

# 利用 ETM<sup>+</sup> 遥感技术进行尾亚杂岩体的岩性识别<sup>\*</sup>

杨建民<sup>1</sup> 张玉君<sup>2</sup> 姚佛军<sup>1</sup>

YANG JianMin<sup>1</sup>, ZHANG YuJun<sup>2</sup> and YAO FoJun<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

2. 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083

1. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

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

2007-06-26 收稿, 2007-08-29 改回.

Yang JM, Zhang YJ and Yao FJ. 2007. Lithology identification of the Weiya complex by means of ETM<sup>+</sup> remote sensing. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2397-2402

**Abstract** Located in a gobi zone of the East Tianshan, Xinjiang, the Weiya elliptic complex is tectonically situated in a zone of tectonic weakness at the intersection site of several large lineaments in the central part of the Kawabulak microblock. The area of the Weiya complex is 167.40 km<sup>2</sup>, of which the area of the outer ring is 77.28 km<sup>2</sup> and the area of the inner ring is 90.12 km<sup>2</sup>. It is important for studying the tectonomagmatic activities in the area because of its nearly equiaxial shape and multiple intrusion; so it has caused close attention of numerous researchers. For a long time, the extraction of lithology information using remote sensing has been one of the technological problems for remote sensing geologists. Lithology identification using multispectral remote sensing in such a large complex where rocks are exposed and lithofacies is complicated can not only supplement and improve the work of previous researchers, but also provide new evidence for the study of magmatic activities, petrology and regional tectonics. The use of this technique for the study of the formation and evolution mechanism of the Weiya complex enlarges the application of the multispectral remote sensing technique in geology.

**Key words** Extraction of lithology information using multispectral remote sensing, lithofacies identification of the Weiya complex, Gobi arid desert landscape, Xinjiang

**摘要** 地处新疆东天山地处荒漠戈壁区的尾亚椭圆形杂岩体,在构造上位于卡瓦布拉克微地块中部几个大构造线交切处的构造软弱部位,面积 167.40km<sup>2</sup>,其中外环面积 77.28km<sup>2</sup>,内环面积 90.12km<sup>2</sup>。其近等轴状形态和多期次侵入的复杂岩性,对研究该区构造-岩浆活动具有重要意义,引起众多学者的注目。长期以来,岩性提取一直是遥感地质工作者希望攻克的难题之一。通过利用多光谱遥感技术对于这样一个面积较大,岩石裸露,岩相复杂的杂岩体进行岩性识别,不仅可以对前人的工作进行补充与完善,为岩浆活动、岩石学、区域构造研究提供新的证据,将遥感岩性识别信息用于尾亚杂岩体的形成、演化机制的探讨,扩大了多光谱遥感技术在地质中的应用领域。

**关键词** 多光谱遥感岩性信息提取;尾亚杂岩体岩相识别;荒漠戈壁景观区;新疆

**中图法分类号** P586; P583

## 1 引言

尾亚椭圆形杂岩体位于兰新铁路尾亚车站附近,距哈密市约 130km。在构造上位于卡瓦布拉克微地块中部几个大

构造线交切处的构造软弱部位,侵入于中—新元古界片岩、片麻岩和澄江期片麻状花岗岩中,面积 167.40km<sup>2</sup>。其近等轴状形态和多期次侵入的复杂岩性(图 1),对研究该区构造-岩浆活动具有重要意义,引起众多学者的注目。他们分别从

\* 国家科技攻关项目(编号:2003BA612A-06-04),地质调查项目(编号:科[2005]017-02-02),国家科技支撑计划重点项目(编号:2006BAB07B07-02)与国家重点基础研究发展计划(973 计划)(编号:2007CB411406)资助。

第一作者简介:杨建民,男,1958 生,研究员,博士生导师,从事矿物学和遥感技术地学应用研究, E-mail: y6100@vip.sina.com

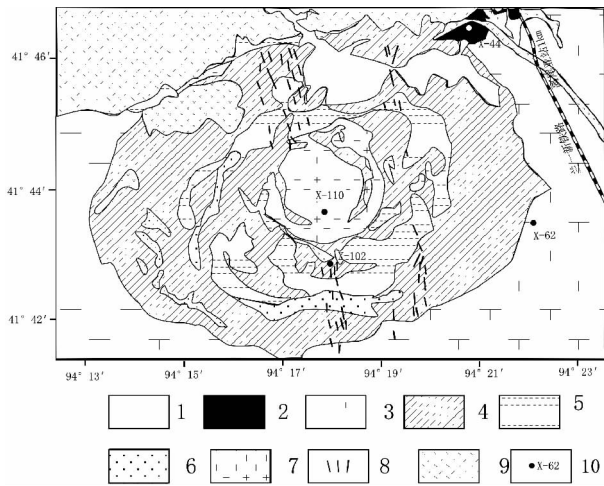


图1 尾亚地质图(据张遵忠,2005)

