

doi:10.3799/dqkx.2015.122

基于 Hyperion 数据的江西德兴矿区 粘土矿物信息提取及其找矿意义

路鹏, 周超, 陈圣波, 张莹, 于亚凤

吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

摘要: 江西德兴矿区为我国重要的矿产资源基地, 目前面临资源枯竭的困境, 寻找替代的新矿产迫在眉睫。根据研究区野外土壤实测样品分析, 利用连续统去除的方法提取土壤实测光谱的特征吸收位置, 从而建立粘土矿物含量为因变量的预测方程。检验得知, 高岭石相关系数 R 为 0.811, 拟合系数 R^2 达到 0.658, F 值为 5.275, Sig 值为 0.047 7, 其小于 0.05; 绿泥石相关系数 R 为 0.893, 拟合系数 R^2 达到 0.797, F 值为 1.602, Sig 值为 0.016 6, 其小于 0.05; 伊利石相关系数 R 为 0.783, 拟合系数 R^2 达到 0.619, F 值为 5.57, 对应的 Sig 值是 0.075 4, 其大于 0.05, 说明自变量与因变量之间具有高度相关性, 反演精度较好。从反演结果可知, 研究区的高岭石整体含量较高, 整体上粘土矿物高岭石、绿泥石和伊利石在 1 号坝、2 号坝、4 号坝和铜矿区含量较低。由于粘土矿物不断地经过地球化学变化、累积, 产生黄铁矿、黄铜矿及赤铁矿, 所以挑选粘土矿物富集并且地质构造活跃的区域为铁矿石及铜矿石预测区。结合研究区地质解译图与粘土矿物反演结果, 在采矿场与 IV 号尾矿坝向 NE 方向沿线上圈定两个遥感找矿有利区。

关键词: 高光谱; 遥感; 粘土矿物; 土壤; 找矿。

中图分类号: P967

文章编号: 1000-2383(2015)08-1386-05

收稿日期: 2015-03-21

Retrieval of Clay Minerals from Hyperion Data in Dexing Mine, Jiangxi Province and Its Prospecting Significance

Lu Peng, Zhou Chao, Chen Shengbo, Zhang Ying, Yu Yafeng

College of Geoporation Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Dexing mine is significant in China, but its resources is endangered with exhaustion, which means it is important to tap the alternative mines. A prediction equation is established in this study by deriving the absorption position of the spectrum in the measured soil data by continuum removal and analyzing the reflectivity of these positions responding to specific clay minerals, using the three clay mineral contents as the dependent variables. It is found that kaolinite retrieval correlation coefficient R is 0.811, fitting coefficient R^2 is 0.658, F is 5.275, Sig is 0.047 7 < 0.05; chlorite retrieval correlation coefficient R is 0.893, fitting coefficient R^2 is 0.797, F is 1.602, Sig is 0.016 6 < 0.05; illite retrieval correlation coefficient R is 0.783, fitting coefficient R^2 is 0.619, F is 5.57, Sig is 0.075 4 > 0.05. The testing indicates the independent variable well correlated to the dependent variable, and the inversion accuracy is high. The results indicate that the ensemble content of kaolinite is higher and distributed more widely, compared with chlorite and illite. Overall, the contents of three clay minerals at tailings dam, II tailings dam, IV tailings dam and copper mine are relatively low. The clay mineral accumulated to pyrite, chalcopyrite and hematite by geochemical changes. The resources prediction area is selected, which have high clay minerals and activity geological structure, located on the northeast of IV tailings dam.

Key words: hyper-spectral; remote sensing; clay mineral; soil; prospect.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(No.2012AA12A308); 国土资源部地质矿产调查评价专项项目(No.1212011120230); 国家自然科学基金项目(No.41402293)。

作者简介: 路鹏(1982-), 女, 工程师, 研究方向为遥感定量反演, E-mail: lupeng@jlu.edu.cn

引用格式: 路鹏, 周超, 陈圣波, 等, 2015. 基于 Hyperion 数据的江西德兴矿区粘土矿物信息提取及其找矿意义. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1386-1390.

江西德兴地区是重要的矿产资源基地.它是中国以铜为主的大型矿集区,已有 60 多年的开采历史(陈翠华等,2005).由于长时间的开采,矿区资源储量急剧下降,周围环境及土壤成分含量发生巨大变化,目前面临资源枯竭的困境.

