

基于 ASTER SWIR-TIR 多光谱数据的西准噶尔花岗岩类岩性信息提取与识别——以克拉玛依岩体为例*

郑硕^{1,2} 付碧宏²

ZHENG Shuo^{1,2} and FU BiHong²

1. 安徽师范大学 国土资源与旅游学院, 芜湖 241003

2. 中国科学院地质与地球物理研究所 地球深部研究重点实验室, 北京 100029

1. College of Territorial Resource and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China

2. Key Laboratory of Earth's Deep Interior, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2012-10-01 收稿, 2013-03-01 改回.

Zheng S and Fu BH. 2013. Lithological mapping of granitoids in the western Junggar from ASTER SWIR-TIR multispectral data: Case study in Karamay pluton, Xinjiang. *Acta Petrologica Sinica*, 29(8):2936–2948

Abstract Lithological mapping of granitoids is a hotspot in remote sensing petrology. In the western Junggar of northern Xinjiang, a number of granitic plutons are well exposed, and the lithological information is significant for the geological investigation of the western Junggar. In this study, the ASTER SWIR-TIR band ratios 13/12(R), 4/6(G) and $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ (B) false color composite imagery was proposed successfully to identify and extract alkali-feldspar granite, granite, granodiorite and monzogranite, respectively, based on analysis of the laboratory reflectance and emissivity spectra of Karamay granitoid samples measured by portable emission spectrometer and related minerals spectra from spectral library in the shortwave infrared (SWIR) to thermal infrared (TIR) region. The results show that ASTER SWIR-TIR multispectral data, especially TIR data, can be applied to map granitoids effectively. Furthermore, based on the lithological and tectonic interpretation of ASTER imagery, mineral exploration prospect also infer around the II pluton and the interchange of between eastern I pluton and III pluton of Karamay, comparing with alteration features of the Baogutu porphyry copper-molybdenum deposit.

Key words ASTER SWIR-TIR data; Spectral characteristics; Lithological identification; Granitoids; Karamay pluton

摘要 花岗岩类的遥感岩性提取与识别研究一直是遥感岩石学领域的热点之一。位于中国新疆北部的西准噶尔地区有许多花岗岩体产出,其岩性信息对于西准噶尔的地质研究十分重要。本文通过对西准噶尔克拉玛依花岗岩体岩石样品及光谱库中相关矿物的可见光-近红外及短波红外(VNIR-SWIR)与热红外(TIR)的光谱测试与特性分析,采用 ASTER SWIR-TIR 比值 13/12(R), 4/6(G), $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ (B)假彩色合成技术识别与提取出研究区碱长花岗岩、花岗岩、花岗闪长岩与二长花岗岩四种花岗岩类,证明 ASTER SWIR-TIR 多光谱数据,尤其是 TIR 数据,对花岗岩类岩性识别的能力。此外,根据遥感影像中岩性、构造特征的解译与区域内包古图斑岩型铜钼矿的成矿斑岩岩体比较,推断出位于克拉玛依 II 号岩体以及 I 号与 III 号岩体交汇部位东侧的部分区域仍可能具有一定的成矿潜力。

关键词 ASTER SWIR-TIR 数据;光谱特性;岩性识别;花岗岩类;克拉玛依岩体

中图分类号 P627

* 本文受国家自然科学基金项目(40872126)资助。

第一作者简介:郑硕,男,1985年生,博士生,遥感地质学专业,E-mail: 201231480013@mail.bnu.edu.cn

1 引言

新疆西北缘的西准噶尔位于阿尔泰山南缘,构造上属于西伯利亚、塔里木和哈萨克斯坦-准噶尔古板块的交汇部位,以古生代蛇绿岩和火成岩为特征。该区域发育有一系列 NE-NNE 向和近 EW 向断裂,沿其南段分布着大大小小呈岩基状的深层花岗岩体,如红山、哈图、阿克巴斯套、克拉玛依和庙尔沟岩体等,侵位于泥盆-石炭系中(图 1)(Feng *et al.*, 1989; Zhang *et al.*, 1993, 1995)。西准噶尔地区对于研究阿尔泰山增生造山带来说是一个天然的试验场,然而许多地质单元的自然属性与构造特征不清楚,缺乏详细的岩性与构造信息及地球动力学数据(Zhang *et al.*, 2011)。相比于东准噶尔地区,西准噶尔碱性花岗岩的研究也较薄弱。因此,对该区域地质体的岩性,尤其是花岗岩类岩性信息的地质调查与研究具有重要意义。

随着遥感技术与信息处理技术的不断发展,遥感信息作为一种独立的地质参数(杨建民等,2007),已被广泛应用于

岩性探测、构造研究、地质灾害等地质领域。尤其是利用遥感光谱信息对岩性的识别与提取,可以快速、宏观地提供丰富的岩石信息。然而,火成岩类遥感岩性识别研究中,花岗岩类的信息提取一直是难点之一。原因在于纯花岗岩在可见光-近红外及短波红外谱域(VNIR-SWIR)不具有反射光谱特征(Hunt and Salisbury, 1973)。相比较而言,作为遥感领域重要大气窗口的 8.0~14.0 μm 热红外谱域(TIR),由于花岗岩的主要造岩矿物——石英与长石,其分子基谱振动所引起的低发射率带(The Reststrahlen Band)光谱特征显著,为更有效地提取花岗岩类岩矿信息提供了可能。Watts *et al.* (2005)曾基于花岗岩含有 5%~10% 的白云母,使用 ASTER SWIR 波段比值 7/6 : 6/5 : 6/4 假彩色合成技术,在西藏南部的印度河-雅鲁藏布江板块缝合带以南地区,从寒武纪片麻岩中区分出第三纪花岗岩。ASTER 8~12 μm 的 TIR 波段设置是火成岩光谱特征较集中的谱域。二宫芳树和付碧宏(2003)基于矿物 ASTER TIR 发射率,建立了石英指数(QI)、碳酸盐指数(CI)与二氧化硅含量指数(SI),在帕米尔东北缘采用三个指数的假彩色合成技术识别出部分花岗岩体。陈

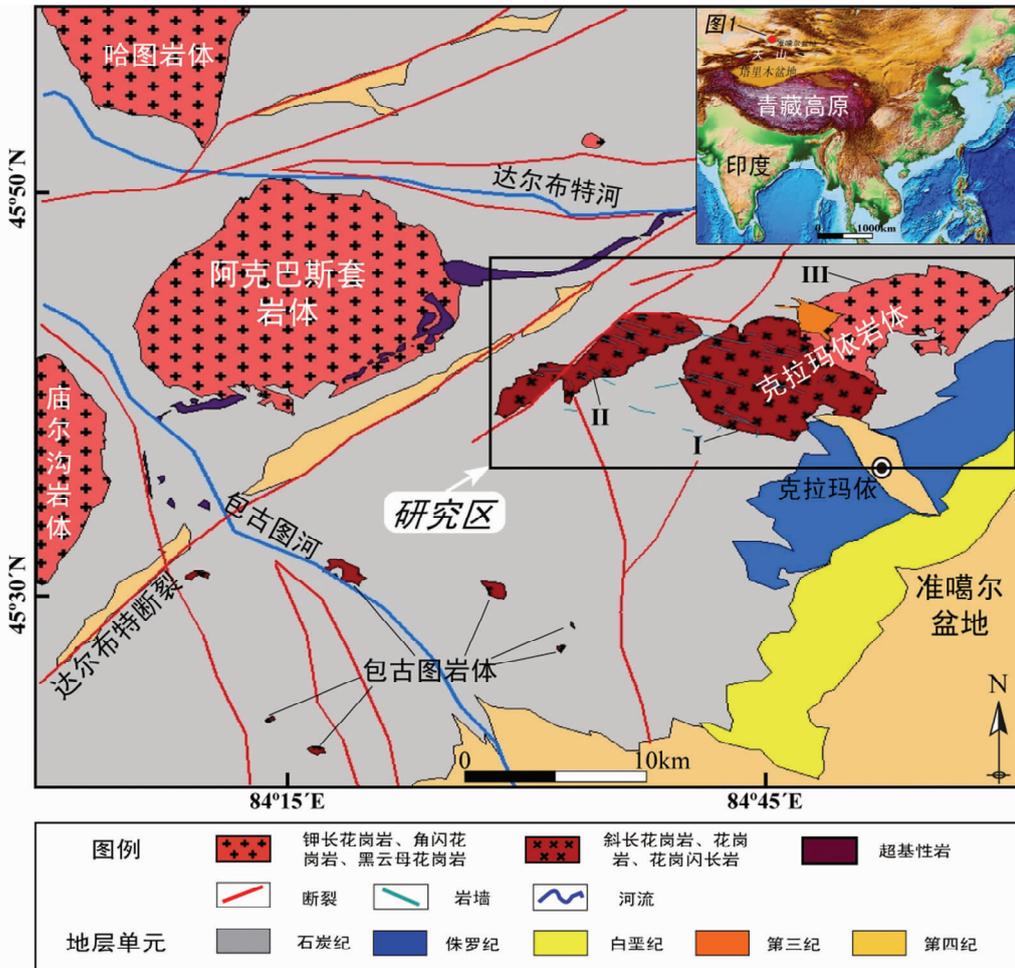


图 1 研究区地质简图

Fig. 1 The schematic geological map of study area

江和王安健(2007)对 ASU 岩石波谱库岩石样品进行了二氧化硅含量与 ASTER TIR 多个波段比值拟合计算,利用所得到的定量方程进行岩石化学成分填图,提取出部分钙碱性及碱性花岗岩。Aboelkair *et al.* (2010)也曾利用 ASTER TIR 波段比值 12/13 : 11/12 : 14/13 假彩色合成技术成功地识别出埃及中东沙漠地区部分钠长花岗岩体。