1-第四纪沉积物; 2-镁铁质、超镁铁质岩; 3-石英正长岩; 4-黑云母二长花岗岩; 5-石英闪长岩; 6-花岗闪长岩; 7-细粒花岗岩; 8-石英闪长玢岩; 9-中元古代片麻岩; 10-取样位置及编号

Fig. 1 Geological map for Weiya pluton

区域地质、岩石学、矿物学、地球化学、同位素地质学、构造演化等角度,对尾亚杂岩体进行了详细的研究(李先梓,1981;张治洮,1983;杨浩 1990;李嵩龄等,1997,2002;张遵忠等,2005)。

目前对该岩体比较一致的认识是它可分为内环和外环两个系列,外环为镁铁质、超镁铁质岩-正长岩系列,以石英正长岩为主(占95%以上),属碱性岩系;内环为石英闪长岩-黑云母二长花岗岩-细粒花岗岩系列,属钙碱性岩系。对两个环带是同源还是异源以及岩体成岩时代的认识仍存在较大分歧。李先梓(1981)和张治洮(1983)认为,尾亚杂岩体系同源产物,前者认为其形成时代为海西晚期,而后者根据内环黑云母单矿物测年(钾氩法)认为是燕山中晚期(127.8~158.1Ma)产物;杨浩(1988)和李嵩龄等(1997,2002)指出,杂岩体的外环和内环其岩浆源和演化系列不同。前者认为形成时代分别为加里东早期和晚期;后者却认为是海西早期(270.67~267.3Ma)和晚期(230~250Ma),两个环带为超带式接触关系,是完全不同时代、不同成分、不同岩浆源的两个独立岩浆作用,沿同一通道就位的产物。张遵忠等根据单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 定年,得出尾亚正长岩和细粒花岗岩年龄分别为(246±6)Ma和(237±6)Ma,属印支早一中期(Zhang *et al.*, 2005),又根据外环和内环黑云母成分的显著差异排除了两个环带同源的可能性,并认为内环的石英闪长岩、二长花岗岩以及细粒花岗岩可能是不同期次的异源岩浆相继侵入的结果;张遵忠等人根据地球化学研究和野外观察认为尾亚杂岩体岩浆侵入期次可分为6期,依次为:镁铁质、超镁铁质岩,石英正长岩,石英闪长岩,黑云母二长花岗岩,石英闪长玢岩,以及细粒花岗岩(张遵忠等,2005,2006)。

随着遥感技术与信息处理技术的迅猛发展,遥感信息作为一种独立的地质参数,已经日益被越来越多的地质工作所认同。人们利用遥感视域宽、信息丰富、具定时性定位性的特点,研究地球表面及表层的地质体,识别地质体的物性及运动状态,从而为地质构造研究、矿产资源勘查、区域地质调查、环境和灾害地质监测等研究提供帮助。由于遥感技术可以在短时间内提供区域的宏观数据,以直观清晰的图像显示地物景观,反映大量地表和浅地表的地质信息,还可以通过那些受地下潜伏地质体、隐伏构造控制和影响的地物的异常信息,来间接识别隐伏地质特征,从而对物探、化探、钻探等勘探手段进行有效的补充,在一定程度上弥补了上述勘查手段的不足,因此被广泛应用于地学领域。我国自20世纪90年代以来,在基础地质方面,遥感应用于岩性识别和地层分类,被广泛应用于遥感地质填图,取得了较好的效果(楼性满等,1994;周维屏等,1993;薛重生,1997;甘甫平等,2000;迟国彬等,1996)。在矿产地质方面,通过计算机图像处理,从遥感数据中识别构造、蚀变等与成矿、控矿有关的信息,结合地球物理及地球化学资料,进行综合地质找矿,也取得了丰硕成果(植起汉等,1997;朱小鸽,2000;陈松岭等,2001;张玉君等,1998,2002,2003;杨建民等,2003)。很显然,遥感的技术优势使得它在地质学领域尤其是宏观地质研究中起着重要的作用,是无法被其它方法所取代的。

