含量散点图如图 6 所示。其模拟函数为:

$$Na_2O\% = 28.57284848102 \times \log(1.168501741987 \times (E_{14} + E_{13} + E_{12}) / (3 \times E_{11}))$$

通过对上述 6 种氧化物含量与各波段比值的综合分析, 在利用波段发射率比值进行函数模拟时, 波段比值与氧化物含量的相关系数越大, 则数值变化趋势越明显。当二氧化硅含量大于 50% 时, 相关性越大, 而低于 50% 时相关性则差一些。对于 Na<sub>2</sub>O K<sub>2</sub>O 的含量与最佳波段比值之间的相关系数也较大, 因此能很好地进行函数模拟。相对而言, MgO CaO 的含量与其对应的最佳波段比值要差一些。另外还要对散点图进行分析, 如图 6 在 Na<sub>2</sub>O 含量低于 1% 时, (E14 + E13 + E12) / (3 × E11) 的数值较为分散, 而当 Na<sub>2</sub>O 含量高于 1% 时, Na<sub>2</sub>O 含量与波段比值之间具有更好的相关性。K<sub>2</sub>O 也具有类似的特征。

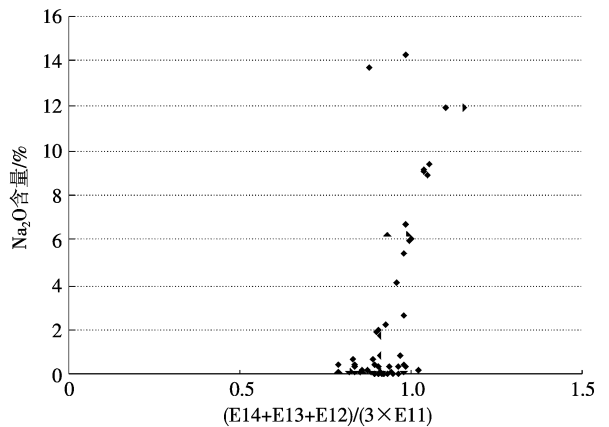


图 6 波段发射率组合比值与 Na<sub>2</sub>O 含量的散点图及函数模拟曲线

Fig 6 The scatter plot and the simulation function of emissivity ratios and Na<sub>2</sub>O components

## 3 试验区的氧化物含量填图结果

上述的各公式是通过光谱库中的数值做出的, 需要进行野外实际验证。选择四川盐源盆地的西范坪矿区及其外围为试验区。在试验区分布有著名的西范坪斑岩型铜矿床, 砂岩型铜矿及与玄武岩有关的铜矿等多种矿化类型。对该区的研究目的是通过遥感数据的解译提供有关铜矿化信息。

### 3.1 ASTER 发射率数值计算方法

ASTER 热红外数据可以利用 ENV 软件包提供

表 2 主要的发射率波段比值与 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O 含量之间的相关系数 (数据来源于 ASU 波谱库, 分析样品 66 个)Table 2 The coefficient among the main emissivity spectra ratios and Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O components (data resampled and collected from ASU spectral library, and 66 samples were analyzed)

