1000-0569/2009/025(04)-0971-76 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

三种不同类型矿床分类型蚀变遥感异常提取及其应用*

姚佛军[1,2] 杨建民[2] 张玉君[3] 耿新霞[2]

YAO FoJun[1,2], YANG JianMin[2], ZHANG YuJun[3] and GENG XinXia[2]

1. 中国地质大学,地球科学与资源学院,北京 100083
2. 中国地质科学院矿产资源研究所,成矿作用与资源评价重点开放实验室,北京 100037
3. 中国国土资源部航天遥感物探中心,北京 100083

1. *School of the Geosciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Metallogeny and Resources Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100037, *China*
3. *China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Land and Resources, Beijing* 100083, *China*

2008-11-17 收稿, 2009-01-20 改回.

Yao FJ, Yang JM, Zhang YJ and Geng XX. 2009. Extraction of remote sensing alteration anomalies of three types of ore deposits and its application. *Acta Petrologica Sinica*, 25(4):971 – 976

Abstract Application of remote sensing alteration anomalies has made great progress in survey of mineral resources and a number of ore occurrence have found by using of remote sensing technology. However, the range of anomalies given this approach was too bigger and it was not specific. In general, the similar deposits had the similar types of the characteristics of the spectrum of their altered rocks. If these characteristics of the deposits were used in extraction of remote sensing alteration anomalies to limit range of anomalies by the spectrum characteristics of altered rocks of deposits, remote sensing alteration anomalies could be extracted with having special target in order to identify remote sensing alteration anomalies of different types of deposits. This approach was used in the East Tianshan region and the East Junggar region with very good results and a number of ore occurrence have been found.

Key words Remote sensing alteration anomalies; Spectrum; Ore deposit-type; Altered rocks

摘 要 蚀变遥感异常在矿产资源勘察中已经取得了很大的进步,目前利用遥感技术已经发现了多个矿(化)点。但这种方法给出的异常范围大,没有针对性。相似的矿床类型蚀变岩波谱特征相似,如果利用这个特点,在异常提取上限定矿床类型蚀变岩的波谱特征,有针对性的提取异常,从而达到分类型矿床蚀变遥感异常的识别。采用这种方法在东天山地区和东准噶尔地区取得了非常好的效果,已经发现了多个矿(化)点。

关键词 蚀变遥感异常; 波谱; 矿床类型; 蚀变岩

中图法分类号 P627

1 引言

遥感(Remote Sensing)广义上泛指从远处(不接触)探测、感知物体或事物的技术。它在20世纪60年代发展起来的一门高新技术,所使用的媒介一般是电磁波,地物在高于绝对零度(273.16℃)都具有一定的反射、吸收、透射及辐射电磁波的特性(吕国楷和洪启望,1994)。利用遥感技术进行蚀变遥感异常提取开始于国外,1977年,Abrams等人利用陆地卫星多光谱(0.5~1.1μm)提取含三价铁的褐铁矿蚀变岩(Abrams *et al.*, 1977),1977~1979年,Hunt (1977, 1979)总结了含羟基矿物的在可见光到短波红外的波谱响应,之后,逐渐完善多光谱蚀变遥感异常的提取(Rutz-Armenta and Prol-Ledesma, 1998; Tangestani and Moore, 2001; Crowley

* 本文受国家科技支撑计划重点项目(2006BAB07B07-02)、国家重大基础研究计划项目(2007CB411406)、地质调查工作项目(1212010818018)与中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(K2007-2-7)联合资助.

第一作者简介: 姚佛军,男,1980年生,博士,研究实习员,主要从事遥感找矿方向研究,E-mail: fjyao@sina.com

万方数据

et al., 2003),特别是1989年,Crosta等人利用主成分分析法从TM成功提取了巴西Minais Gerais半干旱地区铁染和羟基蚀变异常,所采用的波段组合一直为多光谱异常提取所推崇(Crosta and Moore, 1989; Loughlin, 1991)。我国这方面工作开始于90年代,之后发展了一系列方法(何国金等,1995;马建文, 1997;张远飞和吴健生,1999;刘庆生等,1999;刘素红等,2000;刘成等,2003),特别是以张玉君等为主研究并制定了"去干扰异常主分量门限化技术"(张玉君等,2002,2003),在东天山地区取得成功的应用(杨建民等,2003,2007a,b;耿新霞等,2008),并发现了多个矿(化)点(杨建民等,2007a,b;姚佛军,2008)。我们一般利用主成分分析方法提取出来的异常往往信息量很大,为了使异常有针对性,笔者曾研究矿床分类型蚀变遥感异常的提取,这种提取是基于相似的地物有相似的光谱特征(取最大相关性)。本文从蚀变岩波谱特征阐述矿床分类型蚀变遥感异常提取及其应用。