ASTER(高级星载热发射反射辐射计)是搭载于 1999 年 12 月发射的 Terra 卫星上的五个传感器之一,通过覆盖可见光-近红外、短波红外和热红外谱域的 14 个波段获取地球表面的多光谱数据:VNIR(0.52 ~ 0.86 μm)有 3 个波段(空间分辨率为 15m),其中第三波段可单轨道获得近红外立体图像数据,具有生成高精度数字高程模型(DEM)数据的能力,SWIR(1.6 ~ 2.43 μm)有 6 个波段(空间分辨率 30m),TIR(8.125 ~ 11.65 μm)有 5 个波段(空间分辨率为 90m)(Fujisada, 1995; Ninomiya and Fu, 2002; Ninomiya *et al.*, 2005)。相比于 Landsat TM/ETM,ASTER 在 SWIR 与 TIR 谱域的波段数更多且光谱分辨率更高,为不同岩性的识别与提取提供更多的诊断窗口。

本次研究通过对相关矿物实验室光谱数据与野外岩石样品 TIR 发射率及 SWIR 反射率的光谱测试与特性分析,使用 ASTER SWIR-TIR 遥感数据的相关波段比值与彩色合成技术对西准噶尔地区克拉玛依花岗岩体进行岩性识别,探讨其花岗岩类岩石与矿物光谱特征,寻找提取花岗岩类岩性信息的适宜方法。

2 地质概况

西准噶尔经历了碰撞前和碰撞后两个阶段的构造演化,其中碰撞后阶段的初期为中酸性岩浆活动期,从晚石炭世开始到早二叠世结束,这一时期发生大规模的中酸性岩浆侵入(冯益民, 1987)。该区域无变质基底的记录,最老的岩石是寒武纪-奥陶纪基性-超基性蛇绿岩。寒武纪后期沉积岩,特别是泥盆和石炭纪火山沉积岩非常丰富(Tang *et al.*, 2010)。石炭纪地层主要在其东南部,地层由老到新分别为太勒古拉组、包古图组和希贝库拉斯组。

西准噶尔花岗岩体分布广泛,裸露面积约占全区的七分之一(金成伟和张秀祺, 1993),其中克拉玛依岩体位于西准噶尔中部。前人对该岩体的花岗岩年代学研究表明,克拉玛依花岗岩体的成岩年龄为 320Ma 左右,为海西中期的晚石炭世初期,侵入太勒古拉组与包古图组地层中(金成伟和张秀祺, 1993; Kwon *et al.*, 1989; 高山林等, 2006)。此外,岩体及其周围地层中还广泛发育有闪长玢岩和辉绿岩岩墙,属于亚碱性系列(李辛子等, 2004)。为便于讨论,本次研究将克拉玛依岩体分为 I、II、III 号(图 1 标注)。该研究区属于旱半干旱气候非常适合开展遥感应用研究。

3 花岗岩类相关矿物与岩石光谱特性

3.1 相关矿物光谱特性

花岗岩的主要造岩矿物为石英与长石,长石主要分为碱性长石族(正长石、微斜长石和条纹长石等)和斜长石族(奥长石、中长石和钙长石等)两大类,但大多数长石是以正长石(Or)、钠长石(Ab)和钙长石(An)为端元组分按一定比例共生于岩石中。根据三个长石端元组分相对含量,花岗岩种类又进一步细分为碱性花岗岩、二长花岗岩、斜长花岗岩等多个亚类。集中研究石英与长石族矿物的光谱特性对花岗岩遥感数据的岩性识别尤为重要。

3.1.1 热红外(TIR)

组成岩石的矿物在热红外谱域具有选择性发射的特性,同一矿物在不同谱域具有不同的发射率,不同矿物在同一谱域也具有不同的发射率(傅碧宏和丑晓伟, 1994)。图 2a, c 显示长石与石英实验室 TIR 谱域光谱曲线。硅酸盐矿物低发射率谱带波长位置会随着晶体结构中 SiO_4 四面体孤立性的增加(聚合度降低)而向长波方向移动(Farmer, 1974),如石英在 8.62 μm 的特征峰值(图 2c),长石则多出现在 9 μm 附近(图 2a, c)。碱性长石族与斜长石族在 TIR 特征谱带多集中于 8 ~ 12 μm 。晶体结构中阳离子质量、化学键强度的改变与轻微形变,会引起矿物特征光谱的波长偏移或分裂(Hecker *et al.*, 2010)。斜长石族中(图 2a),从钠长石端元至钙长石端元特征吸收带的数量逐渐减少且吸收强度也相对下降。特征光谱的分裂能力随富钠斜长石向富钙斜长石减弱。斜长石族在 8.2 ~ 8.8 μm 波长范围为一个宽吸收带,至 8.9 ~ 9.25 μm 出现发射率相对高的峰值,10.8 μm 附近存在弱且更宽的吸收谱带。碱性长石中(图 2c),条纹长石作为一种钾、钠长石为主客晶共生构成的碱性长石,光谱特征强于正长石与微斜长石。碱性长石族 8.2 ~ 8.8 μm 的特征吸收带相对斜长石较窄,特征峰值集中于 9 μm 附近,9 ~ 10.2 μm 波长区间的一系列吸收峰数量多于斜长石。但在 10 ~ 11.6 μm 并未见任何光谱特征。

上述矿物实验室光谱重采样至 ASTER TIR 波段后(图 2b, d),长石族矿物在 TIR 光谱特征依旧明显。光谱曲线中,无论碱性长石还是斜长石,波段 10 与 12 发射率都高于波段 11,石英恰好相反。然而,各类长石矿物之间也存在一定区别。斜长石族中(图 2b)中,钠长石至钙长石在波段 12 的发射率相对于波段 10 与 13 分别上升与下降,波段 12 与 13 的曲线斜率减小的变化趋势显而易见。相比于斜长石族,碱性长石族在波段 13 的值都高于波段 12(图 2d)。因此,波段 13 与 12 的比率差异可用于区分斜长石与碱性长石。同时,除钠长石以外的斜长石族矿物,如奥长石、拉长石、钙长石,波段 12 相对于其肩部的波段 11 与 13 的较高比率具有识别斜长石的能力。

