

基于独立分量分析的铝土矿蚀变信息遥感提取方法

彭光雄^{1,2,3}, 王明艳⁴, 陈锋锐⁵, 潘彤³, 叶震超^{1,2}

(1. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083;

2. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083; 3. 青海省地质调查院, 西宁 810012;

4. 湖南有色金属控股集团有限公司 矿山管理部, 长沙 410015; 5. 河南大学 环境与规划学院, 开封 475001)

摘要: 褐铁矿所形成的铁帽是寻找铝土矿的重要标志。在分析铝土矿地质特征、光谱特征和遥感影像特征的基础上, 引入独立分量分析(ICA)法用于铝土矿的蚀变信息遥感提取, 并与传统的主成分分析(PCA)法和比值法进行了比较。结果表明: 3种方法的准确率分别为84.5%、80.9%和79.4%, 并且独立分量分析的第一分量IC1的值越低, 铝土矿的蚀变程度越高, 信息提取的准确率也越高。遥感提取的铝土矿蚀变面积约210.1 km², 可划分为3个区带, 主要分布于海拔250 m以上且切割相对较大的山顶和斜坡上, 而低海拔的平缓地带铝土矿基本不发育。初步查明了区内铝土矿的地表分布规律, 为进一步的找矿勘查工作提供有效的指示信息。

关键词: 铝土矿; 蚀变; 独立分量; 信息提取; 成矿预测

中图分类号: TP 753

文献标志码: A

Extraction of bauxite alteration information from remote sensing data based on independent component analysis

PENG Guang-xiong^{1,2,3}, WANG Ming-yan⁴, CHEN Feng-rui⁵, PAN Tong³, YE Zhen-chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

3. Qinghai Institute of Geological Survey, Xining 810012, China;

4. Department of Mineral Resources, Hunan Nonferrous Metals Holding Group Co., Ltd., Changsha 410015, China;

5. College of Environment and Planning, Henan University, Kaifeng 475001, China)

Abstract: Iron cap formed from limonite is an important prospecting symbol of bauxite in the studied area. Based on the feature analyses of geological, spectral and remote sensing images, independent component analysis (ICA) was used to extract the alteration information of bauxite. The traditional methods of the principal component analysis (PCA) and ratio were compared with ICA. The test results show that the extraction accuracies of ICA, PCA and ratio are 84.5%, 80.9% and 79.4%, respectively. The lower the value of the first component of ICA is, the higher the degree of bauxite alteration and the extraction accuracy are. The surface area of bauxite alteration extracted from IC1 is about 210.1 km², and is divided into three zones. It mainly distributes in the hill and slope where the elevation is higher than 250 m. There is little bauxite in the flat zone with low elevation. The distribution of bauxite in this area is verified preliminarily, which provides very effective instruction information for further exploration.

Key words: bauxite; alteration; independent component; information extraction; metallogenic prediction

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2011M501296); 中南大学中央高校基本科研业务费资助项目(2011QNZT006); 湖南省自然科学基金资助项目(11JJ4028)

收稿日期: 2011-12-01; 修订日期: 2012-01-04

通信作者: 陈锋锐, 讲师, 博士; 电话: 0378-3881850; E-mail: fruich@gmail.com

红土型铝土矿床主要由含酸性、中性和基性成分的铝硅酸盐岩石在热带和亚热带气候条件下经深度化学风化形成^[1]。铝土矿常跟褐铁矿与赤铁矿等相伴生而形成含铁的红土层,成为铝土矿的重要找矿标志,并受地形剥蚀在地表形成规律性的地貌特征,十分利于铝土矿的遥感信息提取。遥感蚀变或异常信息的提取是遥感找矿的重要途径之一,自20世纪70年代以来就成为遥感地质的热点研究问题,逐步形成了以光谱波段比值和主成分分析(Principal component analysis, PCA)为核心的遥感蚀变或异常提取多方法^[2-3]。铝土矿的矿化蚀变也一直运用这两种主要方法进行遥感提取^[3-6],较少引入新的数据分析方法。独立分量分析(Independent component analysis, ICA)是近几年才发展起来的一种新的数据分析方法,它将观察到的数据进行某种线性分解,使其分解成统计独立的成分^[7]。PCA是基于二阶的统计量,然而很多弱信息有时包含在高阶的统计量中,采用PCA算法进行处理可能会遗漏一些关键信息^[8]。而ICA是基于高阶统计的,它不但能实现PCA的去相关特性,而且还能获得各分量之间相互独立的特性,从而使得ICA比PCA表现出更好的性能^[9-10]。目前,ICA在信号处理尤其是盲信号分离上有着广泛的应用^[7, 11]。本文作者引入ICA法用于遥感提取铝土矿的蚀变信息,使得各个变量之间相互独立,以便简洁有效地进行数据表达,从而有利于后续的蚀变信息阈值分割处理,提高铝土矿蚀变信息提取的精度。