土壤粘土矿物是由各类母岩经过风化作用、蚀变作用或沉积作用而形成的产物.土壤粘土矿物的光谱特征与含量之间的定量关系(汤艳杰等,2002),对地质找矿、矿山环境恢复和生态健康发展都有重要的指示作用(杭小帅等,2007).

近些年来,地质、地球化学、地球物理和遥感等方法技术的进步都不同程度地促进了矿床的发现(赵鹏大和陈永清,2011).早在 20 世纪 80 年代,国内外学者就开始了有关土壤光谱学的研究,并取得了一定的成绩.Ben-Dor and Banin(1995)在近红外波段范围内,采集了 91 个土壤样品并对土壤的粘土矿物含量等 6 种土壤参数进行含量反演;Kooistra *et al.*(2001)在可见光—近红外光谱范围内运用最小二乘法估算了土壤中粘土矿物含量,并由此建立其与土壤重金属之间的关系,进一步判定重金属的污染程度;Chang *et al.*(2001)在近红外光谱范围内,利用主成分分析法建立了 Ca 元素和其他土壤参数含量的回归模型.在国内,张华安和朱永豪(1994)对实地采集的样品进行光谱测试,并用最小二乘法建立了土壤反射光谱特征与高岭石和蒙脱石等粘土矿物含量的回归预测方程;谢伯承等(2005)经研究发现,在 600~800 nm 范围内的光谱吸收面积与土壤有机质含量之间存在较好的线性关系,1800~2100 nm 波段内与土壤粘土矿物含量具有较好的相关性,从而建立土壤参数的预测模型.

笔者在研究区采集了 48 个样品,并测量其光谱曲线,通过光谱曲线特征利用数学建模提取研究区粘土矿物含量.同时,笔者综合研究区地质构造情况,对江西德兴矿区的铜矿、铁矿等资源范围进行预测,为矿区找矿提供理论依据.

1 区域地质概况

德兴地区自中元古界以来各个时代的地层均有分布,新老地层皆有出露,区域地质情况如图 1.并且该地区岩浆活动频繁,岩浆岩分布较为广泛.同时,赣东北大断裂是主要的地质构造单元,在遥感影像中也表现明显,它对赣东北地区的成矿具有一定的指示意义(陈翠华等,2005).德兴地区位于江南造山

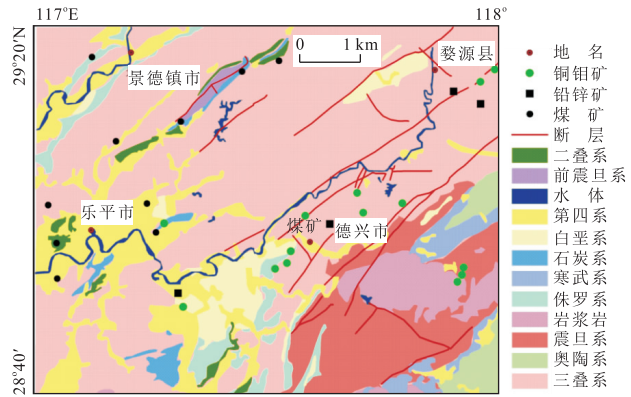


图 1 江西德兴区域地质图

Fig.1 Geological sketch of Dexing

带的东段,其构造演化制约着该地区地质构造特征及其矿产资源的形成.该区在侏罗纪发育了大规模的花岗质岩浆活动,但基本没有火山喷发活动.随着不同时期地质构造的演化,德兴地区主要形成与侏罗纪大规模岩浆作用有关的铜、金、钼、铅、锌、银和矿(李晓峰等,2002,2007,2009;赵同阳等,2007).

2 样品采集及处理

根据研究区的地质情况和矿区分布信息,笔者分别在其矿区采场外围和尾矿坝 I、尾矿坝 II、尾矿坝 IV 以及尾矿坝 IV 下游和乐安河附近采集不同恢复年限的土壤作为研究样品.德兴矿区共采集土壤样品 48 个,采样分布如图 2 绿色圆点.

