

提取黔西南红粘土的 ASTER 波段比值技术研究

于彩虹^{①,②}, 武晓波^①, 燕守勋^①

(^① 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101; ^② 中色地科矿产勘查股份有限公司, 北京 100012)

摘要:红粘土型金矿是黔西南的一个重要的金矿类型, 我们以往的研究实践表明: Aleks Kalinowski 等^[1]研制的红粘土型金矿 ASTER 波段比值 4/5 不适合黔西南红粘土的信息提取, 因此, 需要研究适合该地区的 ASTER 波段比值。ASTER 波段比值组合 2/1、4/3 和 (5+7)/6 彩色合成后被成功地应用到研究区的红粘土提取中。比值的选择是建立在对矿区红粘土光谱曲线特征的分析 and ASTER 图像预处理的基础上, 该比值组合能够有效提取出 ASTER 图像上的矿区红粘土信息, 并可以扩展应用到周边地区, 寻找到更多含金红粘土的分布区, 这充分显示了 ASTER 波段比值彩色合成技术在红粘土提取中的作用。

关键词:红粘土; ASTER; 波段比值; 信息提取; 大气校正

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.019

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2012)120-0096-07

Research on ASTER Band Ratio to Extract Red Clay in Southwest Guizhou

YU Cai-hong^{①,②}, WU Xiao-bo^①, YAN Shou-xun^①

(^① Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101;

^② Sinotech Minerals Exploration Co., Ltd., Beijing 100012)

Abstract: Red clay-type gold deposit is an important gold type in southwest Guizhou. Our research in the past showed that the ASTER index of band ratio 4/5 put forward by Aleks Kalinowski^[1] can not be used for extraction of red clay in southwest Guizhou, so that, a study of ASTER index for red clay extraction in this area is necessary. The combination of ASTER band-ratio images 2/1, 4/3 and (5+7)/6 in RGB were applied successfully for the red clay extraction in study area. The selection of band ratio was based on the analysis of spectra characteristics of red clay samples and preprocessing ASTER image. This combination of band ratios has successfully extracted red clay in the gold mining area, and can assist to find more similar red clay in surrounding area, which demonstrated usefulness of ASTER band ratios color combination in extracting red clay.

Key words: red clay; ASTER; band ratios; information extraction; atmospheric correction

1 引言

红粘土型金矿床首先是在 1980 年于西澳大利亚的博尔顿地区发现的, 而中国最早于 1989 年在湖北嘉鱼蛇屋山发现了该类型金矿床, 之后在贵州、云南、湖南、广西等地先后也发现了一大批类似的金矿床^[2]。在贵州省西南部的晴隆、贞丰、兴仁、安龙和

盘县等地, 有很多红粘土型金矿, 它们是分布在贵州喀斯特山区的一种特殊类型的金矿。经过近 20 年的地质勘查、开发与研究, 已经成为该区黄金生产的主要接替资源^[3]。遥感在矿产勘查中起着很重要的作用, 特别在提取与金矿化有关的蚀变信息中有很成功的应用^[4]。本文在红粘土的光谱特征分析的基础上, 利用 FLAASH 大气校正后的 ASTER 图像

收稿日期: 2011-02-21 修订日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“黔西南红粘土型金矿的光谱指数研制和 ASTER 遥感填图研究”, 批准号: 40772199。

作者简介: 于彩虹(1985~), 女, 硕士研究生, 主要方向是遥感在地质找矿中的应用。

E-mail: yuchirsa@hotmail.com

— 96 —

提取红粘土的分布信息。

波段比值法能压制反照率、地形坡度等不同的信息,增强成分信息,在地质填图中被广泛使用^[5~6]。然而,在开展中澳合资贵州金洛矿业公司委托项目:“黔西南烂泥沟金矿外围靶区遥感勘查”应用实践中,鉴于黔西南发育脉型(烂泥沟型)、层间型(水银洞型)、土型(老万场型和砂锅厂型)3类金矿^[7],其中,在大量的相关文献中,土型金矿又称为红土型金矿,文献中的英文名称为 Laterite(红矾土)。因此,我们直接引用 ASTER 矿物指数处理手册^[1]中的红矾土指数:ASTER Band4/Band5,填制了红矾土指数图(图 1)。该图中,东部三叠系碎屑岩区全部和西部二叠系一下三叠统碳酸盐区的部分为红矾土分布的亮白区,被称为典型红土型金矿的红旗坡金矿^[8]及其他所谓的红土型金矿分布在暗区,表明由来自于澳大利亚 Boddington 金矿的 Laterite 研制的光谱指数不适用于黔西南的所谓红土型金矿遥感填图,因此,研究适用于中国黔西南红粘土的 ASTER 波段比值很有必要。

