

# 基于ENVI和GIS的矿物精细化提取与分析

李慧敏, 王瑞雪, 李文超, 罗闰豪

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 为充分发挥ENVI和GIS等遥感软件在高光谱矿物精细化提取与分析中的作用,以云南个旧老厂矿区及外围为研究区,采用国产GF-5遥感数据,基于ENVI平台采用光谱角匹配法和波谱特征拟合法对研究区的蚀变矿物信息进行精细化提取,基于统计分析软件和GIS平台,对提取的研究区蚀变矿物信息进行数理统计、相关性和地物化遥等综合分析。研究显示,基于国产GF-5数据提取的研究区蚀变异常信息与该区地质和物化探信息吻合较好。研究表明,利用国产GF-5数据,基于ENVI和GIS等软件平台可对研究区蚀变矿物进行精细化提取与分析,为该区传统地质找矿工作提供参考。

**关键词:** 国产GF-5遥感数据;ENVI;光谱角匹配法;波谱特征拟合法;蚀变矿物信息;GIS

**DOI:** 10.11907/rjdk.231200

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



中图分类号:P627

文献标识码:A

文章编号:1672-7800(2024)003-0150-07

## Refined Extraction and Analysis of Minerals Based on ENVI and GIS

LI Huimin, WANG Ruixue, LI Wenchao, LUO Runhao

(College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** In order to give full play to the application of remote sensing software such as ENVI and GIS in the fine extraction and analysis of hyperspectral minerals, taking the old factory mining area and its periphery in Gejiu, Yunnan as the research area, the domestic GF-5 remote sensing data are used to extract the altered mineral information in the study area based on ENVI platform by spectral angle matching method and spectral feature fitting method. Based on statistical analysis software and GIS platform, the extracted altered mineral information in the study area is comprehensively analyzed by mathematical statistics, correlation and geophysical and geochemical remote sensing. The study shows that the alteration anomaly information extracted from the domestic GF-5 data is in good agreement with the geological and geophysical and geochemical information in the study area. The research shows that the domestic GF-5 data can be used to extract and analyze the altered minerals in the study area based on ENVI and GIS software platforms, and provide reference for the traditional geological prospecting work in the area.

**Key Words:** domestic GF-5 remote sensing data; ENVI; spectral angle matching method; spectral feature fitting method; alteration mineral information; GIS

## 0 引言

ENVI是一种能够从各种影像中识别并提取信息,且提供专业光谱分析工具的软件<sup>[1]</sup>,GIS是具有强大的地图制图、数据管理、数据分析和数据集成等功能的软件,ENVI和GIS软件以其便捷、高效等特点已广泛应用于生态环境、农业、水文、地质等诸多领域。高光谱遥感数据凭借纳米级别的空间分辨率,具有精细识别地物信息的能力<sup>[2-5]</sup>。

近年来,随着高光谱遥感技术的迅猛发展,基于ENVI和GIS软件平台,利用高光谱遥感技术进行蚀变矿物识别、地质构造解译和地层岩性识别等已有诸多应用。目前开展的高光谱矿物填图工作主要利用国外的Hyperion数据,国产GF-5光谱数据的应用研究较少。Bedini<sup>[6]</sup>基于HyMap和ASTER遥感影像完成了东格陵兰中部矿区的矿物填图,效果良好。冯博等<sup>[7]</sup>、董新丰等<sup>[8]</sup>运用国产GF-5数据成功提取了研究区矿物信息。刘洪成等<sup>[9]</sup>基于GF-5和AHSI高光谱影像对研究区进行了矿物填图并作了对比分

收稿日期:2023-03-02

基金项目:云南锡业股份有限公司科技计划项目(GF-2021-01);企业基础研究应用基础研究联合专项(202101BC070001003)

作者简介:李慧敏(1996-),女,昆明理工大学国土资源工程学院硕士研究生,研究方向为遥感地质;王瑞雪(1973-),女,博士,昆明理工大学国土资源工程学院副教授、硕士生导师,研究方向为遥感地质。本文通讯作者:王瑞雪。

析,取得良好效果。

云南个旧老厂矿区地质构造复杂,成矿条件优越,矿产资源丰富且矿区采冶历史悠久,很多地质学家、学者在此进行了长期研究。然而,鲜有学者利用高光谱遥感数据在该矿区开展过蚀变信息提取研究。以个旧老厂矿区及外围为研究区,利用国产GF-5遥感数据,基于ENVI平台对研究区蚀变矿物信息进行精细化提取,基于数理统计平台进行了统计和相关性分析,基于GIS平台进行了地物化遥等综合分析,以揭示研究区蚀变矿物的空间分布特征,为传统地质勘查提供依据。