遥感找矿信息提取主要包括构造信息提取、蚀变遥感信息和特殊岩性提取。长期以来,岩性提取一直是遥感地质工作者希望攻克的难题之一。新疆东天山地处荒漠戈壁区,对于这样一个面积较大,岩石裸露,对研究区域构造-岩浆活动具有重要意义的尾亚杂岩体,我们也表现出了极大的兴趣。本文结合对尾亚杂岩体的岩相识别,讨论利用多光谱遥感技术在特殊岩性提取中的应用。结合遥感技术提供的岩性信息,还探讨了尾亚杂岩体的形成与演化。

## 2 数据选择

为了使研究结果具有普适性,本次我们选用 Landsat 7 卫星的 ETM<sup>+</sup> 数据,数据景号为 13831,采集日期为 2003 年 2 月 21 日。ETM<sup>+</sup> 数据由于其单景面积大、价格便宜、分辨率适中,是目前我国在矿产资源调查、预测与评价工作中使用最多的数据之一。

## 3 岩性识别的波谱基础与技术方法

遥感岩性信息提取技术的发展与地物光谱特征的研究密不可分。岩石、矿物的光谱特征研究是利用遥感数据提取岩性信息的基础。近 30 年来有一批学者进行了岩石和矿物波谱特性的大量研究工作,这些研究涉及到晶体场理论的矿物学、固体物理学、量子力学、遥感岩石学等众多领域及应用。最引人注意的是 Hunt 等(1977,1978,1982)在 20 世纪 70 年代

系统地发表了关于矿物岩石波谱测试结果的文章, Hunt 利用近 300 个粒状矿物的测定结果归纳出下述重要的结论:

(1) 主要造岩矿物的主要成分, 即硅、铝、镁和氧, 其振动基频在中红外和远红外区, 波长位于 10 $\mu\text{m}$  附近或更长区域, 第一倍频也在 5 $\mu\text{m}$  附近或更长区域, 高倍频谱带强度太弱, 所以在可见—近红外 (VNIR) 区不产生具有诊断性的谱带。

(2) 岩石中的次要成分, 如铁杂质或蚀变矿物, 可形成岩石谱带中的优势地位。换言之, 在可见及近红外区中, 天然矿物和岩石最常见的光谱特征是由这样或那样形式存在的铁产生的, 或者是由水、OH<sup>-</sup> 基团或 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> 基团产生的。

(3) 热液蚀变矿物在短波近红外波段具有诊断性强吸收特征, 它们是纯矿物本身固有的特征。不同矿物混合在一起组成岩石并不能改变矿物的波谱特征, 因此岩石的波谱是组成岩石的纯矿物波谱的线性组合, 但某种矿物吸收特征的强弱不但取决于其含量, 还取决于辐射能量的可接近程度。例如某一矿物被透明矿物所包围时, 其吸收特征就较强, 反之亦然。吸收特征的尖锐程度取决于矿物的结晶程度, 结晶程度越好吸收特征越明显。

(4) 绝对反射率和谱带的光谱对比度, 对矿物颗粒大小非常敏感。对透明物质来说, 一般的规律是, 粒级越小, 总反射率越高, 但光谱对比度降低。不透明物质, 粒级越小, 反射率越低。

遥感探测的是地表物质的光谱信息, 因此只要有一定面积的岩石出露, 遥感都有可能识别。岩性识别主要依赖于不同岩性的光谱和空间特征的差异, 包括灰度、颜色、纹理、结构、形态和空间关系等差异。如岩浆岩岩体一般具有比较规则的平面几何形态, 如圆、椭圆形、透镜状与脉状等; 除少数熔岩外, 岩浆岩多数缺少层理影像特征; 出露规模较大的侵入岩在图像上常具环状、放射状的水系、节理或岩脉等; 沉积岩平面几何形态为条状或带状, 具有明显的层理影像特征; 一组有序分布的沉积岩常构成颜色各异的层状影像特征; 变质岩的影像特征一般与原岩组分及其变质过程中新物质的加入和结构的变化有关; 正变质岩的影像特征类似岩浆岩, 副变质岩则与沉积岩影像特征比较接近。不同类型岩石的矿物

成分、赋存空间状态以及抗风化强度决定了它们各自的波谱特征。岩性识别主要是应用图像增强、图像变换和图像分析方法, 增强图像的色调、颜色以及纹理的差异, 达到最大限度地区分不同岩相、划分不同岩石类型或岩性组合的目的。

