

文章编号: 0258-7106 (2006) 03-0329-08

# 哈密土墩矿区高光谱影像蚀变矿物识别初步研究\*

周强<sup>1,2</sup>, 甘甫平<sup>2</sup>, 陈建平<sup>1</sup>, 闫柏琨<sup>1</sup>, 王润生<sup>2</sup>

(1 中国地质大学, 北京 100083; 2 中国国土资源航空物探遥感中心, 北京 100083)

**摘要** 文章以哈密土墩矿区为例, 利用航空高光谱 HyMAP 数据, 从单矿物光谱与混合像元光谱之间的相似概率和模型化参数出发, 发展了基于光谱混合组成的极大相关高光谱矿物识别方法, 初步识别出该区与成矿关系密切的 6 种蚀变矿物及其空间分布趋势, 并为野外地质工作与薄片鉴定所证实。该研究初步表明, 高光谱遥感可为地质学中矿物的空间分布研究提供有用的新技术。

**关键词** 地质学; HyMAP; 矿物识别; 数理统计; 高光谱; 土墩矿区

**中图分类号**: P627 **文献标识码**: A

## Application of hyperspectral imaging data to mineral identification in Tudun Cu-Ni deposit, Hami, Xinjiang

ZHOU Qiang<sup>1,2</sup>, GAN FuPing<sup>2</sup>, CHEN JianPing<sup>1</sup>, YAN BoKun<sup>1</sup> and WANG RunSheng<sup>2</sup>

(1 China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2 China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing 100083, China)

### Abstract

Mineral is an important end-member in the processing of geological data. In this paper, a mineral identification method is put forward in the light of the similitude probability between pure mineral end-members and mixture pixel, including some model parameters obtained from mathematical and statistical means. Maximum coefficients based on pure mineral end-members and mixture pixel by the Spearman *R* and the Kendall *tau* statistical methods were designed and developed to extract the information of mineral with HyMAP data. Six minerals, namely, calcite, chlorite, epidote, serpentine, kaolinite and sericite, were identified by this method, with their spatial abundances given. The results were varified in the field and by the thin section identification. The hyperspectral imaging technique supplies a new and useful tool for mineral spatial analysis in geology.

**Key words:** geology, HyMAP, mineral identification, statistical method, hyperspectral imaging technique, Tudun Cu-Ni deposit

地质演化是一个动态的过程。在地质作用过程中, 矿物是一个非常重要的基本单元, 并在近矿空间内以矿物种类和空间上的变化特征形成朝矿体方向呈明显梯度变化的矿物组合分带现象。通过对矿物

空间展布特征的分析, 可以确定成矿作用类型以及成岩、成矿条件等地质相关信息, 继而更深入地研究蚀变作用的化学特点、温度、压力以及成矿流体中组分的富集情况等, 有助于对成岩、成矿作用地质条件

\* 本文得到国土资源部“百名优秀青年科技人才计划”、国家自然科学基金(40201034)和国土资源部科研项目(2002206)的联合资助  
第一作者简介 周强, 女, 1972年生, 在读博士研究生, 地球信息探测技术专业, 主要从事遥感技术与地学应用研究。E-mail: zhouqq@263.net

收稿日期 2005-11-02; 改回日期 2006-03-28。李岩编辑。

的认识,正确判断矿床的成因类型,指导矿产的找寻与勘探。

矿物识别是高光谱遥感技术地质应用最成功的领域之一(连长云等,2005)。矿物单个诊断性吸收特征可以利用吸收波段位置( $\lambda$ )、吸收深度( $H$ )、吸收宽度( $W$ )、吸收面积( $A$ )、吸收对称性( $d$ )、吸收数目( $n$ )和排序参数等作一完整的表征(陈述彭等,1998)。根据端员矿物的单个诊断性吸收波形,从高光谱数据中提取并增强这些参数信息,可直接用于识别岩矿类型(BEN-DOR et al., 1995)。但对于地表地物分布或对于目前像元尺度大小的地物而言,相对纯的端员组成是不存在的,都是由具有内在联系的端员成分有机结合而成的,其光谱特征综合了不同组分的光谱效应而更加复杂多变。尽管目前混合光谱矿物识别的技术方法大多基于线形分解,但由于矿物混合光谱的非线性性,使其矿物识别的结果具有不确定性。因此,本文在混合光谱主导性矿物研究(甘甫平,2004)的基础之上,首次在新疆东天山哈密土墩铜镍硫化物矿床,利用高光谱 HyMAP 数据开展蚀变矿物识别研究,编制了矿区矿物空间分布图,以期对该矿区提供基础地质本底信息,也为地质找矿以及其他矿区矿物空间分布信息的探测提供借鉴与参考。