1 研究区域与数据

几内亚铝土矿资源非常丰富,是世界上铝土矿资源储量最大的国家。研究区位于几内亚金迪亚区的法雷和马迪纳两地之间的区域,属于热带季风气候,经纬度范围为W13°00'—W13°15', N10°45'—N11°00'(见图1(a)),是几内亚铝土矿的主要产区。该区域位于非洲大陆太古界基底西非克拉通内,主要地层为古生界奥陶系(O)海相沉积的泥岩、砂砾岩等,地层呈北东向单斜产出,断裂构造以北东向为主、次之为北西向的性质不明断层,岩浆岩主要为呈枝杈状分布于区域东北部的玄武岩、辉长岩,是区域的成矿母岩^[12]。区内铝土矿床多为辉长岩或玄武岩风化残积型,沿垂向自上而下形成的岩性体为铁矾土(块状铝土矿)—铁红土(土状铝土矿)—铁质黏土—黏土—粉砂质黏土—风化玄武岩(辉长岩),构成该矿床的赋矿岩系^[13-14]。铝土矿均赋存于铁矾土或其下的铁红土内,矿体大小不等,形态各异,多分布于正地形近地表处,随地形起伏而起伏^[15]。地表厚为几米至二十余米的风化残积物—硅铝铁风化壳,即是含矿层位,区域范围内大部分被赋存铝土矿的铁帽覆盖(见图1(b))。

在本次实验中,所使用的遥感数据为多光谱卫星影像(Advanced land observing satellite, ALOS),共有420~500、520~600、610~690和760~890 nm 4个光谱波段,空间分辨率均为10 m。为方便与GPS采点数

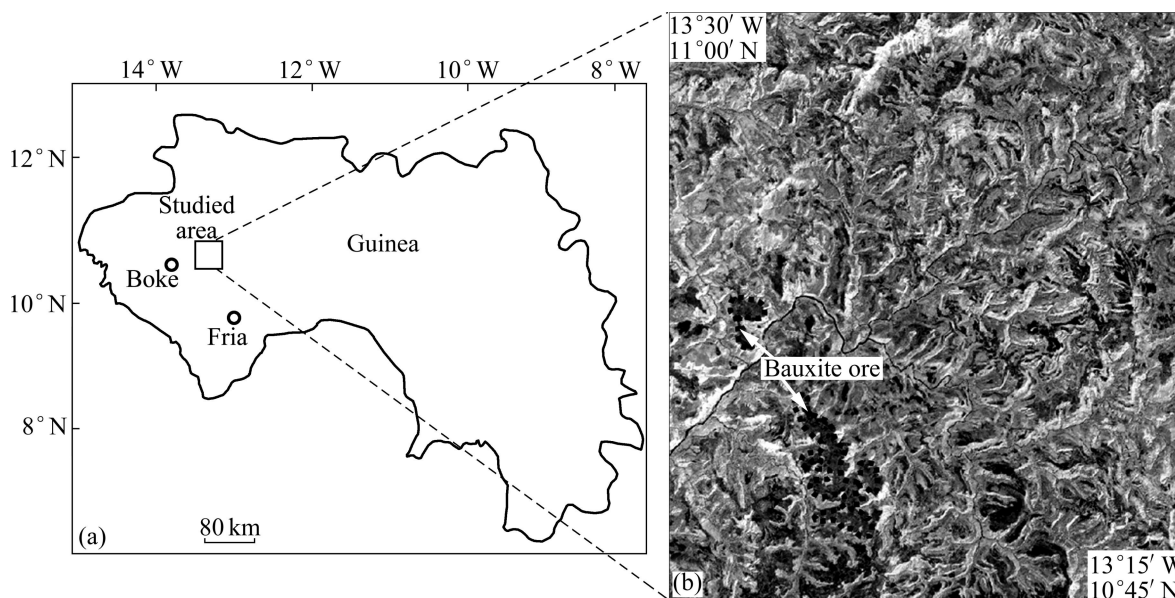


图1 研究区位置(a)及地貌影像特征(b)

Fig. 1 Location (a) and image features (b) of studied area

据的集成分析,遥感影像采用 UTM 投影 WGS84 坐标系。野外调查与数据采集工作由几内亚的工作人员完成。

2 研究方法

在本次实验中,分别利用 ICA、PCA 和波段比值法对研究区的铝土矿蚀变信息进行遥感提取。将 GPS 野外实地获取的铝土矿蚀变数据分为两组,一组作为训练样本和建立遥感解译标志,另一组用于结果检验和精度评价,以分析比较 3 种蚀变信息提取方法的性能特点和在该地区的适应性。最后,在铝土矿蚀变信息遥感提取的基础上,结合该地区的地质资料,利用成矿理论,对研究区的铝土矿远景成矿靶区进行预测分析和圈定,从而为该地区铝土矿的勘查找矿提供参考。本次实验数据处理与方法流程如图 2 所示。

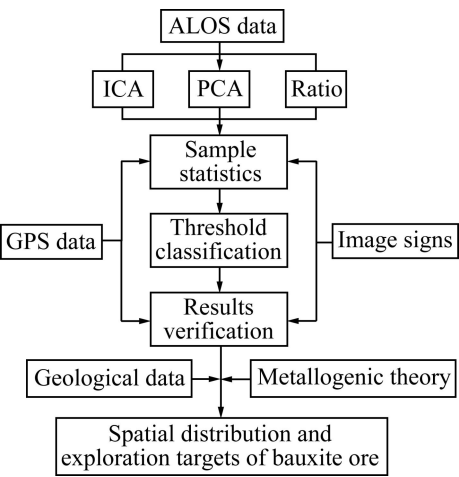


图 2 数据处理与方法流程
Fig. 2 Flow chart of data processing and methods

2.1 独立分量分析方法

JUTTEN 和 HERAULT^[16]于 1988 年首次提出独立分量分析(ICA)的概念,他们对 ICA 给出了一个简单的描述,认为 ICA 是从线性混合信号里恢复出一些基本的源信号的方法。ICA 的严格定义需要使用一个隐