光谱曲线测试所使用的仪器为美国的 ASD

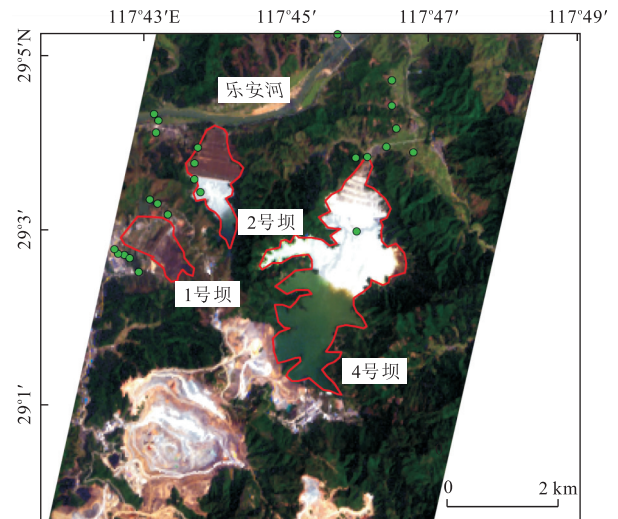


图 2 江西德兴矿区土壤采样点分布

Fig.2 Distribution of soil samples in Dexing mine

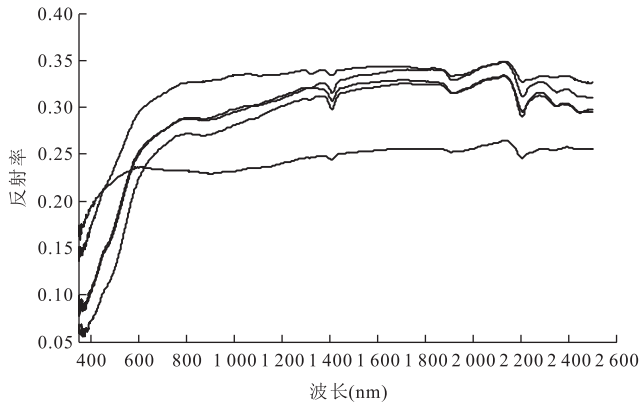


图 3 部分土壤实测光谱曲线

Fig.3 The soil spectrum of partial samples

(analytical spectral devices) 光谱仪, 该光谱仪可以探测到 350~2 500 nm 的波谱范围. 土壤光谱测试在野外实地进行, 测定时间为每天 12~14 时, 天空云量 < 10%, 测试场地的视场角为 25° 左右, 测点的视场角为 5° 左右. 在野外每次进行岩石光谱测试前, 需要在半小时之前对仪器进行开机预热和软件标准化调试, 并用白板进行定标. 最后得到研究区土壤光谱曲线图(图 3).

3 建立土壤粘土矿物含量反演模型

基于野外实测土壤光谱的特征吸收位置, 通过分析光谱吸收特征位置对应的反射率是针对何种粘土矿物, 从而建立以高岭石、绿泥石和伊利石含量为因变量的预测方程. 研究区野外实测的土壤光谱如图 3, 利用连续统去除的方法提取土壤实测光谱吸收位置为 2 202 nm、2 345 nm 和 2 440 nm, 反射位置为 2 212 nm、2 290 nm 和 2 405 nm.

利用上述特征位置对应土壤样品的光谱反射率作为自变量, 采用多元逐步线性回归法分别于高岭石含量、绿泥石含量和伊利石含量进行预测建模, 得到建模方程如下.

高岭石含量预测模型:

$$Y = 0.056 - 2.271 \times R_{2202} + 2.262 \times R_{2345} + 0.498 \times R_{2122} - 0.508 \times R_{2290} . \quad (1)$$

绿泥石含量预测模型:

$$Y = 0.0735 - 2.691 \times R_{2202} + 5.115 \times R_{2122} - 7.898 \times R_{2290} . \quad (2)$$

伊利石含量预测模型:

$$Y = 0.854 + 26.027 \times R_{2202} - 30.88 \times R_{2345} + 10.659 \times R_{2122} - 17.479 \times R_{2290} . \quad (3)$$

(1)~(3)式中, R_{2202} 、 R_{2345} 、 R_{2122} 和 R_{2290} 分别为波段 2 202 nm、2 345 nm、2 122 nm 和 2 290 nm 处的光谱反射率.