## 1 土墩矿区地质概况

土墩基性-超基性杂岩体位于天山地槽褶皱带中的北天山优地槽内,觉罗塔格复背斜背斜水向斜束山口一双岔沟背斜的北翼,干洞大断裂带附近。区内出露地层为石炭系中统梧桐窝子组,是一套海底喷溢的中基性-中酸性火山熔岩及火山碎屑岩。主要岩性组合为细碧岩、细碧玢岩、角斑岩、石英角斑岩,内夹薄层状及透镜状凝灰岩、沉凝灰岩,属细碧岩-石英角斑岩火山岩系组合(图1)(永文富,2002)。

土墩镍矿床由不同大小的矿体和矿化体组成,并主要赋存在超基性岩中。有利的含矿岩相主要为单辉橄榄岩相,在这一岩相带的膨大处,矿体厚度大,品位也较高。土墩超基性岩体均系铁质超基性岩,其成分中含 S 高,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  低。该矿床超基性岩主要矿物有橄榄石、普通辉石、紫苏辉石、古铜辉石;次要矿物有褐色普通角闪石、基性斜长石;副矿物有铬铁矿、磁铁矿、磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜

矿、榍石等。基性岩主要矿物有基性斜长石、辉石;次要矿物有褐色普通角闪石、橄榄石;副矿物有磁铁矿、磷灰石及镍黄铁矿、磁黄铁矿等。含矿岩石蚀变强烈,常具有滑石化、透闪石化、绿泥石化、叶蛇纹石化。矿体顶部岩石片理化较强,蚀变更加强烈。地表的矿体(或矿化体)风化之后常呈黄褐色、淡黄绿色,疏松多孔土状,具较强的粘土化、高岭土化。这些蚀变特征是找矿的直接标志。

## 2 HyMAP 数据获取及其数据特征

土墩矿区高光谱数据是于 2002 年 10 月租用澳大利亚的高光谱仪 HyMAP,在新疆东天山哈密地区进行航空飞行获取的。该高光谱仪指标参数(Cocks et al., 1998)如下:

- (1) 光谱范围: 400~2 500 nm
- (2) 波段数: 128
- (3) 光谱分辨率, 可见光-近红外: 15 nm  
短波红外: 15~20 nm
- (4) 瞬时视场: 1~3 毫弧度
- (5) 视场角: 30~65°

在该区飞行相对航高 3 000 m,所获取的高光谱数据空间分辨率 5 m。使用澳大利亚针对 HyMAP 仪器所开发的、基于 6S 模型的辐射校正专用模块对所获取的数据进行了大气校正,并利用该区白云母和方解石矿物的特征光谱评价 HyMAP 数据重建光谱的真实性,从数据源头确保高光谱数据的准确与可靠性(甘甫平等,2005)。

## 3 高光谱影像矿物识别

针对目前实际应用中纯的矿物像元通常不易获取,一些匹配与分解算法不确定因素较多等问题,在混合光谱主导性矿物研究(甘甫平,2004)的基础之上根据统计学中的因素分析原理,从探讨个性与共性的关系入手,分析影像光谱(混合光谱)与标准矿物光谱之间的相关性,降低地物光谱变异、数据噪声、光谱重建误差等对矿物识别的影响。为此,发展了基于光谱混合极大相关的高光谱矿物识别方法,利用该方法和经过大气校正以及光谱的真实性检验后的 HyMAP 数据对土墩矿区的蚀变矿物进行初步识别。