### 1 地质概况

研究区位于云南省红河州个旧市东部,大地构造位置位于中国华南成矿省最西部,与三江特提斯成矿带相邻,隶属华夏地块西部的右江盆地,如图1所示<sup>[10]</sup>(彩图扫描OSID码可见,下同)。区域构造位置位于兰坪—思茅褶皱系、华南褶皱系和扬子准地台三大大型地质构造单元的接触带附近<sup>[11]</sup>。区内地层出露简单,主要为中三叠统法郎组 and 个旧组,地层岩性主要为白云岩、灰岩等<sup>[12]</sup>。区内各种尺度的褶皱和断裂广泛发育,主要褶皱有矿区中部的五子山背斜、北西部的黄茅山背斜,中部的湾子街背斜,东部的黄泥洞挠曲带等,北西向、北东向及东西向均有断裂产出。研究区围岩蚀变类型主要为赤铁矿化、碳酸盐化、绿泥石化、大理石化等。

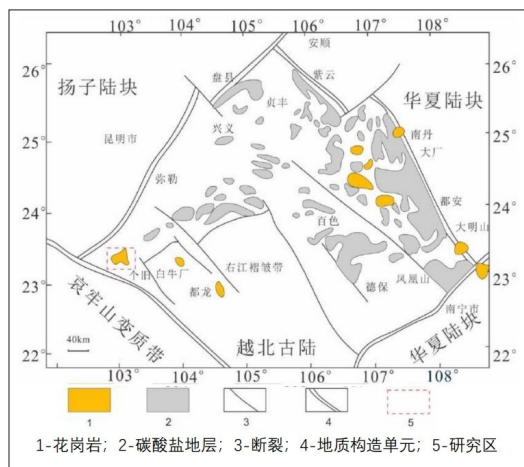


Fig. 1 Geotectonic map of the study area

图1 研究区大地构造图

### 2 数据源及预处理

#### 2.1 遥感数据源及预处理

国产GF-5 高光谱卫星数据,具有可见光、近红外和短波红外共330个通道数据<sup>[13]</sup>,波段特征参数如表1所示。研究区影像的成像时间为2019年12月16日。国产GF-5影像未经过定标和校正,为还原影像真实地物信息,需基

于ENVI软件对影像进行坏波段剔除,剔除水汽影像较大、信噪比过低的波段,最终保留272个有效波段<sup>[14]</sup>,再进行辐射定标、坏线修复、大气校正、几何校正、裁剪等预处理。遥感蚀变信息提取中,蚀变为弱信息,易受云雪、植被、水体、阴影等强信息干扰<sup>[15]</sup>。选用的研究区影像质量较好,无冰雪覆盖,云量小于3%,影像整体清晰,只需采用NDVI和MNDWI消除水体和植被的干扰。

Table 1 GF-5 data band characteristic parameters

表1 GF-5数据波段特征参数

光学系统	波段	波段范围/ $\mu\text{m}$	空间分辨/m	幅宽/km
VNIR	150	0.4-0.9	30	60
SWIR	180	0.9-2.5	30	60

#### 2.2 多元数据处理

GIS提供的空间分析工具能够提供多源数据综合分析功能,基于GIS的空间分析工具对研究区的遥感矿物、地质构造和物化探等信息综合分析,揭示研究区蚀变矿物信息的空间分布特征。①对多元数据作预处理,主要包括投影转换和格式变换等,将数据转为GIS可以识别的文件类型;②对不同数据按照属性类型分为若干图层;③建立属性文件,建立空间拓扑关系。

### 3 矿化蚀变信息精细化提取

#### 3.1 端元光谱提取

端元光谱提取是高光谱矿物填图工作的重要环节,只有选取最接近真实地物的矿物端元,才能高效完成后续的光谱匹配和矿物填图等。在高光谱技术应用于地质领域的几十年里,许多学者提出多种端元提取算法,分析多种端元提取算法的优劣性,选取纯净像元指数法和顺序最大凸锥法对研究区GF-5影像提取矿物端元。

##### 3.1.1 纯净像元指数法

纯净像元指数法是一种通过光谱变换技术减少影像冗余信息,选取并计算最纯端元的算法,其通过最小噪声分离变换(Minimum Noise Fraction, MNF)、纯度像元指数(Pure Pixel Index, PPI)和N维可视化加以实现。整个过程基于ENVI软件和IDL平台完成。

(1)最小噪声分离变换(MNF)。MNF变换可用于确定影像的内在维数,去除影像噪声<sup>[16]</sup>。MNF变换本质上是通过两次主成分变换而实现,第一次变换是使影像噪声数据只有最小方差,而没有波段间的相关性,第二次是对噪声数据进行标准主成分变换,变换完成后可根据各分量进行去噪。MNF变换后有用信息集中于比较靠前的波段影像中。

如图2MNF特征曲线显示,影像前20个波段的特征值较大,集中了影像大多有用信息,之后的波段受噪声影响而趋于平缓,影像信息量趋于零。如图3所示,选取MNF变换后的1-3、10、20、21波段图像,不难看出MNF变换后各波段并不是严格按图像质量进行排序,但总体上表现为

越靠后波段图像包含的噪声越多。MNF2影像虽然特征值较大,但影像质量不好;MNF21受噪声影像较大,故综合考虑像元特征值、噪声干扰与影像质量等因素,剔除波段2,保留1和3-20的MNF变换结果。