以黔西南贞丰县红旗坡金矿区为实验区,采集矿区含金红粘土样品,并用 ASD 光谱仪测量样品的光谱曲线。通过分析样品的光谱曲线特征,选择比值 2/1,4/3,(5+7)/6 为增强红粘土中特征矿物的波段比值。为把比值应用于遥感图像,需要将 ASTER DN 值图像校正为反射率图像。本文将具体介绍比值选择、大气校正和应用到遥感图像上的过

程和结果分析。

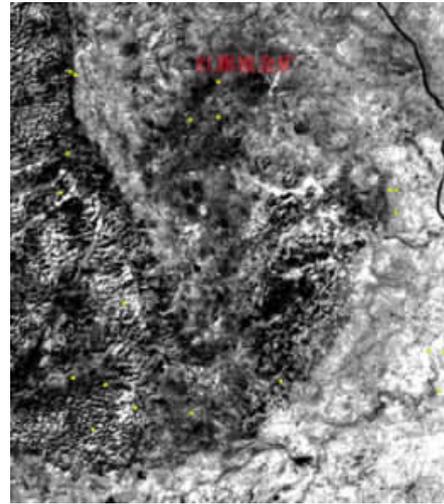


图 1 贵州黔西南烂泥沟金矿外围红矾土指数图 (ASTER Band4/Band5)

2 区域地质背景

红旗坡红粘土型金矿床(图 2)位于黔西南贞丰县赖子山背斜北倾伏端,右江造山带北缘,紧邻在扬子准地台西南缘的大地构造位置上^[9]。该矿床产于第四纪松散堆积物(土壤)中,其底板基岩均为下二叠统茅口组石灰岩,是与喀斯特作用密切相关的一种特殊的金矿类型。容矿介质主要是高岭石、水云母等粘土矿物,金主要以 <1μm 呈吸附状态或呈包裹体形式存在于褐铁矿、伊利石、绢云母、高岭石及石英钠长石、黄铁矿、辉锑矿等矿物中^[3]。

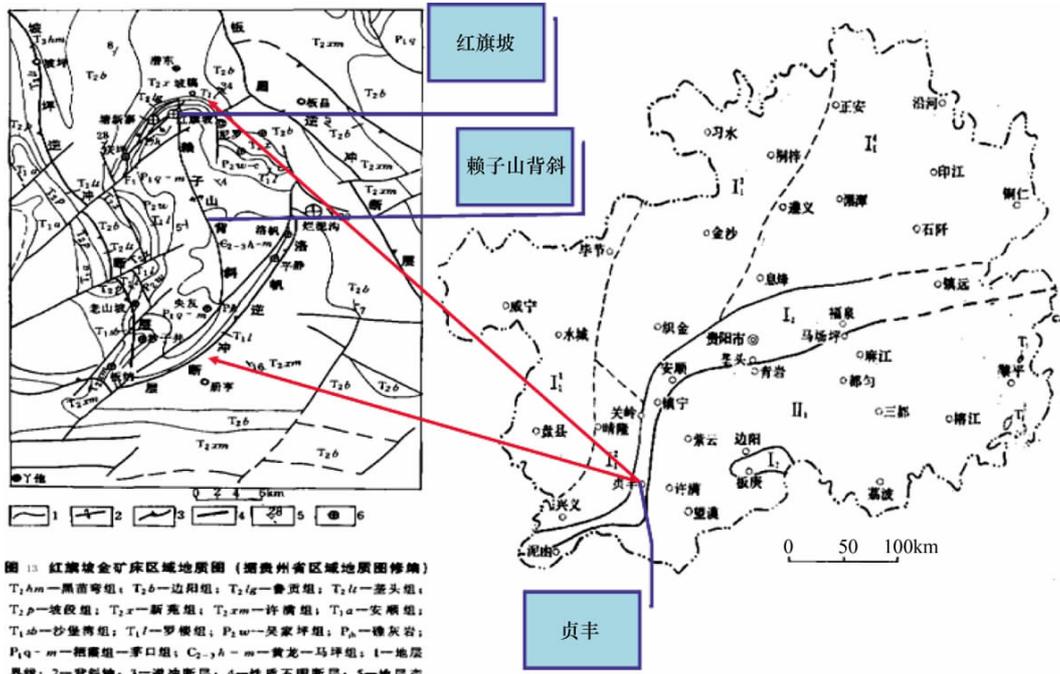


图 2 研究区位置图(摘自贵州省 1:10 万贞丰县坡稿矿区区域地质图^[8])