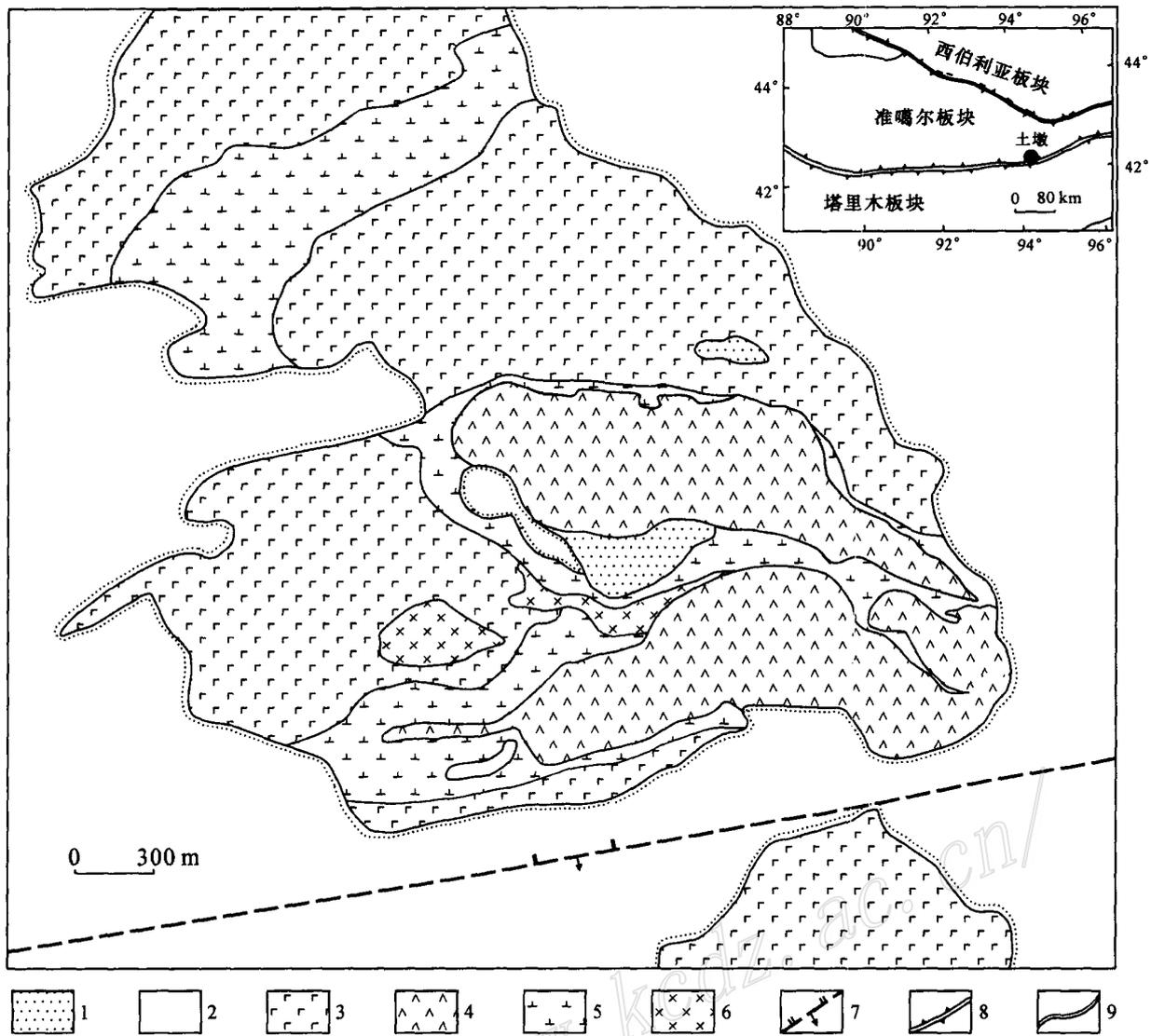


图 1 土墩矿区地质图(据永文富,2002 修改和简化)

1—第四系全新统洪积松散砂土、碎石;2—第三系上新统葡萄沟组橙红色粉质泥岩、白色砾岩;3—石炭系梧桐窝子组火山熔岩及火山碎屑岩;4—华力西期侵入橄辉岩;5—闪长岩;6—辉长岩;7—推测逆断层;8—板块缝合线;9—不整合地质界线

Fig. 1 Geological Map of Tudun area

1—Quaternary deluvial material;2—Tertiary salmon pink silty mudstone and white conglomerate;3—Carboniferous Wutongwozi Formation volcanic lava and pyroclastic rock; 4—Variscan intrusive peridotite;5—Diorite;6—Gabbro;7—Inferred strike-slip fault;8—Suture of plate; 9—Unconformity geological boundary

### 3.1 基于光谱混合极大相关的高光谱矿物识别法

像元尺度的影像光谱实为混合光谱。对于来自高光谱影像的混合光谱以及来自标准矿物光谱库的单矿物光谱之间的内在联系可以理解为是两组离散数据的有机构成,两组数据间的关系除了数学和表面的关系外,还可能存在潜在的因果性(Causality)和等级性(Hierarchy);不论是因果性还是等级性都可以通过对这两组离散数据间关系的分析进行探索,

寻找像元混合光谱与单矿物标准光谱之间潜在的共性与本质的联系,从而达到对单矿物的识别和信息提取。Spearman  $R$  (斯皮尔曼相关等级系数)和 Kendall  $\tau$  (肯达尔一致性系数)被选择用于对两者的关系进行探讨,从而实现单矿物的识别。

在不考虑变量之间排序的关联的条件下,Spearman  $R$  基本与常规 Pearson  $R$  (皮尔森相关系数)等同,即可用方差解释比例来说明关联程度。在混合

光谱中,数据顺序构成是对像元光谱属性的描述。在 Spearman  $R$  假设中,所研究的变量具有排序性能(Plakhov, 2004; Monjardet, 1997)。因此,像元混合光谱与矿物标准光谱可以作为两个有序的数据组进行研究。这样,可以通过对有序数据组间进行相关性分析与显著性假设检验,达到对两者共同因素的认同,以这种认同感知的程度大小作为对单矿物识别的依据。在满足显著性假设的条件下,愈高的相关性(认同感知程度)体现指示两者共同的特征愈多,像元光谱为所依赖的矿物标准光谱的程度愈大,从而根据一定的原则进行分割,识别出单矿物。

