

doi:10.3799/dqkx.2015.113

基于光谱特征空间的苏必利尔湖型铁矿 高光谱遥感蚀变信息提取方法

黄爽¹, 陈圣波¹, 周超¹, 查逢丽¹, 路鹏^{1*}, 黄唯实²

1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林长春 130026

2. 辽宁省第七地质大队, 辽宁丹东 118000

摘要: 由于境外铁矿床位置偏远, 现场研究困难, 旨在探讨苏必利尔湖型铁矿的高光谱遥感蚀变信息提取方法, 为境外找矿提供依据。鉴于传统蚀变信息提取方法的局限性, 研究了在二维光谱特征空间中提取蚀变信息的方法。高光谱影像经主成分变换后, 包含较多地物信息的两个主成分的二维光谱特征空间体现了各向异性的特点, 不同地物的聚类常呈类似椭圆分布。在蚀变信息的聚类椭圆中圈定散点, 并应用波谱特征拟合, 将异常散点的平均光谱与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)光谱库中的矿物光谱匹配, 确定蚀变矿物类型。以苏必利尔湖型铁矿——巴西 Aguas Claras 铁矿区为例, 提取了赤铁矿、绿泥石等蚀变矿物, 结果表明矿物的类型和分布与该区地质概况吻合。

关键词: 光谱特征空间; 蚀变矿物; 二维散点图; 遥感; Hyperion 数据。

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2015)08-1325-05

收稿日期: 2015-03-21

The Application of Spectral Characteristic Space Method to the Alteration Information Extraction of Lake Superior-Type Iron Deposit

Huang Shuang¹, Chen Shengbo¹, Zhou Chao¹, Zha Fengli¹, Lu Peng^{1*}, Huang Weishi²

1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

2. 7th Battalion of the Geological Unit of Liaoning Province, Dandong 118000, China

Abstract: The field study of overseas iron ore deposits is difficult because of its remote location. The spectral characteristic was used to extract alteration information in view of the limitation of the traditional methods in this paper, aiming to explore alteration information extraction from hyperspectral images for the Lake Superior type iron ore to facilitate overseas prospecting. A two-dimensional spectral characteristic space takes on an anisotropic feature in associated distribution of two principal bands after principal component analysis. The distribution is usually combined by oval clusters. The scatter points were enclosed in oval clusters of alteration information, and the mean spectra of abnormal scatter points were matched with mineral spectra from United States Geological Survey(USGS) spectral library by means of spectral feature fitting to ensure the type of alteration minerals. Spectral characteristic space method was described with the instance of Lake Superior-type iron deposit—Aguas Claras iron area in Brazil. Hematite, chlorite and other minerals were extracted in this study. It is found that the type and distribution of extracted altered minerals were consistent well with geological condition.

Key words: spectral characteristic space; alteration minerals; 2D scatter plot; remote sensing; Hyperion data.

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(Nos.2012AA12A308, 2008AA121100); 国家自然科学基金项目(No.41402293); 吉林大学研究生创新基金资助项目(No.2014029)。

作者简介: 黄爽(1987—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为高(多)光谱地质遥感。E-mail: hsmylife2012@163.com

* **通讯作者:** 路鹏, E-mail: lupeng@jlu.edu.cn

引用格式: 黄爽, 陈圣波, 周超, 等, 2015. 基于光谱特征空间的苏必利尔湖型铁矿高光谱遥感蚀变信息提取方法. 地球科学——中国地质大学学报, 40(8): 1325-1329.

遥感技术在铁矿床蚀变信息提取和建立遥感找矿模型方面均取得了显著成就。国内外专家利用遥感数据对岩浆熔离型铁矿和区域变质型铁矿进行了研究,并在埃塞俄比亚(代晶晶,2012)、塔萨拉(陈玲等,2012)和湖北随州—大悟(黄祥芝,2012)等地区成功提取了蚀变信息并圈定了找矿靶区。

