

基于 ASTER 的遥感蚀变信息提取

——以西藏玉龙斑岩铜矿带为例

张远飞, 王艳军, 王大钊, 李凯旋, 梁丰, 冷成彪

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 位于特提斯-喜马拉雅成矿带东部的西藏玉龙斑岩铜矿带, 是全球瞩目的铜成矿远景区。尽管矿区的自然条件严峻, 给传统的地表勘探工作带来了挑战, 但其植被稀疏的特点却为遥感信息提取提供了便利。为此, 本文以 ASTER 遥感影像为数据源, 应用主成分分析法和成像光谱法提取玉龙斑岩铜矿带的蚀变矿化信息。其中, 主成分分析法选用 ASTER 1~4 波段提取铁染蚀变异常信息, 1、3、4、5 波段提取碳酸盐化蚀变异常信息, 1、3、4、8 波段提取 Mg 羟基蚀变异常信息, 1、3、6、7 波段提取 Al 羟基蚀变异常信息; 而成像光谱法则主要通过最小噪声分离 (MNF)、纯净像元指数 (PPI)、 n 维可视化 (n -D Visualizer) 和混合像元分解法 (MTMF), 绘制了玉龙斑岩铜矿带的蚀变矿物信息分布图。通过综合分析两种方法所得的结果, 结合地层、构造等地质要素, 构建了遥感找矿模型, 并预测了 4 个成矿远景区。最后, 通过与已知矿点的对比验证, 确认了我们提取的矿化蚀变区域与实际矿点高度吻合, 从而证明了这两种方法的有效性和可靠性。本研究不仅为玉龙斑岩铜矿带的大规模勘探提供了有力的技术支持, 也为未来靶区的精确圈定奠定了坚实基础。

关键词: ASTER; 主成分分析法; 成像光谱法; 蚀变信息; 玉龙斑岩成矿带

中图分类号: TP79; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2024)06-1601-14

Extraction of alteration information based on ASTER remote sensing: A case study of the Yulong porphyry copper belt in Xizang

ZHANG Yuan-fei, WANG Yan-jun, WANG Da-zhao, LI Kai-xuan, LIANG Feng and LENG Cheng-biao

(State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: The Yulong porphyry copper belt in Xizang, located in the eastern part of the Tethys-Himalaya metallogenic belt, is a globally renowned copper mineralization prospect area. Despite the challenging natural conditions in the mining area, which pose difficulties for traditional surface exploration work, the sparse vegetation facilitates the extraction of remote sensing information. In this study, we used ASTER remote sensing imagery as the data source and applied principal component analysis (PCA) and imaging spectrometry to extract alteration and mineralization information from the Yulong porphyry copper belt. Specifically, PCA was used to extract information on iron staining alteration anomalies using ASTER bands 1~4, carbonate alteration anomalies using bands 1, 3, 4, and 5, Mg-hydroxyl alteration anomalies using bands 1, 3, 4, and 8, and Al-hydroxyl alteration anomalies using bands 1, 3, 6, and 7. Imaging spectrometry, on the other hand, involved techniques such as minimum noise fraction (MNF),

收稿日期: 2024-04-15; 接受日期: 2024-09-13; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究(2021QZKK0301); 国家自然科学基金项目(42022021)

作者简介: 张远飞(1998-), 男, 硕士研究生, 地质资源与地质工程专业, E-mail: 17361566151@163.com; 通讯作者: 冷成彪(1982-), 男, 教授, 从事矿床地球化学方面的科研与教学工作, E-mail: lcb8207@163.com。

pure pixel index (PPI), n -dimensional visualizer (n -D Visualizer), and mixture tuned matched filtering (MTMF) to map the distribution of alteration mineral information in the Yulong porphyry copper belt. By comprehensively analyzing the results obtained from both methods and considering geological factors such as stratum and tectonics, we constructed a remote sensing mineral exploration model and predicted four mineralization prospect areas. Finally, through comparison and verification with known mineral occurrences, we confirmed that the extracted mineralization alteration areas closely matched the actual mineral occurrences, demonstrating the effectiveness and reliability of these two methods. This study not only provides strong technical support for large-scale exploration in the Yulong porphyry copper belt but also lays a solid foundation for the precise delineation of future target areas.