4 结果分析

4.1 粘土矿物含量反演

利用检验可行的模型, 基于 Hyperion 高光谱数据反演研究区土壤粘土矿物的含量. 由图 4 可以看出, 研究区高岭石整体含量较高, 这是因为研究区土壤类型为红壤, 红壤中粘土矿物以 1:1 型高岭石为主, 因此高岭石的含量较高, 相对其他粘土矿物来讲, 分布也较为广泛. 在 1 号坝、2 号坝、4 号坝和铜矿区的绿泥石和伊利石含量较低, 这是因为尾矿坝区域是采矿之后的废弃土, 含有大量的尾矿砂, 土壤砂化现象严重并且肥力质量较差, 所以 3 个尾矿坝和铜矿的绿泥石和伊利石含量相对较低.

4.2 精度评价

通过分析, 高岭石相关系数 $R = 0.811$, 说明自变量与因变量之间具有高度相关性, 拟合系数 R^2 也达到了 0.658, F 值为 5.275, Sig 值是 0.047 7 < 0.05; 绿泥石相关系数 $R = 0.893$, 也说明自变量与因变量之间具有高度相关性, 拟合系数 R^2 也达到了 0.797, F 值为 1.602, Sig 值是 0.016 6 < 0.05; 伊利石相关系数 $R = 0.783$, 说明自变量与因变量之间相关性较好, 拟合系数 R^2 也达到了 0.619, F 值为 5.57, 对应的 Sig 值是 0.075 4. 说明模型回归效果较好, 该回归模型是具有统计学意义的, 可以利用此回

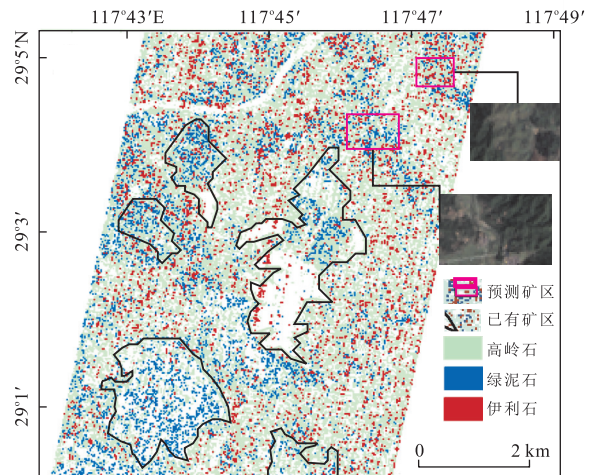


图 4 粘土矿物含量反演结果

Fig.4 The inversion of clay mineral contents

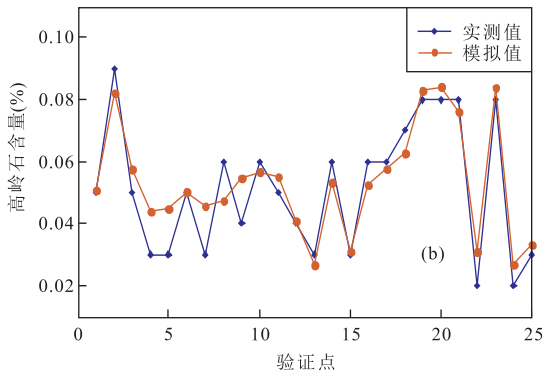
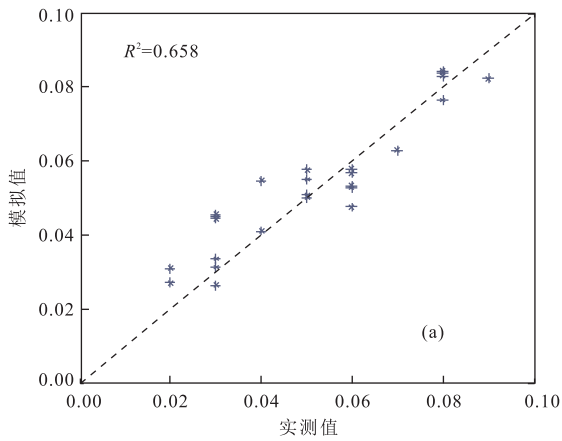


图 5 高岭石含量实测值与预测值相关性散点(a)和高岭石含量实测值与预测值对比折线(b)

Fig.5 The relationship scatter diagram of measured and prospected kaolinit contents (a) and the comparison of measured and prospected kaolinit contents (b)

归模型反演高岭石的含量。

以上说明模型回归效果较好,该回归模型具有统计学意义.利用该反演模型对 25 个验证点进行检验,得到的粘土矿物含量实测值和预测值的相关性散点图以及实测值与预测值的对比折线图如图 5~7.结果表明,该模型的反演精度较高,拟合效果也比较好,大部分验证点的实测值与模拟值的结果相近.