红旗坡金矿的矿源体位于戈塘层序,戈塘层序出露在关岭—兴仁—一线以东的安龙、贞丰等地,基本层序是在下二叠统茅口组石灰岩之上,平行不整合覆盖着上二叠统龙潭组含煤陆源的碎屑岩并少量碳酸盐岩,往上是下三叠统夜郎组钙质岩系及石灰岩。该层序最大的特点是上、下二叠统界面之间缺失峨眉山玄武岩系,茅口组顶部常有强硅化角砾化灰岩存在,是戈塘卡林型金矿的矿化部位^[8]。

当前开发利用的红粘土型金矿主要分布在下二叠统茅口组的岩溶侵蚀面上,这类矿床较典型的有老万场金矿、砂锅厂金矿、红旗坡金矿等。它们是由卡林型金矿床经暴露地表遭受风化作用改造,坍塌、迁移、堆积、淋滤而形成新类型金矿,其矿体的形态因受岩溶地形地貌、构造环境的制约而复杂多样,如老万场金矿的主矿体呈岩溶漏斗充填的“漏斗状”,砂锅厂、红旗坡等金矿的某些金矿体则分布在第四系沉积物覆盖的“石林微地貌”的沟壑中(图 3)。红粘土型金矿床大多产于王砚耕^[3]所划分的黔西南地区地壳表层构造“层、块、带”单元中相对隆升的地块内,这些“块”具有第四纪构造演化较为强烈、水文地质单元相对独立封闭的特点。

3 实验区样品的光谱测量和分析

选择红旗坡矿区作为实验区,在此矿区均匀定位了 4 个 GPS 点,共采集了 12 个红粘土和含矿灰岩样品,样品主要来自于矿区内开采后残余的含金红粘土,在地质剖面上是位于灰岩之上或是其下部的风化红粘土,也有位于喀斯特石林夹缝内的红粘土和含矿灰岩(如图 3),都位于地表采矿的部位,可以代表矿区内的含金红粘土。红粘土样品的 XRD 分析结果:含有石英、高岭石、蒙脱石、云母、锐钛矿、针铁矿、方解石等。



图 3 红旗坡矿区的野外照片—石林微地貌

在 2008 年 12 月一个光照充足的上午进行样品的 ASD 光谱测量,光谱仪的测量范围是 350nm~2500nm,以灰板为标准参考板,采用垂直测量的方

法,对每个样品进行 5 次光谱测量。首先,对原始数据进行筛选,通过 ASD ViewSpecPro 软件进行数据预览和格式转换处理,删除有明显异常值的曲线;然后,根据灰板的标定系数计算样品反射率,并计算每个样品的平均反射率;最后,对每个样品的平均反射率曲线进行了均值滤波去噪,得到了 12 个样品的反射率曲线。

采用垂直测量的方法,反射率的计算公式如下:

$$\rho(\lambda) = \frac{V(\lambda)}{V_s(\lambda)} \cdot \rho_s(\lambda) \quad (1)$$

式中: $\rho(\lambda)$ 为被测物体的反射率, $\rho_s(\lambda)$ 为标准板的反射率, $V(\lambda)$ 、 $V_s(\lambda)$ 分别为测量物体和标准板的仪器测量值。