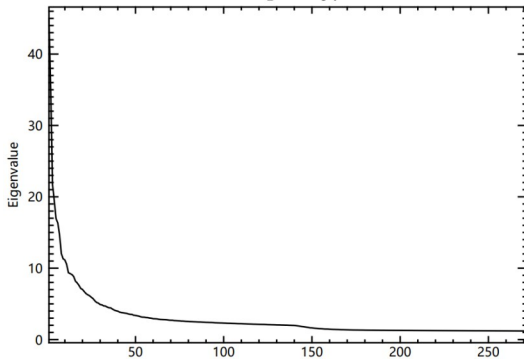


Fig. 2 MNF characteristic curve  
图2 MNF特征曲线

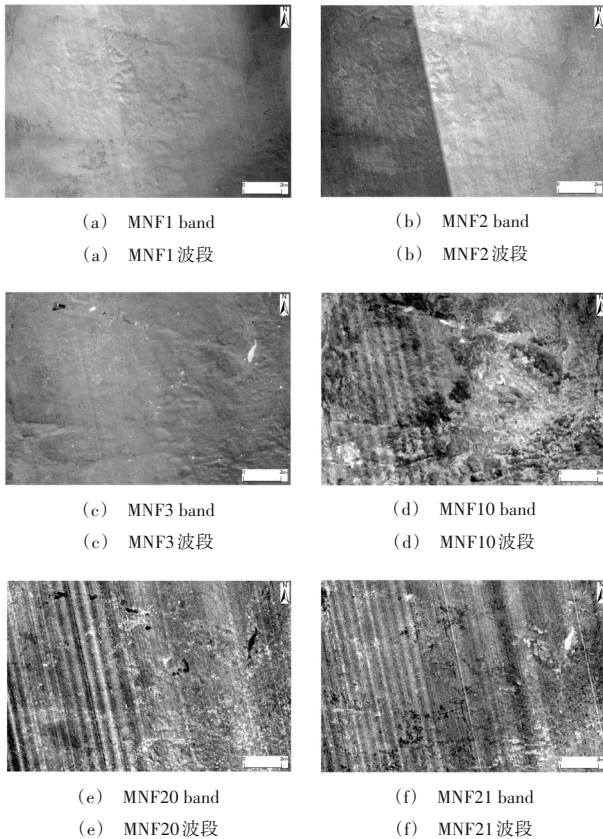


Fig. 3 Different band images under MNF transform  
图3 MNF变换下不同波段图像

(2)纯净像元指数(PPI)。PPI指数法是目前使用较多的端元提取方法,其是以频率形式统计每个像元在  $n$  维特征向量空间中被映射为极值像元的次数,生成像元纯度图像,通过减少空间维数据量找出“极纯”像元,再进行端元光谱选取,效果较为理想<sup>[17]</sup>。

利用MNF变换结果进行PPI计算时,需要设置参与运算的波段数目、迭代次数和阈值3个参数。波段数目的选取结合MNF变换后特征值大小和影像质量等因素,选取

MNF变换后的1和3-20波段参与运算。在PPI计算时,迭代次数越多的数据映射为随机向量次数越多,越容易获取纯净像元,但是迭代次数过大,会降低获取纯净像元的速度,综合考虑工作效率和计算机性能等因素,选取迭代次数10 000次。阈值的选取经过多次筛选与运算,如图4所示,选取阈值3,当PPI迭代次数近9 000后,迭代曲线很快达到饱和,PPI指数趋于平缓。

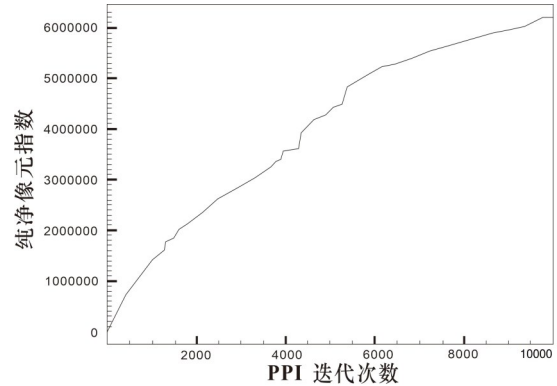


Fig. 4 Pure pixel index  
图4 纯净像元指数

重复多次将  $N$  维散点图投影在随机单元矢量,记录每次投影的极值像元,最后注记每个像元被标定为极值的总次数,最终生成如图5所示的研究区PPI图像。

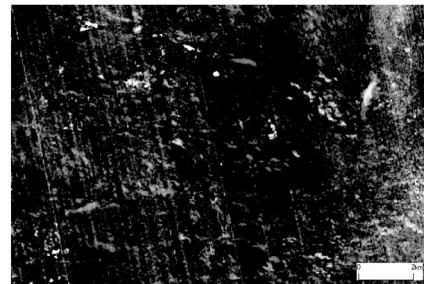


Fig. 5 PPI image of the study area  
图5 研究区PPI图像

(3) $N$ 维可视化。利用ENVI的  $N$  维可视化工具,将PPI处理后得到的“极纯”像元导入ENVI的  $N$  维可视化工具,选取不同波段进行旋转,选取散点图的顶点作为图像端元光谱,人机交互式提取矿物端元,得到如图6所示的矿物端元波谱曲线。

