矿化信息提取的混合蚀变遥感模型
——以鹰嘴山金矿区为例

杨 波[1],吴德文[2,3],陈云浩[1],李 京[1],朱谷昌[3]
(1. 北京师范大学资源学院,环境演变与自然灾害教育部重点实验室,北京　100875;2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京　100083;3. 有色金属矿产地质调查中心北京遥感中心,北京　065201)

摘要:在围岩蚀变类型丰富、成矿作用复杂的甘肃省鹰嘴山金矿区,依据矿化蚀变岩与其围岩的波谱特征差异,通过对地面实测光谱数据及其岩矿石多元数据的统计分析,建立混合蚀变遥感模型。选择最佳变量图像或变量图像组合,最终提取出该地区的混合蚀变遥感异常信息。实践证明,该方法在矿化信息的提取上效果显著。

关键词:混合蚀变;遥感模型;光谱;图像变量;异常信息;鹰嘴山
中图分类号:TP 753　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1001 - 070X(2005)01 - 0020 - 06

0 引言

研究表明,利用遥感多光谱波段组合运算,可以提取矿化蚀变异常信息。戈茨(1976)利用 1.6 μm 和 2.2 μm 两谱带反射比的比值,可以定量划分蚀变岩和非蚀变岩;艾布拉姆斯等人(1977)利用 TM 图像波段比值 + 主成分变换方法排除了植被覆盖干扰之后提取矿化蚀变信息[1]。Timothy K M 等(2002)利用 TM5/TM7、TM5/TM1、(TM5/TM4) × (TM3/TM4)假彩色合成图像,在阿拉伯—努比亚地盾的干旱气候下提取金矿化蚀变信息[2];马建文(1997)利用‘TM 掩膜 + 主成分变换 + 分类’方法识别提取矿化弱信息方法,在辽宁二道沟金矿提取 Fe^{3+} 蚀变火山碎屑岩信息,在华北地台北缘提取含金钾化带信息,均取得较好的效果[3]。但上述研究主要针对某种特定矿化蚀变进行信息提取,实际上,很多矿床都同时存在多种矿化蚀变类型,即混合蚀变。多种矿化蚀变类型混合分布地区,也常有矿床分布,故而混合蚀变也可以作为找矿的重要标志之一。本研究选择围岩蚀变类型复杂的甘肃鹰嘴山金矿作为研究区,通过分析地面实测光谱数据,探讨混合蚀变遥感模型的建立方法,最终建立了混合蚀变遥感模型,提取出与金矿化有关的遥感异常信息。

1 研究区概述

以 1∶10 万地形图石包城幅(编号 10 - 47 - 1)的鹰嘴山为研究区,地理坐标 96°00′E ~ 96°24′E,39°43′ N ~ 39°56′N。东西长 34 km,南北宽 24 km,面积 816 km^2。该区是近几年新发现的金矿集中区,金矿已达大型规模,且成因十分复杂,成矿期可划分为 5 个成矿阶段[4],是由各种不同类型的岩石经过多期次、多阶段强烈的构造变动,再加上硅化、铁化、绿泥石化、碳酸盐化、绢云母化等多种类型的围岩蚀变而形成,矿床类型基本定义为是与超基性岩有关的构造蚀变岩型金矿[5,6]。

2 研究方法与步骤

2.1 地物光谱测试及特征分析

采用美国 Analytical Spectral Devices 公司生产的 Field Spec FR - 3 型便携式野外波谱仪,测试波谱范围为 350 ~ 2 500 nm,即从可见光到短波红外,包括了 ETM^+ 1 ~ 5、7 共 6 个波段的波谱范围。岩矿石光谱测试分野外剖面(点)测试和场地测试。在鹰嘴山金矿进行岩矿石光谱测试,主要横切金矿带,由顶板—矿体—底板岩石进行。