藏的统计变量模型进行描述^[17-18]。

$$X=AS$$
(1)

式(1)中的统计模型称为独立成分分析或 ICA 模型,该模型描述了观测数据是如何由信源 S 混合生成的。源变量 S 是隐藏变量,不能直接观测到,而且混合矩阵 A 也是未知。所有能观测到的数据只有随机变量 X ,所以,必须估计出混合矩阵 A 和向量 s ,且必须在尽量少的假设条件下完成它。

ICA 假设成分是统计独立的,而且还必须假设独立成分是非高斯分布的。如果能计算出混合矩阵 A 的逆矩阵 W ,也即分离矩阵 $W=A^{-1}$,则独立成分可由下式得到:

$$s=Wx$$
(2)

独立分量分析的主要任务是估计出分离矩阵 W 。目前实现 ICA 的方法有多种,如 CHEN 等^[17]提出基于高阶累积量来构造算法的代价函数法, BELL 和 SEJNOWSKI^[19]提出的信息最大化(Infomax)方法等。

ICA 是从 PCA 发展而来,杨竹青等^[7]总结了 ICA 与 PCA 的区别,如表 1 所列。ICA 得到的分量是尽可能互相独立的,而 PCA 得到的分量则仅是无关(但并非是一定独立的)。在实际应用中,大多数源信号是非高斯的,且其相互关系也是非正交的,因而 ICA 比 PCA 更接近实际情况,有着更大的应用潜力和更好的适应性。本文作者利用 ICA 法对铝土矿的蚀变信息进行遥感提取,并与 PCA 和波段比值法的提取结果进行比较分析。

2.2 区内铝土矿主要地质特征

区内风化残积物-硅铝铁风化壳是本区的含矿岩系,由上至下分为铁矾土(铁帽)、铝土矿和黏土 3 类^[13]。1)铁矾土层。厚度为 0.5~9 m,呈褐红色-褐色,常见斑杂色、紫红色;其结构较为复杂,主要有泥质结构、均一结构、不等砾和巨砾结构,蜂窝状-皮壳状-块状构造;矿物成分主要为高岭石、三水铝石、赤铁矿、褐铁矿等,岩石较硬,局部含砾。铁矾土分布面积广,野外易于识别,是该地区铝土矿重要的找矿标志,当 Al_2O_3 含量高时也为优质的铝土矿。2)铝

表 1 PCA 与 ICA 的特性比较^[11]

Table 1 Brief characteristic comparison between PCA and ICA

Method	Type of signal	Statistical property	Treatment effect	Relationship of components	Complexity
PCA	Gaussian	Second-order	Non-related component	Orthogonal	Low
ICA	Non-Gaussian	High level	Independent component	Not necessarily orthogonal	High

土矿层。厚度一般为0~18 m,主要有块状和土状两种矿石类型。块状铝土矿位于铁矾土下部,褐红色带浅灰色,泥质-豆状结构,蜂窝状-块状构造,主要矿物成分为三水铝石、高岭石、白云母,含有赤铁矿、褐铁矿和针铁矿。土状铝土矿位于块状铝土矿下部,呈棕红色、砖红色,泥质-豆状结构,土状构造,主要矿物成分为三水铝石、高岭石、白云母,含有针铁矿、褐铁矿。3)黏土层。黏土类岩石主要有铁质黏土和黏土两种类型。地表主要出露在切割较深的沟谷中,呈长条水平层状分布。

2.3 铝土矿遥感特征分析

2.3.1 光谱特征分析

利用遥感进行铝土矿信息的提取主要有两种类型,一是直接提取 Al^{3+} 和 OH^- 的信息,二是间接提取与铝土矿伴生的赤铁矿和褐铁矿的 Fe^{3+} 的信息。本区的铝土矿为红土型三水铝石矿,大部分被铁矾土所覆盖,且 Al^{3+} 和 OH^- 的遥感信息较弱,较难单独分离,因而以 Fe^{3+} 为主要的蚀变信息进行遥感提取。三水铝石的野外照片如图 3(a)所示,三水铝石、针铁矿和褐铁矿的光谱曲线如图 3(b)所示。从图 3(b)可见,三水铝石在 1 440~1 600 nm 间产生由 1 435 和 1 558 nm 组成的尖锐的“二元”吸收峰。 Fe^{3+} 在 600~900 nm 间有一个很强的吸收谱带。对于不同类型铁化合物,因其分子结构和晶体结构的差异,其特征谱形差别较大。褐铁矿各组成矿物及氧化的赤铁矿、黄铁钾矾在 800、2 195、1 900 和 1 400 nm 附近的吸收峰。由于 ALOS 卫星的光谱波段在 420~890 nm 之间,三水铝石的“二元”吸收峰(1 435 nm)和(1 558 nm)在 ALOS 影像上无法反映出来,而 Fe^{3+} 在 600~900 nm 间的强吸收谱带正好放映 ALOS 的第 4 波段位置。又由于褐铁矿所形成的铁帽是该地区寻找铝土矿的重要标志,因此,蚀变信息提取也是以 Fe^{3+} 铁化提取为主。铁化提取时可选择 ALOS4/1 或 ALOS3/1 波段组合进行比值运算。