近年来发展了一系列的以主成分变换为主的信息提取技术, 在岩矿信息提取中发挥了重要的作用。这些技术与方法是建立在图像灰度特征之上, 利用数理统计的知识进行地物分类与信息提取, 是基于主成分分析进行信息特征选择与特征提取。同时, 根据模式识别的原理, 提出并设计出监督分类与非监督分类方法。实际操作中需要通过典型区段或样区的研究, 取得研究区地层影像特征, 建立岩性解译标志, 从而判读岩石类型、产出状况、展布、变化及其相互关系, 并尽可能解译出不同岩性分界。对于岩性信息提取, 主要是采用一些增强处理, 扩大图像中地物间的灰度差别, 以突出目标信息或改善图像效果, 提高解译标志的判别能力, 如反差扩展、彩色增强、运算增强、变换增强等, 这些传统的图像处理方法在一定程度上满足了应用的需要。

## 4 尾亚杂岩体岩性信息提取

首先对 ETM-13831 景尾亚杂岩体局部数据 (4248, 3030, 4650, 3386) 做统计 (见表 1), 从相关巨阵中找出相关性最底的三个波段 1、4、7, 以 R、G、B 显示, 然后做直方图均衡化处理, 即获得尾亚杂岩体遥感岩性图 (图 2)。

## 5 尾亚杂岩体遥感岩性信息应用讨论

### 5.1 由遥感岩性信息表述的尾亚杂岩体客观又直观

为了达到最大限度地区分尾亚杂岩体不同岩性的目的, 通过应用图像增强、图像变换和图像分析方法, 增强图像的色调、颜色以及纹理的差异, 我们得到了尾亚杂岩体遥感岩性图 (图 2)。这个图色彩鲜艳, 清晰直观, 给人以强烈的视觉冲击, 为岩性可视化提供了一条新的思路。利用 GIS 软件, 可以精确计算出地质体的分布面积。尾亚杂岩体总面积 167.40km<sup>2</sup>, 其中外环面积 77.28km<sup>2</sup>, 内环面积 90.12km<sup>2</sup>。

表 1 尾亚杂岩体局部数据统计

Table 1 Local data statistics of Weiya complex

采样窗口大小						
左上角行列值: 4248P, 3030L		窗口行列数: 422P, 356L			采样像素数: 150232	
协方差矩阵						
波段	1	2	3	4	5	7
1	168.359					
2	196.214	238.410				
3	257.637	319.003	439.646			
4	184.700	232.635	323.674	243.200		
5	159.219	211.234	305.813	235.931	265.672	
7	116.174	157.847	231.986	180.943	217.337	204.013

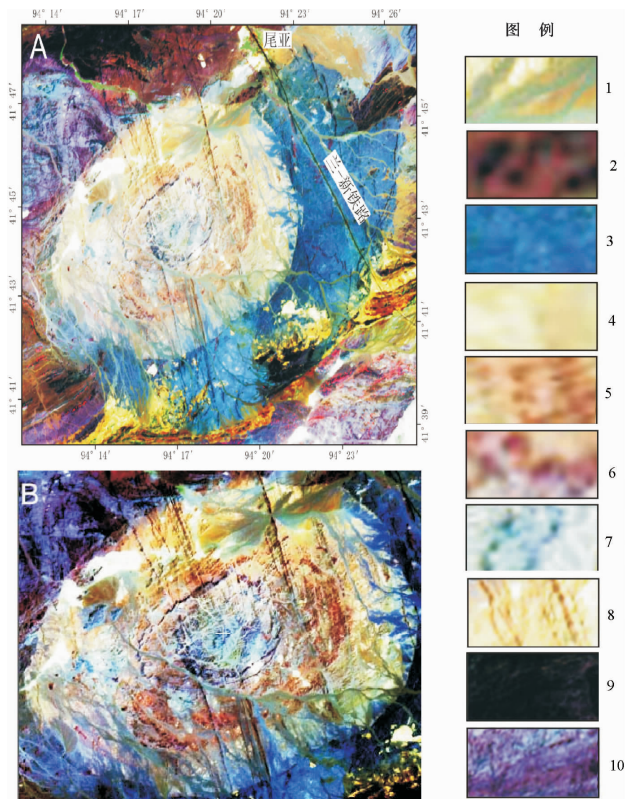


图2 尾亚杂岩体遥感岩性解译图

B 图为 A 图核部的放大与增强

1-第四纪沉积物; 2-镁铁质、超镁铁质岩; 3-石英正长岩; 4-黑云母二长花岗岩; 5-石英闪长岩; 6-花岗闪长岩; 7-细粒花岗岩; 8-石英闪长玢岩; 9-中元古代片麻岩; 10-太古宇亚西岭片麻岩套