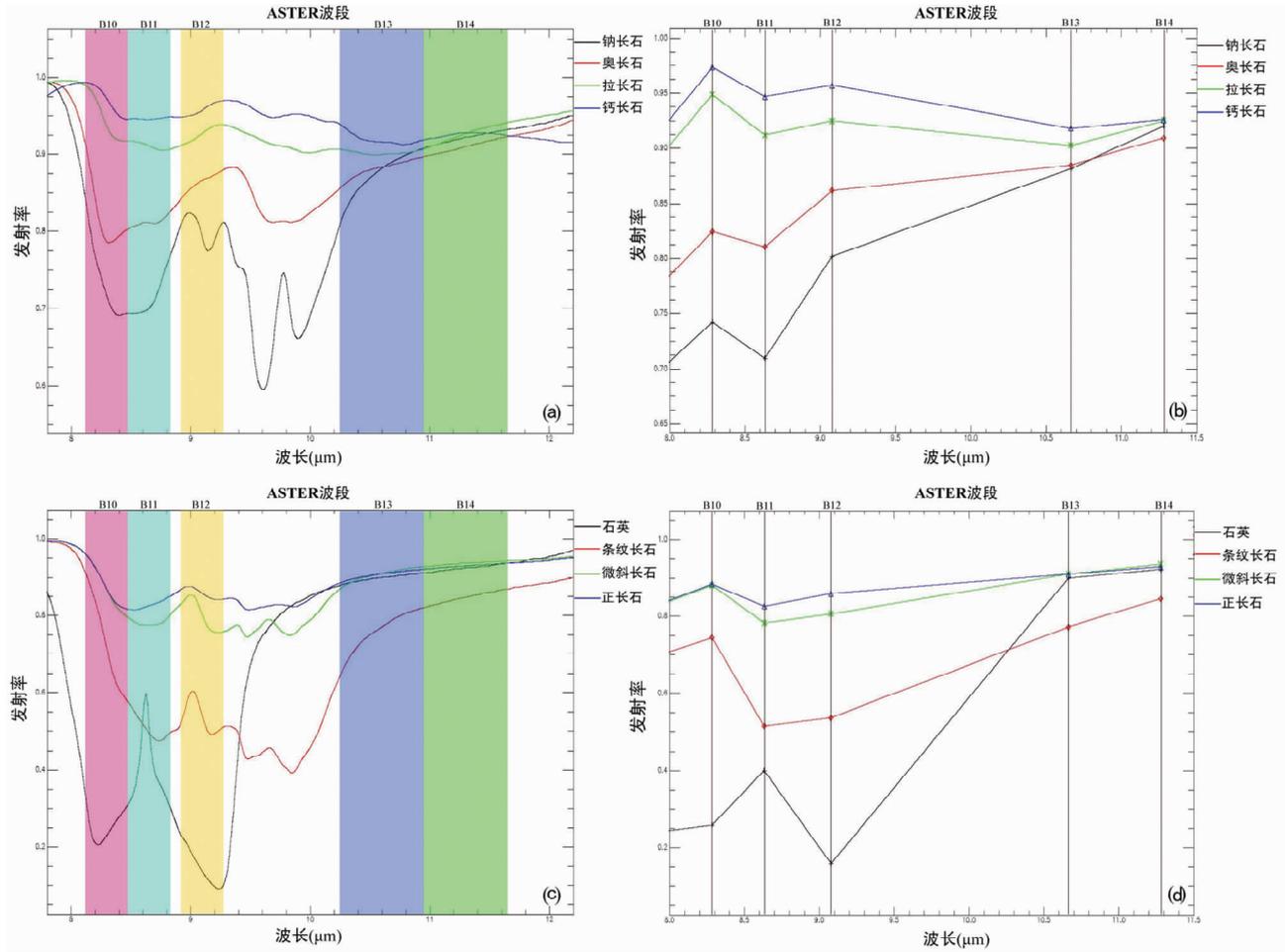


图 2 矿物发射率光谱曲线

(a)-斜长石族矿物 TIR 谱域发射率光谱曲线；(b)-斜长石族矿物 ASTER TIR 波段重采样后发射率光谱曲线；(c)-碱性长石族矿物与石英 TIR 发射率光谱曲线；(d)-碱性长石族矿物与石英 ASTER TIR 波段重采样后发射率光谱曲线。数据源于 USGS 反射率光谱库，根据基尔霍夫定律 ($E = 1 - R$) 将反射率转换为发射率

Fig. 2 Emissivity spectra of minerals

Thermal infrared emissivity spectra of plagioclase minerals from USGS mineral spectral library (a) and the spectra convolved to the ASTER bandpasses (b); Thermal infrared emissivity spectra of alkali-feldspar minerals and quartz from USGS mineral spectral library (c) and the spectra convolved to the ASTER bandpasses (d)

3.1.2 短波红外 (SWIR)

纯净的石英与长石族矿物在 VNIR-SWIR 区域一般不具备任何光谱特征 (图 3a)。自然条件下出现的某些光谱特征反映的是其结构中某些杂质 (如云母族、闪石族矿物) 与特殊阳离子的信息, 并非硅酸盐结构本身。在克拉玛依岩体的二长花岗岩中发现白云母含量较高且部分正长石发生绢云母化蚀变, 明显区别于区域其他花岗岩类。由于白云母与绢云母化学成分基本相同, 两者的光谱特征也基本一致, 在 $2.2\mu\text{m}$ 的羟基振动谱带十分尖锐。而黑云母、角闪石等其他矿物在 SWIR 的吸收谱带出现在波长更长的 $2.3\mu\text{m}$ 附近 (图 3a)。与其他矿物相比, 白云母在 ASTER 波段 4 的反射率明显强于具有吸收特性的波段 6 (图 3b)。因此, 可以根据波段 4 与 6 的比率指示白云母与绢云母化蚀变矿物。

3.2 花岗岩类岩石样品光谱特性

克拉玛依岩体野外花岗岩样品 (采样点位置见后文) 光谱发射率测试采用 Micro FT (Model 102) 便携式光谱计。测量的光谱区间为 $2 \sim 16\mu\text{m}$, 光谱分辨率 FWHH 为 4 波数。岩石样品 VNIR-SWIR 光谱反射率的测试使用 ASD 便携式分光辐射计, 可以在 $0.35 \sim 2.5\mu\text{m}$ 范围记录高分辨率的光谱数据。图 4 与图 5 分别显示了岩样 $8 \sim 12\mu\text{m}$ TIR 发射率光谱曲线与 $1.0 \sim 2.5\mu\text{m}$ SWIR 反射率光谱曲线。

3.2.1 热红外 (TIR)

岩石在热红外谱域光谱信息量丰富, 其特征的低发射率谱带均是由造岩矿物的原子振动激发产生, 谱带的中心波长位置是岩石主要矿物成分的直观反映 (丑晓伟等, 1996)。

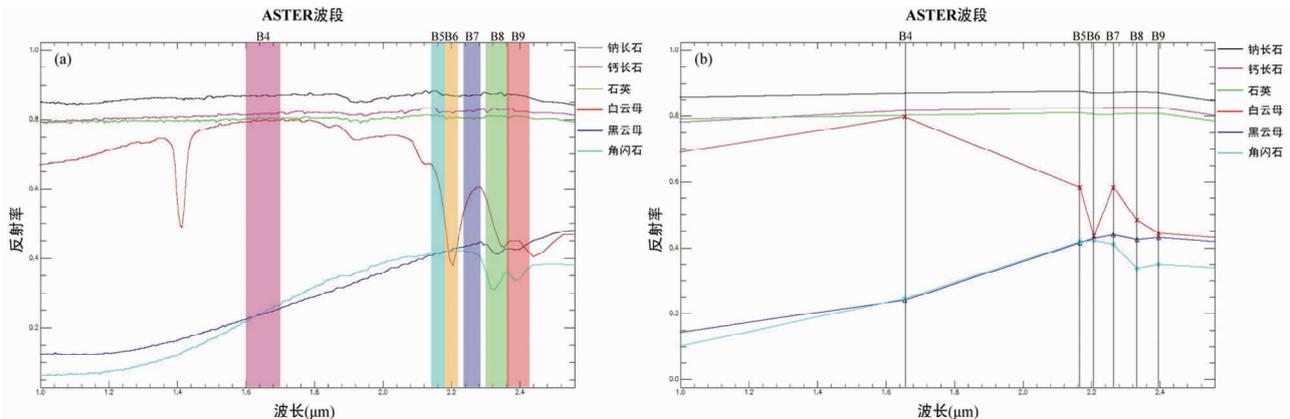


图3 相关矿物 SWIR 谱域反射率光谱曲线(a)和 ASTER SWIR 波段重采样后发射率光谱曲线(b)

Fig.3 Shortwave infrared reflectance spectra of related minerals (a) and the spectra convolved to the ASTER bandpasses (b)

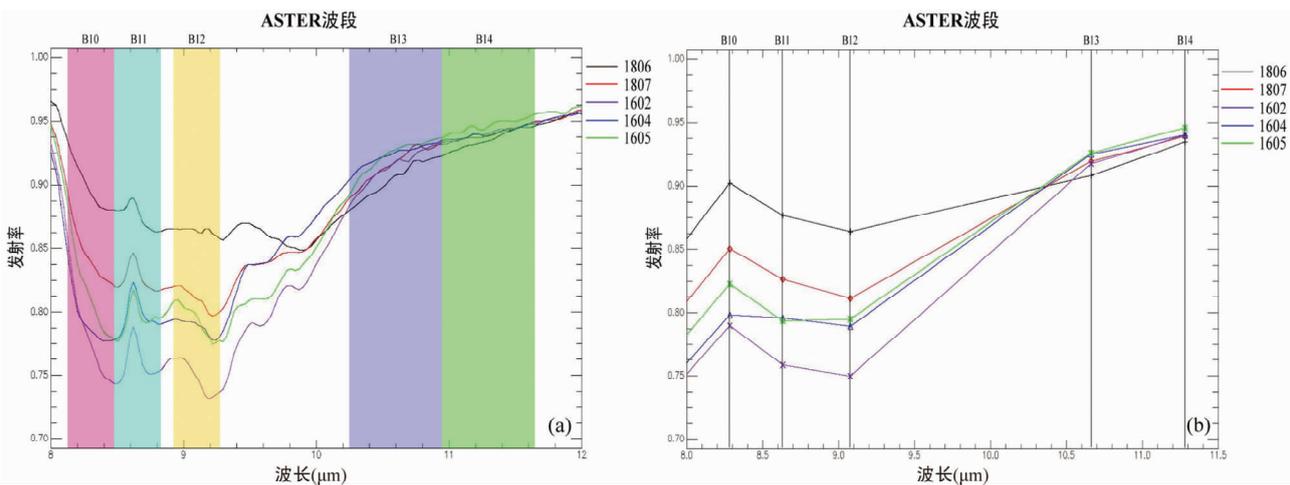


图4 研究区花岗岩样品 TIR 发射率光谱曲线(a)和样品 ASTER TIR 波段重采样后发射率光谱曲线(b)

Fig.4 Thermal infrared emissivity spectra of granitoids samples (a) and the spectra convolved to the ASTER bandpasses (b) in study area

图4a显示花岗岩样品在TIR谱域特征明显,特征谱带多集中于 $8\sim 10\mu\text{m}$,主要体现出石英与长石两类矿物综合的光谱特性。石英的 $8.62\mu\text{m}$ 特征峰值在花岗岩光谱中依旧突出,但长石族矿物光谱的抑制作用使其强度减弱。长石族矿物 $8.8\sim 10.2\mu\text{m}$ 一系列特征谱带的存在导致花岗岩样品在这一谱域范围出现数量多且强弱不一的光谱特征。从样品ASTER TIR波段光谱曲线可以看出(图4b),总体上,波段10、13和14发射率值都高于波段11与12。斜长石族与碱性长石族矿物波段13与12比率区别最显著,这一特性同样反映于岩样的光谱曲线(图4b),引起不同样品之间较大变化。

3.2.2 短波红外(SWIR)

岩石VNIR-SWIR特征谱带是某些特殊矿物、蚀变其杂质的金属阳离子电子跃迁和分子基谱振动的倍频与合频所产生。相比于TIR谱域,岩样SWIR的光谱特征(图5a)除各类岩石中广泛存在的 $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.9\mu\text{m}$ 水的强吸收谱带外,其