苏必利尔湖型铁矿形成于大陆架海水相对较浅的环境中,铁矿床的含铁岩系中石英岩和白云岩发育。多数苏必利尔湖型铁矿床与沉积建造有关(Trendall,1968)。含铁建造呈条带状,主要矿石类型为脆性赤铁矿,常见的围岩蚀变有绿泥石化、赤铁矿化和滑石化。巴西铁四角区是典型的苏必利尔湖型铁矿。Lobato *et al.*(1998)在铁四角区提取了含铁和 Al-OH 的蚀变信息。赵志芳和郭富达(2010)应用遥感影像分析总结惠民铁矿区赋矿地层、弧形构造、铁染羟基异常等成矿和控矿条件,并根据矿化遥感异常信息圈定找矿远景地段。但是上述研究没有根据苏必利尔湖型铁矿的矿物特征提取蚀变矿物信息。目前,高光谱遥感已广泛应用于矿物识别、光谱角法(Crosta *et al.*, 1998)、光谱特征拟合(Farifteh *et al.*, 2013)、混合调谐匹配滤波(Kruse, 2003)等方法中,均取得较好效果。由于上述方法均具有相对固定的处理流程和分析步骤,不能够因地制宜的提取蚀变异常矿物(胡波等,2011)。同类矿物在光谱特征空间中呈聚类分布,所以应用光谱特征空间提取蚀变矿物不受固定流程限制,提取结果更加准确。但是一般应用光谱特征空间进行蚀变信息提取时仅使用两个波段,提取单独一种蚀变信息,例如用 TM3 和 TM4(胡波等,2011)提取铁染异常。

本文根据苏必利尔湖型铁矿的特征,应用矿物特征波段分辨率高的 Hyperion 高光谱数据,利用主成分变换后包含较多地物信息的 2 个主成分波段构成二维光谱特征空间,提取巴西 Aguas Claras 矿区赤铁矿和绿泥石等多种苏必利尔湖型铁矿典型蚀变矿物,改进了单一两个波段只提取某一种矿物的缺点。

1 研究区地质概况

以巴西 Aguas Claras 铁矿区为例,该地区是巴西米纳斯吉拉斯州铁四角区内的大型苏必利尔湖型铁矿床,矿床处于 Serra do Curral 成矿带的北段(Spier *et al.*, 2007)。矿区内出露的岩石为莫埃达(Moeda)组的石英岩、百塔托(Batatal)组千枚岩、卡乌厄(Caue)组白云石、铁英岩、赤铁矿、铁角砾岩和

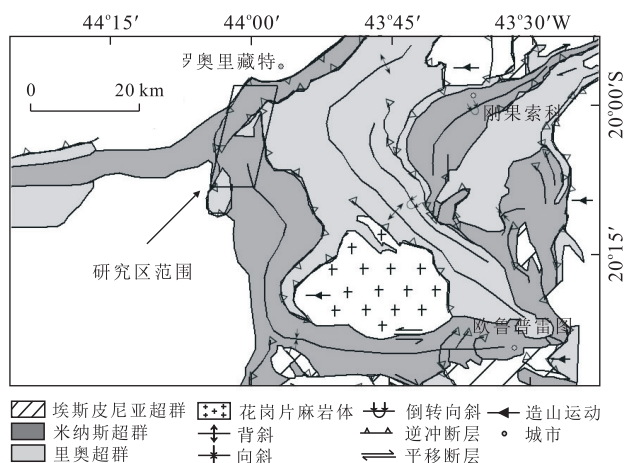


图 1 巴西 Aguas Claras 矿区地质图

Fig.1 Geological sketch of Aguas Claras ore field in Brazil

詹德瑞拉(Gandarela)组碳酸盐岩(Spier *et al.*, 2007)。其地层单元之间的界面是渐变的(图 1)。

Aguas Claras 铁矿区的矿体产在 Caue 组含白云石铁英岩层中,是一个大致呈板状的规则矿体,呈条带状分布。铁矿石几乎由纯的赤铁矿组成, Fe_2O_3 含量大于 98%, 只含极少的其他混染物。主要的围岩蚀变包括赤铁矿化、绿泥石化和滑石化(Spier *et al.*, 2007)。

2 研究区数据

研究数据采用 Hyperion 高光谱影像。Hyperion 传感器是搭载于 EO-1 卫星平台的成像光谱仪。提供了 242 个波段,光谱范围覆盖 355~2 577 nm,光谱分辨率 10 nm,空间分辨率 30 m。研究区内过境有 1 幅 Hyperion 影像,经过波段重建、辐射定标、坏线修复和大气校正得到反射率数据。

3 蚀变信息提取

3.1 光谱特征空间

假设一幅影像有 n 个波段,则影像上每个像元都可以用一个 n 维向量 $\mathbf{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 表示, \mathbf{X} 为像元的向量值,光谱特征空间就是包含所有 \mathbf{X} 的 n 维空间(李红等,2010)。二维散点图是二维光谱特征空间的一种平面表现形式。它所反映的是 2 个波段灰度值的联合分布。以 Hyperion 数据为例,主成分变换后由 PC1 与 PC3 组成光谱特征空间(图 2),每个像元在光谱特征空间中表示为 (X_{pc3}, Y_{pc1}) 。