2 物质内部特征和电磁波的相互关系

我们知道,物质都是由原子或分子(离子、基团)构成的,如果电磁波照射到处于低能级(E1)状态的原子(或分子、离子、基团)上,其能量(λH)的一部分就会被吸收,造成能级的提高(E2),使电子向上一级轨道上移动,ΔE = E2- E1 = hc/λH。相反,如果原子从高能级(E2)向低能级(E1)变化时,就能辐射出电磁波来(λH)。表1阐述了物质内部状态与电磁能量的关系,如果原子核内部发生相互作用,相应吸收或辐射伽马射线,对应能量大约为$10^7 \sim 10^5$eV,内层电子发生电离作用,相应吸收或辐射X射线,对应能量大约为$10^4 \sim 10^2$eV,外层电子发生电离作用,相应吸收或辐射紫外线,对应能量为$10^2 \sim 4$eV,外层电子收激发,则相应吸收或辐射可见光,能量为4~1eV,分子振动或晶格振动吸收或辐射红外线,能量为$1 \sim 10^{-5}$eV,分子旋转、反转或电子自旋和磁场相互作用,对应吸收或辐射微波,能量为$10^{-3} \sim 10^{-5}$eV,电磁场的相互作用吸收或辐射米波,对应能量为10^{-7}eV。

表1 物质内部状态与对应电磁波及能量关系

Table 1 Relationship in electromagnetic waves, state of matter and its energy

内部状态	能量(电子伏eV)	对应的电磁波
原子核内部相互作用	$10^7 \sim 10^5$	伽马射线
内层电子的电离作用	$10^4 \sim 10^2$	X射线
外层电子的电离作用	$10^2 \sim 4$	紫外线
外层电子的激发	4~1	可见光
分子振动,晶格振动	$1 \sim 10^{-5}$	红外线
分子的旋转及反转	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	微波
电子自旋和磁场的相互作用	$10^{-3} \sim 10^{-5}$	微波
电磁场的相互作用	10^{-7}	米波

根据量子物理理论(王正行,2008),如果一个分子有N个原子组成,就有3N-6个正常的振动方式,即基频,基频可以组成合频和倍频。如水(H_2O)有3个基频振动:O-H对称伸缩振动2.738μm,H-O-H弯曲振动6.270μm,O-H非对称伸缩振动2.663μm。能产生倍频1/(2×(1/2.738)) = 1.369μm,合频1/(1/2.738 + 1/6.27) = 1.906μm。CO_3^{-2}有3个基频:9.407μm(对称伸缩振动),11.4μm(平面外弯曲振动),7.067μm(非对称伸缩振动)和14.7μm(平面内弯曲振动),可求出其合频为1/(1/9.407 + 2/7.067) = 2.57μm,倍频为1/(3/7.067) = 2.356μm。含OH矿物吸收可在2.67~3.45μm之间,OH弯曲振动出现在10μm,对于硅酸盐,通常叠加在Si-O强基频上,对与含羟基矿物,OH弯曲振动加上OH的伸缩振动,使得许多矿物的诊断性吸收出现在2.2~2.3μm之间。

3 实测光谱分析

关于光谱的研究,Hunt and Salisbury (1976a, b)、Hunt (1977, 1979)已经作了非常详细的工作。为了利用遥感进行蚀变遥感异常的分类型提取,笔者在2004-2006年对蚀变遥感异常区分矿床能力作了初步研究,总结了中国铜矿床的围岩蚀变特征,以东天山地区黄山东铜镍矿、沙泉子铅锌矿、天目金矿为例研究了镁铁质铜镍矿、矽卡岩铅锌矿、蚀变岩金矿等不同矿床类型的蚀变围岩的光谱特征,发现三种类型矿床光谱特征不同(图1)。