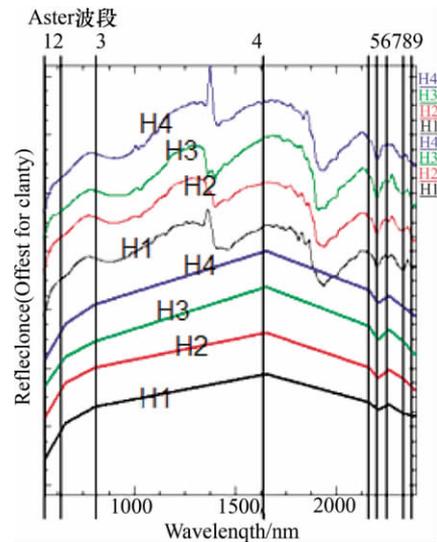


图 4 红旗坡 4 个采样点(H1-H4)的平均实测光谱曲线和重采样到 ASTER 前 9 个波段的光谱曲线

图 4 是实验区样品实测光谱曲线(350nm~2500nm)重采样到 ASTER 的可见光近红外—短波红外 1~9 波段的反射率曲线。对比图 5 中标准光谱库里的矿物反射率曲线,并结合样品的 XRD 矿物分析结果可知:在第一波段(绿光波段)520nm~600nm 和第三波段(近红外波段)800nm~1000nm 有明显的吸收谷,是含铁矿物如针铁矿等存在的标志;第六波段 2204nm 左右的吸收峰特征突出,是粘土类矿物如高岭石,蒙脱石,云母存在的标志。为了突出矿区的红粘土信息,利用含铁矿物在绿光波段(b1)、近红外波段(b3)的吸收和红光波段(b2)的反射特征,以及粘土矿物在 2206nm(b6)的吸收特征,确定波段比值 b_2/b_1 和 b_4/b_3 以突出含铁矿物的存在,比值 $(b_5 + b_7)/b_6$ 以突出粘土矿物的存在。对于绿色植被、水体等干扰地物在 b_2/b_1 和 b_4/b_3 上均能被抑制,为此设置波段比值 $b_2/b_1, b_4/b_3,$

$(b_5 + b_7) / b_6$ 来增强红粘土信息。

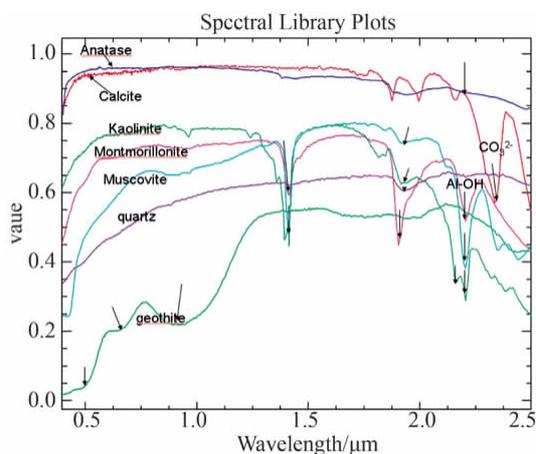


图5 样品 XRD 分析的矿物组分在 USGS 和 JPL 光谱库中的光谱曲线(箭头指示反射率曲线反射峰或吸收谷的位置)

4 ASTER 遥感图像的选择与预处理

本文利用搭载在美国 NASA 的 Terra 航天平台上的先进星载热发射和反射辐射仪 ASTER 遥感影像,它从可见光波段到热红外波段有 14 个波段, ASTER 在短波红外区间有 6 个波段,扫描幅宽是 60km,观测能力可扩展到 232km,空间分辨率从可见光近红外波段的 15m,短波红外波段的 30m 到热红外波段的 90m。由于 ASTER 数据覆盖面积大,价格低廉且光谱和空间分辨率较高,在干旱一半干旱地区资源勘查中广泛用来识别矿物岩石^[4]。本研究只使用 ASTER 可见光—近红外和短波红外波段这 9 个波段来提取红粘土信息。ASTER 影像主要技术参数见表 1。

购买包含红旗坡矿区在内的,基本无云的 2003.03.02 获取的 ASTER 影像,此初春季节的植被较干枯稀疏。数据级别是 1B 级,ASTER 的 L1B 数据记录的是 DN 值,而在 ENVI4.7 中打开 ASTER L1A/L1B 的数据时会自动完成对 VNIR 和 SWIR 数据的定标,变为辐射亮度数据,单位是 $W/(m^2 \cdot \mu m \cdot sr)$ ^[10]。通过对简化的黑暗像元大气校正方法原理的分析,本研究选择利用 FLAASH 大气校正方法得到较精确的 ASTER 反射率图像。

对于经常被用在多光谱遥感地质领域的简化的黑暗像元法大气校正方法^[11],经过分析,它的波段比值并不能很好地反映对应反射率的差异。其基本原理是在假设待校正的遥感图像上存在黑暗像元、地表朗伯面反射和大气性质均一,并忽略大气多次散射作用和邻近像元漫反射作用的前提下,反射值

表 1 ASTER 影像主要技术参数—引自 ASTER Reference Guide(Version 1.0)^[14]