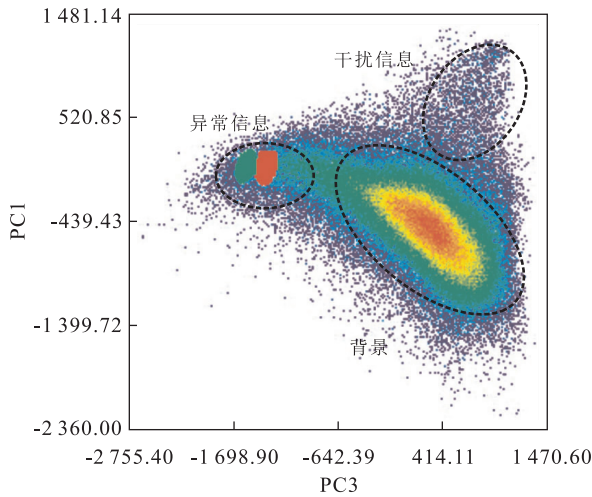


图 2 二维光谱特征空间

Fig.2 Two-dimensional spectral characteristic space

同类地物无论在空间上分布如何,在散点图中总是形成聚类,并且呈现出近似椭圆的形态(图 2)。而不同地物组合形成了椭圆的套叠结构,图 2 背景是遥感影像中一种或多种地物光谱特征的综合反映,在多波段遥感影像的数据点集空间中,背景是一个近似的椭球体,异常信息游离于椭球体外部。

由于苏必利尔湖型铁矿的围岩蚀变包括赤铁矿化、绿泥石化和滑石化,因此在 Hyperion 数据中选择赤铁矿等含铁矿物的特征吸收波段 530~560 nm 和 890~910 nm,在绿泥石等羟基矿物的特征吸收波段 2180~2220 nm 区间内进行主成分变换,增大不同物质间的图像差异。选择各波段特征贡献值符号相反且数值较大的 PC1 与 PC3 进行二维光谱特征空间分析(表 1)。PC1 与 PC3 的特征贡献值相反且绝对值较大,说明 PC1 和 PC3 的数据差异最大,在二维光谱特征空间中不同物质的空间分布更容易区分(图 2)。

3.2 蚀变信息提取

在 PC1 与 PC3 组成的二维光谱特征空间中,圈

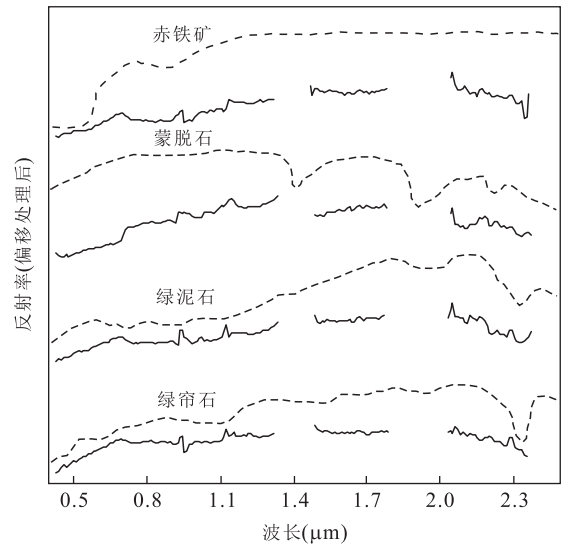


图 3 异常散点平均光谱与 USGS 光谱对比

Fig.3 The comparison of mean spectra of abnormal information and mineral spectra from USGS

虚线代表 USGS 光谱库中的光谱,实线代表影像中异常散点的平均光谱

定表示异常信息的散点,将异常散点的平均光谱与美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)光谱库中的光谱数据匹配,通过光谱特征匹配程度(van Der Meer, 2004)确定矿物类型(图 3)。

图 3 中红色异常点的平均光谱与 USGS 光谱库中的赤铁矿光谱相匹配,则红色散点在影像中代表赤铁矿;绿色散点的平均光谱与 USGS 光谱库中的绿泥石相匹配,则绿色散点在影像中代表绿泥石。由此得到研究区蚀变矿物分布(图 4)。

Aguas Claras 矿区是典型的苏必利尔湖型铁矿床,主要的含铁矿物为赤铁矿,围岩蚀变为赤铁矿化、绿泥石化和滑石化。提取出的蚀变矿物赤铁矿和绿泥石与苏必利尔湖型铁矿围岩蚀变类型相符。从图 4 可以看出蚀变矿物呈条带状分布在含矿岩层内,与图 1 中含矿岩层米纳斯超群走向吻合。