他都较微弱。但是,研究区二长花岗岩中富白云母且部分正长石发生绢云母化蚀变,在 $2.2\mu\text{m}$ 出现了羟基特征吸收谱带,与其他花岗岩样品区别显著,这说明尽管在SWIR谱域光谱数量少、吸收强度低,但特殊矿物信息也可以作为岩性识别的标志。

4 花岗岩类岩性信息提取与识别

4.1 ASTER数据预处理

本次研究使用两景经高精度正射几何校正的ASTER 3A数据产品,数据获取时间分别为2001年3月26日与5月22日。首先,对ASTER SWIR-TIR数据进行辐射定标,使DN值转换为星上辐射率。其次,SWIR波段数据大气校正采用基于MODTRAN4辐射传输模型的FLAASH大气校正方法,TIR波段数据则通过大气校正计算大气透射率与大气上行辐射,

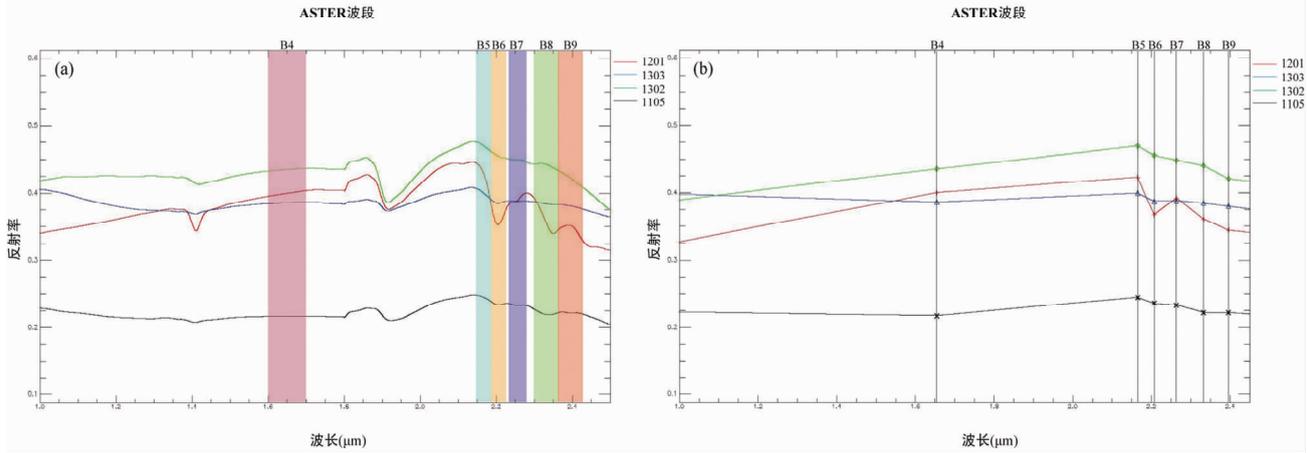


图 5 研究区花岗岩样品 SWIR 反射率光谱曲线 (a) 和样品 ASTER SWIR 波段重采样后反射率光谱曲线 (b)

Fig. 5 Shortwave infrared reflectance spectra of granitoid samples (a) and the spectra convolved to the ASTER bandpasses (b) in study area

将星上辐射率反演为地表辐射率后,采用发射率标准化 (Emissivity Normalization) 技术分离辐射数据中的发射率与温度信息。同时,将 TIR 数据 90m 空间分辨率重采样至 30m,与 SWIR 数据融合。

4.2 岩性信息提取方法

4.2.1 波段比值

波段比值算法可用来表现光谱吸收特征的对比而又降低相关反照率与地形坡度变化的影响,已经被广泛应用于遥感地质研究中。比值图像中不同岩石地层单元的亮度比值与其光谱比值之间存在正相关关系,因此不同岩石地层单元的光谱数据可作为影像波段比值增强处理的依据 (丑晓伟和傅碧宏, 1995)。

依据岩石矿物在 SWIR-TIR 谱域光谱特征,波段比值 13/12 与碱性长石族矿物呈正相关,如正长石、微斜长石,与中基性斜长石呈负相关。因此,比值 13/12 可以指示碱性长石信息。中基性斜长石矿物在波段 12 发射率高于波段 11 与 13,比值 12/11 和 12/13 都为正值,如拉长石、钙长石,因而选择比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 增强这些长石矿物信息。图 6a, c 分别显示研究区两种比值的灰度图像。同时,研究区二长花岗岩富白云母及绢云母化蚀变的特征导致其在 SWIR 波段 6 光谱范围表现强吸收性,波段比值 4/6 可用于进一步识别研究区二长花岗岩岩性信息 (图 6b)。

4.2.2 彩色合成

假彩色合成影像通过色彩的变化直观地显示出地表岩性信息,基于波段比值图像的假彩色合成技术则能够更准确地探测研究区具有不同岩性的岩石单元。Aboelkair 等曾利用 ASTER TIR 波段比值 12/13 (R), 11/12 (G), 14/13 (B) 假彩色合成影像成功识别出埃及中东沙漠地区部分色彩为品红色的钠长花岗岩 (Aboelkair *et al.*, 2010)。研究区应用该

比值技术生成的假彩色合成 (图 7) 图像中,除 1 号岩体的外环部分呈紫红色外,克拉玛依岩体均呈深浅不等的蓝色,说明研究区花岗岩不具备类似的光谱特性,不同岩性信息可识别性较差。本次研究基于本研究区花岗岩岩性的光谱特性,利用图 6 所示的比值灰度图像引入一种新的 ASTER 波段比值彩色合成影像: 13/12 (R), 4/6 (G), $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ (B) (图 8a)。

4.3 岩性信息识别

新比值假彩色合成图像可以成功地区分出克拉玛依岩体的花岗岩类,为进一步讨论所采用的波段比值,统计计算了相关矿物与岩样的 ASTER 波段光谱比率。如表 1 所示,

表 1 长石矿物与岩石样品实验室光谱数据 ASTER TIR 比值表
Table 1 ASTER thermal infrared band ratio values of feldspar and rock samples library data

名称	比值 13/12	序列	比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$	序列
斜长石族				
钠长石	1.0997	1	1.0276	4
奥长石	1.0269	2	1.0347	3
拉长石	0.9756	3	1.0398	2
钙长石	0.9593	4	1.0540	1
碱性长石族				
条纹长石	1.4377	1	0.7237	3
微斜长石	1.1320	2	0.9091	2
正长石	1.0598	3	0.9821	1
岩石样品				
1602	1.2231	1	0.8083	5
1604	1.1724	2	0.8457	4
1605	1.1647	3	0.8602	3
1807	1.1335	4	0.8659	2
1806	1.0505	5	0.9386	1

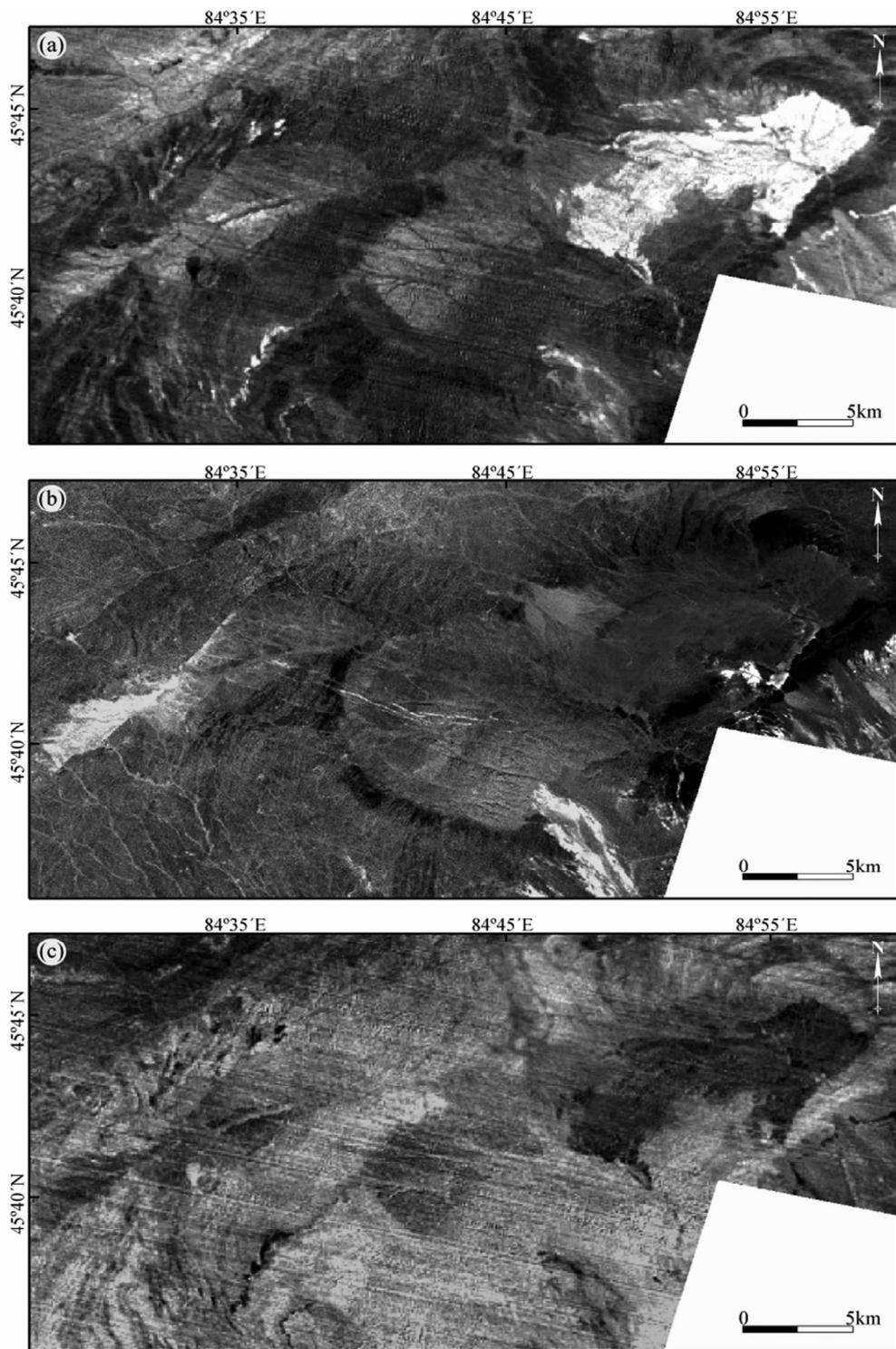


图6 研究区 ASTER 波段比值灰度图像

(a)-比值 13/12; (b)-比值 4/6; (c)-比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$