2.3.2 影像特征分析

高灶其和樊克锋^[13]研究表明该区铝土矿体多赋存于山体顶部和坡度适中的斜坡上,沟谷部位矿体质量差或无矿体。矿体底板为铝土矿的成矿母岩-基性侵入岩或泥盆系砂岩。矿体发育地段矿石质量好,厚度大,地表植被繁茂;在地形平缓地带,坚硬的硅铝铁质风化壳发育,植被稀少,通视条件好,其下一般铝土矿质量差^[13],如图 4(b)所示。根据地形地貌、地表植被及铁铝质风化壳发育程度,可为找矿提供标

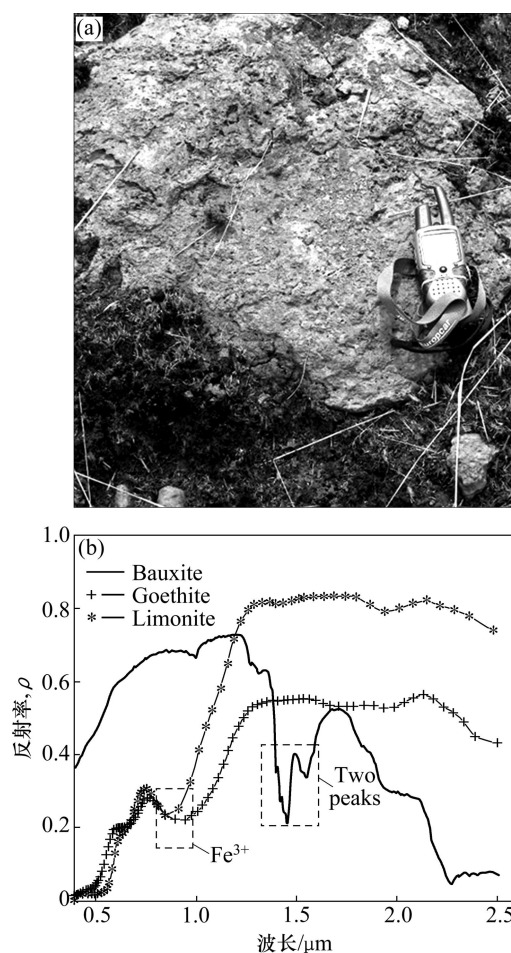


图3 铝土矿矿石标本照片(a)与光谱特征(b)

Fig. 3 Photo of ore sample (a) and spectra curves of bauxite (b)

志。在 ALOS341 假彩色合成的遥感影像上铁帽呈粉红色,植被为绿色,河流为蓝色(参见电子版),如图 4(a)所示。结合数字高程模型 DEM 数据,建立海拔分级分带图,根据铝土矿的地形分布特点和遥感解译标志,则能较好对铝土矿的空间分布情况进行定位和制图。人工解译的精度虽然较高,但是工作量大,不适宜大范围制图,较适合利用信息提取技术进行计算机自动制图。

2.4 铝土矿信息提取

在遥感图像处理软件 ENVI4.5 中对 ALOS 影像的 1、2、3 和 4 波段分别进行 ICA 和 PCA 分析,对 ALOS 4/1 波段组合进行比值运算。结果表明:ICA 和 PCA 的 4 个分量中,第一分量 IC1 和 PC1 能够较好地反映铁帽信息,IC1 和 PC1 的灰度图像分别如图 5(b)和图 5(c)所示,ALOS 4/1 的比值灰度图像如图 5(d)所示。可以看出,IC1 提取的铁帽影像最为清晰,与周边地

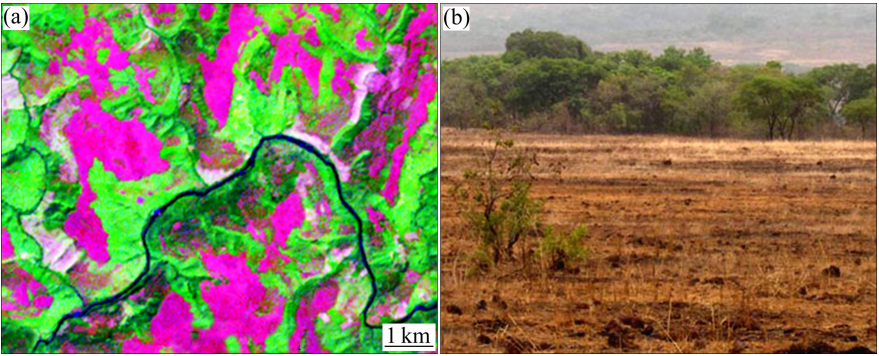


图 4 铝土矿的影像(a)与地貌特征(b)