4 蚀变矿物组合分析

从上述可以看出,三种类型矿床蚀变岩石的波谱曲线有着明显的差别,实际上引起蚀变岩石波谱特征的差别是由于蚀变矿物组合不同。我们对所测波谱应用PimaView软件进行分析,分别得出三种不同类型矿床的蚀变矿物组合。

黄山东铜镍矿区内出露苦橄质拉斑玄武岩浆或橄榄拉斑玄武质岩浆分异的镁铁-超镁铁杂岩(毛景文等,2002;Qin et al., 2003;韩宝福等,2004)。利用波谱根据统计规律分析出黄山东镁铁-超镁铁岩铜镍矿的七种蚀变矿物:绿泥石、伊利石、方解石、透闪石、蛇纹石、绿帘石、角闪石。

沙泉子铅锌矿区内出露地层主要为中元古界蓟县系卡瓦布拉克组的一套碳酸盐岩建造(肖昱,2003;花林宝,2001;花林宝等,2002;方维萱等,2003)。利用波谱根据统计规律分析出沙泉子铅锌矿的六种蚀变矿物:方解石、蛇纹石、绿泥石、伊利石、白云石、角闪石。

天目金矿区内出露的地层主意为一套中石炭统梧桐窝子组的灰绿色玄武凝灰岩、硅质岩、凝灰岩、角岩化玄武质凝灰岩等(据新疆地矿局第六地质大队①)。利用波谱根据统计规律分析出天目金矿六种蚀变矿物:蒙脱石、蛇纹石、埃洛石、黑云母、透闪石、绿脱石。

① 新疆地矿局第六地质大队. 1988年. 新疆哈密黄山东铜镍矿区初查—详查地质报告

万方数据

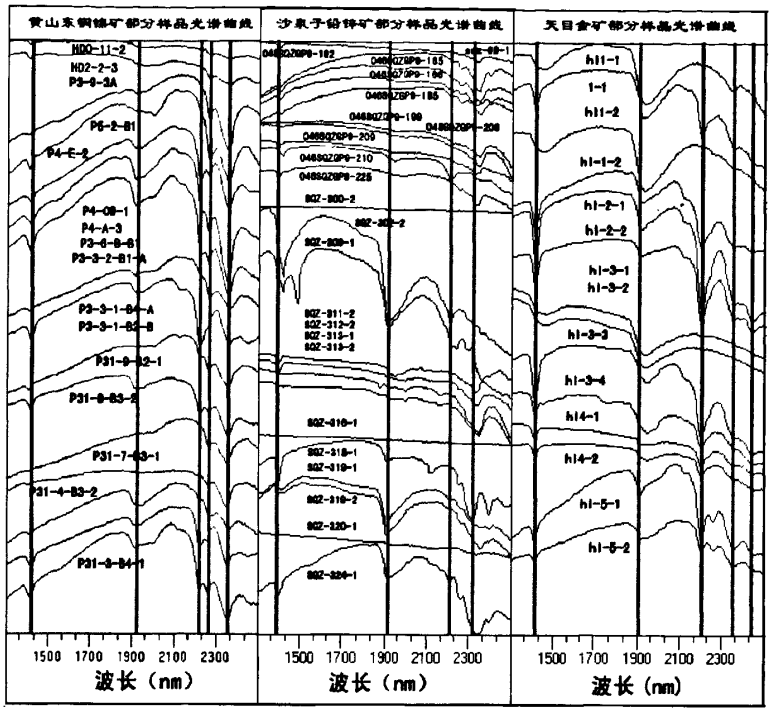


图 1 不同类型矿床光谱特征对比图

Fig. 1 The compare with the spectral charactreristics of different types of deposits