Radiometer	Band	Wavelength (μm)	Spatial resolution	Quantum number
VNIR	1	0.52~0.60	15m	8 bits
	2	0.63~0.69		
	3N	0.78~0.86		
	3B	0.78~0.86		
SWIR	4	1.600~1.700	30m	8 bits
	5	2.145~2.185		
	6	2.185~2.225		
	7	2.235~2.285		
	8	2.295~2.365		
	9	2.360~2.430		
TIR	10	8.125~8.475	90m	12 bits
	11	8.475~8.825		
	12	8.925~9.275		
	13	10.25~10.95		
	14	10.95~11.65		

很小(近似 0)的黑暗像元由于大气的影,使得这些像元的反射值相对增加,可以认为这部分增加的反射值是由于大气影响(主要是大程辐射)产生的。由于程辐射的影响随波长的增加而变弱,使得这种大气校正方法对可见光波段大气校正效果较好,在短波红外波段精度就很低;而且因为忽略了公式(2)中的透射率和跟波长相关的入射太阳辐射亮度的影响,此种简化的黑暗像元法大气校正不能很好地反映波段比值中体现的反射率差异。地物表面反射率公式^[12]为:

$$R(\lambda) = \frac{\pi(L(\lambda) - L_p(\lambda))}{E_0(\lambda) \cos\theta T} \quad (2)$$

公式中, $R(\lambda)$: 相应波长 λ 处的地物表面反射率; $L(\lambda)$: 地物表面反射辐射亮度; $L_p(\lambda)$: 程辐射值; $E_0(\lambda)$: 相应波长的太阳光谱辐照度; θ : 为太阳天顶角; T : 太阳辐射入射方向上的大气透射率。

FLAASH 是基于 MODTRAN4+辐射传输模型,该算法精度高,MODTRAN 模型是由进行大气校正算法研究的领先者 Spectral Sciences, Inc 和美国空军实验室(Air Force Research Laboratory)共同研发;ITT VIS 公司负责集成和 GUI 设计。FLAASH 大气校正通过图像像素光谱上的特征来估计大气的属性,不依赖遥感成像时同步测量的大气参数数据;基于像素级的校正,校正目标像元和邻

近像元交叉辐射的“邻近效应”；结果除了真实地表反射率外，还可以得到整幅图像内的能见度、卷云与薄云的分类图像、水汽含量数据^[10]。

ASTER 数据的 FLAASH 校正步骤如下：

①打开红旗坡所在的 ASTER 图像—L1B 数据 Prdat0113. dat, 确认其头文件是 Floating Point 格式, 即 ENVI 已自动完成辐射定标；

②统计检查每个波段的直方图, 确保辐射亮度数据的直方图是连续分布, 若不是, 需要经过 ENVI 中的 Basic Tools —> Preprocessing —> General Purpose Utilities —> Cross — Track Illumination Correction, 本矿区 ASTER 图像的第 3 波段(见图 6 左)需要校正, 设置按 lines 的一次乘法校正, 效果最好, 得到直方图(图 6 右)符合要求；

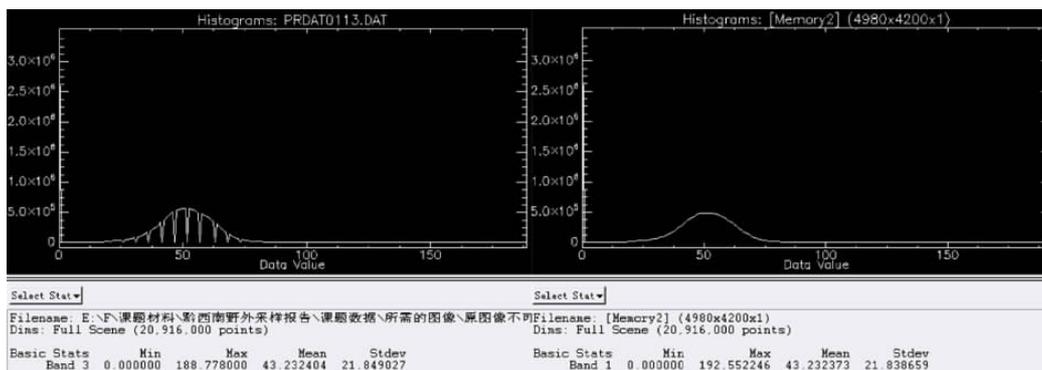


图 6 0113. dat 第 3 波段的直方图, 有一些不连续点(左); 校正后的直方图(右)