Fig. 4 Image (a) and topography (b) of bauxite

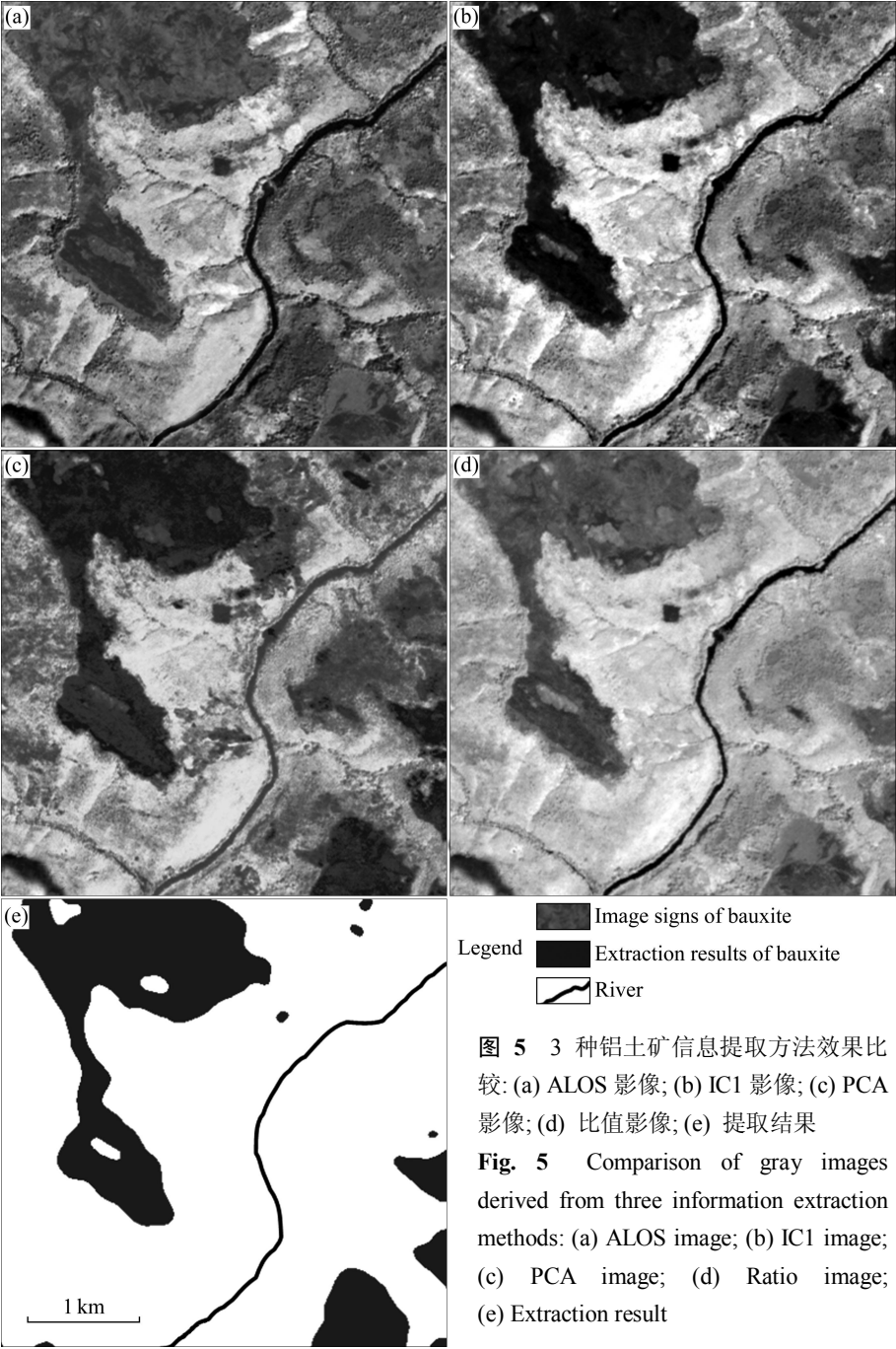


图 5 3 种铝土矿信息提取方法效果比较: (a) ALOS 影像; (b) IC1 影像; (c) PCA 影像; (d) 比值影像; (e) 提取结果

Fig. 5 Comparison of gray images derived from three information extraction methods: (a) ALOS image; (b) IC1 image; (c) PCA image; (d) Ratio image; (e) Extraction result

物的区分度最高, PC1 次之, 比值最差。

得到蚀变信息灰度图像后, 还需要进行图像分割以将蚀变信息提取出来。异常分割通常利用 $(X+k\sigma)$ 来确定异常下限和划分异常强度等级。 X 是某一成分的统计均值代表区域背景, σ 是该成分的标准差, k 是系数一般取值在[1, 3]之间。常规情况下由于已知样本数量太少, 不足以建立合理的分割阈值准则时, 变量的均值和标准差统计在整个灰度图像内进行。本次试验在野外 GPS 观测数据的支持下, 通过与遥感影像进行比较分析, 建立了合理的铝土矿解译标志, 可以通过解译标志来产生阈值统计样本。在 ALOS 影像上根据解译标志共采集 60 个统计样本点, 以分别统计 ICA、PCA 和比值灰度影像中蚀变图斑的最小值、最大值、均值 X 和标准差 σ , 统计结果如表 2 所列, 多次试验表明 $k=1$ 最佳。得到 ICA、PCA 和比值蚀变信息提取阈值分别为 1.05、-19.4 和 0.52, 铝土矿的蚀变信息提取结果如图 5(e)所示。