Key words: ASTER; principal component analysis; imaging spectroscopy; alteration information; Yulong porphyry copper belt

Fund support: The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2021QZKK0301); National Natural Science Foundation of China (42022021)

随着科学技术的飞速发展,矿产勘探工作在不同程度上获得了各种新技术的支撑(张玉君等, 2003; Xue *et al.*, 2012)。特别是 20 世纪 70 年代遥感技术的迅速发展为找矿勘探提供了更加方便快捷的技术方法,可以通过对遥感影像的运算、分割,突出蚀变信息,解译构造信息,达到圈定找矿靶区的目的。国内外研究者采用多光谱遥感技术识别和提取蚀变信息,其中 TM、ETM⁺、ASTER 等多光谱遥感数据被广泛应用于地质找矿工作中(张玉君等, 2012; Salem *et al.*, 2013; Ibrahim *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017)。ASTER 数据相比于 TM 等方法,具有更高的分辨率以及更多更细的光谱波段,能够识别方解石、白云石和白云母及其矿物组合(Rowan *et al.*, 2003; 吕凤军等, 2009; 杨日红等, 2012)。Rowan 和 Mars(2003)基于 ASTER 影像,使用矿物指数法提取的岩性分类结果与基于 AVIRIS 高光谱数据的岩性填图结果基本一致,且提取的潜在矿床地点与已探明的金矿位置基本吻合。Son 等(2014)结合 SWIR-BRLO 模型和匹配滤波提取奥尤陶勒盖地区的铜金矿床,结果与实地验证信息基本一致,并预测了新的泥化带位置。Emam 等(2016)利用 ASTER 数据,对 Allaqi-Heiani 缝合线东部的蛇绿岩进行解译,发现 Mafic Index(MI)指数能够有效识别蛇绿岩化镁铁质侵入体。最近,王瑛雪等(2023)借助 DEM 地形渲染技术和 ASTER 主成分分析方法,对硅酸盐中充填型脉状萤石矿床进行快速定位。

围岩蚀变对于找矿勘探具有很好的指示意义(刘知等, 2017)。矿体周围的岩石受到热液蚀变影响后,在化学成分、颜色、纹理等方面均与新鲜围岩明显不同,这些差异反映在岩石的反射光谱特征等

方面,并在特定的波段形成特定的光谱特征。遥感卫星传感器可以记录地表物质的光谱信息,因此只要存在一定面积的矿化蚀变岩体露头,遥感卫星就有可能检测到(赵志芳等, 2012)。斑岩矿床具有明显的蚀变分带性,且矿床规模越大,蚀变越明显,分带性越好,通常也意味着矿化富集程度越高(段祝龄等, 1982; Sillitoe, 2010)。针对斑岩矿床的强蚀变特点,各种遥感技术方法,包括主成分分析法、K-L 变换、相关吸收波段深度法(RBD)等,已得到广泛应用(Pour and Hashim, 2012; 李忠烈等, 2012; 张楠楠等, 2016)。Crosta 和 Moore(1989)首次尝试使用主成分分析法提取圈定巴西 Minas Gerais 地区的羟基和铁染异常,效果显著,因而该方法被沿用至今。张玉君等(2007)结合矿床地质学和蚀变矿物的光谱特征,设计了 ETM⁺ 和 ASTER 数据提取羟基蚀变矿物组合的流程方案并在蒙古欧玉斑岩铜矿成功应用。Liu 等(2023)考虑到传统的 Crosta 方法没有涉及地形干扰因素的校正,因此尝试将波形计算和主成分分析法结合,并构建模型完成图像主成分自动选择,结果显示此方法在提取蚀变面积和空间聚合方面明显优于传统方法。

玉龙铜矿带是中国重要的铜矿成矿远景区带之一,同时也是特提斯-喜马拉雅成矿带的重要组成部分(陈建平等, 2009; 陈喜连等, 2016; 张少颖等, 2024)。作为藏东地区的特大型斑岩铜矿床,玉龙铜矿自 1996 年发现以来,就引起了研究者的高度关注,并持续展开了大量研究工作(Hou *et al.*, 2007; 张红等, 2018; 刘创脱, 2019)。同时玉龙地区海拔高,自然条件恶劣,不利于传统地表找矿勘查工作的开展。基于此,本文以玉龙斑岩铜矿带为研究对象,

以 ASTER 为遥感数据源,采用主成分分析法和成像光谱法提取蚀变异常信息,通过对两种方法结果的对比,定量分析提取结果的空间分布特征,并将两种方法提取的结果与地层、构造等地质信息相结合,分析遥感技术在该地区的应用潜力,以期为后续找矿勘查工作提供参考。