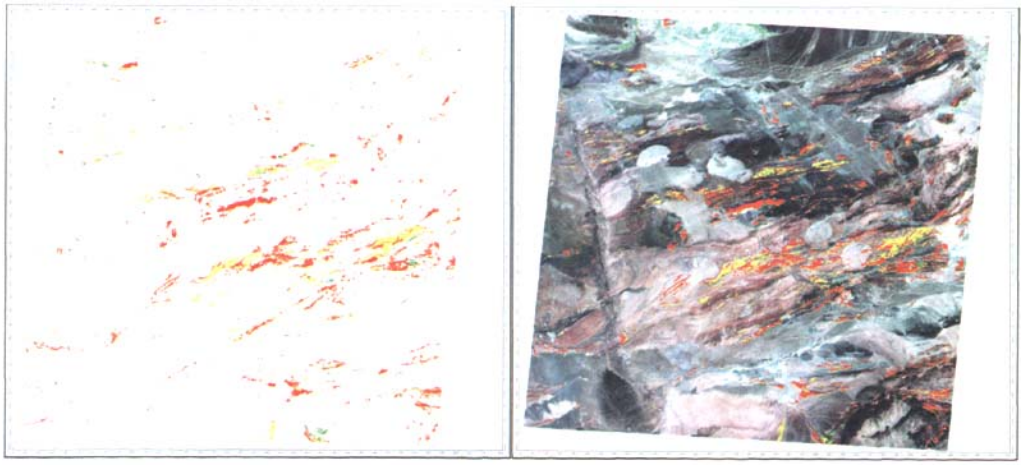


图 2 13831 景 ETM⁺ 整景提取不同类型矿床蚀变遥感异常区分图

左边为去掉背景的异常图;右边为有背景的异常图;绿色提取的是黄山东型铜镍矿蚀变遥感异常;红色提取的是沙泉子型铅锌矿蚀变遥感异常;黄色提取的是天木型金矿蚀变遥感异常

Fig. 2 The remote sensing alteration anamolies of different types of deposits in ETM⁺ data (13831)

5 典型矿床分类型蚀变异常提取结果

2006 年,我们以地物光谱测试为基础,分别选用了 ASTER 和 ETM 遥感数据,有针对性地提取了黄山东型铜镍矿、沙泉子型铅锌矿和天木金矿三种不同类型矿床的蚀变遥感异常。我们选用分类系数 2 作为完全不相关,铜镍矿、铅锌矿和金矿它们之间两两的分类系数分别为 1.997554、1.999857 和 1.990492,表明矿床类型区分非常好(图 2)。

万方数据

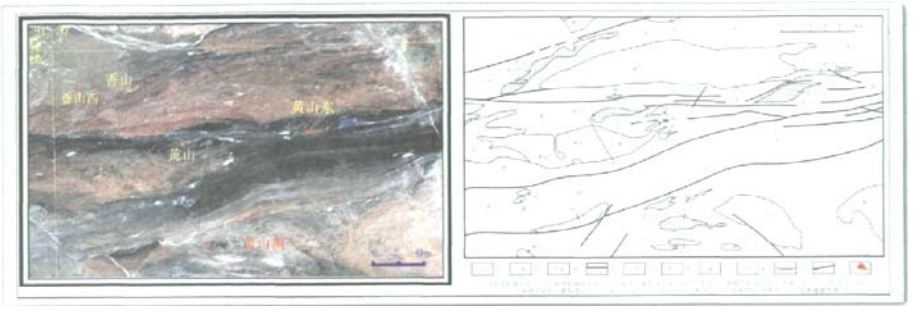


图3 黄山东型铜镍矿蚀变遥感异常与地质略图对比

上图为蚀变遥感异常图(红色是提取出的异常),下图为地质略图(毛景文等,2002;白云来,1993及新疆六队改)

Fig. 3 The compare with two maps of remote sensing alteration anamolies and geology in Huangshandong copper-nickel mine (after Mao *et al.*, 2002; Bai, 1993)