2.5 结果评价分析

将提取的铝土矿蚀变结果图与野外 GPS 采集的铝土矿范围实测数据进行比较, 对在一定图斑内提取的蚀变面积与 GPS 测量面积进行统计分析。定义吻合率来表示信息提取的精度, 如式(3)所示, 吻合率越大

表明提取的有效信息量越大, 精度越高。

$$E=\left(1-\frac{|S_1-S_2|}{S_1}\right)\times 100\%$$

(3)

式中: E 为吻合率; S_1 为观测面积; S_2 为提取面积。

统计了 GPS 实地测量的 8 个图斑, 结果如表 3 所列。ICA、PCA 和比值提取的蚀变吻合率从高到低依次为 84.5%、80.9%和 79.4%, 说明 ICA 法在该地区的铝土矿蚀变信息提取中具有最好的效果, PCA 次之, 比值法最差, 这与 3 个变量的灰度影像特征比较也是一致的。野外观测结果还表明 ICA 的第一分量 IC1 的值越低的区域, 铝土矿的蚀变程度越高, 信息提取的吻合率也越高。

3 遥感成矿预测

研究区位于赤道附近, 广泛分布的基性富铝岩石, 在湿热多雨和干旱交替的热带气候条件下形成了红土型铝土矿。由于强烈的风化作用, 区内地形平缓起伏, 多为低山丘陵地带, 一方面有利于地表水和地下水下渗, 另一方面又使风化产物积聚起来^[13]。研究资料表明^[20]: 铝土矿的分布情况与海拔标高有一定的正相关

表 2 3 种铝土矿信息提取的灰度图像统计信息

Table 2 Statistics of gray images derived from three information extraction methods

Method	X			Standard deviation, σ	Threshold of extraction
	Minimum	Maximum	Mean		
ICA	-5.49	5.88	0.05	1.00	1.05
PCA	-54.29	54.54	-26.00	6.60	-19.4
Ratio	0.18	1.64	0.34	0.18	0.52

表 3 3 种铝土矿信息提取方法野外验证结果比较

Table 3 Comparison of field verification for three information extraction methods

Number	Location	Area of GPS/ha	ICA		PCA		Ratio	
			Area/ha	Matching rate/%	Area/ha	Matching rate/%	Area/ha	Matching rate/%
1	W13.44°, N10.87°	320.9	276.6	86.2	400.2	75.3	402.8	74.5
2	W13.44°, N10.79°	1 413.3	1 633.8	84.4	1 622.5	85.2	1 663.5	82.3
3	W13.48°, N10.97°	876.4	1 117.4	72.5	661.7	75.5	1 108.6	73.5
4	W13.32°, N10.77°	768.5	936.8	78.1	971.4	73.6	584.8	76.1
5	W13.48°, N10.85°	247.8	279.3	87.3	201.7	81.4	284.0	85.4
6	W13.34°, N10.97°	1 021.5	1 197.2	82.8	872.4	85.4	1 219.7	80.6
7	W13.45°, N10.76°	674.8	616.8	91.4	739.6	90.4	567.5	84.1
8	W13.27°, N10.82°	546.6	583.8	93.2	649.9	81.1	429.1	78.5
Mean				84.5		80.9		79.4

性,这是由于在海拔较高的情况下,潜水面以上的氧化带也相对较高,对水的垂直循环和淋滤作用有利,因此化学风化作用强烈,更有可能形成品位更高,矿层更厚的铝土矿。对GPS野外观测样区的统计分析表明,内铝土矿主要分布于在海拔250 m以上且切割相对较大的山顶和斜坡上,而低海拔的平缓地带铝土矿基本不发育。

以褐铁矿硬壳层形成的铁帽为主要遥感找矿特征进行铝土矿的信息提取,再结合地形地貌要素对遥感提取结果进行信息复合与分析,从而得到研究区铝土矿的地表空间分布图,如图6所示。结果表明,与铝土矿有成生关系的褐铁矿硬壳层遭受水系切蚀及地形影响而不连续,总体呈现北北东向展布的Soussouba带和Bergue区带以及北东向的展布Botowel带。褐铁矿硬壳层多呈支离破碎状,单体数量多且规模普遍不

大,面积最大者约为15 km²,面积最小者不到1 km²。整个研究区的面积约为1 235.7 km²,利用独立分量分析ICA方法提取得到的铝土矿地表面积约为210.1 km²,植被覆盖区域的面积约为461.8 km²。植被的覆盖使得部分铝土矿的信息遥感技术难以探测得到,从而使得铝土矿的地表分布面积大于210.1 km²。铝土矿的层厚从几米到几十米不等,目前还缺乏详细的数据资料,因而铝土矿的矿石资源量还难以估算。

根据ICA的第一分量IC1值的高低和地貌特征,还可以进一步将铝土矿蚀变信息提取区域划分为找矿最佳、找矿可行与找矿可能3类。在进一步的找矿勘查工作中宜参照以下规律:1) IC1的值越低,铝土矿的蚀变程度越高,因此,优选靶区宜在IC1的低值区选取;2) 首选单体面积较大、连续的遥感褐铁矿硬壳层单元,该类遥感单元垂向剖面比较完整,矿化连续性好;3) 优先选择剥蚀程度弱、排水通畅、海拔高程250 m以上的低缓丘岭处,而相对高差较小的平坦山丘及冲沟、河流两侧相对高差较大者不利于成矿。