Fig. 6 The gray images of the ASTER band ratio 13/12 (a), 4/6 (b) and $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ (c) in study area

由于 ASTER 波段 12 发射率谱带的变化,斜长石族矿物从酸性到基性长石其波段 12 相对波段 11 与波段 13 的比率逐渐增大,进而导致波段比值 13/12 的降低与 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 的升高。相反,碱性长石族矿物 ASTER 波段 12 相对波

段 11 的比率变化较小,最突出的特征是波段 13 的发射率整体为高值,所以比值 13/12 都大于 1 而比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 都小于 1。但属钾长石类的正长石和微斜长石的 13/12 比值明显低于钾、钠长石共生的条纹长石,说明钠长石对比

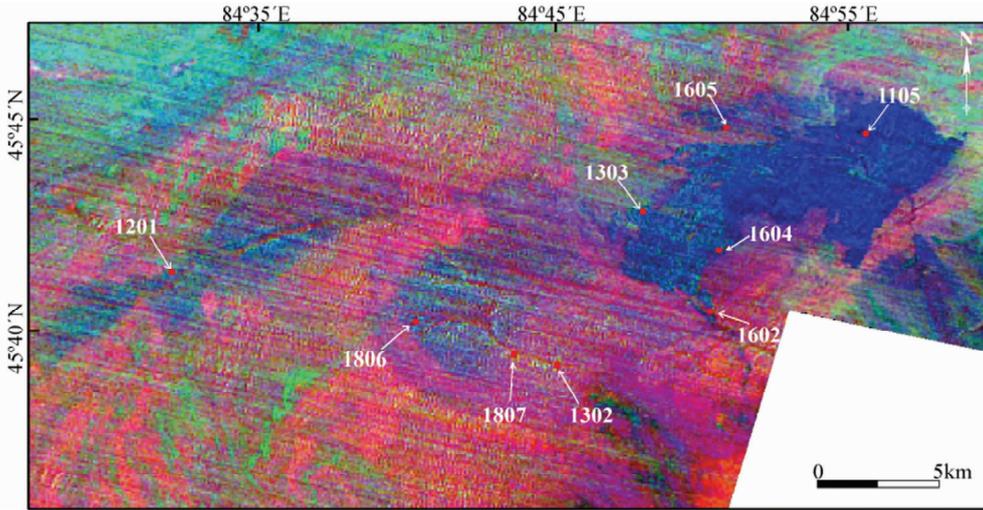


图7 研究区 ASTER 12/13(R), 11/12(G), 14/13(B)假彩色合成影像

采样点位置以红色实心点标注

Fig.7 The ASTER 12/13(R), 11/12(G) and 14/13(B) false color composite image of study area

The red filled dots show the location of rock samples

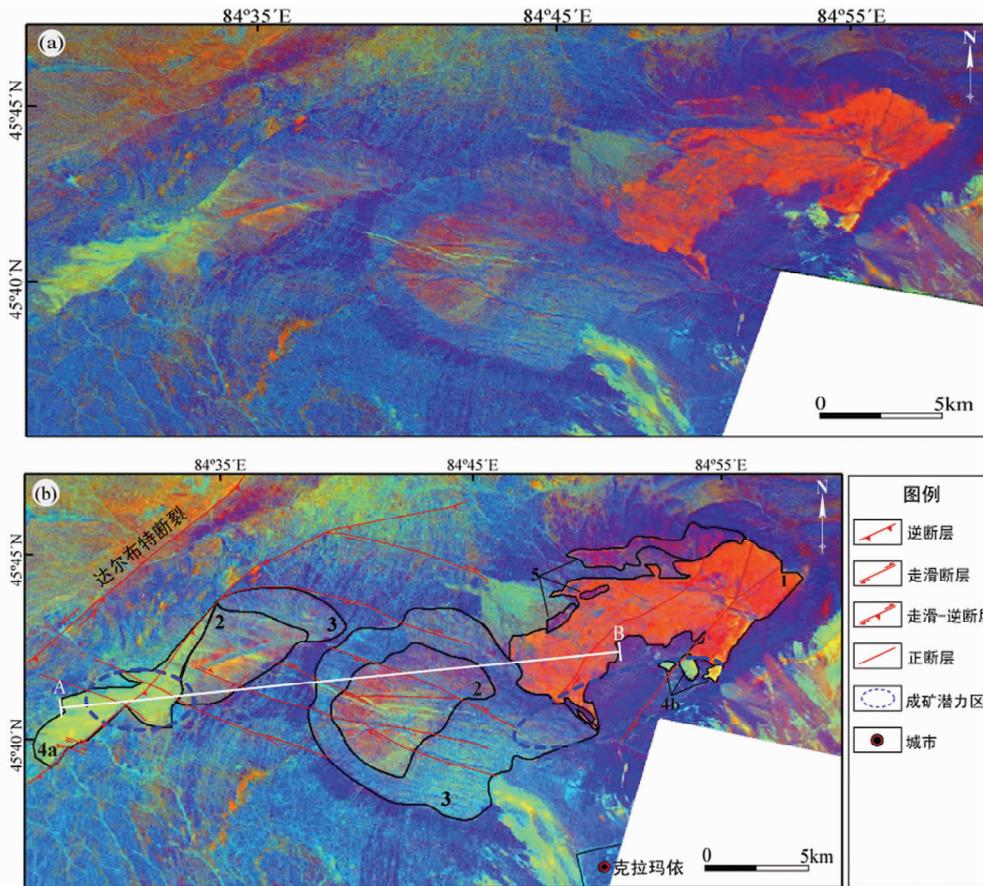


图8 研究区 ASTER 13/12(R), 4/6(G), (12×12)/(11×13)(B)假彩色合成图像(a)和假彩色合成解译图像(b)

Fig.8 The ASTER 13/12(R), 4/6(G) and (12×12)/(11×13)(B) false color composite image of study area (a) and interpretation of the image (b)

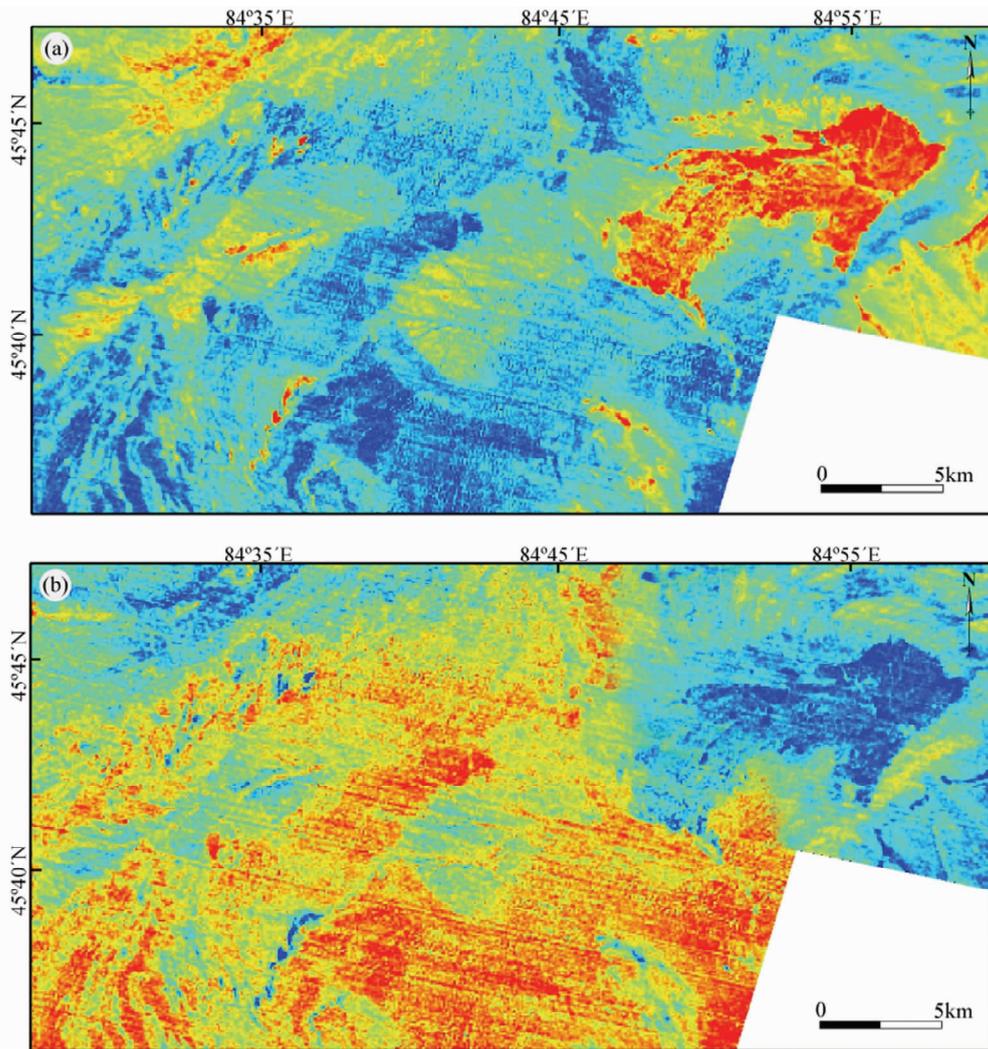


图9 研究区波段比值伪彩色图像

(a)-比值 13/12; (b)-比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$. 蓝色至红色指示低值至高值区域