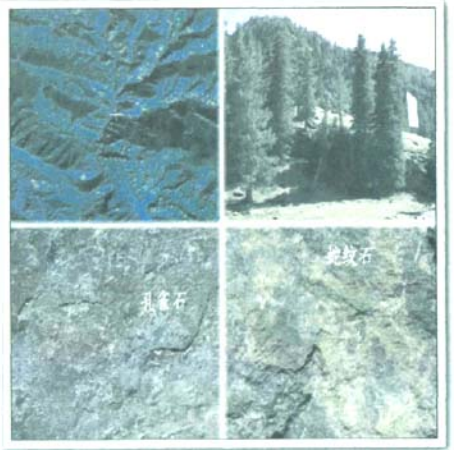


图4 2008年发现的铜矿化点

Fig. 4 The newly copper mine point found in 2008

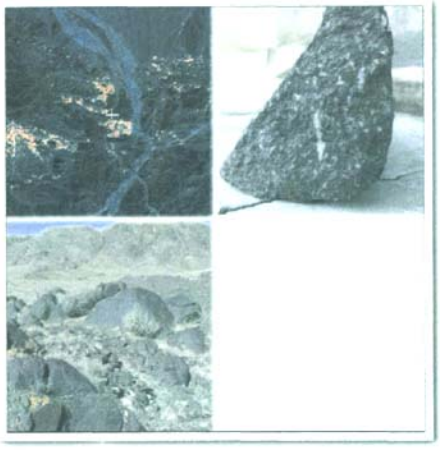


图5 2008年东准噶尔新发现的基性岩

Fig. 5 The newly mafic rocks found in East Junggar in 2008

图3为黄山东矿田蚀变遥感异常分布情况,从图中可以看出,蚀变遥感异常和已知矿床对应非常好。

6 黄山东超铁镁质铜镍矿蚀变遥感异常的应用及新发现的矿(化)点

2004年7月,由矿产资源研究所杨建民等人在坡北地区外围遥感异常检查中,对罗东岩体进行了实地验证,发现了罗东含矿基性-超基性杂岩体。在橄榄岩中发现了孔雀石,在橄榄辉石岩中发现了褐铁矿以及金属硫化物。矿化蚀变较强地段主要集中于岩体内接触带及橄榄-辉石岩相中,伴随有少量的孔雀石以及金属硫化物等产出。野外观察发现的蚀变有绿帘石化,绿泥石化或纤闪石化、伊丁石化、蛇纹石化(杨建民等,2007a,b)。

2008年9月,笔者与新疆地勘局第六地质队李磊等人在新疆东准噶尔异常查证时,发现一处基性岩体,一个铜矿点,见图4,图5。

7 结论

不同类型矿床分类型蚀变遥感异常信息的提取,能够去掉与某种类型矿化信息没有关系的干扰信息,而且只针对某种类型矿床进行蚀变遥感异常的提取,有了明确的针对性。适合应用于干旱半干旱地区进行矿产普查的遥感扫面、利用这种技术进行靶区的优选以及找矿,有重要的经济价值。

致谢 感谢付碧宏研究员审阅稿件,提出重要修改建议,使本文得以完善。

万方数据

References

Abrams MJ, Ashley RP, Brown LC, Goetz AFH and Kahle AB. 1977. Mapping of hydrothermal alteration in the cuprite mining district, Nevada, using aircraft scanning images for the spectral region 0.46 to 2.36mm. Geology, 5: 713 - 718

Bai YL. 1993. Geological-geochemical characteristics and tectonic significance of the ophiolites block in huangshan area, Xinjiang. Xinjiang Geology, 11 (1): 34 - 42 (in Chinese with English abstract)

Crosta A and Moore J. 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerais State, Brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain. In: Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, 1173 - 1187

Crowley JK, Hubbard BE and Mars JC. 2003. Hydrothermal alteration on the cascade stratovolcanoes: A remote sensing survey. Geological Society of America Abstracts with Programs, 35(6):552

Fang WX, Xu J, Liu ZT and Li FH. 2003. Optimization and queuing of rock fragment geochemical anomalies in the Kumutage-Shaquanzi area of Eastern Xinjiang. Geology and Prospecting, 39(5):57 - 62 (in Chinese with English abstract)

Geng XX, Yang JM, Zhang YJ and Yao FJ. 2008. The application of ASTER remote sensing data for extraction of alteration anomalies information in shallow overburden area: A case study of the Baoguto porphyry copper deposit intrusion in western Junggar, Xinjiang. Geological Review, 54 (2): 184 - 192 (in Chinese with English abstract)

Han BF, Ji JQ, Song B, Chen LH and Li ZH. 2004. SHRIMP U-Pb zircon age of the mafic-ultramafic rocks and geological significance in Kalatongke and Huangshan, Xinjiang. Chinese Science Bulletin, 49 (22): 2324 - 2328 (in Chinese)

He GJ, Hu DY, Chen ZJ and Lei LP. 1995. Extracting gold mineralized information directly from TM image. Remote Sensing Technology and Application, 10(3):51 - 54(in Chinese with English abstract)