收稿日期:2004 - 05 - 20;修订日期:2004 - 08 - 18
基金项目:国土资源大调查项目:用于地质矿产调查的‘遥感信息多层次分离提取技术’的研制(No. 20002010004106)。

通过对实测的各类矿化蚀变岩和非矿化围岩光谱曲线对比研究,发现矿化蚀变岩光谱曲线最显著的特征是整体反射率较高,存在蚀变矿物特征吸收谱带,主要是 0.9 μm 处含铁矿物吸收带、2.2 μm 处粘土矿物吸收带和 2.35 μm 处碳酸盐矿物吸收带；随各类蚀变作用强弱变化,光谱特征吸收带吸收程度不同；谱形起伏大；蚀变作用愈强,蚀变类型越复杂,曲线形态变化越大[7,8]。矿化蚀变岩光谱曲线以硅化、铁化和泥化为代表(图 1a,b)。

火山岩、板岩、灰岩和大理岩等未蚀变围岩在谱形上表现为整体反射率较低,起伏变化小,曲线的形态变化也不大,与硅化、铁化和泥化蚀变岩的光谱曲线有显著差别(图 1c,d)。

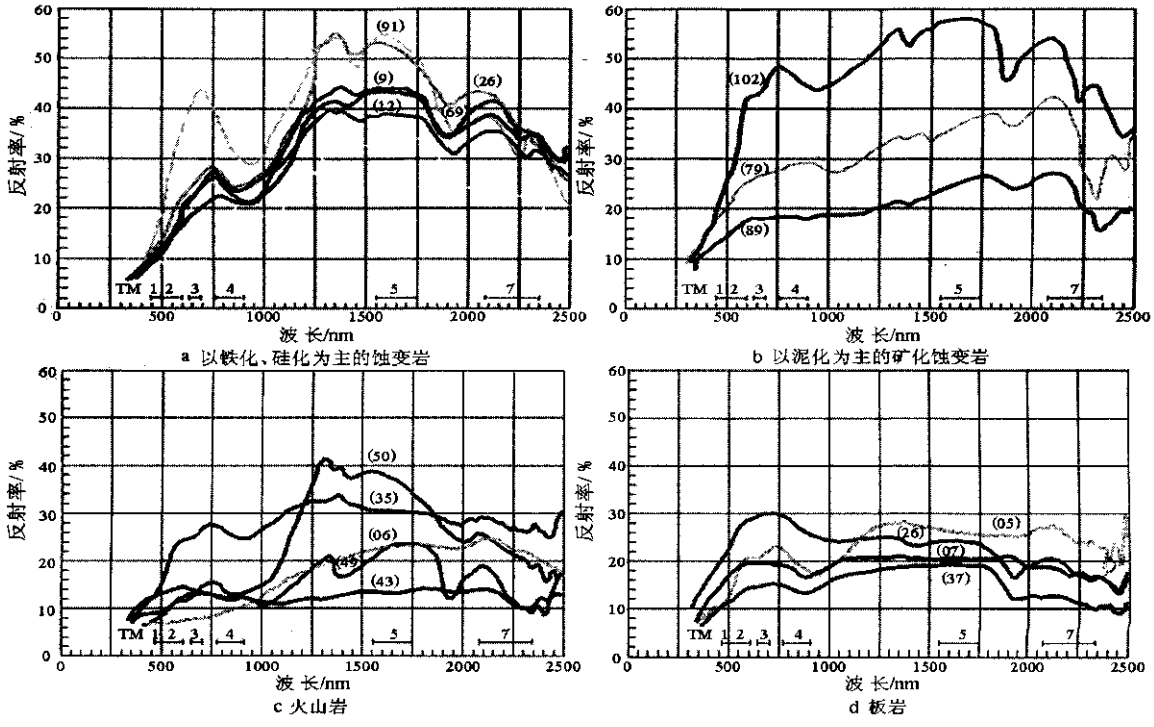


图 1　甘肃鹰嘴山测区各类矿化蚀变岩和非矿化围岩反射光谱曲线比较

2.2　混合蚀变遥感模型的建立

野外勘查发现，多种类型的围岩蚀变在金矿区随处可见,并有规律地混合在一起,仅用 TM 或 ETM⁺数据区分还有一定难度。故可以通过对地面实测光谱数据进行分析,建立混合蚀变遥感模型,以提取与金矿化有关的遥感异常信息。具体技术路线和流程如图 2 所示。