Fig. 2 Remote sensing lithological map of Weiyi complex

尾亚杂岩体呈近等轴中心环状,由石英闪长岩-黑云母二长花岗岩-细粒花岗岩系列构成内环呈同心环状,边界圆滑;由镁铁质、超镁铁质岩-正长岩系列构成的外环自南东方向包裹内环。内环和外环界线清晰。外环总面积 $77.28\text{km}^2$ ,石英正长岩构成主侵入体,占总面积的95%以上,镁铁质、超镁铁质岩、石英二长闪长岩、碱长花岗岩、斑状钾长花岗岩的含量均较少。内环总面积 $90.12\text{km}^2$ ,黑云母二长花岗岩构成主侵入体,占总面积的62.3%,核部的细粒花岗岩占总面积的7.8%,早期的石英闪长岩与花岗闪长岩一般呈云朵状形似分布与黑云母二长花岗岩中,分别占总面积的22.1%和7.8%,接触关系有的清晰,有的过渡。

## 5.2 尾亚杂岩体岩浆活动的遥感证据

为了更清晰地观察尾亚杂岩体核部不同岩性的空间分布,我们将图2A的核部又进行了放大和增强(见图2B)。

横贯杂岩体AB的反射谱剖面图是通过图上采样的方法取得的。从图3中可以看出,石英正长岩、石英闪长岩、片麻岩的反射率较低,在图2中的颜色较暗淡;第四纪沉积物、黑

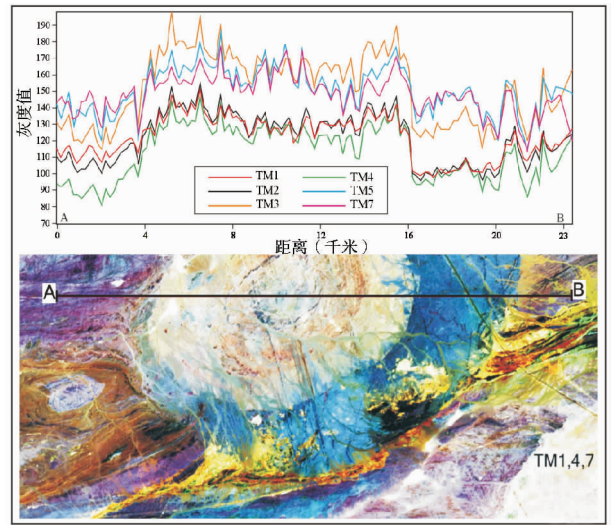


图3 尾亚杂岩体遥感不同岩性反射谱剖面图

下图图例同图2

Fig. 3 Reflective spectral profile of different lithology of Weiyi complex

云母二长花岗岩、细粒花岗岩的反射率较高,在图中的颜色较明亮。从东到西,岩性从第四纪沉积物→石英正长岩→黑云母二长花岗岩→石英闪长岩→细粒花岗岩→石英闪长岩→黑云母二长花岗岩→片麻岩,在岩性发生变化的位置,其对应的反射谱变化显著。岩石间反射谱的差异是由其矿物组成的不同造成的,不同岩石与反射谱具有明确的对应关系。岩类随造岩矿物的不同,光谱会出现一些系统的区域性变异变化,但也具有局部的稳定性和规律。

尾亚杂岩体在构造上位于卡瓦布拉克微地块中部几个大构造线交切处的构造软弱部位,其围岩岩性复杂。

将图1与图2进行比较,可以看出,遥感岩性图给出的岩性、地层的空间分布信息更直观,也更客观。可以利用它补充、完善与修正前人的地质图。另外,遥感岩性图是栅格图象,从图中可以确定任何一点的坐标,人们在进行野外地质工作之前,就能够在图上设计采集样品的位置、进行工程布置、1:5万地质调查的部署等等……遥感信息在矿产勘查与基础地质领域中的应用是非常广泛的。