Kendall  $\tau$  在本质上与 Spearman  $R$  一样。从统计的角度看两者是相似的,但 Kendall  $\tau$  与 Spearman  $R$  内涵有着不同的解释:Spearman  $R$  可认为是排序变量的普通 Pearson 时间效应相关系数;而 Kendall  $\tau$  是概率,是两变量实际数据处于相同顺序的概率以及与处于不同顺序的概率差别的综合。在探讨像元混合光谱与单矿物标准光谱之间的内在联系时,不仅仅数据组间相同顺序的联系比较重要,同时数据组间顺序的差异也非常重要。

基于上述理解,利用 Spearman  $R$  和 Kendall  $\tau$  的计算方法(徐建帮等, 2001),发展了针对高光谱矿物识别的基于光谱混合极大相关的高光谱矿物识别方法。首先在矿物标准光谱库中或实验室测量的矿物光谱中选择该区域可能分布的矿物光谱作为参考单光谱,利用 Spearman  $R$  和 Kendall  $\tau$  计算方法分别逐像元地计算每一像元光谱(混合光谱)与单矿物光谱之间的相关系数;然后确定与单矿物光谱的相关系数极大的像元;最后再利用合理的阈值分割出单矿物。

### 3.2 识别结果

在上述研究的基础之上,利用土墩矿区航空高光谱 HyMAP 数据开展蚀变矿物的识别研究。从美国地质调查局 USGS 矿物标准光谱库中选择方解石、绿泥石、绿帘石、蛇纹石、高岭石、云母的光谱,将每一种矿物的光谱与 HyMAP 像元光谱组成数据组,利用 Spearman  $R$  和 Kendall  $\tau$  计算方法分别逐像元地计算两者之间的相关性,选择合理的阈值进行分割,识别出分布于土墩矿区的相应蚀变矿物。图 2 是利用 Spearman  $R$  和 Kendall  $\tau$  系数计算像元光谱与不同单矿物光谱之间的最大相关系数,并以该相关系数作为所识别的端员组成存在的概率大小或相对分布趋势的指示量。图 2 中,从紫色到红

色表示该像元存在该矿物分布几率由小到大,其展布与图 1 具有一定的对应关系。对 Spearman  $R$  系数分布图利用一定的阈值进行合理分割,可以识别出土墩矿区蚀变矿物的分布(图 3)。

### 3.3 野外验证

通过野外实地勘查,初步判断利用高光谱 HyMAP 数据所识别的蚀变矿物分布范围及趋势与实际情况近于一致。在影像所识别矿物的分布区,采集岩石样品进一步进行镜下鉴定,其结果如表 1。由于高岭石矿物成粉末状,未在表 1 中列出。镜下鉴定结果表明,所验证处含有利用与高光谱 HyMAP 数据所识别矿物相同的蚀变矿物。

### 3.4 分析与讨论

通过对 Spearman  $R$  系数(表 2)和 Kendall  $\tau$  系数(表 3)的统计分析,可知 Spearman  $R$  系数绝大多数界于 0.6~0.9 之间,而 Kendall  $\tau$  系数界于 0.4~0.7 之间,显著性检验  $p < 0.06$ ,绝大多数处于 0.001 附近。因此,所计算的相关系数符合显著性检验,具有较大相关性。

Spearman  $R$  和 Kendall  $\tau$  系数并不需要所研究的变量成正态分布,这正好满足光谱数据的非正态性,计算的相关系数从理论上以及实际混合的角度更好地描述了混合光谱(影像光谱)主导性矿物的分布趋势。由于 Kendall  $\tau$  与 Spearman  $R$  的内涵有着不同的解释,仅在相关系数的数值大小上存在一些差异,但其分布趋势都基本一致。利用这种相似性系数的分布趋势,可以认识矿物的空间赋存状态,并可进一步理解矿物在空间量变中的物理和化学作用过程,获取相应的地质演化信息。

从不同矿物的相关系数分布(图 2)与野外验证可知,相关系数成面型分布趋势,与地面矿物分布较为一致。红色分布区基本上为原生风化露头或原岩强烈蚀变处,黄色分布区为风化或蚀变的边缘区,绿色为风化或蚀变碎屑物分布区,青色分布区可能含有部分风化或蚀变矿物的碎屑物,蓝色分布区则基本上为其他岩石或矿物成分。在野外验证中也能找到两者间的对应关系,原生风化露头或原岩强烈蚀变处一般为正地形,风化碎屑物成“扇状”分布,所提取的端员矿物与地质图中原岩成分一致或与其蚀变成分一致。高岭石、绢云母、方解石等(图 2 中红色表示部分)与矿体分布位置一致。在实际工作中,往往需要对原生露头进行追索,圈定其分布区。混合组成最大相关系数法利用相对“量”的大小非常直