③将短波红外波段的图像从 30m 像元大小重采样到 15m 像元大小, 并与直方图校正后的前 3 个波段合并为 ENVI 标准文件。设置头文件信息—中心波长值(nm 为单位)、增益、偏移、像元大小、传感器类型等^[13]；

④将 ENVI 标准文件由 BSQ 转为 BIL 的格式, 进行 FLAASH 校正；

⑤将④中的 BIL 文件作为 FLAASH 校正的输入辐亮度文件。在图像上定位中心点的行列(2490, 2100)的经纬度坐标, 并从头文件中读出成像日期和

时刻, 红旗坡矿区所在的图像成像时间是 2003—03—02 的 03:36:36(格林威治时间), 高度 1km, 选择中纬度夏季的大气模型, 不做气溶胶和水汽处理。因为 ASTER 光谱分辨率低于 15nm 不适合做水汽反演, 并且其第二波段较宽包含植被红边, 估算能见度误差较大, 因此不用 K-T 气溶胶反演方法^[10]。这样得到了 FLAASH 大气校正后的反射率图像, 图 7 显示了 FLAASH 校正前图像上典型地物—植被、水体和红粘土采样点的辐亮度曲线(左)和 FLAASH 校正后对应地物的像元反射率曲线(右)。

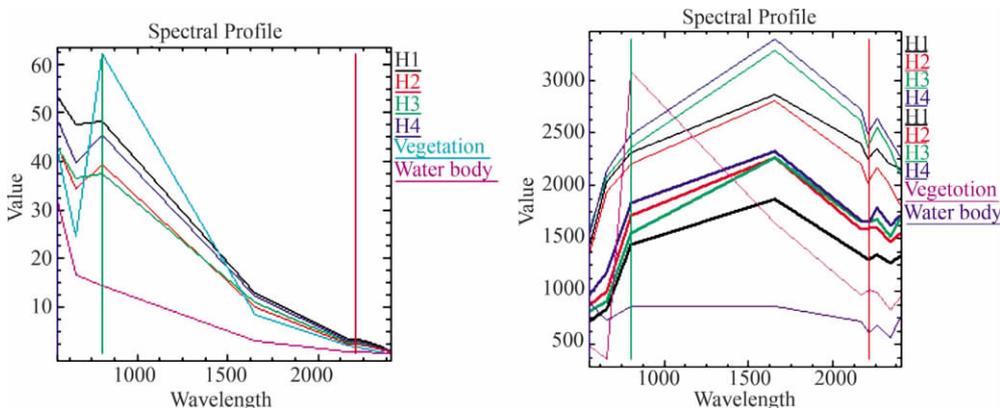


图 7 红旗坡矿区 FLAASH 大气校正前的像元辐亮度曲线(左)和校正后(右)图像上采样点像元光谱反射率(粗线)和植被、水体的像元光谱反射率, 以及样品实测反射率曲线(细线)

图 7 反映 FLAASH 校正前图像像元辐亮度值在短波红外波段普遍很低, 这与太阳入射辐射能在这些波段上较低有关, 由此可知, 精确的大气校正对于 ASTER 数据尤为必要。FLAASH 大气校正后

的反射率图像在短波红外波段的反射特征被很好地体现出来, 典型地物如植被、水体的反射率曲线较为理想。尽管由于 15m×15m 的粘土和岩石等混合像元的影响, 有些含有红粘土的像元在第 2 波段反

射特征和第 6 波段吸收特征不明显,但粘土采样点的反射率曲线在整个 500nm~2500nm 区间上,跟样品的实测光谱曲线形状很相近。根据植被、水体等地物校正后的光谱曲线说明 FLAASH 校正是有效的。值得注意的是,对 FLAASH 校正所得的反射率图像进行波段信息统计,除了第 2 波段,其他 8 个波段都有负值。由于 ASTER 数据的可见光—近红外区间跟短波红外区间的成像时间相差 1s,因此合并后的图像覆盖范围略有不同^[15],表现为图像边缘的光谱曲线有明显异常,需要用裁剪法将边缘除去。然后经过 Band Math 去除负值,再应用波段比值,以限制比值的值域范围,避免比值彩色合成图像出现偏色,便于地质解译。对于波段比值中分母为 0 的情况,ENVI 能自动检测出来,会把它们统一处理为 0 (参考 ENVI HELP 中的 Calculating Band Ratios)。

5 ASTER 遥感图像上红粘土信息的提取方法

根据地物光谱特征选择的波段组合进行彩色合成,能快速辅助了解研究区的大致地物如植被和岩石的分布,而波段比值则能根据不同地物的光谱差异,更细致地区分地物类型^[11]。本文结合这两种彩色合成方法对实验区展开研究。