表 1 Hyperion 数据主成分特征贡献值

Table 1 Principal component from Hyperion data

主成分	Band 19	Band 20	Band 21	Band 54	Band 55	Band 203	Band 204	Band 205	Band 206
PC1	0.132 8	0.146 8	0.450 1	0.539 9	0.294 3	0.305 2	0.302 5	0.278 8	0.343 1
PC2	-0.009 8	-0.110 9	0.865 9	-0.090 8	-0.168 0	-0.187 4	-0.244 3	-0.242 5	-0.218 5
PC3	-0.314 0	-0.334 0	-0.160 0	0.746 7	-0.073 3	-0.034 1	-0.069 0	-0.170 9	-0.407 7
PC4	0.437 1	0.715 0	-0.062 8	0.211 9	-0.184 6	-0.086 7	-0.013 5	-0.030 5	-0.454 1
PC5	0.263 3	0.070 8	-0.122 9	0.231 3	0.161 1	-0.037 1	-0.629 2	-0.450 5	0.480 5
PC6	0.029 4	-0.027 5	0.012 7	-0.203 8	0.530 4	0.650 6	-0.208 1	-0.134 3	-0.436 6
PC7	-0.080 8	0.013 7	0.007 6	0.027 6	-0.663 8	0.572 5	-0.355 6	0.293 4	0.107 1
PC8	-0.556 4	0.381 6	0.041 2	0.013 0	0.288 9	-0.253 3	-0.440 6	0.447 9	-0.020 5
PC9	-0.553 4	0.438 0	0.033 5	-0.042 9	-0.119 4	0.215 4	0.289 9	-0.570 6	0.169 3

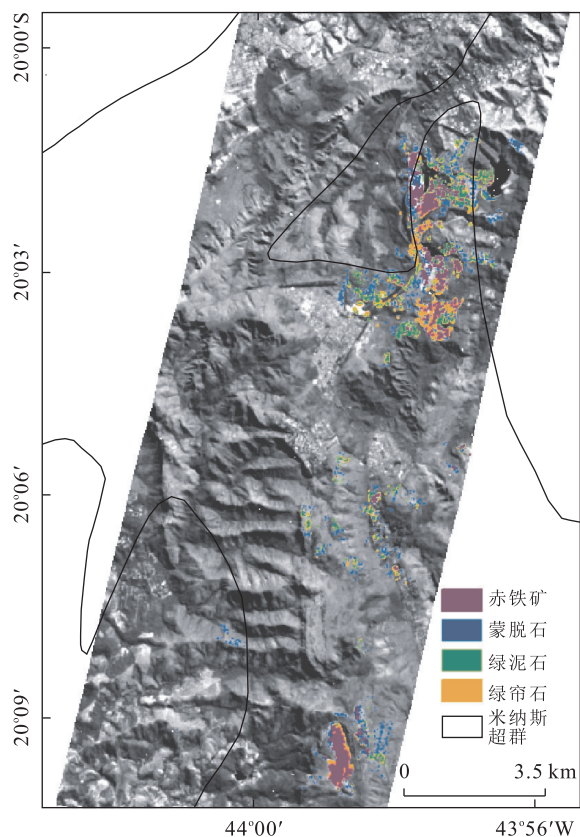


图 4 研究区蚀变信息分布

Fig.4 The sketch of alteration information in study area

4 结论

由于同类地物在光谱特征空间呈聚类分布,对巴西 Aguas Claras 矿区的 Hyperion 影像主成分变换后,笔者根据包含较多地物信息的 PC1 和 PC3 构成的二维光谱特征空间,提取了苏必利尔湖型铁矿床中赤铁矿、绿泥石等典型蚀变矿物,结论如下:

(1)Hyperion 影像的高光谱分辨率决定其数据维数较大,因此主成分分析算法不仅实现了数据降维,并且分离了背景和异常信息.主成分构成的二维光谱特征空间更为准确的映射不同物质的空间分布,用于矿物信息的圈定.

(2)应用光谱特征空间提取的赤铁矿、绿泥石等蚀变矿物与苏必利尔湖型铁矿围岩蚀变类型相符,且蚀变矿物呈条带状分布,其与矿区已知含矿层吻合较好.因此,在巨型铁矿床的遥感示矿信息提取研究中应当将遥感岩矿信息与地质特征综合分析,为潜在矿床的调查提供可行的技术支持.