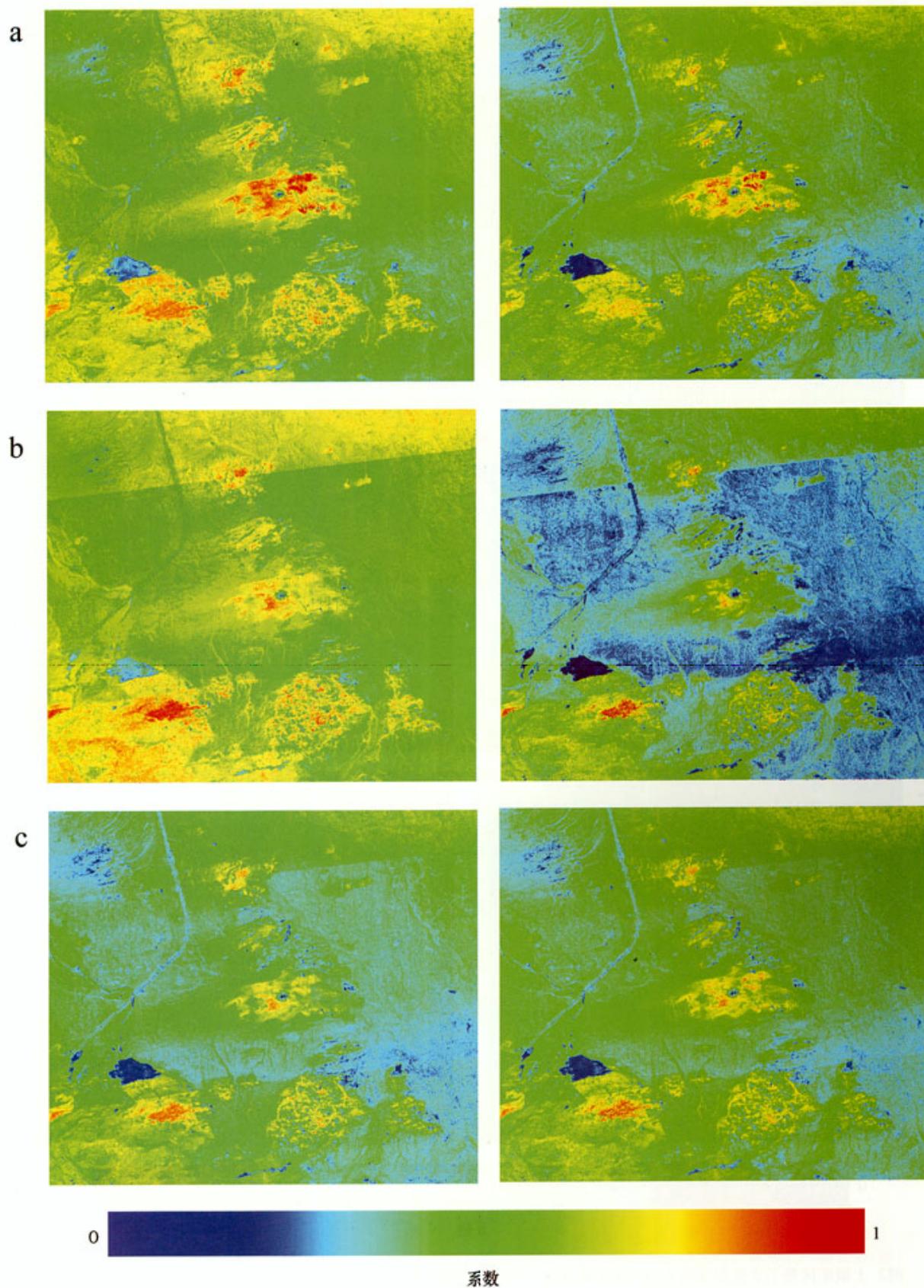


图 2(图名见下页)