由于研究区位于海外,找矿勘查的成本比国内的高,利用遥感技术进行面上前期筛查,可有效降低成本,提高效率。除地形和风化作用等因素外,成矿条件和沉积环境等因素对铝土矿的形成起着至关重要的作用。然而,由于勘查工作还处于初期阶段,后续工作仍在进行,加之本次实验获得的野外数据比较有限,所得到的认识仅仅围绕遥感信息提取展开。更加完整深入的认识有待于在进一步的工作中得到加强。

4 结论

1) 本区的铝土矿为红土型三水铝石矿,大部分被铁矾土所覆盖,且Al³⁺和OH⁻的遥感信息较弱,较难单独分离。褐铁矿所形成的铁帽是该地区寻找铝土矿的重要标志,因此,该区的铝土矿蚀变信息提取是提取Fe³⁺为主,并作为指示信息。

2) 引入ICA法用于铝土矿的蚀变信息遥感提取,使得各个变量之间相互独立且数据表达简洁有效,有利于后续的蚀变信息阈值分割处理和提高铝土矿蚀变信息提取的精度。实验结果表明:ICA法在该地区的铝土矿蚀变信息提取中具有最好的效果,PCA法次之,比值法最差,吻合率分别为84.5%、80.9%和79.4%。

3) ICA的第一分量IC1值越低的区域,铝土矿的蚀变程度越高,信息提取的吻合率也越高,优选靶区宜在IC1的低值区选取。

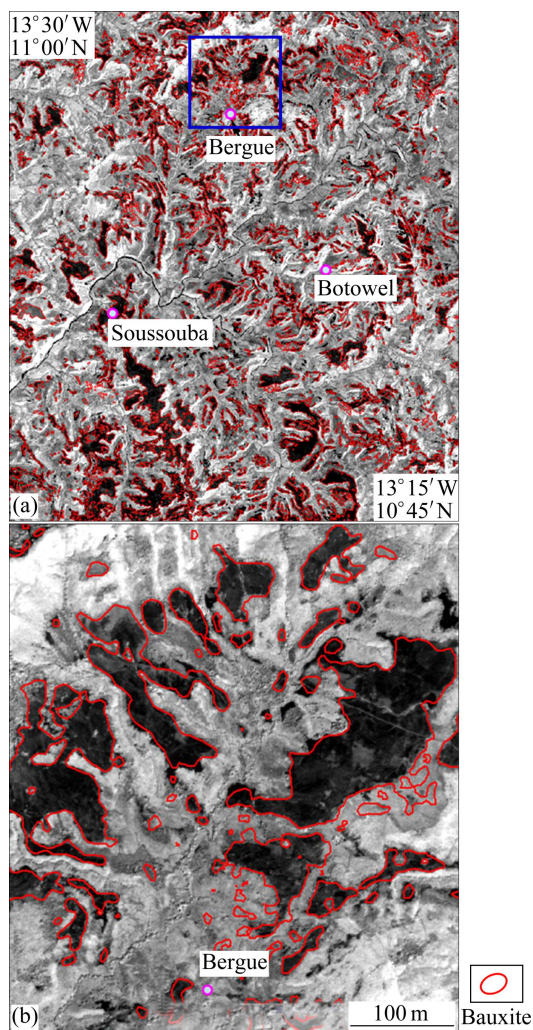


图6 铝土矿蚀变遥感提取结果空间分布图

Fig. 6 Spatial distribution of bauxite alteration derived from remote sensing extraction: (a) Whole image; (b) Enlarged image of thosen zone in Fig. 6(a)

4) 由于部分铝土矿被植被所覆盖而使得遥感技术难以探测得到, 从而使得实际的铝土矿的地表分布面积大于遥感提取的面积。实验结果表明: 区内铝土矿主要分布于海拔 250 m 以上且切割相对较大的山顶和斜坡上, 而低海拔的平缓地带铝土矿基本不发育。基于上述两个特点, 铝土矿蚀变信息的遥感提取必须要与地形地貌特征进行信息复合与分析, 以提高信息提取的准确度。