References

- Chen, L., Zhang, W., Zhou, Y., 2012. Application of High-Resolution Remote Sensing Image to Searching for Sedimentary-Metamorphic Type Iron Deposits in the Taxkorgan Area, Xinjiang. *Geology and Exploration*, 48 (5): 1039—1048 (in Chinese with English abstract).
- Crosta, A. P., Sabine, C., Taranik, J. V., 1998. Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, Using AVIRIS Hyperspectral Data. *Remote Sensing of Environment*, 65 (3): 309—319. doi: 10.1016/S0034—4257(98)00040—6
- Dai, J. J., 2012. Remote Sensing Model for Magmatic Liquation Iron Deposit Prediction in Western Ethiopia. *Remote Sensing Technology and Application*, 27 (3): 380—386 (in Chinese with English abstract).
- Farifteh, J., Nieuwenhuis, W., García-Meléndez, E., 2013. Mapping Spatial Variations of Iron Oxide by-Product Minerals from EO-1 Hyperion. *International Journal of Remote Sensing*, 34 (2): 682—699. doi: 10.1080/01431161.2012.715776
- Hu, B., Zhu, G. C., Zhang, Y. F., et al., 2011. The Application of Spatial U-Static Method to the Extraction of Alteration Anomalies. *Remote Sensing for Land & Resources*, 23 (3): 71—76 (in Chinese with English abstract).
- Huang, X. Z., 2012. Study of Metallogenic Prognosis Based on Remote Sensing of Suizhou-Dawu Area, Hubei Province. *Resources Environment and Engineering*, 26 (4): 388—393 (in Chinese with English abstract).
- Kruse, F. A., 2003. Preliminary Results-Hyperspectral Mapping of Coral Reef Systems Using EO-1 Hyperion, Buck Island, US Virgin Islands. *In JPL Airborne Earth Science Workshop*, 12 (2003): 157—173.
- Li, H., Zhu, G. C., Zhang, Y. F., et al., 2010. Reflectance Spectral Characteristics and Spatial Structure of Typical Objects in Mineralization and Alteration Areas: A Case Study of the Tuquan-Jarud County Metallogenic Belt in Inner Mongolia. *Remote Sensing for Land & Resources*, 22 (1): 89—95 (in Chinese with English abstract).
- Lobato, L. M., Vieira, F. W. D. R., Rebeiro-Rodrigues, L. C., et al., 1998. Styles of Hydrothermal Alteration and Gold Mineralizations Associated with the Nova Lima Group, Quadrilátero Ferrífero: Part I, Description of Selected Gold Deposits. *Brazilian Journal of Geology*, 28 (3): 339—354.
- Spier, C. A., de Oliveira, S. M. B., Sial, A. N., et al., 2007. Geochemistry and Genesis of the Banded Iron Formations of the Cauê Formation, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, 152 (3): 170—206. doi: 10.1016/j.pr—ecamres.2006.10.003
- Trendall, A. F., 1968. Three Great Basins of Precambrian

- Banded Iron Formation Deposition: A Systematic Comparison. *Geological Society of America Bulletin*, 79 (11): 1527—1544. doi: 10.1130/0016—7606 (1968) 79 [1527; TGBOPB]2.0.CO;2
- van Der Meer, F., 2004. Analysis of Spectral Absorption Features in Hyperspectral Imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 5 (1): 55—68. doi: 10.1016/j.jag.2003.09.001
- Zhao, Z. F., Guo, F. D., 2010. A Study on the Close-Range Ore Prospecting Mark of Remote Sensing Geology and Metallogenetic Prognosis of Huimin Fe Deposit. *Yunnan Geology*, 29(4): 434—437 (in Chinese with English abstract).
- 尔干地区沉积变质型铁矿勘查中的应用. *地质与勘探*, 48(5): 1039—1048.
- 代晶晶, 2012. 埃塞俄比亚西部岩浆熔离铁矿遥感找矿模型. *遥感技术与应用*, 27(3): 380—386.
- 胡波, 朱谷昌, 张远飞, 等, 2011. 空间 U 统计量法在遥感蚀变信息提取中的应用研究. *国土资源遥感*, 23(3): 71—76.
- 黄祥芝, 2012. 湖北随州—大悟地区遥感预测成矿研究. *资源环境与工程*, 26(4): 388—393.
- 李红, 朱谷昌, 张远飞, 等, 2010. 矿化蚀变区典型地物光谱特征分析与空间结构研究——以内蒙古突泉县—扎鲁特旗成矿带为例. *国土资源遥感*, 22(1): 89—95.
- 赵志芳, 郭富达, 2010. 云南惠民铁矿遥感近矿找矿标志及成矿预测. *云南地质*, 29(4): 434—437.

附中文参考文献

陈玲, 张微, 周艳, 等, 2012. 高分辨率遥感影像在新疆塔什库