从遥感信息提供的尾亚杂岩体不同岩性的空间分布状况分析,我们认同张遵忠等人根据地球化学研究和野外观察将尾亚杂岩体岩浆侵入期次分为6期:镁铁质、超镁铁质岩被石英正长岩穿插,形成外环,内环从外至里依次为石英闪长岩,黑云母二长花岗岩,以及细粒花岗岩,除中心部位的细粒花岗岩外,各期侵入体都被近南北向石英闪长玢岩脉所穿插,尾亚杂岩体遥感影像图上各岩性色彩差异分明,接触界线均十分清晰;该遥感图像地质分析与张遵忠等人根据地球化学研究和野外观察所得结论的吻合程度之佳令人惊叹。

### 5.3 尾亚杂岩体的实地查证

为了判别尾亚杂岩体遥感岩性图的精度与准确性,我们进行了实地考察。尾亚杂岩体地处新疆东天山荒漠戈壁景观区,物理风化与风成沙的影响较大。由于风化剥蚀与搬运作用,在不同岩性的接触带附近,多种岩石碎屑呈残积物或冲积物覆盖在岩体之上,严重影响了对不同岩体边界准确界定。例如,在内环与外环的接触带附近,由于外环地势相对较高,石英正长岩(在尾亚杂岩体遥感岩性图中呈兰色)被冲积到内环的黑云母二长花岗岩(在尾亚杂岩体遥感岩性图中呈淡黄色)之上,由于石英正长岩碎屑、黑云母二长花岗岩碎屑与风成沙等混杂沉积物的覆盖,在实地要将内环与外环的分界线精准划分是非常困难的事情。在有的地方,我们看到黑云母二长花岗岩时,已经进入到内环里面了。一个人在地面上眼睛的高度不足 2m,观察的范围有限,在宏观上很难把握,人眼只能看到可见光给出的信息。美国陆地卫星 7 号(LANDSAT-7)的轨道高度为 705km,视野开阔,一景图象覆盖了 34225km<sup>2</sup>(185 × 185km<sup>2</sup>)的范围。ETM<sup>+</sup>数据除了可见光波段以外,还包括近红外、短波红外波段的信息。经过遥感数据处理,不但将不同岩性间的差异信息增强,还将原来不可见的近红外、短波红外波段的信息都变成可视的图象,极大地丰富了我们的视野,视觉的改观使我们的思维升华。结合遥感岩性图来精准划分尾亚杂岩体内环与外环的分界线就很容易了。我们本次工作使用的 ETM<sup>+</sup>数据空间分辨率为 30m,(第八波段空间分辨率为 15m),可以得到比例尺 1:5 万的图件。如果使用分辨率高但价格昂贵的 SPOT4 数据(分辨率 2.5m)或者 QuickBird 数据(分辨率 0.6m)进行处理,可以得到更清晰的遥感岩性图,出图比例尺可达 1:1000。

## 6 结论

(1) 利用遥感技术提取出了尾亚杂岩体色彩鲜艳、清晰直观遥感岩性图,并计算出了尾亚杂岩体总面积 167.40km<sup>2</sup>,其中外环面积 77.28km<sup>2</sup>,内环面积 90.12km<sup>2</sup>。

(2) 遥感岩性图上显示,尾亚杂岩体分为内环与外环两个系统。结合前人的研究成果,内外两个环带是不同时代、不同成分、不同岩浆源的两个独立岩浆作用沿同一通道就位的产物。

(3) 尾亚杂岩体遥感岩性图进一步证实,尾亚杂岩体的岩浆活动有 6 个期次:镁铁质、超镁铁质岩,石英正长岩,石英闪长岩,黑云母二长花岗岩,石英闪长玢岩,以及细粒花岗岩。从遥感角度佐证了张遵忠等人根据地球化学研究和野外观察将尾亚杂岩体岩浆侵入期次分为 6 期的结果。

(4) 利用遥感技术提取的尾亚杂岩体遥感岩性图色彩鲜艳,清晰直观,给人以强烈的视觉冲击,为岩性可视化提供了一条新的思路。借助遥感数据处理技术将不同岩性间的差异信息增强,还将原来不可见的近红外、短波红外波段的