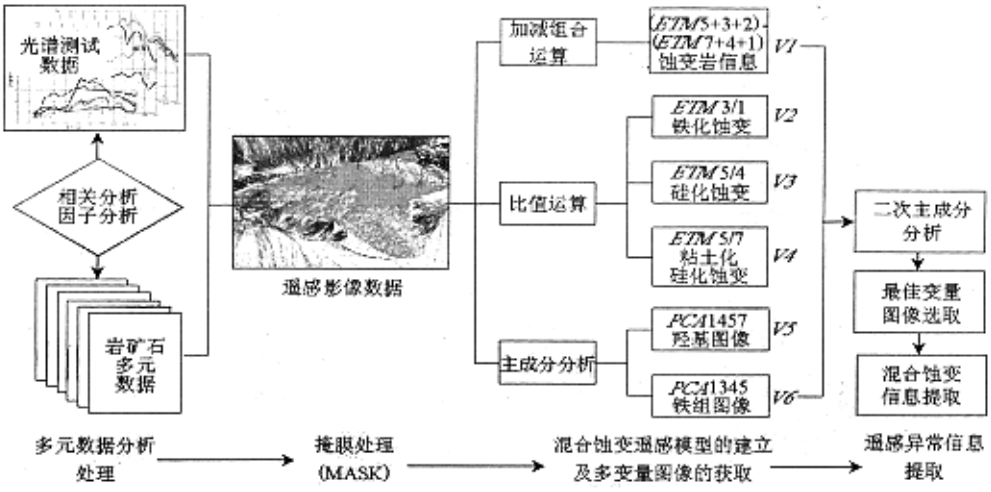


图 2　混合蚀变遥感模型的建立及混合蚀变遥感信息提取流程

运用类比方法,将该模型运用到遥感影像数据处理中。从遥感影像上选择感兴趣区域,对其进行掩膜处理,并按照所建模型,进行相关波段组合运算,提取单类矿化蚀变信息,最后对所获得的多变量图像($V1 \sim V6$)进行第二次主成分分析,从中选择出最能代表混合蚀变特征的最佳变量,对其进行混合蚀变信息提取。

2.2.1 多变量图像的获取

(1)波段加减组合运算。对矿化蚀变岩与围岩光谱曲线进行对比可知,矿化蚀变岩光谱曲线波动大,波段间差值大;而围岩光谱曲线,相对平缓,波段间差值较小。根据这一特征,采用波段加减组合运算,可以扩大矿化蚀变岩与围岩的亮度差,达到增强矿化蚀变岩信息的目的。矿化蚀变岩在 ETM^+ 5、3 波段为反射峰,与围岩差值大且高于围岩值,在 ETM^+1、4、7 波段为吸收峰,与围岩值接近。因此,采用$(B_5 + B_3 + B_2) - (B_7 + B_4 + B_1)$(用 $V1$ 表示,B 表示 ETM^+ 通道,为避免负值,加 B_2)进行计算。

(2)波段比值。根据研究区矿化蚀变岩光谱特征,选用 B_3/B_1 增强铁化蚀变信息(用 $V2$ 表示);B_5/B_4 增强硅化蚀变信息(用 $V3$ 表示);B_5/B_7 增强粘土化、碳酸盐化蚀变信息(用 $V4$ 表示)。