5.1 假彩色合成

用 FLAASH 大气校正后的图像做 631RGB 假彩色合成,能进行有效的遥感地质解译。因为第 6 波段既突出了粘土矿物的 Al-OH 和 Mg-OH 的吸收位置,又有区别于植被在此波段的反射峰的特征;第 1 波段是层状硅酸盐中铁离子和铁氧化物(如针铁矿、褐铁矿)的特征吸收位置,第 3 波段是铁晶体的吸收位置和植被的高反射区^[16]。从图 8 的假彩色 631RGB 合成图像上很清楚得看到植被覆盖(绿色)和岩石土壤(粉色)的分布界限。假彩色合成图像上的颜色表示了各波段上地物的相对亮度值在合成图像上的反映。植被显示绿色,因为植被在第 3 波段高反射,第 6 和第 1 波段反射率普遍较低,红旗坡矿区(图 8)的红粘土(绿色三角位置)显示淡粉色,与其左上方的灰岩山头色调一致,无法将它们区分开,因此选择波段比值进行区分。

5.2 比值图像彩色合成

波段比值处理方法简单易行,对增强特征矿物组分信息尤为有效^[17]。根据前面对矿区红粘土样品的光谱分析,确定 b_2/b_1 、 b_4/b_3 和 $(b_5 + b_7)/b_6$ 分别作为突出含铁矿物和粘土矿物光谱特征的比值,



图 8 假彩色合成图像 631RGB

▲ H1-H4 采样点位置

用于 FLAASH 大气校正后的图像。由于单一的比值波段图像并不能有效地增强红粘土,而经过 b_2/b_1 、 b_4/b_3 、 $(b_5 + b_7)/b_6 \rightarrow RGB$ 彩色合成后(图 9 中 H1-H4)的淡粉色突出了矿区的红粘土,有效地区分了红粘土(淡粉色)和灰岩(黄绿色)、植被(蓝色或蓝紫色)等地物。其他类似的淡粉色的区域,可以结合地质图(图 2)中的构造带分布,作为靶区来寻找含金红粘土。此比值彩色合成图像能从色调上有效地区分常规 631RGB 彩色合成图像上区分不出来的岩石和红粘土(图 8 中大片的粉色区域),达到了增强矿区红粘土的效果。

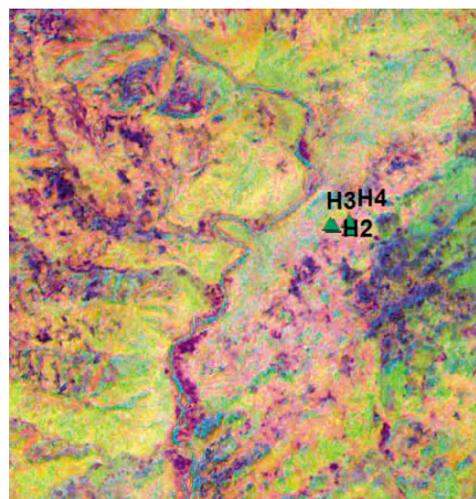


图 9 比值彩色合成图像 b_2/b_1 、 b_4/b_3 、 $(b_5 + b_7)/b_6 \rightarrow RGB$

▲ H1-H4 采样点位置

6 结束语

本研究通过对黔西南贞丰县红旗坡金矿区的红粘土样品的光谱测量和分析,选择能突出红粘土光谱特征的波段进行假彩色合成和波段比值彩色合

成。而地质领域常用的简化的黑暗像元法大气校正并不能有效地体现反射率的差异,特别是短波红外波段的反射率。因此对 ASTER 图像进行了基于大气辐射传输方程的 FLAASH 大气校正,得到的反射率图像可以通过典型地物的光谱曲线评价其大气校正是有效的。将波段比值组合应用到 FLAASH 校正后的反射率图像上,比值组合 $b_2/b_1, b_4/b_3, (b_5 + b_7)/b_6 \rightarrow RGB$ 能有效地区分出常规假彩色合成图像中无法分开的灰岩和红粘土,显示出 ASTER 波段比值彩色合成技术在红粘土提取中的作用。