4.3 结果分析

由于江西德兴矿区资源逐渐走向枯竭,寻找一种接替资源势在必行.土壤中的粘土矿物是由于矿床多期次多阶段的成矿作用而产生.铁矿的形成,是花岗闪长斑岩结晶成岩晚期,发生最早一次成矿作用.这时岩浆内部的残余气液温度很高,在斑岩体内部产生不均匀的钾长石化、黑云母化和钠长石化,伴随晶出少量细粒散染黄铁矿和黄铜矿.当矿物混合后,经过高温和盐基快速淋失后,高岭石、蒙脱石、伊利石等一些粘土矿物逐渐积累生成.在此期间土壤中的粘土矿物在一定条件下相互转化.随着硫酸盐

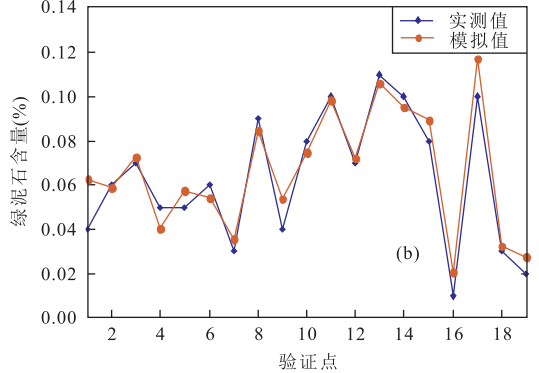
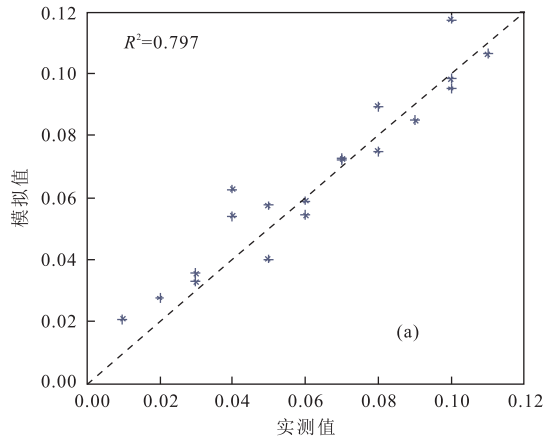


图 6 绿泥石含量实测值与预测值相关性散点(a)和绿泥石含量实测值与预测值对比折线(b)

Fig.6 The relationship scatter diagram of measured and prospected chlorite contents (a) and the comparison of measured and prospected chlorite contents (b)

的生成,土壤中 Fe 离子也相应发生转变成赤铁矿(龚星等,2014).

结合图 1 和由图 4 可知,在采矿场与 IV 号尾矿坝向北东方向沿线上,正处于一个较大的断层.研究区赣 NE 大断裂是主要的地质构造单元,通过研究区粘土矿物分布特征,发现高岭石、绿泥石及伊利石均富集地区,同时也在几条断层附近,该处岩体与地层接触带往往发生围岩蚀变和接触交代作用,较利于成矿作用的发生.综合分析遥感示矿信息后,可预测在采矿场与 IV 号尾矿坝向 NE 方向沿线上存在 2 个遥感找矿有利区,为德兴矿区找矿提供参考依据.

5 结论

本文以高光谱数据 Hyperion 作为数据源,提取了江西德兴矿区粘土矿物信息,并根据粘土矿物含量分布情况结合研究区地质解译图,对研究区已开采矿区之外的铁矿石及铜矿富集位置进行预测.