### 3.1.2 顺序最大角凸锥法

顺序最大角凸锥法(SMACC)是一种在顶点主成分分析基础上改进的算法<sup>[18]</sup>。该算法利用一种带约束条件的凸锥模型提取图像的端元光谱,运用顺序最大角凸锥法进行端元提取可直接对预处理完成后的图像进行处理,无需作降维处理,可更好地保留影像细节<sup>[19]</sup>。SMACC算法数学模型为:

$$H(c, i) = \sum_k^N R(c, k)A(k, j) \quad (1)$$

其中,  $H$  表示端元光谱;  $i$  表示像元编号;  $j$  和  $k$  表示由1到  $N$  的像元编号;  $R$  表示端元光谱列矩阵;  $c$  表示波段编号;  $A$  表示每个像元中端元  $k$  的丰度矩阵。

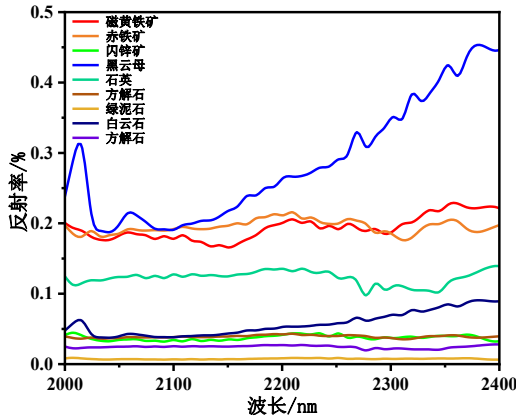


Fig. 6 PPI mineral end-member spectrum curve

图 6 PPI 矿物端元波谱曲线

基于 ENVI 软件和 IDL 平台,对预处理后的影像运用顺序最大角凸锥法通过设置合理参数完成了端元的提取,得到如图 7 所示的端元光谱曲线图。

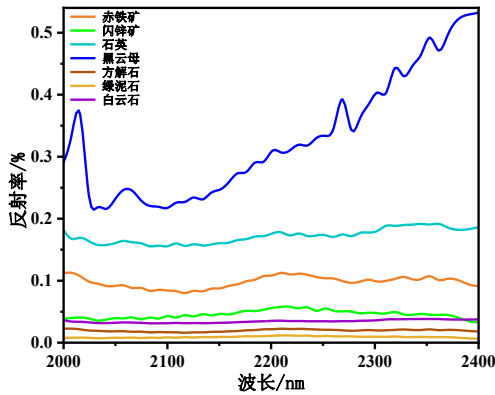


Fig. 7 SMACC mineral end-member spectrum curve

图 7 SMACC 矿物端元波谱曲线

### 3.2 端元识别分析

在 N 维可视化工具中将端元波谱提取出来后,利用 ENVI 的光谱分析工具,将识别的波谱端元曲线与 USGS 波谱库中的波谱曲线进行匹配。经过多次试验与筛选,确定了表 2 和表 3 的矿物端元识别结果。如表 2 所示,利用 PPI 算法在研究区成功提取出赤铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、石英、黑云母、方解石、绿泥石、绿帘石和白云石 9 种矿物端元。

如表 3 所示,利用 SMACC 算法在研究区成功提取出赤

Table 2 PPI mineral end-member identification results

表 2 PPI 矿物端元识别结果

波谱库	得分	SAM	SFF
赤铁矿	1.786	0.893	0.893
磁黄铁矿	1.775	0.899	0.876
闪锌矿	1.482	0.736	0.745
石英	1.653	0.812	0.840
黑云母	1.340	0.748	0.762
方解石	1.959	0.976	0.983
绿泥石	1.870	0.709	0.693
绿帘石	1.764	0.883	0.882
白云石	1.928	0.955	0.955

铁矿、闪锌矿、石英、黑云母、方解石、绿泥石和白云石 7 种矿物端元。

Table 3 SMACC end-member identification results

表 3 SMACC 端元识别结果

波谱库	得分	SAM	SFF
赤铁矿	1.541	0.713	0.828
闪锌矿	1.340	0.619	0.721
石英	1.383	0.619	0.764
黑云母	1.368	0.694	0.674
方解石	1.978	0.986	0.992
绿泥石	1.946	0.699	0.689
白云石	1.928	0.954	0.955

对比分析利用两种算法得到的端元提取结果,PPI 算法提取了磁黄铁矿的有效矿物端元,并且有效区分了绿帘石和绿泥石这两种相近矿物。基于 PPI 算法提取的矿物端元曲线反射率整体高于 SAMCC 算法的结果且得分更高。综合分析,基于 PPI 算法提取的矿物端元结果优于 SMACC 算法,故研究区的矿物填图是基于 PPI 算法。