Hua LB, Yang X, and Zhong H. 2002. Geochemical characteristics and ore-finding forecast of "Shaquanzi" area, Eastern Tianshan, Xinjiang. Mineral Resources and Geology, 16(5):291 - 296 (in Chinese with English abstract)

Hua LB. 2001. Element geochemistry subarea and ore-finding direction of metallogenic district, Yamansu- Shaquanzi, eastern Tianshan, Xinjiang. Journal of Guilin Institute of Technology, 21(2):99 - 103 (in Chinese with English abstract)

Hunt GR. 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near- infrared Geophysics, 42(3): 501 - 513

Hunt GR. 1979. Near-infrared (1.3 ~ 2.4μm) spectra of alteration minerals -potential for use in remote sensing. Geophysics, 44(12): 1974 - 1986

Hunt GR and Salisbury JW. 1976a. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, XI. Sedimentary Rocks, Mod, 1(5): 211 - 217

Hunt GR and Salisbury JW. 1976b. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, XII. Metamorphic Rocks, Mod, 1(5):219 - 228

Liu C, Wang D and Li XM. 2003. Extracting clay alteration information of medium vegetation covered areas based on linear model of spectral mixture analysis. Remote Sensing Technology and Application, 18 (2): 131 - 137 (in Chinese with English abstract)

Liu QS, Yan SX, Ma CF and Lin QZ. 1999. Remote sensing extraction of piedmont potassic alteration zone in Hadamengou gold deposit district, Inner Mongolia autonomous region. Remote Sensing Technology and Application, 14(3):7 - 11(in Chinese with English abstract)

Liu SH, Ma JW, and Lin QZ. 2000. Depicting the hydro-thermal alterations of high mountains in multi-spectral Data via gram-schmidt projection method. Geology and Prospecting, 36(5): 62 - 65 (in Chinese with English abstract)

Loughlin WP. 1991. Principal component analysis for alteration mapping. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 57: 1163 - 1169

Lv GK and Hong QW. 1994. Principle of Remote Sensing. Beijing: China Higner Education Press (in Chinese)

Ma JW. 1997. Methodology study of quickly identifying mineral bearing alterations from TM Data. Journal of Remote Sensing, 1(3):208 - 213(in Chinese with English abstract)

Mao JW, Yang JM, Qu WJ, Du AD, Wang ZL and Han CM. 2002. Re-Os dating of Cu-Ni sulfide ores from Huangshandong deposit in Xinjiang and its geodynamic significance. Mineral Deposits, 21(4): 323 - 330(in Chinese with English abstract)

Qin KZ, Zhang LC and Xiao WJ. 2003. Overview of major Au, Cu, Ni and Fe deposits and metallogenic evolution of the eastern Tianshan Mountains, Northwestern China. In: Mao, Goldfarb and Seltrnan (eds.). Tectonic Evolution and Metallogeny of the Chinese Altay and Tianshan (London), 227 - 249

Rutz-Armenta JR and Prol-Ledesma RM. 1998. Techniques for enhancing the spectral response of hydrothermal alteratioin minerals in Thematic Mapper images of central Mexico. International Journal of Remote Sensing, 19:1981 - 2000

Tangestani MH and Moore F. 2001. Comparison of three principal component analysis techniques to porphyry copper alteration mapping: A case study, Meiduk area, Kerman, Iran. Canadian Journal of Remote Sensing, 27:176 - 181

Wang ZX. 2008. Principles of Quantum Mechanics. Beijing: Peking University Press (in Chinese)

Xiao Y. 2003. The geological character and prospecting orientation in Shaquanzi copper deposit of Hami, Xinjiang. Mineral Resources and Geology, 17(Suppl.):345 - 347(in Chinese with English abstract)

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, 22(3):278 - 286(in Chinese with English abstract)

Yang JM, Zhang YJ, Yao FJ, Wu H, Deng G and Chen J. 2007a. Dominant role of remote sensing mineral exploration information in the discovery of the Luodong Ni deposit, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 23(10):2647 - 2652(in Chinese with English abstract)

Yang JM, Zhang YJ, and Yao FJ. 2007b. Lithology identification of the Weiya complex by means of ETM remote sensing. Acta Petrologica Sinica, 23(10):2397 - 2402 (in Chinese with English abstract)