(3)对 ETM^+ 1、4、5、7 进行主成分分析,获取“羟基图像”(碳酸盐化、粘土化)[9]。表 1 是 ETM^+ 1、4、5、7 波段主成分分析结果,其中,PC4 特征向量载荷因子绝对值较大的是 ETM^+5 和 ETM^+7,分别为 0.683 44 和 −0.593 94,两者符号相反,而 ETM^+1 和 ETM^+4 的载荷因子小,说明 PC4 信息基本上来自 ETM^+5 和 ETM^+7,且 ETM^+5 为加信息,ETM^+7 为减信息,与粘土矿物和碳酸盐矿物存在 ETM^+5 高反射和 ETM^+7 强吸收相符(图 1b),突出了泥化蚀变信息。因此,取 PC4 作为“羟基图像”(以 $V5$ 表示)。

表 1 鹰嘴山地区 ETM^+1、4、5、7 波段特征向量及特征值

主组分	ETM^+1	ETM^+4	ETM^+5	ETM^+7	贡献率/%
*PC*1	0.276 67	0.427 73	0.623 06	0.593 55	97.94
*PC*2	0.403 25	0.739 33	−0.215 86	−0.494 15	1.31
*PC*3	−0.833 50	0.395 50	0.313 22	−0.225 28	0.57
*PC*4	0.257 13	−0.337 68	0.683 44	−0.593 94	0.17

(4)对 ETM^+ 1、3、4、5 进行主成份分析,获取“铁组图像”(铁化)[9]。由于 ETM^+1、3、4 波段能够区分岩石中铁、锰矿物和含铁、锰矿物的相对含量,ETM^+5 可识别含绿帘石族矿物的岩石。对 ETM^+1、3、4、5 波段进行主成分分析,分析结果见表 2,其中,*PC*3 和 *PC*4 以 ETM^+1、3、4 组合信息为主,ETM^+5 信息量小,从特征向量载荷因子大小和数值符号及通过对主组分图像进行增强处理、比较发现,*PC*3 更能突出铁化蚀变信息。因此取 *PC*3 为“铁组图像”(用 $V6$ 表示)。

表 2 鹰嘴山地区 ETM^+ 1、3、4、5 波段特征向量及特征值

主组分	ETM^+1	ETM^+3	ETM^+4	ETM^+5	贡献率/%
*PC*1	0.536 31	0.464 46	0.532 16	0.462 02	99.42
*PC*2	−0.664 27	0.356 96	−0.188 35	0.629 16	0.51
*PC*3	−0.035 50	0.809 82	−0.190 16	−0.553 87	0.04
*PC*4	−0.519 48	−0.032 29	0.803 23	−0.289 69	0.03

2.2.2 最佳变量图像的选择

图 3 为掩膜后信息增强处理的 $V1 \sim V6$ 图像,在

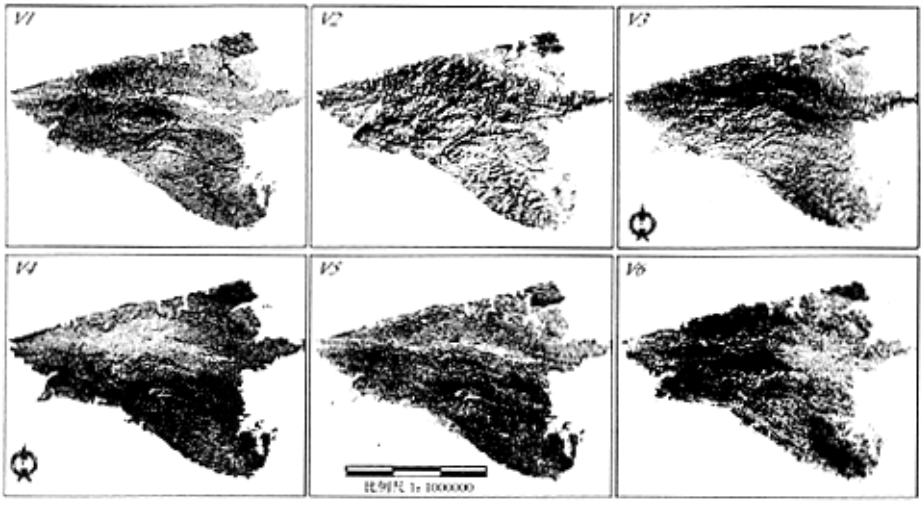


图 3 鹰嘴山地区经掩膜处理后的信息增强图像($V1 \sim V6$)
(图中小框内为金矿区)