### 3.3 矿物蚀变填图

#### 3.3.1 光谱角匹配法

光谱角匹配法(Spectral Angle Matching, SAM)是一种借助波谱空间数据分析,求图像像元矢量和参考矢量间的广义夹角,由夹角大小计算矢量光谱间的相似度从而识别地物的方法<sup>[20]</sup>。其本质为对地物波谱的形态特征进行比较,通过选取有不同判断性波谱特征的波段范围,以取得更优的物信息结果<sup>[21]</sup>。地物的每个像元可以得到一条连续的波谱曲线,不同矿物对应不同特征的波谱曲线。

计算影像中地物波谱与标准波谱夹角公式为:

$$T = \cos^{-1} \left[ \frac{\sum_{i=1}^{nb} t_i r_i}{\left( \left( \sum_{i=1}^{nb} t_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left( \sum_{i=1}^{nb} r_i^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)} \right] \quad (2)$$

其中, nb 表示波段数, T 的范围为 0~90°。

#### 3.3.2 波谱特征拟合法

波谱特征拟合法(Spectral Feature Fitting, SFF)是对图像像元光谱和参考光谱的吸收特征进行匹配的一种算法<sup>[22]</sup>,在匹配前需对图像的像元光谱和参考光谱作连续统去除,再用最小二乘法拟合法对图像像元光谱和参考光谱进行拟合。其数学模型为:

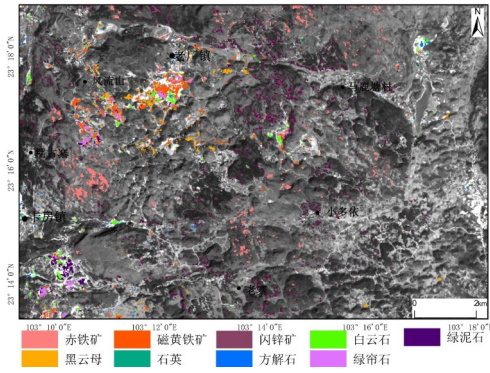
$$C = \frac{\text{cov}(p, q)}{\sqrt{E(p)E(q)}} \quad (3)$$

其中: P 表示像元光谱; q 表示参考光谱; cov(p, q) 表示像元光谱与参考光谱协方差; c 表示像元光谱与参考光谱相关系数; E(p) 表示参考光谱方法; RMS 表示均方根误差。

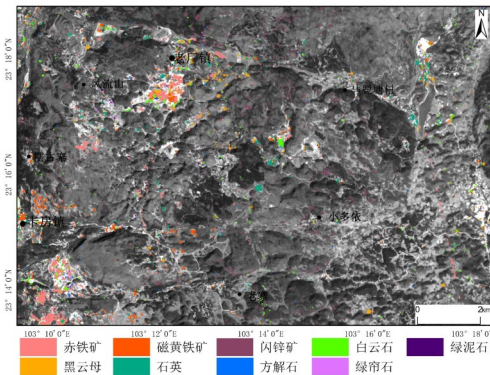
#### 3.3.3 矿物填图

利用 ENVI 软件提供的制图工具,采用 SAM 和 SFF 两种高光谱填图算法对研究区的 GF-5 影像进行矿物填图,并基于 GIS 软件提供的制图工具生成如图 8 所示的研究区

蚀变矿物分布图。



(a) SAM 填图结果



(b) SFF 填图结果

Fig. 8 The distribution of altered minerals in the study area

图8 研究区蚀变矿物分布

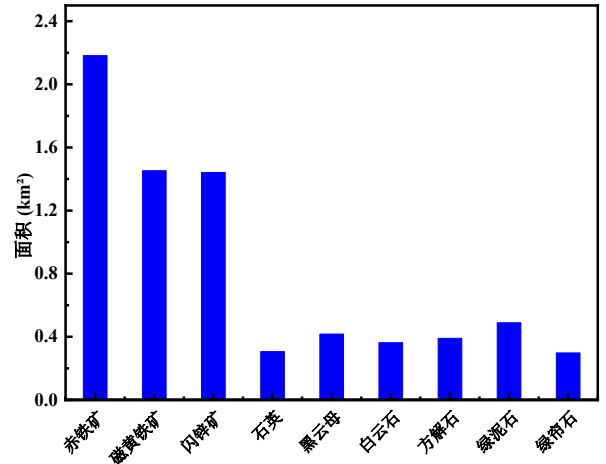
### 4 结果分析验证

#### 4.1 蚀变信息统计分析

为清楚了解蚀变矿物信息的空间分布特征,对提取的蚀变信息进行统计分析,并绘制蚀变信息分布统计图。如图9所示,两种方法的提取结果存在差异,具体表现为铁染类蚀变矿物在研究区分布范围更广,羟基/碳酸盐蚀变矿物在研究区分布范围略差;在研究区内采用SAM算法提取的蚀变矿物分布更广泛。综合分析,两种方法提取的矿物蚀变信息在空间分布上存在差异,但有一定的相邻与相交,有相互补充的作用,可以提高精度,更好地为该区的找矿工作提供参考。