	E14/E10	E10/E14	E13/E10	E10/E13	E12/E10	E10/E12	E10/E11	E14/E11	E13/E11	E11/E13	E13/E12	E12/E13	E12/E11	E11/E12	E14/E12	E12/E14	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
E14/E10	1.00																	
E10/E14	-0.99	1.00																
E13/E10	0.87	-0.85	1.00															
E10/E13	-0.87	0.86	-1.00	1.00														
E12/E10	0.58	-0.56	0.61	-0.61	1.00													
E10/E12	-0.49	0.49	-0.53	0.53	-0.97	1.00												
E10/E11	0.34	-0.33	0.22	-0.21	-0.25	0.32	1.00											
E14/E11	0.95	-0.94	0.80	-0.79	0.41	-0.32	0.62	1.00										
E13/E11	0.86	-0.84	0.92	-0.91	0.43	-0.33	0.57	0.91	1.00									
E11/E13	-0.87	0.86	-0.93	0.93	-0.42	0.33	-0.55	-0.91	-0.99	1.00								
E13/E12	0.14	-0.14	0.20	-0.20	-0.63	0.72	0.54	0.29	0.37	-0.38	1.00							
E12/E13	-0.19	0.19	-0.29	0.29	0.58	-0.64	-0.52	-0.33	-0.44	0.45	-0.98	1.00						
E12/E11	0.71	-0.70	0.70	-0.69	0.93	-0.88	0.13	0.65	0.65	-0.63	-0.46	0.40	1.00					
E11/E12	-0.65	0.64	-0.65	0.65	-0.95	0.94	-0.02	-0.56	-0.56	0.55	0.56	-0.48	-0.98	1.00				
E14/E12	0.37	-0.37	0.21	-0.21	-0.53	0.62	0.64	0.51	0.41	-0.43	0.90	-0.86	-0.32	0.42	1.00			
E12/E14	-0.47	0.48	-0.27	0.28	0.45	-0.52	-0.63	-0.59	-0.47	0.48	-0.83	0.82	0.23	-0.31	-0.98	1.00		
Na <sub>2</sub> O	0.51	-0.47	0.41	-0.37	0.35	-0.29	0.42	0.57	0.51	-0.47	-0.02	0.02	0.52	-0.45	0.12	-0.17	1.00	
K <sub>2</sub> O	-0.16	0.16	-0.23	0.24	-0.53	0.63	0.36	-0.03	-0.07	0.06	0.51	-0.43	-0.42	0.52	0.50	-0.43	-0.03	1.00

的程序来依次处理。

首先计算辐射率 (Radiance), 随后进行大气校正。在 ENV 软件包中, 大气校正算法是采用实地大气补偿算法 (In-Scene Atmospheric Compensation algorithm ISAC)<sup>[10]</sup>。经过大气校正后, 可以计算发射率。ENV 软件包提供三个技术, 可以用来分离热红外传感器测量的辐射数据中的发射率和温度信息, 即参考通道 (Reference Channel), 发射率标准化 (Emissivity Normalization) 和  $\alpha$  残余 (Alpha Residuals)。参考通道和发射率标准化方法都假定一个固定的发射率值, 并生成发射率和温度输出。 $\alpha$  残余方法不提供温度信息。本次研究是采用发射率标准化法计算发射率数值。

### 3.2 岩石化学成分填图

利用上述计算  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  的模拟函数可以分别计算出它们的含量。其中  $\text{SiO}_2$  的含量在岩浆岩石学中还称为酸度,  $\text{K}_2\text{O}$  与  $\text{Na}_2\text{O}$  的重量百分数之和, 称为全碱含量。而确定岩浆岩碱性程度的方法中最方便且常用的是里特曼组合指数 ( $\delta$ ) 其中  $\delta = (\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})^2 / (\text{SiO}_2 - 43)$ 。

划分岩石类型时, 首先根据酸度 ( $\text{SiO}_2$  重量百分数) 把岩浆岩分为超基性岩、基性岩、中性岩和酸性岩 4 大类, 然后每大类再根据碱度大小进一步划分为钙碱性、碱性和过碱性三个系列。由此可以划分出以下 9 类岩浆岩石类型: (1) 钙碱性花岗岩-流纹岩类; (2) 碱性花岗岩-流纹岩类; (3) 辉长岩-玄武岩类; (4) 超基性岩 (碳酸盐岩); (5) 闪长岩-安山岩类; (6) 碱性辉长岩-玄武岩类; (7) 过碱性辉长岩-玄武岩类; (8) 二长岩-粗面岩类; (9) 霞石正长岩-响岩类。

对试验区的岩石填图结果 (图 7) 与区域地质图和野外实际对比发现, 出露的与斑岩型铜矿等有密切关系的石英二长斑岩岩体均落在二长岩-粗面岩类, 区中出现的碳酸盐地层落在超基性岩中。研究区分布的大部分为火山岩, 与填图所划分出的大面积闪长岩-安山岩岩相在化学成分上是一致的。因此岩石填图的结果可以用来辅助找矿勘查工作。本次研究所得到的岩石填图成果是基于岩浆岩的基础, 而相应的化学成分对沉积岩和变质岩的研究也同样适用。

由于很多矿床的形成与硅化有密切的关系, 且石英脉、硅质岩等常为野外的重要找矿标志, 因此二氧化硅含量的确定, 不但有着重要的地质意义还有着重要的矿产勘查与找矿预测的意义。在试验区对