在选择特征波段比值组合以及将其应用到遥感

图像上之前,需要对感兴趣的红粘土光谱曲线特征做光谱分析,并将遥感图像做精确的大气校正,使图像光谱曲线能反映出已知地物的光谱特征。ASTER 图像的 FLAASH 校正结果能达到恢复地物反射率的目的,但统计信息表明其反射率有负值,在应用波段比值之前需要去除负值,使波段比值每个区间值对应的地质意义更加明确。

单一的波段比值图像显示地物的能力很弱,而将这三个单波段比值图像进行合适顺序的彩色合成,能产生跟矿区红粘土分布一致的结果图像,达到提取目标红粘土的目的。

参考文献

- [1] Kalinowski A., Oliver S., Aster mineral index processing manual[J]. Remote Sensing Applications Geoscience Australia, 2004: 1-36.
- [2] 陈赶良, 杨柏林. 黔桂地区微细浸染型金矿蚀变信息提取机理[J]. 环境遥感, 1996, 11(2): 88-93.
- [3] 王砚耕, 陈履安, 李兴中, 等. 贵州西南部红粘土型金矿特征及其分布规律[J]. 贵州地质, 2000, 17(1): 2-13.
- [4] Pazner Micha, Zhang. X., Comparison of lithologic mapping with ASTER, Hyperion, and ETM data in the southeastern chocolate mountains, USA[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007, 73(5): 555-561.
- [5] Sabreen Gad, T. K., ASTER spectral ratioing for lithological mapping in the Arabian-Nubian shield, the Neoproterozoic Wadi Kid area, Sinai, Egypt[J]. GR Letter, 2007(11): 326-335.
- [6] Mustard, J. F., Sunshine, M. J., Spectral analysis for earth science: Investigations using remote sensing data[J]. Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual for Remote Sensing, 1998(3): 251-306.
- [7] 冯学仕, 郭振春. 黔西南地区金矿产出模式及找矿潜力[J]. 贵州地质, 2002, 19(2): 109-111.
- [8] 范二川. 贵州贞丰红旗坡红粘土型金矿床成矿作用浅析[J]. 贵州地质, 2002, 19(1): 31-36.
- [9] 王砚耕, 陈履安, 李兴中, 等. 区域地质——贵州西南部红粘土型金矿[M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2000: 7-10.
- [10] 邓书斌. ENVI 遥感图像处理方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 274.
- [11] JASON L. Perry, Robert K. Vincent, Chapter 12, remote sensing and spectral geology[J]. Review in Economic Geology, 2009(16): 143.
- [12] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正的黑暗像元法[J]. 国土资源遥感, 2005(1): 8-11.
- [13] 吕凤军, 郝跃飞, 李川平, 等. 基于 FLAASH 模块的遥感数据大气校正应用研究[J]. 河北地质, 2007, (2): 23-26.
- [14] ERSDAC. ASTER Reference Guide Version 1.0[Z]. Earth Remote Sensing Data Analysis Center, 2003.
- [15] 吕凤军, 郝跃飞, 石静, 等. ASTER 遥感数据蚀变遥感异常提取研究[J]. 地球学报, 2009, 30(2): 271-276.
- [16] Massironi *, M., Bertoldi, L., Calafa, P., Interpretation and processing of ASTER data for geological mapping and granitoids detection in the Saghro massif (eastern Anti-Atlas, Morocco)[J]. Geosphere, 2008, 4(4): 736-759.
- [17] 王建平. 基于遥感的河南卢氏西部地区蚀变信息提取与分析[J]. 地球信息科学, 2007, 9(6): 111-115.

(上接第 66 页)

- [5] Stroppiana D, Pinnock S, Pereira J M C, et al. Radiometric analysis of SPOT-VAGETATION images for burnt area detection in northern Australia[J]. Remote Sensing of Environment, 2002(81): 21-37.
- [6] Li R R, Kaufman Y J, Hao W M, et al. A technique for detecting burn scar using MODIS data[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(6): 1300-1308.
- [7] Chuvieco E, Ventura G, Martin M P, et al. Assessment of multi temporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping[J]. Remote Sensing of Environment, 2005(94): 450-462.
- [8] 国家林业局. 2009 年全国林业经济运行状况报告[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/portal/main/s/58/content-435929.html>
- [9] 郭朝辉, 亓雪勇, 龚亚丽, 祝令亚. 环境减灾卫星影像森林火灾监测技术方法研究[J]. 遥感信息, 2010(4): 85-88.
- [10] Pinty B, Verstraete M M. GEMI: A non-linear index to monitor global vegetation from satellites [J]. Vegetation, 1992 (101): 15-20.