Fig.9 The pseudo color images of the ASTER band ratio 13/12 (a) and $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ (b) in study area
The color region from blue to red represent the value from low to high

值 13/12 贡献更大。热红外波段发射率光谱具有线性混合的特征(闫柏琨等, 2006), 岩石样品热红外光谱数据是岩石自身主要矿物光谱信息的综合。5 个样品 13/12 与 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 比值变化趋势也恰好相反, 比值 13/12 高的样品对应低的 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 比值。

通过岩石矿物 TIR 光谱特征比值分析, 利用遥感影像可识别不同岩性。研究区 ASTER 比值灰度图像中, 图 6a 中克拉玛依 III 岩体呈高亮值区, 说明以碱性长石族矿物为主。I 号岩体中心圆形区域与 II 号岩体灰度明显低于 III 岩体, 说明碱性长石含量明显减少。与之相反, 比值 13/12 灰度图像中的高亮值区在比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 图像中(图 6c)为暗像元, 而以亮像元显示的 II 号岩体外环部分说明富含斜长石族矿物。克拉玛依岩体在比值 4/6 灰度图像(图 6b)中, 只有 II 号岩体尾部高亮显示, 这一区域与野外岩样鉴定中富白

云母与正长石绢云母化蚀变特征吻合。为突出显示上述 TIR 比值对岩性的敏感度, 我们对比值灰度图像进行伪彩色增强。伪彩色增强是每个像元灰度值通过色彩映射使用 R、G、B 强度值显示图像的技术。从图 9a 可以看出, 富碱性长石的区域为红色, I 号岩体中心圆形区域与 II 号岩体为强度较弱的黄色; 同样, 富斜长石的 II 号岩体外环区域在比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 伪彩色图像中(图 9b)以高强度的红色显示。除此以外, 可以发现 TIR 比值灰度图像与伪彩色图像对克拉玛依 II 号岩体的识别结果基本一致, 并没有 SWIR 比值 4/6 中突出的差异, 间接证明了引入 SWIR 波段数据的重要性。

传统的单波段假彩色合成所含信息量少且无法表现不同地物光谱的诊断特征, 比值假彩色合成技术则更为简单有效。对于花岗岩类, VNIR-SWIR 谱域的光谱特征较弱且反映的并非主矿物信息, 而 TIR 谱域发射率光谱贡献来自花岗岩

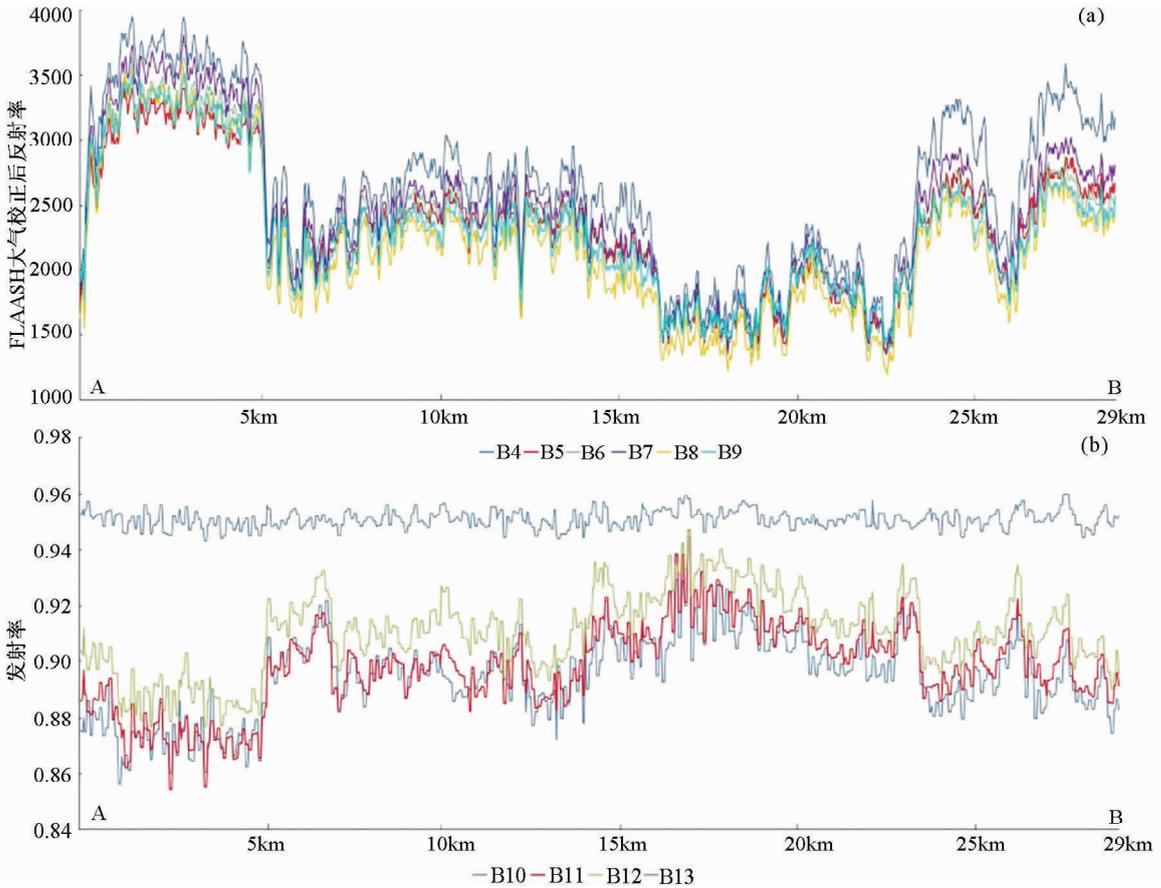


图 10 研究区 A-B 段 ASTER 光谱剖面图

(a)-SWIR 波段; (b)-TIR 波段

Fig. 10 The ASTER SWIR (a) and TIR (b) spectral profiles of A-B section in study area

自身不同丰度、种类的石英与长石,使用前人对于钠长花岗岩的 ASTER TIR 探测技术用于本研究区可以发现识别效果并不理想(图 7),可能原因是克拉玛依岩体以碱性花岗岩为主,钠长石的光谱特征并不占优势。新比值彩色合成图像显示的彩色区分度高(图 8a),与原 90m 较低空间分辨率的 TIR 影像相比,SWIR 与 TIR 数据融合图像更清晰,更有利于目视解译。解译图中(图 8b),比值 13/12 贡献最大的克拉玛依 III 号岩体呈亮红色,例如样品 1602 其比值高达 1.2231,为碱长花岗岩(多边形 1)。呈红色但颜色明显较暗的多边形 2 区域分别位于克拉玛依 I 号和 II 号岩体中部,说明岩石中存在一定含量的斜长石,比值 $(12 \times 12) / (11 \times 13)$ 的贡献已经显现,应为常见的普通花岗岩。呈深浅不等蓝色区域(多边形 3)都位于所识别出的普通花岗岩的外围,样品 1806 $(12 \times 12) / (11 \times 13)$ 比值为 0.9386,超过其比值 0.8083 的碱长花岗岩样品 1602 约 16%,岩性以中基性斜长石族矿物为主,样品 1806 的低 13/12 比值(1.0505)也说明石英含量较低,与花岗闪长岩的岩性较一致。由于在 SWIR 谱域中白云母与正长石绢云母化蚀变引起的特殊光谱特征,克拉玛依 II 号岩体青黄色区域(多边形 4a)指示出比值 4/6 贡献较大的岩体,

也证明其岩性碱性长石与斜长石共存且相对含量差异不明显,识别为二长花岗岩。值得注意的是,在 III 号岩体东缘标注出三个岩株(多边形 4b)与二长花岗岩色彩相似,其中最东部黄色的岩株色彩上略有区别,说明其富碱性长石并存在 SWIR 波段 6 的羟基蚀变。此外,多边形 5 覆盖的区域也属于 III 号岩体,但色调上呈紫红色与 III 号岩体主体的亮红色差异明显,说明 III 号岩体边缘已表现出斜长石光谱特性。