6 种派生图像变量中,除 $V2(B_3/B_1)$ 在突出铁化信息的同时更突出了地形信息外,其它图像变量都突出了已知矿化带的特征影像,对矿化蚀变信息增强具有明显效果。同时,它们各自对其它信息产生了不同程度的增强和压抑。最显著的如 $V4$ 增强了鹰嘴山北部和南部沟谷内第四系沉积物信息(多为粘土类和碳酸盐类物质),对侵入岩信息有所压抑;$V6$ 在整体上突出了富含铁镁质的超基性侵入岩信息,使侵入岩蚀变信息受到抑制;$V1$ 和 $V5$ 包含岩石信息量大,突出了横贯鹰嘴山东西的超基性辉长岩体的侵入岩信息,并与其它岩石信息构成负相关关系。$V3$ 突出了含矿寒武系中统黑茨沟组岩石信息,这正是硅化蚀变比较明显的地区。

图 4 为野外实勘矿化蚀变岩、凝灰岩和花岗岩对应于遥感图像上的像元,对其进行采样统计,最后得到了采样像元在各图像变量上的灰度均值变化曲线。图中,矿化蚀变岩的亮度值在图像上均高于其它两类岩石,差值最大的是 $V1$、$V2$ 和 $V3$,其次是 $V5$ 和 $V6$,$V4$ 上 3 种岩石的亮度值很接近,对增强蚀变岩信息效果不明显。

为了消少干扰因素,增强混合蚀变异常信息,再次对 $V1 \sim V6$ 等 6 个变量图像进行第二次主成分分析,变量图像的二次 PCA 统计特征见表 3 和表 4。

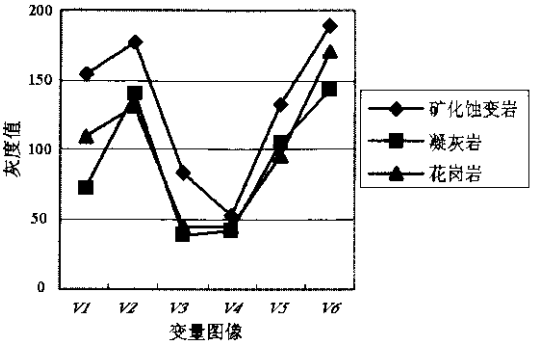


图 4　矿化蚀变岩及其围岩在各图像变量上灰度变化

表 3　$V1 \sim V6$ 第二次主成分分析特征变量及特征值①

主组分	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$	$V6$	贡献率/%
PC_2^1	−0.045 1	−0.859 20	−0.426 37	0.278 65	0.003 53	−0.017 07	58.84
PC_2^2	−0.691 6	−0.284 53	0.256 44	−0.602 0	−0.057 52	−0.096 08	21.20
PC_2^3	−0.427 7	0.399 19	−0.795 10	−0.046 3	−0.093 46	0.120 91	10.98
PC_2^4	−0.549 6	0.134 70	0.270 72	0.722 46	0.061 92	−0.284 12	8.62
PC_2^5	0.1859 7	0.048 64	−0.173 50	−0.137 8	−0.281 12	−0.913 74	0.33
PC_2^6	−0.007 1	−0.030 81	0.129 91	0.129 74	−0.951 36	0.245 38	0.04