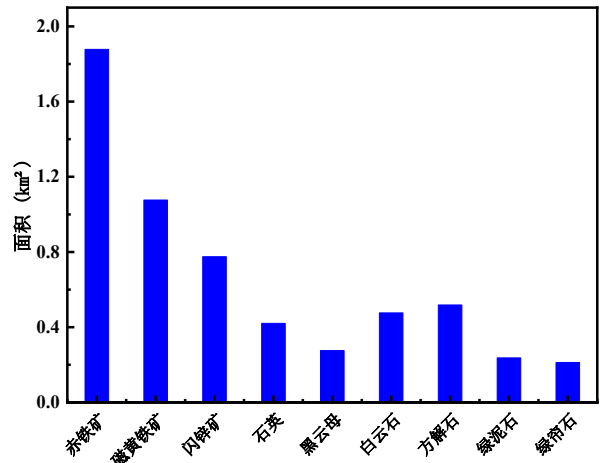
#### 4.2 蚀变信息相关性分析

统计采用SAM和SFF算法提取的蚀变异常面积,并对SAM和SFF两个变量作Pearson相关系数计算,得Pearson相关系数表。如图10所示,相关系数为0.94,双尾显著性值为0,小于显著性水平0.01,说明利用两种方法提取的蚀变信息具有很强的相关性,相关系数 $R^2=0.94$ ,为高度正相关。



(a) SAM mapping results

(a) SAM 填图结果



(b) SFF mapping results

(b) SFF 填图结果

Fig. 9 Statistical map of alteration information distribution

图9 蚀变信息分布统计图

	SAM	SFF
SAM	1	0.94
SFF	0.94	1
显著性(双尾)0.000 在0.01级别双尾,相关性显著		

Fig. 10 Pearson correlation coefficient

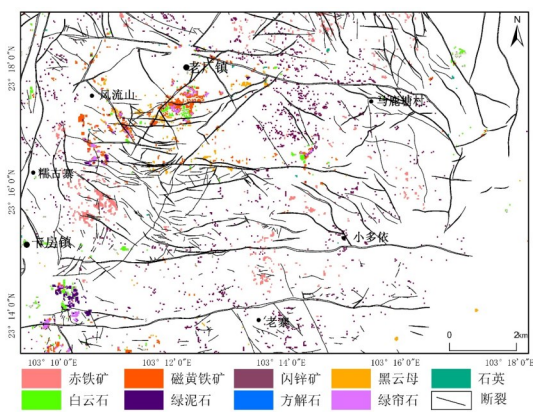
图10 Pearson 相关系数

#### 4.3 地物化遥综合分析验证

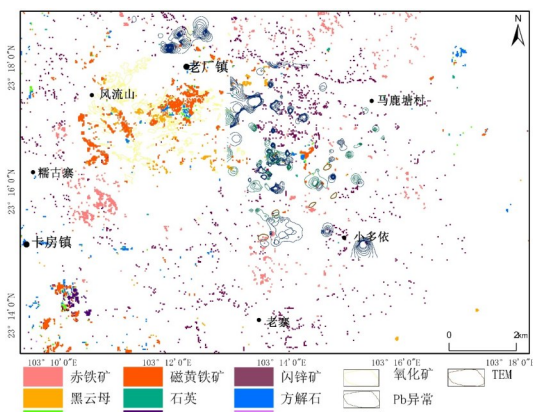
为进一步验证遥感蚀变异常信息和矿区实际地质情况的吻合程度,选取利用两种方法提取的蚀变矿物信息,基于GIS平台的数据分析工具将研究区已知断裂和物化探等地质资料投影到蚀变矿物图上,以揭示研究区内蚀变矿物信息的空间分布特征。

如图11和图12所示,在空间分布上,蚀变矿物信息整体沿SN、EW向大规模断裂附近呈条带状展布,沿NE、NW向较大规模及小规模断裂附近展布,推测受断裂控制;局部呈环状、半环、零星点状分布,具体表现为蚀变矿物高异

常图斑集中在环形构造内,但分布不均匀,其中主要集中于南北轴向的五子山—竹叶山背斜与东西轴向的老厂背斜交叠部位老厂—风流山一带,相比两种算法发现,该区内采用SAM算法提取的赤铁矿、磁黄铁矿、白云石、黑云母和方解石等蚀变矿物分布更广泛;其次是东西轴向的老厂背斜、期六寨褶皱(向斜)与北西轴向期六寨—团结村褶皱叠加部位,该区内两种算法提取的绿泥石和绿帘石均分布较好(图 11、图 12 的(a)图)。在地层岩性上,蚀变信息主要分布于中三叠统个旧组马拉格段、卡房段碳酸盐岩和围岩接触带,集中分布在马拉格段白云岩、石灰岩等岩性地层,研究提取的矿物信息分布情况与已知矿体、TEM 物探异常和 Sn、Pb 化探异常对应较好(图 11、图 12 的(b)图)。