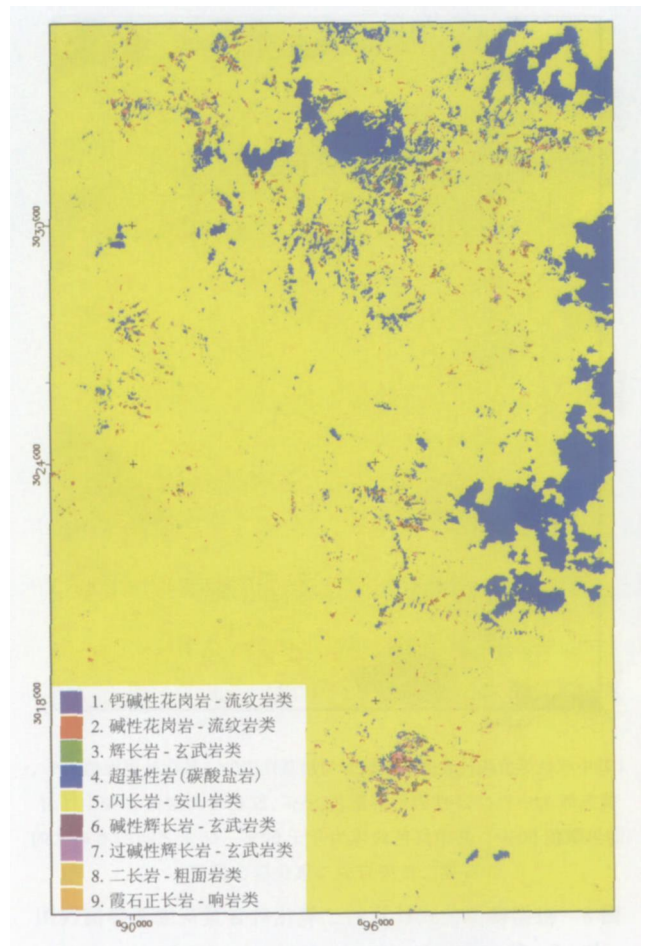


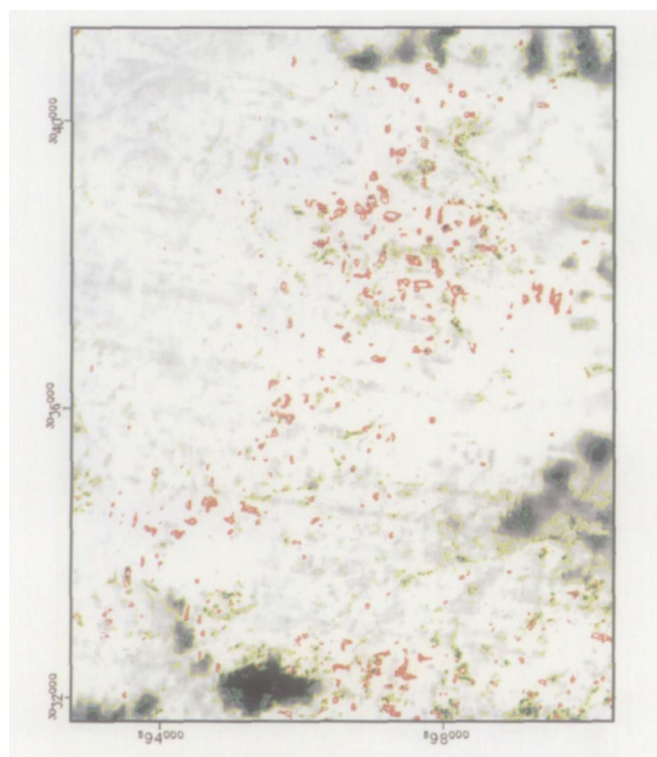
图 7 利用 ASTER 热红外数据进行区域岩石填图结果

Fig 7 The rock mapping with ASTER thermal infrared data in the study area

于二氧化硅含量的解译成果 (图 8) 得到了较好的验证, 其中二氧化硅含量较高的地层主要是砂岩和少量的石英二长斑岩, 结合其他蚀变信息, 在二氧化硅含量较高的地层中发现有砂岩型铜矿化的存在。