① PC_2^x 表示经第二次主成分分析后的第 X 主分量。

表 3 中,PC_2^1 中 $V2$ 的载荷因子最大,其次为 $V3$ 和 $V4$,$V5$ 和 $V6$ 较小,其中 $V3 \sim V5$ 为正号,其它为负号。因此,PC_2^1 突出的是铁化信息。对照表 4 可知,$V1$ 与 $V3$ 为负相关且相关性小,与其它变量相关性均相对较大,这与 $V1$ 包含大量的地形和岩石信息有关。PC_2^2 主要反映 $V1$、$V2$、$V3$、$V4$ 的铁化和粘土化蚀变信息;PC_2^3 中 $V3(B_5/B_4)$ 的载荷因子最大,并与 $V2$ 呈高度负相关,主要反映硅化和铁化的混合信息;PC_2^4 主要反映 $V4$ 的粘土化信息;在 PC_2^5 和 PC_2^6 中,$V6$ 和 $V5$ 值分别高达 −0.913 74 和 −0.951 36,主要反映了 $V6$ 的铁化信息和 $V5$ 的泥化信息。

通过对该区含金岩矿石标本的鉴定,发现硅化和铁化混杂得越厉害,其成矿的可能性就越大。综上所述,PC_2^3 能够最好地反映出与矿化有关的硅化和铁化混合蚀变信息。因此,选择 PC_2^3 作为混合蚀变信息提取的最佳变量图像。

表 4　变量 $V1 \sim V6$ 数据统计特征

变量	$V1$	$V2$	$V3$	$V4$	$V5$	$V6$
均值	15.649	27.830	17.993	16.618	2.065	4.713
标准偏差	91.559	174.829	149.038	83.221	127.000	127.150
$V1$	1.0	0.148 962	−0.010 996	0.308 435	0.490 341	0.485 295
$V2$		1.0	0.553 367	−0.349 588	−0.049 540	0.204 231
$V3$			1.0	−0.449 446	0.252 723	−0.341 114
$V4$				1.0	0.591 841	−0.176 677
$V5$					1.0	−0.143 521
$V6$						1.0

3 混合蚀变信息提取结果

对最佳变量图像 PC_2^3 处理在 PCI 中进行。因遥感异常在图像中的灰度值很低,故先对整个图像进行求反、线性拉伸及扩大图像对比度处理,然后,进行 11 像元 × 11 像元均值滤波处理,最后,对图像进行最优密度分割,得到一幅包含混合蚀变异常信息、不同程度分级的彩色密度分割图像(插页彩片 15)。

插页彩片 15 中,红、黄、青、蓝 4 种颜色依次代表混合蚀变程度高、次高、中和低。对于具体成矿部位的选定,应和实际地质条件和成矿背景结合起来考虑。混合蚀变遥感异常信息提取结果见表 5。

表 5 MASK1 混合蚀变信息异常提取结果

强度分级	灰度值	赋色	像元数/个	面积/km^2	占 MASK1 面积/%
Ⅰ	156 ~ 255	红	60416	13.594	2.433
Ⅱ	131 ~ 155	黄	27 493	6.186	2.032
Ⅲ	107 ~ 130	青	13 388	3.012	0.989
Ⅳ	75 ~ 106	蓝	416 291	3.666	1.204
合计	75 ~ 255		117 588	26.457	6.658

4 结果验证

对最终提取出的鹰嘴山金矿区混合蚀变遥感异常信息(插页彩片 15)进行实地勘查,发现鹰嘴山金矿带和黑峡口锰矿在图像上的异常显示与实际情况吻合得较好,异常蚀变矿物以蚀变辉长岩为主,普遍含铬铁矿与磁铁矿,部分还有锰矿存在,证明该方法确实突出了该地区硅化和铁化异常信息。此外,在其外围还发现了几条与线环构造和岩体密切相关的异常带,这对于指导矿区外围的二轮找矿和发现新矿区有很好的参考价值。

5 讨论

该混合蚀变遥感模型是由各单类矿化蚀变遥感模型复合而成,并无其独立的数学表达形式,作者在此提出,期望起到抛砖引玉的作用;另外,由于遥感的‘异常信息’往往不在光谱的高值区,这就增加了“异常”分离的难度,也给提取出的‘异常信息’如何更好地表示和解释带来了挑战。

致谢:本项研究工作得到了有色金属矿产地质调查中心北京遥感中心和植起汉教授的大力支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。

参考文献

[1] 地质部情报研究所. 遥感专辑——矿物岩石的可见 - 中红外光谱及其应用[M]. 北京:地质出版社,1980.