(a) Remote sensing and geological information superposition  
(a) 遥感与地质信息叠加

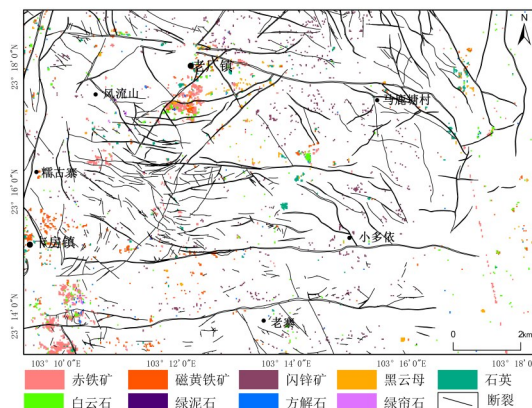


(b) Remote sensing and geophysical and geochemical information superposition  
(b) 遥感与物化探信息叠加

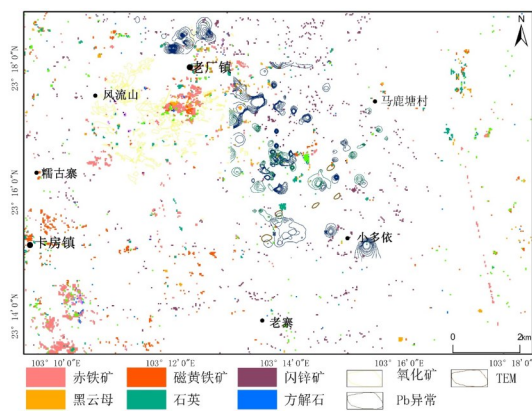
Fig. 11 SAM mapping results analysis verification diagram  
图 11 SAM 填图结果分析验证图

### 5 结语

依托 ENVI 软件强大的图像处理与分析工具,利用研究区国产 GF-5 影像提供的多波段信息对研究区的蚀变矿物信息进行精细化提取研究;依托数理统计分析软件,对



(a) Remote sensing and geological information superposition  
(a) 遥感与地质信息叠加



(b) Remote sensing and geophysical and geochemical information superposition  
(b) 遥感与物化探信息叠加

Fig. 12 SFF mapping results analysis verification diagram  
图 12 SFF 填图结果分析验证图

提取的研究区蚀变矿物信息进行统计和相关性分析;依托 GIS 软件强大的空间信息整合和分析功能,对提取的研究区蚀变矿物信息进行地物化遥感等综合分析。研究得出以下结论:①基于国产 GF-5 影像数据,运用 PPI 算法提取的研究区矿物端元优于 SMACC 算法,有效区分了绿帘石和绿泥石等相似端元;②利用 SAM 与 SFF 算法在研究区内的矿物填图结果具有很好的相关性,两种算法均适用于该区的遥感蚀变矿物填图,比较两种算法发现,SAM 算法提取的蚀变矿物信息在研究区内分布更广泛;③基于 GIS 的空间分析功能,对提取的研究区蚀变矿物信息进行综合分析发现,两种算法提取的蚀变矿物信息均符合研究区地质情况,可以为该区的地质找矿工作提供依据;④多种矿物填图算法可规避单一算法的局限性,有相互补充和验证,提取结果可信用度更高。