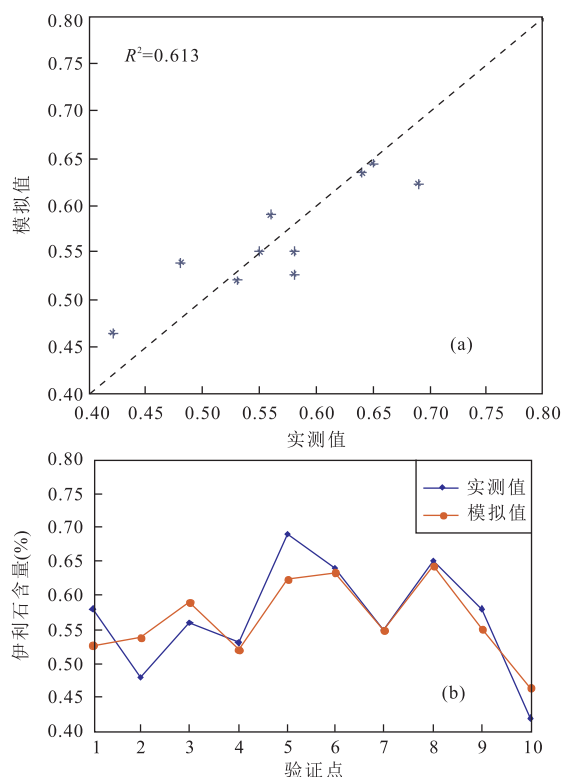


图 7 伊利石含量实测值与预测值相关性散点(a)和伊利石含量实测值与预测值对比折线(b)

Fig. 7 The relationship scatter diagram of measured and prospected illite contents (a) and the comparison of measured and prospected illite contents (b)

研究发现高岭石整体含量较高,相对其他粘土矿物来讲,分布也较为广泛.1号坝、2号坝、4号坝和铜矿区的绿泥石和伊利石含量较低.这是因为尾矿坝的土是采矿之后的废弃土,含有大量的尾矿砂,土壤砂化现象严重,同时肥力质量较差,所以3个尾矿坝和铜矿的绿泥石和伊利石含量相对较低,并且3个尾矿坝和铜矿的粘土矿物含量相对较低.

结合研究区地质解译图与粘土矿物反演结果,在采矿场与IV号尾矿坝向NE方向沿线上圈定2个遥感找矿有利区,对矿区今后找矿有指导意义.

References

- Ben-Dor, E., Banin, A., 1995. Near-Infrared Analysis as a Rapid Method to Simultaneously Evaluate Several Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 59(2): 364–372. doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900020014x
- Chang, C.W., Laird, D.A., Mausbach, M.J., et al., 2001. Near-Infrared Reflectance Spectroscopy-Principal Components Regression Analyses of Soil Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2): 480–490. doi: 10.

2136/sssaj2001.652480x

- Chen, C.H., Ni, S.J., He, B.B., et al., 2005. An Assessment of Mine Environmental Geochemistry Quality by GIS Methods in Dexing, Jiangxi, China. *Journal of Chengdu University of Technology: Sci. & Technol. Ed.*, 6(7): 86–92 (in Chinese with English abstract).
- Gong, X., Chen, Z.H., Luo, Z.H., 2014. Hydrogeochemical Characteristics and Genesis of Luohe Iron Deposit. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(3): 293–302 (in Chinese with English abstract).
- Hang, X.S., Zhou, J.M., Wang, H.Y., et al., 2007. Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils Using Clay Minerals. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 1(9): 113–120 (in Chinese with English abstract).
- Kooistra, L., Wehrens, R., Leuven, R.S.E.W., et al., 2001. Possibilities of Visible-Near Infrared Spectroscopy for the Assessment of Soil Contamination in River Flood Plains. *Analytica Chimica Acta*, 446(1): 97–105. doi: 10.1016/S0003-2670(01)01265-X
- Li, X.F., Hua, R.M., Yang, F.G., et al., 2002. K-Ar Age of Illite in Jinshan Gold Deposit and Its Implication to the Tectonic Evolution of Northeastern Jiangxi Province. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 21(1): 49–54 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.F., Wang, C.Z., Yi, X.K., et al., 2007. Deformation Structures at Various Scales and Their Roles during Gold Mineralization at Jinshan Gold Deposit, Jiangxi Province. *Geological Review*, 53(6): 774–785 (in Chinese with English abstract).
- Li, X.F., Yi, X.K., Zhu, H.P., 2009. Source of Ore-Forming Fluids in Jinshan Gold Deposit of Dexing County: Constraints from Microstructures and Stable Isotopes. *Mineral Deposits*, 28(1): 42–52 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y.J., Jia, J.Y., Xie, X.D., 2002. Environment Significance of Clay Minerals. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337–344 (in Chinese with English abstract).
- Xie, B.C., Xue, X.Z., Liu, W.D., et al., 2005. Hull-Curve-Method-Based Extraction and Analysis of Soil Spectral Characteristics. *Acta Pedologica Sinica*, 42(1): 171–175 (in Chinese with English abstract).