信息都变成可视的图象,极大的丰富了我们的视野,视觉的改观使我们的思维升华。遥感岩性信息在矿产勘查与基础地质领域中有非常广泛的应用前景。

## References

- Chen SL, Lu FH, Gao GM and Wu DW. 2001. Remote sensing extraction of altered information related to gold mineralization, inner Mongolia section, north margin of north China plate. *Remote Sensing for Land and Resources*, (2): 13 - 18
- Chi GB and Li Y. 1996. The recognizing methods and applications of remote sensing information for mineralized geological environment. *Journal of Remote Sensing*, 11(2): 94 - 101
- Gan FP, Wang RS, Jiang SH, Zhang ZG, Guo XF and Wang QH. 2000. Discrimination technique for rocks or ore deposits based on the feature of full spectral shape using hyperspectral remote sensing and its application. *Scientia Geologica Sinica*, 35(3): 376 - 384
- Hu SX, Guo JC, Gu LX, Yan ZF and Yan H. 1990. *Geology of the Caledonian orogenic belt and its importance to the framework of East Tianshan (E85-95)*. Geoscience of Xinjiang. Beijing: Geological Publishing House, 32 - 45
- Hunt GR. 1977. Spectral signature of particular minerals in the visible and infrared. *Gesph*, (42): 501 - 513
- Hunt GR. 1982. Spectroscopic properties of rock and minerals in handbook of physical properties of rocks. vol. 1. Carniche-el R S de. Roca Raton; CRC Press, 295 - 385
- Hunt GR. 1978. Salisbury J W. Assessment of landsat filters for rock type discrimination. Based on Intrinsic Information in Laboratory Spectra. *Geophysics*, 43: 738 - 748
- Li SL and Feng XC. 1997. Super-unit association of Weiya, Eastern Tianshan of Xinjiang. *Xinjiang Geology*, (1): 13 - 27 (in Chinese with an English abstract)
- Li SL, Li WQ, Feng XC and Dong FR. 2002. Age of formation of Weiya composite stocks in Eastern Tianshan mountains. *Xinjiang Geology*, (4): 357 - 259 (in Chinese with an English abstract)
- Li XZ. 1981. The characteristics of the Weiya in trusive in Tianshan with a discussion on its mode of formation. *Bull Xi'an Inst Geol Mineral Res Chinese Acad Geol Sci*. 2: 53 - 62
- Lou XM and Ge BJ. 1994. Method on ore prospecting and prognosis by remote sensing. Beijing: Geological Publishing House
- Xue ZS. 1997. Application and progress of remote sensing techniques in geological surveying. *Geological Science and Technology Information*, 16(Sup): 15 - 22
- Yang H, Gu LX and Yan ZF. 1990. Characteristics of lead isotopic compositions of the Weiya granitic complex in Middle Tianshan. *Uranium Geology*, 6(3): 156 - 162
- Yang JM, Zhang YJ, Chen W, Wang ZL, Jiang LF, Ji HG and Han CM. 2003. Application of ETM(TM) remote sensing alteration anomaly extraction technique to gobi area, east Tianshan mountains. *Mineral Deposits*, (3): 278 - 286 (in Chinese with an English abstract)
- Zhang YJ and Yang JM. 1998. Extraction Methods for the Alteration Remote Sensing Information in the Area with Outcropping Rocks. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2: 46 - 53 (in Chinese with an English abstract)
- Zhang YJ, Yang JM and Chen W. 2002. The Methods for Extraction of the Alteration Remote Sensing Anomaly from ETM<sup>+</sup>(TM) Data and Their Application; Geological Basis and Spectral Precondition. *Remote Sensing for Land & Resources*, (4): 30 - 36 (in Chinese with an English abstract)
- Zhang YJ, Zeng ZM and Chen W. 2003. The Methods for Extraction of the Alteration Remote Sensing Anomaly from ETM<sup>+</sup>(TM) Data and