5 讨论

遥感技术获取的是地表光谱信息,遥感岩性识别依赖于岩石之间不同种矿物的反射谱与发射谱的差异。因此,岩石光谱也具有明显的空间对应关系。通过 ASTER 数据采样获取的横贯克拉玛依岩体 I、II 号 A-B 段(图 8b)岩体的光谱剖面图(图 10)显示,剖面西段的二长花岗岩反射率明显最高,但发射率最低,在图 8 中突出单一绿波段的色调。至剖面中段是花岗岩与花岗闪长岩过渡,花岗岩闪长岩短波红外反射率幅值要高于花岗岩,而热红外发射率幅值正好相反,在图 8 中表现出两种花岗岩类红、蓝波段的明显差异。剖面

东段的碱长花岗岩短波波段反射率亦较高,尤其是 ASTER 第 4 波段的整体高幅值。A-B 剖面由西至东花岗岩类岩性的光谱变化具有明显的空间区域分带特征,并且都表现出同类岩性反射率与发射率幅值的反比变化特点,也充分说明在一定区域范围内的花岗岩类岩石反射与发射光谱特征都具有稳定性与规律性。

西准噶尔地区作为哈萨克斯坦巴尔喀什斑岩型成矿带的东延部分,其中位于克拉玛依岩体西南约 25km 的包古图斑岩铜铅矿床是近些年来研究热点(代华五等, 2010; Shen *et al.*, 2009; 申萍等, 2009; 张连昌等, 2006)。从岩石学与地学化学方面来看,许多证据表明克拉玛依花岗岩体主要属于 I 型钙碱性花岗岩类,具有高 Sr、富 Al_2O_3 和富 Na 等特点,为碰撞后阶段壳幔岩浆混合作用形成(高山林等, 2006; 贺敬博和陈斌, 2011; 邹涛等, 2011; 苏玉平等, 2006)。遥感解译结果(图 8b)发现 III 号岩体与 I 号、II 号岩体差异显著,且具有斜长石族矿物含量较低而石英含量较高的特点,与西准地区阿克巴斯套、庙尔沟等典型的铝质 A 型碱性花岗岩体类似,这些岩体成岩时间相对较晚(庞振甲等, 2010; 王金荣等, 1996),进而判断克拉玛依 III 号岩体可能属于 A 型花岗岩并非 I 型,形成时间可能晚于 I 号和 II 号岩体。遥感数据识别出的克拉玛依花岗岩体为中酸性花岗岩类,碱性长石含量明显高于包古图成矿斑岩体。解译图中显示克拉玛依岩体蚀变异常主要集中于 II 号岩体的二长花岗岩(图 8b 多边形 4a),这与适用于钙碱性中酸性斑岩系统的 Lowell and Guilber (1970) 经典热液蚀变模式(如花岗闪长斑岩和二长花岗岩斑岩)的岩性特征类似。从成矿构造方面来看,斑岩型铜铅矿床分布常受区域深大断裂的次级构造控制。西准噶尔东南部的次级构造以达尔布特断裂为界,北侧以 NE 向为主,南侧以近 NS 向为主。杨富贵等运用岩浆动力学原理认为克拉玛依岩体具有浅侵位特点,主要以岩浆扩张方式定位(杨富贵等, 1998),而斑岩型铜矿床在空间上一般均与中酸性浅成侵入体有关。从遥感解译图中不难看出(图 8b),克拉玛依岩体地表出露形态为椭圆-长方形, I 号、II 号岩体的延伸方向与区域内近 EW 向的次级压扭性断裂产出部位一致,而 III 号岩体则与 NE-NNE 向断裂一致。II 号岩体中具有蚀变特征的二长花岗岩构造上位于 NE 向与 EW 向断裂交汇部位,此外,岩性类似的 III 号岩体东缘三个岩株(图 8b 中多边形 4b)同样在构造上位于 I 号岩体的 EW 向断裂与 III 号岩体的 NE 向断裂的交汇处。因此,推断克拉玛依 II 号岩体以及东侧 I 号与 III 号岩体交汇处的局部区域仍具有成矿潜力。

综上所述,相比于 ASTER VNIR-SWIR 波段,基于花岗岩类主要矿物长石与石英发射率光谱特征的 TIR 比值影像数据更有助于花岗岩类岩性识别和提取,利用具有特征指示信息的 SWIR 与 TIR 波段融合比单独使用 TIR 波段效果更佳。ASTER 波段比值 13/12、4/6 和 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$,可以定性识别出研究区碱长花岗岩、花岗岩、花岗闪长岩与二长

花岗岩四种花岗岩类。不同区域的花岗岩类由于区域地质条件的差异会导致其矿物成分与蚀变类型等发生不同变化,很难依据花岗岩 VNIR-SWIR 谱域反射率光谱数据对不同区域花岗岩识别方法进行统一厘定,TIR 谱域发射率光谱特征稳定,且反映的是花岗岩类中主要造岩矿物的自身属性,适用范围更为广泛。西准斑岩型铜矿与较年轻的中酸性花岗岩类联系密切,且受区域断裂次级构造控制明显,与包古图成矿岩体的岩性与控矿构造比较,依据遥感岩性识别与提取结果以及断裂构造解译判断克拉玛依岩体部分区域仍具有成矿远景。

6 结论

通过本研究得出以下结论和认识:

(1) 不同种类花岗岩类由于其长石组分与特征矿物的差异可引起光谱反射率与发射率的响应,西准噶尔克拉玛依岩体花岗岩类岩石及相关矿物的 ASTER SWIR 反射率与 TIR 发射率测量结果证明长石与石英矿物以及云母族等特征矿物在花岗岩类岩石中的反射与发射率谱带具有各自稳定的光谱特征。这些显著的光谱特征可适用于花岗岩类的遥感岩性信息提取与识别。

(2) 基于光谱测量分析结果,选择出 ASTER TIR 波段比值 13/12 可指示碱性长石矿物信息,比值 $(12 \times 12)/(11 \times 13)$ 对中基性的斜长石矿物敏感,SWIR 波段比值 4/6 则用来探测白云母矿物和绢云母化蚀变信息。基于短波与红外波段信息融合的该三波段比值假彩色合成影像可提取与识别出研究区碱长花岗岩、花岗岩、花岗闪长岩与二长花岗岩四种花岗岩类。该提取方法应对干旱-半干旱岩浆岩体出露地区的花岗岩岩性遥感探测具有普适性。

(3) 依据克拉玛依岩体的花岗岩遥感岩性识别与解译出的区域断裂构造空间分布特征,并结合他人对西准格尔地区多期花岗岩侵入体的地球化学研究,推断克拉玛依 II 号岩体以及东侧 I 号与 III 号岩体交汇处的部分区域仍可能是未来的成矿潜力区,下一阶段可进一步开展野外调查与验证。

本次研究结果表明 ASTER SWIR-TIR 谱域波段比值假彩色合成技术可以有效地探测西准噶尔研究区花岗岩类,遥感影像的岩性识别与解译可以为今后该区域地质工作提供更详尽的岩性信息,并为该地区矿产勘探和预测提供前期技术支撑。

References

- Aboelkair H, Ninomiya Y, Watanabe Y and Sato I. 2010. Processing and interpretation of ASTER TIR data for mapping of rare-metal-enriched albite granitoids in the Central Eastern Desert of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 58(1): 141-151
- Chen J and Wang JA. 2007. The pilot study on petrochemistry components mapping with ASTER thermal infrared remote sensing