## 4 结论与探讨

利用 ASU 热红外发射率波谱, 可以进行矿物成分的定量研究。而目前大部分学者研究的是精确提取矿物种属及矿物丰度信息。ASTER 是多光谱热红外遥感数据, 具有 5 个热红外波段, 不足以精确提取矿物种属及矿物丰度信息, 但是其对化学成分的含量能进行半定量反演。利用纯矿物的发射率波谱与化学成分之间所作的函数模拟具有较高的准确性, 这是因为纯矿物的波谱比较单一, 而其化学成分也比较单一。通过实际研究发现利用热红外的波段比值与化学成分之间的函数模拟, 可以应用于实际



(其中绿色等值线代表的是基性岩与超基性岩的二氧化硅界限值 45%，黄色线为中性与基性岩的界限值 53%，红色线为酸性岩和中性岩的界限值 66%。其中红色块体为介于 62%—66% 之间的本地地区的石英二长斑岩的二氧化硅含量值)

图 8 根据模拟公式计算的二氧化硅含量灰度及等值线图

Fig. 8 The  $\text{SiO}_2$  content map with gray level and contour based on the simulation function

的地质研究中, 并已在矿产资源勘查及区域地质调查方面得以应用。

运用文中所述的公式可以测出几种主要氧化物的含量来, 但是也存在很多的不确定性。影响各模拟函数的主要因素有: 参与各氧化物成分模型的数据较少, 本文中参与二氧化硅含量统计分析的样品数(波谱分析矿物数)为 75 种, 而参与氧化钾模拟的只有 31 个, 因此, 只有在多种矿物、岩石有大量分析数据的前提下, 才能更精确地进行含量与波谱比值模拟, 提高精确度。在对试验区填图的实践中发现影响热红外岩石化学成分填图的另一个主要因素是航天遥感数据的处理, 特别是研究区中如果植被发育的情况下, 如果不对植被进行线性波谱分离等

过程的去除, 会使整个  $\text{SiO}_2$  的含量测试结果整体下降。因此在使用本文提供的公式时要消除岩石、土壤外其他地物的干扰。

总之, 尽管存在着许多的非确定性, 但是仅利用多光谱热红外遥感数据就可以进行(半)定量的岩石化学成分填图, 这无疑使遥感岩石化学的研究跨上了一个新的台阶。

#### 参 考 文 献 (References)

- [1] Lyon R J P. Analysis of Rocks by Spectral Infrared Emission (8—25 microns) [J]. *Econ Geol* 1965 **60** 715—736
- [2] Walter L S, Salisbury J W. Spectral Characterization of Eneous Rocks in the 8—12  $\mu\text{m}$  Region [J]. *J Geophys Res* 1989 **94** 9203—9213
- [3] Sabine C, Reardon V J, Tamalik J V. Quantitative Estimation of Granitoid Composition from Thermal Infrared Multispectral Scanner (TMS) Data, Desolation Fliderness, Northern Sierra Nevada, California [J]. *J Geophys Res* 1994 **99** 4261—4271.
- [4] Bandfield J L, Golch T D, Christensen P R. Spectroscopic Identification of Carbonate Minerals in the Martian Dust [J]. *Science* 2003 **301** 1084—1087.
- [5] Hoefen TM, Clark R N, et al. Discovery of Olivine in the Nili Fossae Region of Mars [J]. *American Journal of Science* 2003 **302** 627—630.
- [6] Christensen P R, Bandfield J L, 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** 9623—9642.
- [7] Hook S J, Dmochowski J E, Howard K A, et al. Mapping Variations in Weight Percent Silica Measured from Multispectral Thermal Infrared Imagery—Examples from the Hiller Mountains, Nevada, USA and Tres Virgenes, La Reforma, Baja California Sur, Mexico [J]. *Remote Sensing of Environment* 2005 **95** 273—289.
- [8] Thomson J L, Salisbury J W. The Mid-infrared Reflectance of Mineral Mixtures (7—13  $\mu\text{m}$ ) [J]. *Remote Sensing of Environment* 1993 **45** 1—13.
- [9] Ramsey M S, Christensen P R. Mineral Abundance Determination: Quantitative Deconvolution of Thermal Emission Spectra [J]. *J Geophys Res* 1998 **103** 577—596.
- [10] Young S J, Johnson B R, Hackwell J A. An In-scene Method for Atmospheric Compensation of Thermal Hyperspectral Data [J]. *J Geophys Res* 2002 **107** 4774.