[2] Timothy M Kusky, Talaat M Ramdadan. Structural controls on Neoprotero zoic mineralization in the South Eastern Desert, Egypt: an integrated field, Landsat - TM, and SIR - C/X SAR approach[J]. Journal of African Earth Sciences, 2002,35:107 - 121.

[3] 马建文. 利用 TM 数据快速提取含矿蚀变带方法研究[J]. 遥感学报[J]. 1997,1(3):208 - 213.

[4] 殷先明. 甘肃省岩金矿床地质[M]. 兰州:甘肃省科学技术出版社,2000.

[5] 丁启福. 甘肃省北祁连西段鹰嘴山金矿的成因特征[J]. 甘肃地质学报,1999,8(C00):32 - 35.

[6] 毛景文,等. 甘肃鹰嘴山金矿床地质和成矿地球化学[J]. 矿床地质,1998,17(4):297 - 306.

[7] 吴德文,朱谷昌,吴健生,等. 青海芒崖地区岩石光谱特征分析及应用[J]. 国土资源遥感,2001,(4):28 - 34.

[8] 陈松岭,卢福宏,高光明,等. 华北地台北缘内蒙古段金矿围岩蚀变的遥感识别[J]. 国土资源遥感,2001,(2):13 - 18.

[9] 阎积慧,等. TM 图像地质应用原理与方法[M]. 北京:冶金工业出版社,1995.

A MIXED ALTERATION REMOTE SENSING MODEL FOR EXTRACTING MINERALIZATION INFORMATION: A CASE STUDY OF THE YINGZUISHAN GOLD DEPOSIT

YANG Bo[1], WU De - wen[2,3], CHEN Yun - hao[1], LI Jing[1], ZHU Gu - chang[3]

(1. *College of Resources Science and Technology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of the Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*; 2. *School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*; 3. *Remote Sensing Centre of China Non - ferrous Metals Resource Geological Survey, Beijing* 065201, *China*)

Abstract: The Yingzuishan gold deposit in Gansu Province is characterized by different wall rock alterations and complicated mineralizations. According to the difference in spectral characteristics between mineralized alteration

rocks and wall rocks, the authors made correlation analysis and factor analysis between the in – situ measured spectral data and multivariate data of rocks and minerals, set up remote sensing models for mixed alteration, and selected the best variable or variable unit. The abnormal information of mixed alteration was also extracted. Practice has proved that such a method is effective in extracting mineralization information.

Key words: Mixed alteration; Remote sensing model; Spectrum; Image variogram; Abnormal information; Yingzuishan

第一作者简介：杨 波(1974 –),男,中南大学遥感地质专业硕士毕业,现为北京师范大学资源学院在读博士,主要从事遥感与地理信息系统在资源和灾害动态监测方面的研究,已发表论文 6 篇。

(责任编辑：周树英)

消息报道

“ 多多合作 ”协调小组第三次会议在香港成功举行

2005 年 1 月 20 ~ 22 日,中国遥感应用协会和香港中文大学地球信息科学联合实验室、台湾大学空间资讯研究中心在香港召开了“ 多多合作 ”协调小组第三次会议。农业部、国土资源部、中国科学院、国家海洋局、中国地震局、中国气象局、中国资源卫星应用中心、中国遥感应用协会和山西、湖南、西藏、江西、江苏等省(区)有关单位代表,同香港中文大学、台湾大学代表共 33 人,交流了一年来多云多雨地区遥感应用和研究的进展情况。