研究表明,利用国产 GF-5 影像,基于 ENVI 和 GIS 平台可对该区的蚀变矿物进行精细化提取与分析,为该区的地质找矿工作提供参考。

## 参考文献:

- [1] KONG J. Application of ENVI in engineering geology[J]. Xinjiang Nonferrous Metals, 2021, 44(4): 15-16.  
孔婕. ENVI在工程地质领域中的应用分析[J]. 新疆有色金属, 2021, 44(4): 15-16.
- [2] MA Y C, MI H Y, ZHONG K. Research on urban ecological environment of high resolution remote sensing image based on ENVI[J]. Software, 2018, 39(11): 235-238.  
马义超, 米鸿燕, 钟凯. 基于ENVI的高分辨率遥感影像城市生态环境研究[J]. 软件, 2018, 39(11): 235-238.
- [3] DU Q S, LI G Y, PENG W L, et al. Land use changes in high cold-altitude mining area based on remote sensing technology[J]. Environmental Science and Technology, 2020, 43(12): 185-194.  
杜青松, 李国玉, 彭万林, 等. 基于遥感技术的高寒矿区土地利用变化研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 185-194.
- [4] CHI W J. Application analysis of remote sensing technology and GIS in geological exploration[J]. Engineering Construction and Design, 2022(18): 85-87.  
迟文晶. 遥感技术及地理信息系统在地质勘查中的应用分析[J]. 工程建设与设计, 2022(18): 85-87.
- [5] LIAN C Q, YAO F J, CHEN M H, et al. The study on alteration information extraction of GF-5 hyperspectral data in vegetation coverage area: a case study of the Yushui copper deposit in Guangdong province[J]. Modern Geology, 2020, 34(4): 680-686.  
连琛芹, 姚佛军, 陈懋弘, 等. GF-5高光谱数据在植被覆盖区的蚀变信息提取研究——以广东省玉水铜矿为例[J]. 现代地质, 2020, 34(4): 680-686.
- [6] BEDINI E. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data[J]. Advances in Space Research, 2010, 47(1): 60-73.
- [7] FENG B, DUAN P X, CHENG X, et al. Application of GF-5 satellite hyperspectral data in uranium exploration: a case study of Longshouan area in Gansu province[J]. Uranium Geology, 2022, 38(2): 309-316.  
冯博, 段培新, 程旭, 等. 国产GF-5高光谱遥感在铀矿找矿中的应用——以甘肃省龙首山地区为例[J]. 铀矿地质, 2022, 38(2): 309-316.
- [8] DONG X F, GAN F P, LI N, et al. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 454-464.  
董新丰, 甘甫平, 李娜, 等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 454-464.
- [9] LIU H C, HUANG T, LU N C, et al. Comparison of mineral identification between GF-5-AHSI and airborne CASI/SASI data: a case study of xuemisitan area, Xinjiang[J]. World Nuclear Geological Science, 2022, 39(3): 546-553.  
刘洪成, 黄涛, 鲁纳川, 等. GF-5星载AHSI和航空高光谱矿物填图对比——以新疆雪米斯坦地区为例[J]. 世界核地质科学, 2022, 39(3): 546-553.
- [10] GUO Z J, SONG Y T, XU R T, et al. Indium distribution and enrichment characteristics in Gejiu Sn-polymetallic orefield area in Yunnan province[J]. Modern Geology, 2020, 34(5): 908-916.  
郭志娟, 宋云涛, 徐仁廷, 等. 云南个旧锡多金属矿集区稀散元素铟的分布富集特征[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 908-916.
- [11] HUANG D Z, CHEN S Y, ZHAO J N, et al. Large scale tectonic geochemical characteristics and prospecting prediction in eastern Laochang orefield, Gejiu, Yunnan province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(6): 1261-1275.  
黄大正, 陈守余, 赵江南, 等. 云南个旧老厂矿田东部大比例尺构造地球化学特征及找矿预测[J]. 物探与化探, 2020, 44(6): 1261-1275.
- [12] ZENG X C. Numerical simulation of tectonic stress field and prospecting prediction of Gaosong ore field in Gejiu mining area[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.  
曾祥晨. 个旧矿区高松矿田成矿期构造应力场数值模拟与找矿预测[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [13] DU X C, LOU D B, ZHANG C Q, et al. Study on extraction of alteration information from GF-5, Landsat8 and GF-2 remote sensing data: a case study of Ningnan lead-zinc ore concentration area in Sichuan province[J]. Deposit Geology, 2022, 41(4): 839-858.  
杜晓川, 娄德波, 张长青, 等. 基于GF-5、Landsat8与GF-2遥感数据的蚀变信息提取研究——以四川宁南铅锌矿集区为例[J]. 矿床地质, 2022, 41(4): 839-858.
- [14] LI M Y. Mineral mapping based on hyperspectral image feature space[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2021.  
李明月. 基于高光谱影像特征空间的矿物填图研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
- [15] JIANG T. Extraction of alteration information from remote sensing data in the Gonchangling district, Liaoning province[D]. Changchun: Jilin University, 2019.  
姜天. 辽宁省弓长岭区遥感蚀变信息提取[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [16] JI C. GF-5 hyperspectral data preprocessing and analysis of feature extraction methods[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2020.  
季超. GF-5高光谱数据预处理及地物特征提取方法分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2020.
- [17] HAN H H, WANG Y L, REN G L, et al. A comparative analysis of several hyperspectral methods in the extraction of altered minerals: a case study of Laojinchangin Beishan area[J]. Northwest Geology, 2020, 53(4): 223-234.  
韩海辉, 王艺霖, 任广利, 等. 几种高光谱分析法在蚀变矿物信息提取中的对比分析——以北山老金厂为例[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 223-234.
- [18] GRUNINGER J H, RATOWSKI A J, HOKE M L. The sequential maximum angle convex cone(SMACC) endmember model[C]//Proceedings of Conference on Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery X, 2004: 1-14.
- [19] TIAN M J. Comparative study of mineral mapping methods based on hyperion and SASI data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.  
田茂杰. 基于Hyperion与SASI数据的矿物填图方法对比研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2017.
- [20] HUANG W. Summary of hyperspectral remote sensing classification and information extraction[J]. Digital Technology and Application, 2010(5): 134-136.  
黄玮. 高光谱遥感分类与信息提取综述[J]. 数字技术与应用, 2010(5): 134-136.
- [21] TONG Q L, ZHANG C, YANG Y J, et al. Extraction of mineral information using hyperspectral data and prediction of favorable areas for uranium exploration in Benbatu Area, Bayingebi Basin[J]. Uranium Geology, 2022, 38(6): 1203-1218.  
童勤龙, 张川, 杨燕杰, 等. 巴音戈壁盆地本巴图地区高光谱矿物信息提取及铀矿勘查有利区筛选[J]. 铀矿地质, 2022, 38(6): 1203-1218.
- [22] WEN X P, HU G D, YANG X F. Extracting vegetation coverage from hyperspectral remotesensing image using spectral feature fitting[J]. Geography and Geographic Information Science, 2008(1): 27-30.  
温兴平, 胡光道, 杨晓峰. 基于光谱特征拟合的高光谱遥感影像植被覆盖度提取[J]. 地理与地理信息科学, 2008(1): 27-30.

(责任编辑: 孙娟)