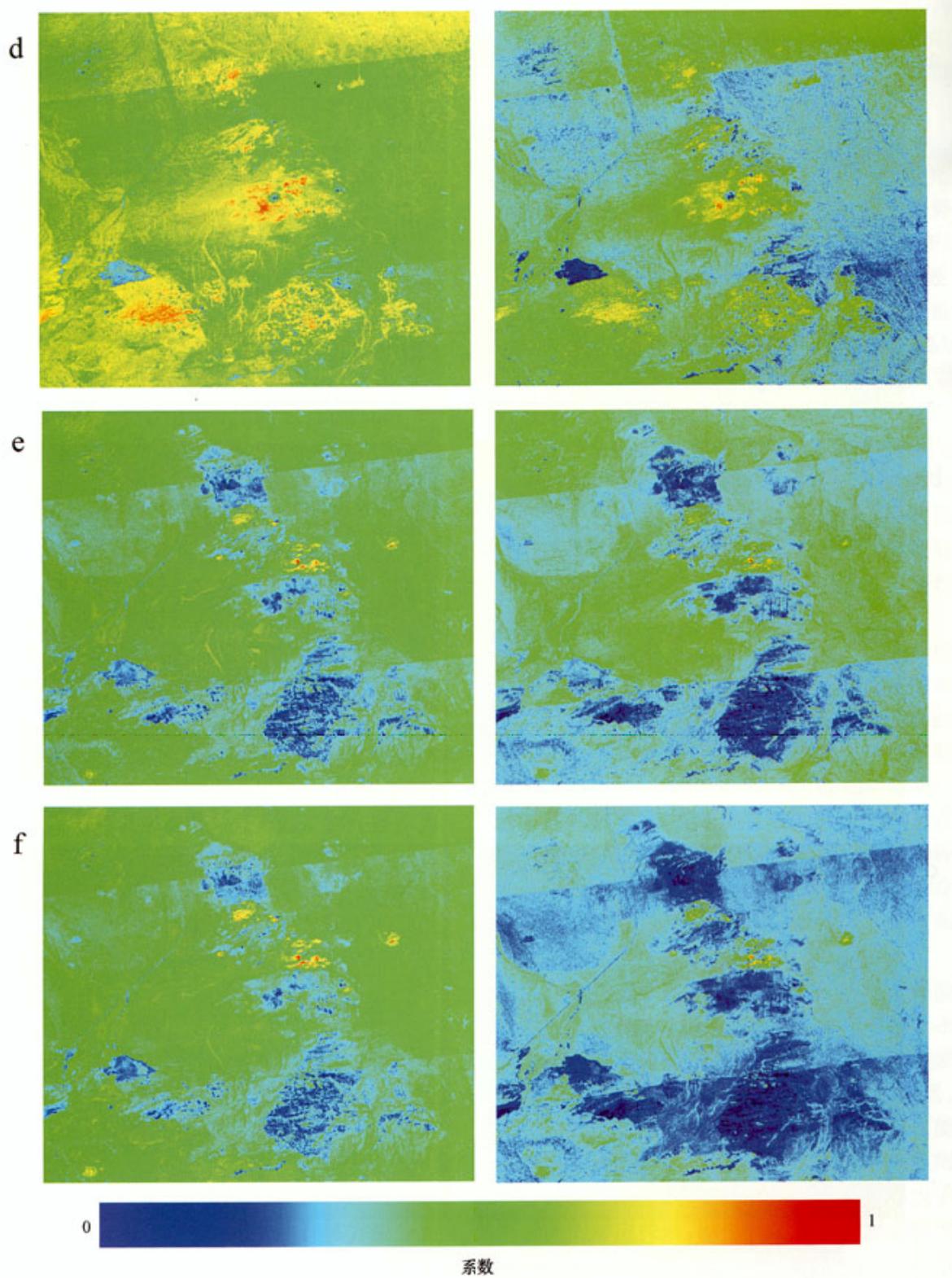


图2 土墩矿区基于光谱混合极大相关的矿物识别(三条航带镶嵌)(左: Spearman R系数; 右: Kendall tau系数)  
a.方解石; b.绿泥石; c.绿帘石; d.蛇纹石; e.高岭石; f.绢云母。由于受飞行时间、辐射校正等多方面的影响, 在相关系数分布图上部 and 下部出现了两条近于NEE80°的明显的航带镶嵌痕迹

Fig. 2 Mineral identification based on mixed Maximum Relationship along Spectral Mixture End-members using Hyperspectral Imaging Data for Tudun area (Mosaicking with three aero lines; Left figures are coefficients of Spearman R of different minerals, whereas right figures are coefficients of Kendall tau of different minerals)  
a. Calcite; b. Chlorite; c. Epidosite; d. Serpentine; e. Kaolinite; f. Sericite