(下转 1440 页)

图方法.光谱学与光谱分析,31(8):2200—2204.

马娜,胡云峰,庄大方,等,2010.基于最佳波段指数和 J-M 距离可分性的高光谱数据最佳波段组合选取研究.遥感技术与应用,25(3):358—365.

苏红军,杜培军,2006.高光谱数据特征选择与特征提取研究.遥感技术与应用,21(4):288—293.

王润生,杨苏明,阎柏琨,2007.成像光谱矿物识别方法与识别模型评述.国土资源与遥感,(1):1—9.

王润生,甘甫平,闫柏琨,等,2010.高光谱矿物填图技术与应

用研究.国土资源遥感,(1):1—13.

许宁,胡玉新,雷斌,等,2011.基于改进光谱特征拟合算法的高光谱数据矿物信息提取.光谱学与光谱分析,31(6):1639—1643.

余先川,熊利平,徐金东,等,2014.基于二次散射非线性混合模型的矿物填图方法.国土资源遥感,26(2):60—68.

张修宝,袁艳,景娟娟,等,2011.信息散度与梯度角正切相结合的光谱区分方法.光谱学与光谱分析,31(3):853—857.

* * * * *

(上接 1390 页)

Zhang, H. A., Zhu, Y. H., 1994. Application of Landsat TM Data to Landuse Classification and Thematic Information Extraction in Subtropical Economic Forest Zone. *Remote Sensing for Land & Resources*, (2):52—54 (in Chinese with English abstract).

Zhao, P. D., Chen, Y. Q., 2011. Theories and Approaches on Scientific Targeting at Mineral Deposites. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2):181—188 (in Chinese with English abstract).

Zhao, T. Y., Zhou, K. F., Zhang, X. F., et al., 2007. Application of Ophiolite Reflectance Spectra in West Junggar Area Based on Wavelet Transform. *Northwestern Geology*, 40(4):87—93 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

陈翠华,倪师军,何彬彬,等,2005. GIS 技术支持下的江西德兴地区矿山环境地球化学质量评价.成都理工大学学报(自然科学版),6(7):86—92.

龚星,陈植华,罗朝晖,2014. 罗河铁矿水文地球化学特征及成因.地球科学——中国地质大学学报,39(3):293—302.

杭小帅,周健民,王火焰,等,2007.粘土矿物修复重金属污染土壤.环境工程学报,1(9):113—120.

李晓峰,华仁民,杨凤根,等,2002. 金山金矿 K-Ar 年龄及其对赣东北构造演化的指示意义.岩石矿物学杂志,21(1):49—54.

李晓峰,王春增,易先奎,等,2007. 德兴金山金矿田不同尺度构造特征及其与成矿作用的关系.地质论评,53(6):774—785.

李晓峰,易先奎,朱和平,2009. 德兴金山金矿床成矿流体来源:小尺度构造和同位素地球化学证据.矿床地质,28(1):42—52.

汤艳杰,贾建业,谢先德,2002. 粘土矿物的环境意义.地质前缘,9(2):337—344.

谢伯承,薛绪掌,刘伟东,等,2005. 基于包络线法对土壤光谱特征的提取及其分析.土壤学报,42(1):171—175.

张华安,朱永豪,1994. 土壤中粘土矿物的反射光谱定量分析.国土资源遥感,(2):52—54.

赵鹏大,陈永清,2011. 科学选靶的理论及途径.地球科学——中国地质大学学报,36(2):181—188.

赵同阳,周可法,张晓帆,等,2007. 基于小波变换的反射光谱分析在蛇绿岩识别中的应用研究.西北地质,40(4):87—93.