- Their Application: Method Selection and Technological flow-chart. Remote Sensing for Land & Resources, (2): 44 - 49 (in Chinese with an English abstract)
- Zhang ZZ. 1983. The mode of formation of the Weiya rock body - Whirl dynamic differentiation. Bull Inst Geomechan Chinese Acad Geol Sci., (4): 139 - 149
- Zhi QH, Wang Yan and Zhu YC. 1997. Comprehensive evaluation of the Laoniushan subvolcanic copper targets by remote sensing method. Mineral Resources and Geology, 11(3): 179 - 186
- Zhou WP, Chen KQ, Jian RC *et al.* 1993. A new mapping method of the 1 : 50000 scale geological mapping. Wuhan: Press of China University of Geosciences
- Zhu XG. 2000. Extracting geological structure information by multi-principal component analysis. Journal of remote sensing, 4(4): 299 - 303
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Li WQ, Xi AH and Wang S. 2005. Zircon SHRIMP dating and Their geological significance of Weiya complex of eastern Tianshan. Acta Geologica Sinica, 79(4): 530
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, San JZ, Tang XQ, Xi AH and Wang S. 2005. Weiya complex, eastern Tianshan: Single-sourced or diverse-sourced; Evidence from biotite. Geochimica, 34(4): 328 - 338 (in Chinese with an English abstract)
- Zhang ZZ, Gu LX, Wu CZ, Zhai JP, Li WQ and Tang JH. 2006. Weiya quartz syenite in early indosina from eastern Tianshan Mountains: Petrogenesis and tectonic implications. Acta Petrologica Sinica, 22(5): 1135 - 1149
- 李嵩龄, 李文铅, 冯新昌, 董富荣. 2002. 东天山尾亚复式岩株形成时代讨论. 新疆地质, 20(4): 357 - 359
- 李先梓. 1981. 天山尾亚岩体地质特征及其形成方式讨论. 中国地质科学院院报, 西安地质矿产研究所所刊, 2(1): 53 - 62
- 楼性满, 葛榜军. 1994. 遥感找矿预测方法. 北京: 地质出版社
- 薛重生. 1997. 遥感技术在区域地质调查中的应用研究进展. 地质科技情报, 16(增刊): 15 - 22
- 杨浩, 顾连兴, 严正富. 1990. 中天山尾亚杂岩体的铅同位素组成特征. 铀矿地质, 6(3): 156 - 162
- 杨建民, 张玉君, 陈薇, 王志良, 姜立丰, 姬厚贵, 韩春明. 2003. ETM<sup>+</sup> (TM) 蚀变遥感异常技术方法在东天山戈壁地区的应用. 矿床地质, 22(3): 278 - 286
- 张玉君, 杨建民. 19980. 基岩裸露区蚀变遥感信息的提取方法. 国土资源遥感, (2): 46 - 53
- 张玉君, 杨建民, 陈薇. 2002. ETM<sup>+</sup> (TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用—地质依据和波谱前提. 国土资源遥感, (4): 30 - 36
- 张玉君, 曾朝铭, 陈薇. 2003. ETM<sup>+</sup> (TM) 蚀变遥感异常提取方法研究与应用—方法选择和技术流程. 国土资源遥感, (2): 44 - 49
- 张治洮. 1983. 尾亚岩体的成岩方式——旋卷动力分异. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, (4): 139 - 149
- 植起汉, 王严, 朱谷昌. 1997. 闹牛山次火山岩铜矿靶区的遥感综合评价. 矿产与地质, 11(3): 179 - 186
- 周维屏, 陈克强, 简人初等. 1993. 1 : 5 万区域地质填图新方法. 武汉: 中国地质大学出版社
- 朱小鸽. 2000. 多重主成分分析及在地质构造信息提取中的应用. 遥感学报, 4(4): 299 - 303
- 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志, 三金柱, 汤晓茜, 郝爱华, 王硕. 2005. 东天山尾亚杂岩体: 同源还是异源? ——来自黑云母的证据. 地球化学, 34(4): 328 - 338
- 张遵忠, 顾连兴, 吴昌志, 翟建平, 李伟强, 唐俊华. 2006. 东天山印支早期尾亚石英正长岩: 成岩作用及成岩意义. 岩石学报, 22(5): 1135 - 1149

#### 附中文参考文献

- 陈松岭, 卢福宏, 高光明, 吴德文. 2001. 华北地台北缘内蒙古段金矿围岩蚀变的遥感识别. 国土资源遥感, (2): 13 - 18
- 迟国彬, 李岩. 1996. 成矿地质环境遥感信息识别方法及其应用研究. 环境遥感, 11(2): 94 - 101.
- 甘甫平, 王润生, 江思宏, 张宗贵, 郭小方, 王青华. 2000. 基于完全波谱特征的成像光谱遥感岩矿识别技术及其应用. 地质科学, 5(3): 376 - 384.
- 胡受奚, 郭继春, 顾连兴, 周顺之, 严正富, 杨浩. 1990. 加里东造山带在东天山(E85° ~ 95°) 构造格架中的重要地位及其地质特征. 北京: 地质出版社, 32 - 45
- 李嵩龄, 冯新昌. 1997. 新疆天山东部尾亚超单元组合特征. 新疆地质, 15(1): 13 - 27