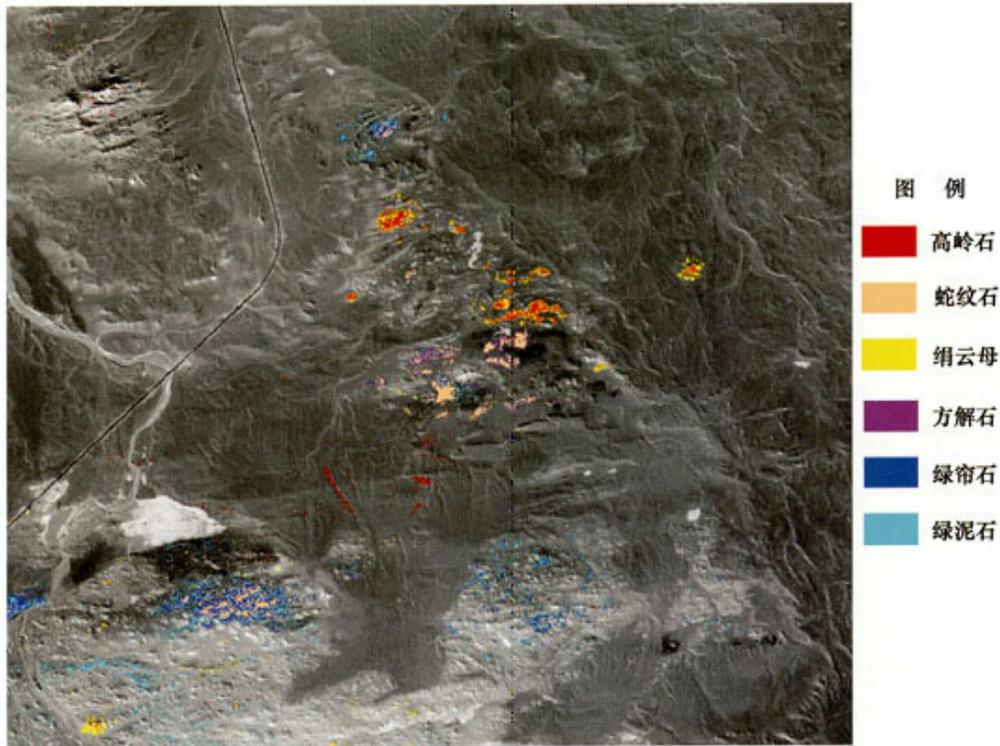


图 3 土墩矿区蚀变矿物分布图（三条航带镶嵌）

Fig. 3 Distribution of altered minerals from Tudun area (Mosaicking with three aero lines)

表 1 土墩矿区样品薄片鉴定结果与影像识别对比

Table 1 Comparison with the thin section identification and mineral identification using HyMAP data for Tudun area

样品号	影像识别矿物	薄片鉴定	
		主要矿物含量 $\varphi(B)$	次要矿物
TD-01	绢云母、绿泥石	绢云母(50%~55%)、绿泥石(40%~55%)、滑石( $\pm 5\%$ )	方解石、黄铁矿
TD-02	蛇纹石、绿泥石	橄榄石(55%~60%)、单斜辉石(25%~30%)、角闪石( $\pm 5\%$ )、金云母	绿泥石、蛇纹石、滑石、透闪石
TD-03	绿泥石、蛇纹石	橄榄石(55%~60%)、单斜辉石(25%~30%)、斜方辉石、角闪石	蛇纹石、绿泥石、褐铁矿、透闪石
TD-05	方解石	方解石( $\pm 95\%$ )、硅质( $\pm 5\%$ )	褐铁矿
TD-06	绿泥石、绢云母	绢云母(40%~50%)、绿泥石(45%~50%)、透闪石( $\pm 5\%$ )、滑石	透闪石、方解石
TD-07	绢云母	碎斑(45%~50%)、碎基(25%~30%)、填隙物中绢云母(20%~25%)、绿泥石、方解石和褐铁矿各 3%	
TD-08	绿泥石、绿帘石	斜长石(55%~60%)、钾长石( $\pm 10\%$ )、石英(10%~15%)、黑云母(假象) ( $\pm 5\%$ )、角闪石( $\pm 15\%$ )	绢云母、绿泥石、绿帘石、钾长石(脉)
TD-09	蛇纹石	橄榄石(65%~70%)、单斜辉石(10%~15%)、角闪石(5%)、金云母( $\pm 5\%$ )、不透明矿物( $\pm 10\%$ )	绿泥石、蛇纹石、包林皂石、透闪石

表2 土壤矿区 Spearman R 系数分析  
Table 2 Analyzing of coefficient of Spearman R  
for Tudun area

矿物	系数	最小值	最大值	均值	方差
方解石	R	0.447213	0.934594	0.812560	0.032227
	p	0	0.013219	0.000000	0.000014
绿泥石	R	0.484761	0.871858	0.789467	0.019424
	p	0	0.006630	0.000000	0.000012
绿帘石	R	0.349761	0.870397	0.698577	0.042139
	p	0	0.058138	0.000045	0.000139
高岭石	R	0.542158	0.938154	0.776793	0.031374
	p	0	0.001969	0.000002	0.000008
白云母	R	0.459399	0.935929	0.753615	0.036218
	p	0	0.010653	0.000007	0.000032
叶蛇纹石	R	0.437152	0.835818	0.739126	0.025418
	p	0	0.015709	0.000006	0.000029