REFERENCES

- [1] 李领军, 张云峰, 张 蓉, 冯 淳, 焦超卫, 张文龙. 几内亚金迪亚地区红土型铝土矿遥感矿化信息与找矿预测[J]. 遥感信息, 2010(5): 93–98.
LI Ling-jun, ZHANG Yun-feng, ZHANG Rong, FENG Chun, JIAO Chao-Wei, ZHANG Wen-long. Mineralized information and metallogenetic prospect of remote sensing for the lateritic bauxite in Kindia of Guinea [J]. Remote Sensing Information, 2010(5): 93–98.
- [2] 王润生, 丁 谦, 张幼莹, 杨苏明. 遥感色调异常分析的协同优化策略[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1999, 24(5): 498–502.
WANG Run-sheng, DING Qian, ZHANG You-ying, YANG Su-ming. Optimized cooperating strategy for analysis of remote-sensing color tone anomaly [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(5): 498–502.
- [3] 王润生. 遥感地质技术发展的战略思考[J]. 国土资源遥感, 2008, 75(1): 1–12.
WANG Run-sheng. On the development strategy of remote sensing technology in geology [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2008, 75(1): 1–12.
- [4] 陈松岭. 广西三水型铝土矿的遥感研究和找矿[J]. 大地构造与成矿学, 1990, 42(14): 83–87.
CHEN Song-ling. Remote sensing for study and prospecting of bauxite (gibbsite) in Guangxi [J]. Geotectonica et Metallogenia, 1990, 42(14): 83–87.
- [5] 高光明, 周利霞, 黄宝华. 波罗芬高原红土型铝土矿遥感影像特征及信息提取[J]. 信息技术与信息化, 2007, 73(3): 73–75.
GAO Guang-ming, ZHOU Li-xia, HUANG Bao-hua. Remote sensing image characteristic and information extraction of red soil bauxite in Belovens [J]. Information Technology and Informatization, 2007, 73(3): 73–75.
- [6] 成 功, 陈松岭, 祝瑞勤, 杨 震. 平果堆积型铝土矿地质特征及遥感找矿预测[J]. 轻金属, 2009(8): 11–19.
CHENG Gong, CHEN Song-ling, ZHU Rui-qin, YANG Zhen. Geological characteristics and remote sensing forecasting of accumulated bauxite of Pingguo [J]. Light Metals, 2009(8): 11–19.
- [7] 杨竹青, 李 勇, 胡德文. 独立成分分析方法综述[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 762–773.
YANG Zhu-qing, LI Yong, HU De-wen. Independent component analysis: A survey [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(5): 762–773.
- [8] 李明明, 周可法, 孙 莉, 秦艳芳, 孙雷刚, 王桂钢. 基于 ICA 的遥感蚀变信息提取方法的研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 308–316.
LI Ming-ming, ZHOU Ke-fa, SUN Li, QIN Yan-fang, SUN Lei-gang, WANG Gui-gang. Extraction of alteration information from remote sensing data based on ICA [J]. Arid Land Geography, 2011, 34(2): 308–316.
- [9] COMON P. Independent component analysis: A new concept [J]. Signal Processing, 1994, 36(3): 287–314.
- [10] LEE T W. Independent component analysis using an extended informal algorithm for mixed Subgaussian and Supergaussian sources [J]. Neural Computation, 1997, 11(2): 409–433.
- [11] PENG Guang-xiong, YE Zhen-chao, GAO Guang-ming, FENG De-shan, XIONG Yun. Pegmatite remote sensing extraction and metallogenetic prediction in Azubai area, Xinjiang [J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(S3): s591–s596.
- [12] 张成学, 张泽夏, 王国库. 几内亚共和国博凯 558 铝土矿区赋矿岩石特征[J]. 化工矿地质, 2009, 31(1): 25–31.
ZHANG Xue-cheng, ZHANG Ze-xia, WANG Guo-ku. Features of ore-boring rocks of 558 bauxite in boke guinea [J]. Geology of Chemical Minerals, 2009, 31(1): 25–31.
- [13] 高灶其, 樊克锋. 几内亚红土型铝土矿床地质特征[J]. 资源调查与环境, 2009, 30(2): 115–119.
GAO Zao-qi, FAN Ke-feng. Geological characteristics of red clay type bauxite deposits in Guinea [J]. Resources Survey & Environment, 2009, 31(1): 25–31.
- [14] PENG Guang-xiong, SHEN Wei, HAN Zhen, SU Wei. Evaluation of tobacco planting suitability based on remote sensing—A case study of Mile County, China [J]. Sensor Letters, 2011, 9(3): 1108–1114.
- [15] 徐红伟, 张先忠. 几内亚共和国博凯地区红土型铝土矿地质特征和成矿机理初探[J]. 长春工程学院学报: 自然科学版, 2009, 10(1): 87–91.
XU Hong-wei, ZHANG Xian-zhong. Geological character and ore mechanism of lateritic bauxite deposits in Boke, Guinea [J]. Journal of Changchun Institute of Technology: Natural Science Edition, 2009, 10(1): 87–91.
- [16] JUTTEN C, HERAULT J. Independent component analysis versus PCA [C]// Proceedings of European Signal Processing Conf. Bruges, Belgium: Springer, 1988: 287–314.
- [17] CHEN F, GUAN Z, YANG X, CUI W. A novel remote sensing image fusion method based on independent component analysis [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32: 2745–2763.
- [18] JUTTEN C, HERAULT J. Blind separation of sources (Part I): An adaptive algorithm based on neuromimetic architecture [J]. Signal Processing, 1991, 24(1): 1–10.
- [19] BELL A J, SEJNOWSKI T J. An information-maximization approach to blind separation and blind deconvolution [J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1129–1159.
- [20] 袁杨森, 高灶其, 张成学, 徐红伟. 几内亚博凯地区红土型铝土矿成矿机理和控矿因素研究[J]. 河南理工大学学报: 自然科学版, 2010, 29(3): 344–351.
YUAN Yang-sen, GAO Zao-qi, ZHANG Cheng-xue, XU Hong-wei. Study on the ore forming mechanism and the ore controlling factors of lateritic bauxite deposits in Boke of Guinea [J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science, 2010, 29(3): 344–351.

(编辑 龙怀中)