Yao FJ. 2008. The study of spectral feature and extraction of remote sensing alteration anomalies for metallic ore deposits in Gobi arid zone and application in mineral resources. Master's Degree Thesis. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2 (in Chinese with English abstract)

Zhang YF and Wu JS. 1999. Extraction of mineralization and alteration information from remote sensing images. Geological Exploration for Non-Ferrous Metals, 8(6): 604 - 606 (in Chinese with English abstract)

Zhang YJ, Yang JM, and Chen W. 2002. A study of the method for extraction of alteration anomalies from the ETM (TM) data and its application: Geologic basis and spectral precondition. Remote Sensing for Land & Resources, 4(54):30 - 37 (in Chinese with English abstract)

Zhang YJ, Zeng ZM, and Chen W. 2003. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM + (TM) data and their application: Method selection and technological flow chart. Remote Sensing for Land & Resources, 2(56):44 - 49 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

白云来. 1993. 新疆黄山地区蛇绿岩块的地质、地球化学特征及构造意义. 新疆地质, 11(1):34 - 42

万方数据

方维萱, 徐杰, 刘正桃, 李丰收. 2003. 新疆库姆塔格-沙泉子地区岩屑地球化学异常优选排队方法. 地质与勘察, 39(5): 57-62

耿新霞, 杨建民, 张玉君, 姚佛军. 2008. Aster 数据在浅覆盖区蚀变遥感异常信息提取中的应用. 地质论评, 54(2):184-192

韩宝福, 季建清, 宋彪, 陈立辉, 李宗怀. 2004. 新疆喀拉通克和黄山东含铜镍矿镁铁-超镁铁杂岩体的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 科学通报, 49(22): 2324-2328

何国金, 胡德永, 陈志军, 雷莉萍. 1995. 从 TM 图像中直接提取金矿化信息. 遥感技术与应用, 10(3):51-54

花林宝. 2001. 新疆东天山雅满苏-沙泉子成矿区元素地球化学分区及找矿方向. 桂林工学院学报, 21(2):99-103

花林宝, 阳翔, 钟华. 2002. 新疆东天山地区地球化学特征及找矿预测. 矿产与地质, 16(5):291-296

刘成, 王丹丽, 李笑梅. 2003. 用混合像元线性模型提取中等植被覆盖区的粘土蚀变信息. 地质找矿论, 18(2):131-137

刘庆生, 燕守勋, 马超飞, 阚启忠. 1999. 内蒙哈达门沟金矿区山前钾化带遥感信息提取. 遥感技术与应用, 14(3):7-11

刘素红, 马建文, 阚启忠. 2000. 通过 Gram-Schmidt 投影方法在高山区提取 TM 数据中含矿蚀变带信息. 地质与勘探, 36(5):62-65

吕国楷, 洪启望. 1994. 遥感概论. 北京:高等教育出版社

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

毛景文, 杨建民, 屈文俊, 杜安道, 王志良, 韩春明. 2002. 新疆黄山东铜镍硫化物矿床 Re-Os 同位素测定及其地球动力学意义. 矿床地质, 21(4):323-330

王正行. 2008. 量子力学原理. 北京:北京大学出版社

肖昱. 2003. 新疆哈密市沙泉子铜矿地质特征及其找矿方向. 矿产与地质, 17(增):345-347

杨建民, 张玉君, 陈薇, 王志良, 姜立丰, 姬厚贵, 韩春明. 2003. ETM(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

杨建民, 张玉君, 姚佛军, 吴华, 邓刚, 陈疆. 2007a. 遥感找矿信息在新疆罗东镍矿发现中的主导作用. 岩石学报, 23(10):2647-2652

杨建民, 张玉君, 姚佛军. 2007b. 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

姚佛军. 2008. 荒漠戈壁地区金属矿床波谱特征和蚀变遥感异常信息提取研究及在矿产资源评价中的应用. 博士学位论文. 北京:中国地质科学院

张玉君, 杨建民, 陈薇. 2002. ETM(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(54):30-37

张玉君, 曾朝铭, 陈薇. 2003. ETM(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(56):44-49

张远飞, 吴健生. 1999. 基于遥感图像提取矿化蚀变信息. 有色金属矿产与勘查, 8(6):604-606

万方数据