- data. *Journal of Remote Sensing*, 11(4): 601 - 608 (in Chinese with English abstract)
- Chou XW and Fu BH. 1995. Extraction and analysis of lithostratigraphic information from Landsat thematic mapper imagery in arid region. *Acta Sedimentologica Sinica*, 13(1): 164 - 170 (in Chinese with English abstract)
- Chou XW, Fu BH and Zheng JJ. 1996. Thermal infrared multispectral remote sensing detecting and its effectiveness evaluation of sedimentary rock. *Remote Sensing Technology and Application*, 11(1): 7 - 13 (in Chinese with English abstract)
- Dai HW, Shen P, Shen YC, Pan HD, Liu TJ, Meng L and Guan WN. 2010. Mineralogy of ore-bearing porphyries in the Baogutu copper-gold belt of west Junggar and its geological significance. *Xinjiang Geology*, 28(4): 440 - 447 (in Chinese with English abstract)
- Farmer VC. 1974. *The Infrared Spectra of Minerals*. London: Mineralogical Society, 539
- Feng YM. 1987. Characteristics ancient plate tectonics in western Junggar. *Bulletin of Xi'an Institute of Geology and Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences*, (18): 141 - 160 (in Chinese with English abstract)
- Feng YM, Coleman RG, Tilton GR and Xiao XC. 1989. Tectonic evolution of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 729 - 752
- Fu BH and Chou XW. 1994. Extraction and recognition of rock and mineral information by using thermal infrared multispectral remote sensing technique. *Remote Sensing Technology and Application*, 9(1): 56 - 61 (in Chinese with English abstract)
- Fujisada H. 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 2583: 16 - 25
- Gao SL, He ZL and Zhou ZY. 2006. Geochemical characteristics of the Karamay granitoids and their significance in west Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 24(2): 121 - 130 (in Chinese with English abstract)
- He JB and Chen B. 2011. Petrogenesis of Karamay plutons in the West Junggar: Constraints from geochronology, petrology and geochemistry. *Earth Science Frontiers*, 18(2): 191 - 211 (in Chinese with English abstract)
- Hecker C, Van der Meijde M and Van der Meer FD. 2010. Thermal infrared spectroscopy on feldspars-Successes, limitations and their implications for remote sensing. *Earth-Science Reviews*, 103(1 - 2): 60 - 70
- Hunt GR and Salisbury JW. 1973. Visible and near infrared spectra of minerals and rock: VII, Acidic Igneous Rocks. *Modern Geology*, 4: 217 - 224
- Jin CW and Zhang XQ. 1993. A geochronology and geneses of the western Junggar granitoids, Xinjiang, China. *Chinese Journal of Geology*, 28(1): 28 - 36 (in Chinese with English abstract)
- Kwon ST, Tilton GR, Coleman RG and Feng Y. 1989. Isotopic studies bearing on the tectonics of the West Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8(4): 719 - 727
- Lowell JD and Guilber TJM. 1970. Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol.*, 65(4): 373 - 404
- Li XZ, Han BF, Ji JQ, Li ZH, Liu ZQ and Yang B. 2004. Geology, geochemistry and K-Ar ages of the Karamay basic-intermediate dyke swarm from Xinjiang, China. *Geochimica*, 33(6): 574 - 584 (in Chinese with English abstract)
- Ninomiya Y and Fu BH. 2002. Quartz index, carbonate index and SiO₂ content index defined for ASTER TIR data. *Journal of Remote Sensing*, 22(1): 50 - 61
- Ninomiya Y and Fu BH. 2003. Extracting lithologic information from ASTER multispectral thermal infrared data in the northeastern Pamirs. *Xinjiang Geology*, 21(1): 22 - 28 (in Chinese with English abstract)
- Ninomiya Y, Fu BH and Cudahy TJ. 2005. Detecting lithology with advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared "radiance-at-sensor", data. *Remote Sensing of Environment*, 99(1 - 2): 127 - 139
- Pang ZJ, Li YJ, Zhao YM, Wang XG, Wang JN and Zhang HW. 2010. The determination and its significance of Akebasitao aluminous A-type granites in West Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 28(2): 119 - 124 (in Chinese with English abstract)
- Shen P, Shen YC, Liu TB, Meng L, Dai HW and Yang YH. 2009. Geochemical signature of porphyries in the Baogutu porphyry copper belt, western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 16(2): 227 - 242
- Shen P, Shen YC, Liu TB, Zhang R, Wang JB, Zhang YX, Meng L, Wang LJ and Wang J. 2009. Host-rocks and alteration characters of the Baogutu porphyry copper-molybdenum deposit in Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4): 777 - 792 (in Chinese with English abstract)
- Su YP, Tang HF, Hou GS and Liu CQ. 2006. Geochemistry of aluminous A-type granites along Darabut tectonic belt in west Junggar, Xinjiang. *Geochimica*, 35(1): 55 - 67 (in Chinese with English abstract)
- Tang GJ, Wang Q, Wyman DA, Li ZX, Zhao ZH, Jia XH and Jiang ZQ. 2010. Ridge subduction and crustal growth in the Central Asian Orogenic Belt: Evidence from Late Carboniferous adakites and high-Mg diorites in the western Junggar region, northern Xinjiang (west China). *Chemical Geology*, 277(3 - 4): 281 - 300
- Wang JR, Song CH, Huang HF and Yang LZ. 1996. The geochemistry and tectonic setting of granitoids in Zhayier mountain, West Junggar. *Journal of Lanzhou University (Natural Science)*, 32(4): 155 - 162 (in Chinese with English abstract)
- Watts DR and Harris NBW. 2005. Mapping granite and gneiss in domes along the North Himalayan antiform with ASTER SWIR band ratios. *GSA Bulletin*, 117(7): 879 - 886
- Yan BK, Liu SW, Wang RS, Gan FP, Chen WT and Yang SM. 2006. Quantitative inversion of the SiO₂ content in surface rocks using thermal infrared remote sensing. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 639 - 643 (in Chinese with English abstract)
- Yang FG, Wang ZG, Hou HQ and Hong WX. 1998. Primary magma dynamic investigations on the emplacement mechanism of alkali granitoids in the eastern part of western Junggar, Xinjiang, China. *Acta Mineralogica Sinica*, 18(4): 411 - 416 (in Chinese with English abstract)
- Yang JM, Zhang YJ and Yao FJ. 2007. Lithology identification of the Weiya complex by means of ETM⁺ remote sensing. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10): 2397 - 2402 (in Chinese with English abstract)
- Zhang C, Zhai MG, Allen MB, Saunders AD, Wang GR and Huang X. 1993. Implications of Palaeozoic ophiolites from western Junggar, NW China, for the tectonics of Central Asia. *Journal of the Geological Society*, 150(3): 551 - 561
- Zhang C, Huang X and Zhai MG. 1995. The geological characteristics, tectonic settings and ages of ophiolite in western Junggar, Xinjiang. *Collected Papers of Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences*, 8: 165 - 218
- Zhang JE, Xiao WJ, Han CM, Ao SJ, Yuan C, Sun M, Geng HY, Zhao GC, Guo QQ and Ma C. 2011. Kinematics and age constraints of deformation in a Late Carboniferous accretionary complex in western Junggar, NW China. *Gondwana Research*, 19(4): 958 - 974
- Zhang LC, Wan B, Jiao XJ and Zhang R. 2006. Characteristics and geological significance of adakitic rocks in copper-bearing porphyry in Baogutu, western Junggar. *Geology in China*, 33(3): 626 - 631 (in Chinese with English abstract)
- Zou T, Wang JB, Wang YW and Long LL. 2011. Magma mixing in the Karamay rock body of West Junggar, Xinjiang: Evidence from geochemistry. *Geology in China*, 38(1): 65 - 76 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈江, 王安健. 2007. 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. *遥感学报*, 11(4): 601 - 608

- 丑晓伟, 傅碧宏. 1995. 干旱区 TM 图像岩石地层信息提取与分析方法研究. 沉积学报, 13(1): 164-170
- 丑晓伟, 傅碧宏, 郑建京. 1996. 沉积岩石信息的热红外多光谱遥感探测及有效性评价. 遥感技术与应用, 11(1): 7-13
- 代华五, 申萍, 沈远超, 潘鸿迪, 刘铁兵, 孟磊, 关维娜. 2010. 西准噶尔包古图含矿岩体矿物学特征及意义. 新疆地质, 28(4): 440-447
- 二宫芳树, 付碧宏. 2003. 帕米尔东北缘 ASTER 多光谱热红外遥感数据的岩性信息提取. 新疆地质, 21(1): 22-28
- 冯益民. 1987. 西准噶尔古板块构造特征. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, (18): 141-160
- 傅碧宏, 丑晓伟. 1994. 利用热红外多光谱遥感技术提取和识别岩石、矿物信息. 遥感技术与应用, 9(1): 56-61
- 高山林, 何治亮, 周祖翼. 2006. 西准噶尔克拉玛依花岗岩体地球化学特征及其意义. 新疆地质, 24(2): 121-130
- 贺敬博, 陈斌. 2011. 西准噶尔克拉玛依岩体的成因: 年代学、岩石学和地球化学的证据. 地学前缘, 18(2): 191-211
- 金成伟, 张秀棋. 1993. 新疆西准噶尔花岗岩类的时代及其成因. 地质科学, 28(1): 28-36
- 李辛子, 韩宝福, 季建清, 李宗怀, 刘志强, 杨斌. 2004. 新疆克拉玛依中基性岩墙群的地质地球化学和 K-Ar 年代学. 地球化学, 33(6): 574-584
- 庞振甲, 李永军, 赵玉梅, 王晓刚, 王军年, 张洪伟. 2010. 西准阿克巴斯陶铝质 A 型花岗岩厘定及意义. 新疆地质, 28(2): 119-124
- 申萍, 沈远超, 刘铁兵, 张锐, 王京彬, 张云孝, 孟磊, 王丽娟, 汪疆. 2009. 新疆包古图斑岩型铜钼矿床容矿岩石及蚀变特征. 岩石学报, 25(4): 777-792
- 苏玉平, 唐红峰, 侯广顺, 刘丛强. 2006. 新疆西准噶尔达拉布特构造带铝质 A 型花岗岩的地球化学研究. 地球化学, 35(1): 55-67
- 王金荣, 宋春辉, 黄华芳, 杨占龙. 1996. 西准噶尔扎依尔山花岗岩类地球化学与构造环境. 兰州大学学报(自然科学版), 32(4): 155-162
- 闫柏琨, 刘圣伟, 王润生, 甘甫平, 陈伟涛, 杨苏明. 2006. 热红外遥感定量反演地表岩石的 SiO₂ 含量. 地质通报, 25(5): 639-643
- 杨富贵, 王中刚, 侯鸿泉, 洪文兴. 1998. 西准噶尔东部碱性花岗岩体侵位机理的岩浆动力学初步探讨. 矿物学报, 18(4): 411-416
- 杨建民, 张玉君, 姚佛军. 2007. 利用 ETM⁺ 遥感技术进行尾亚杂岩体的岩性识别. 岩石学报, 23(10): 2397-2402
- 张连昌, 万博, 焦学军, 张锐. 2006. 西准包古图含铜斑岩的埃达克岩特征及其地质意义. 中国地质, 33(3): 626-631
- 邹涛, 王京彬, 王玉往, 龙灵利. 2011. 新疆克拉玛依岩体的岩浆混合作用成因: 岩石地球化学证据. 中国地质, 38(1): 65-76