香港中文大学针对多云多雨地区遥感信息源的需求,在中央政府和特区政府大力支持下,建设香港中文大学遥感卫星地面站,该地面站将于 2005 年 6 月投入试运行,首批接收欧空局 ENVISAT ASAR 数据,接收范围覆盖了我国南方及东南亚多云多雨地区,可为多云多雨地区遥感应用与研究提供不同分辨率(5 ~ 1 000m)的数据源。香港中文大学遥感卫星地面站负责人林珲教授表示,对“ 多多合作 ”协调小组成员单位承担的由协调小组商定的合作项目,以优惠价格提供数据和高质量的技术服务,并承诺为来港参与合作项目的人员提供后勤保障(办公室、住宿和医疗等)和生活补贴。台湾大学朱子豪教授介绍了台湾地区业务性遥感应用成果;多家科研机构对多云多雨地区的遥感问题亦已有多项关键技术研究成果,可供大家共享。中国资源卫星应用中心副主任闵祥军研究员介绍了 CBERS – 02 星 CCD 相机绝对辐射标定试验成果,同时展示了 CBERS – 02 星 CCD 数据在印度洋地震海啸监测中发挥的作用,并建议在“ 多多合作 ”中利用 CBERS 卫星数据配合其他类型遥感数据发挥更大作用。中国地震局王晓青研究员在印度洋大地震海啸灾情和中国大陆地震防灾减灾工作介绍的基础上,分析了中国地震海啸发生的可能性,建议建立地震海啸预警系统,并在“ 多多合作 ”框架内开展基于遥感的多灾种监测预警有关的合作研究。

与会专家认为,包括遥感卫星、通讯卫星、导航定位卫星和地理信息系统技术在内的空间技术,在印度洋(多云多雨地区)大地震海啸的救灾中起到了重要的作用,建议在“ 多多合作 ”协调小组中开展空间技术在地震海啸预警中的应用研究,发挥促进我国地震海啸预警系统建立的作用。

会议要求协调小组各成员单位,对已确定的合作项目抓紧实施,争取在 2005 年 10 月前提交一批研究成果,在中国遥感应用协会 2005 年年会上进行交流。为了建立持续稳定的“ 多多合作 ”机制,进一步确认了“ 多多合作 ”协调小组的成员单位。会议同意在北京师范大学珠海分校建立多云多雨地区遥感应用培训中心,重点培训雷达遥感应用人才。

(胡如忠供稿)

加快开发西部地区优势国土资源
促进西部大发展



彩片 10　方解石信息提取(红色)



彩片 11　绿泥石信息提取(绿色)



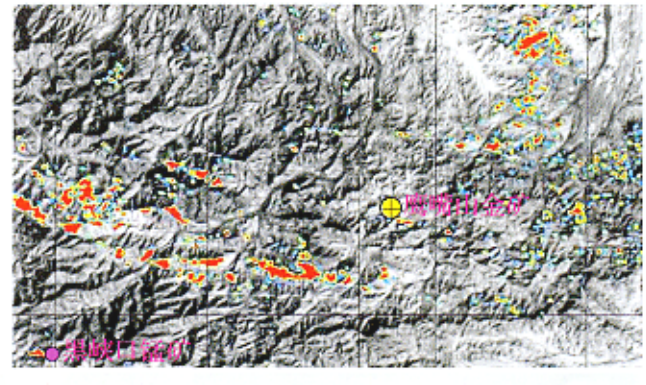
彩片 12　绢云母信息提取(蓝绿色)



彩片 13　杭州湾地区史前文化遗址分布特征(遗址位置引自资源[6])



彩片 14　跨湖桥附近卫星影像



彩片 15　矿区及外围彩色密度分割图像　(为避免遮掩蚀变信息，注记“鹰嘴山金矿”和“黑峡口锰矿”分别向东做了适当位移)

(彩片 13、14 见王永江，等一文；彩片 15 见杨波，等一文)