注:p为显著性检验。

表3 土壤矿区 Kendall tau 系数分析  
Table 3 Analyzing of coefficient of Kendall tau  
for Tudun area

矿物	系数	最小值	最大值	均值	方差
方解石	tau	0.317607	0.783908	0.618844	0.037760
	p	0	0.013705	0.000004	0.000019
绿泥石	tau	0.301149	0.696552	0.521554	0.038770
	p	0	0.019430	0.000094	0.000118
绿帘石	tau	0.251152	0.713464	0.544243	0.041325
	p	0	0.051277	0.000057	0.000151
高岭石	tau	0.393103	0.797701	0.597479	0.032225
	p	0	0.002282	0.000008	0.000022
白云母	tau	0.31954	0.802299	0.538260	0.034176
	p	0	0.013142	0.000063	0.000140
叶蛇纹石	tau	0.264368	0.641379	0.497374	0.031543
	p	0.000001	0.040197	0.000174	0.000206

注:p为显著性检验。

观地再现了地物主要端员的分布趋势,尤其是对原生露头的指示作用,对原生矿床的找寻非常有利。

## 4 结 语

高光谱遥感技术使遥感从对地物的鉴别(Discrimination)发展到对地物的直接识别(Identification),并使遥感工作方法由图像分析转变为以谱分析为主的图谱结合的模式的新阶段,使遥感利用地物谱的指纹效应直接进行微观(如矿物)信息提取。本文利用高光谱技术直接进行蚀变矿物识别,量化了蚀变矿物的空间展布,为矿物共生组合分布规律、分带性与差异性研究,圈定蚀变中心、确定蚀变作用类型、分析各阶段蚀变与成矿的关系等提供了可靠

的信息,促进了遥感技术与地质的有机结合,并为地质研究提供了新工具。

## References

- BEN-DOR E and Kruse F A. 1995. Surface mineral mapping of Makh-tesh Ramon/Negev, Israel using GER 63 channel scanner data[J]. Int. J. Remote Sensing, 16(8): 3529~3553.
- Chen S P, Tong Q X and Guo H D. 1998. Mechanism of remote sensing information[M]. Beijing: Sci. Press(in Chinese).
- Cocks T D, Janssen R, Stewart A, Wilson I and Shields T. 1998. The HyMAP airborne hyperspectral sensor: The system, calibration and performance[A]. In: 1st EARSEL Workshop on Imaging Spectrometry[C]. 6~8, October, 1998, Zurich.
- Gan F P. 2004. Imaging-spectral information of hyperspectral remote sensing and its application [R]. Postdoctor Report. Peking Univ. (in Chinese with English abstract).
- Gan F P, Zhang Z G, Wang R S, Yang K, Liu S W and Yan B K. 2005. Spectral application in spectral reconstruction and validation based on hyperspectral imaging data[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 63(1): 12~16(in Chinese with English abstract).
- Monjardet B. 1997. Concordance between two linear orders: The Spearman and Kendall coefficients revisited[J]. J. Classification, 14(2): 269~297.
- Lian C Y, Zhang G and Yuan C H. 2005. Application of SWIR reflectance spectroscopy to pulang porphyry copper ore district, Yunnan Province[J]. Mineral Deposits, 24(6): 621~637(in Chinese with English abstract).
- Plakhov A. 2004. Relation between the Kendall and Spearman coefficients and concordance graphs[J]. J. Mathematical Sci., 120(1): 988~994.
- Xu J B, Feng S M and Sun Y H. 2001. Statistics[M]. Dalian: Dongbei Univ. Finance & Econ. Press(in Chinese).
- Yong W F. 2002. Investigation on characteristics of mafic-ultramafic rocks and its anomaly evaluation of Tudun area, Hami district of Xinjiang Uighur Autonomous Region[J]. Non-Ferrous Metals of Xinjiang Uighur Autonomous Region, (3): 1~6(in Chinese).

## 附中文参考文献

- 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 1998. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社.
- 甘甫平. 2004. 高光谱图谱信息及其应用[R]. 博士后出站报告. 北京大学.
- 甘甫平, 张宗贵, 王润生, 杨 凯, 刘圣伟, 闫珀琨. 2005. 光谱重建与光谱真实性检验中地物光谱的作用[J]. 国土资源遥感, 63(1): 12~16.
- 连长云, 章革, 元春华. 2005. 短波红外光谱矿物测量技术在普朗斑岩铜矿区热液蚀变矿物填图中的应用[J]. 矿床地质, 24(6): 621~637.
- 徐建帮, 冯叔民, 孙玉环. 2001. 统计学[M]. 大连: 东北财经大学出版社.
- 永文富. 2002. 新疆哈密土壤基性-超基性岩体特征及其含矿性研究[J]. 新疆有色金属, (3): 1~6.