1 研究区地质背景

研究区位于东经 $97^{\circ}22' \sim 97^{\circ}49'$,北纬 $31^{\circ}12' \sim 31^{\circ}33'$,属于横断山区北部,山体较多,地势较为复杂,总体呈北高南低,海拔约为 4 569~5 118 m。该区气候类型为陆地温带半干旱高寒山地气候,地形地貌以高原高山峡谷地貌为主(张洁, 2017)。冬季常常被冰雪覆盖,但植被稀少,特别是斑岩体裸露部分,植被覆盖率较低,有利于遥感蚀变信息提取;而夏季虽然冰雪覆盖较少,但植被覆盖率较高,且由于玉龙地区海拔较高,山体较多,因此山体阴影较多。

玉龙斑岩铜矿带地处特提斯-喜马拉雅成矿带东部,位于西藏自治区昌都地区江达县境内,区域构造上位于西藏东部的“三江”构造中段,是藏东“三江”成矿带的亚带玉龙斑岩铜(钼)矿带重要矿床之一(别小娟等, 2014)。矿区分布较为广泛,出露地层跨越古生界至新生界(图 1, 付文博, 2014)。波里拉组地层围绕玉龙岩体大面积出露,其中下段以灰岩和白云质灰岩为主,中段较为复杂,上部石英砂岩与同成分砂质灰岩互层,中部的泥质灰岩、生物碎屑灰岩与下部的砂岩、页岩互层,下段为灰色石英砂岩、钙质砂岩互层(张林, 2011; 杜斌等, 2022)。在矿区及外围,出露的岩浆岩均为成群分布的中酸性浅成、超浅成小型斑状侵入岩。岩体岩性主要为二长花岗斑岩、花岗斑岩、花岗闪长岩等岩石类型(陈丰琪, 2014)。区内发育多条断裂、褶皱,其中温泉断裂和妥坝-芒康断裂分别在矿带东西两侧,对斑岩铜矿带影响较大。褶皱构造控制了研究区内大部分含矿斑岩的分布,主要为恒星错-甘龙拉背斜。研究区及近外围所出露的岩浆岩类型为成群分布的中酸性浅成、超浅成小型斑状侵入岩类,呈带状沿 NNW-SSE 构造线走向成群分布(张金树等, 2008; 张晓旭等, 2022)。区内矿化分带明显,由内向外围依次发育钾化、钾化与黑云母化、绢英岩化等等(孙茂好等, 2015)。

2 数据介绍

ASTER 传感器是日本 METI 搭载在美国 TERRA 卫星上的一个多光谱传感器。ASTER 数据幅宽 60 km,有 14 个波段,光谱波长范围为 $0.52 \sim 11.65 \mu\text{m}$,主要分为可见光-近红外波段、短波红外波段、热红外波段。制作调绘片采用 1、2、3 波段,空间分辨率为 15 m; 4~9 波段为短波红外波段,空间分辨率为 30 m; 10~14 波段为热红外波段,空间分辨率为 90 m。可见光-近红外波段可以获取由电子跃迁引起的金属阳离子(如过渡族金属元素铁和稀土元素)的特征光谱(杨斌等, 2015);短波红外波段可诊断羟基蚀变、碳酸盐化蚀变等由分子振动引起吸收特征的蚀变异常(杨佳佳等, 2008);热红外波段不仅可以反演 SiO_2 含量,区分长石、石英等矿物,也可以进行岩性提取(李进波, 2019)。本次研究所采用的 ASTER 影像景号为 AST-L1T_00302062008041527_20150522221736_99136 和 AST-L1T_00302062008041_518_20150522221736_99140,时间是 2008 年 2 月 6 日,来自 USGS 的 EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov>)。本次使用的 ASTER 数据无云,部分冰雪覆盖,仅采用 1~9 波段数据。

3 数据预处理

数据预处理的目的是改正或者补偿遥感数据成像中的几何变形、大气辐射等,为后续蚀变提取提供高质量数据。处理过程主要为辐射定标、大气校正以及干扰物去除。

3.1 辐射定标

根据 ASTER 数据各波段空间分辨率不同的特点,首先对 ASTER 数据进行波段融合,将空间分辨率为 15 m 的 VNIR 波段重采样为 30 m 分辨率。为了消除传感器本身所带有的误差,进一步确定准确的辐射值,同时也为后续的大气校正提供辐射亮度值,需对 ASTER 数据进行辐射定标。

3.2 大气校正

大气层的各种气体都会对遥感接收的电磁波进行选择性的吸收、反射及散射,对影像造成影响,因此需要对影像进行大气校正(王曦等, 2022)。本次大气校正采用了 MODTRAN5 辐射传输模型的 FLAASH 大气校正算法。该算法由大气校正算法研

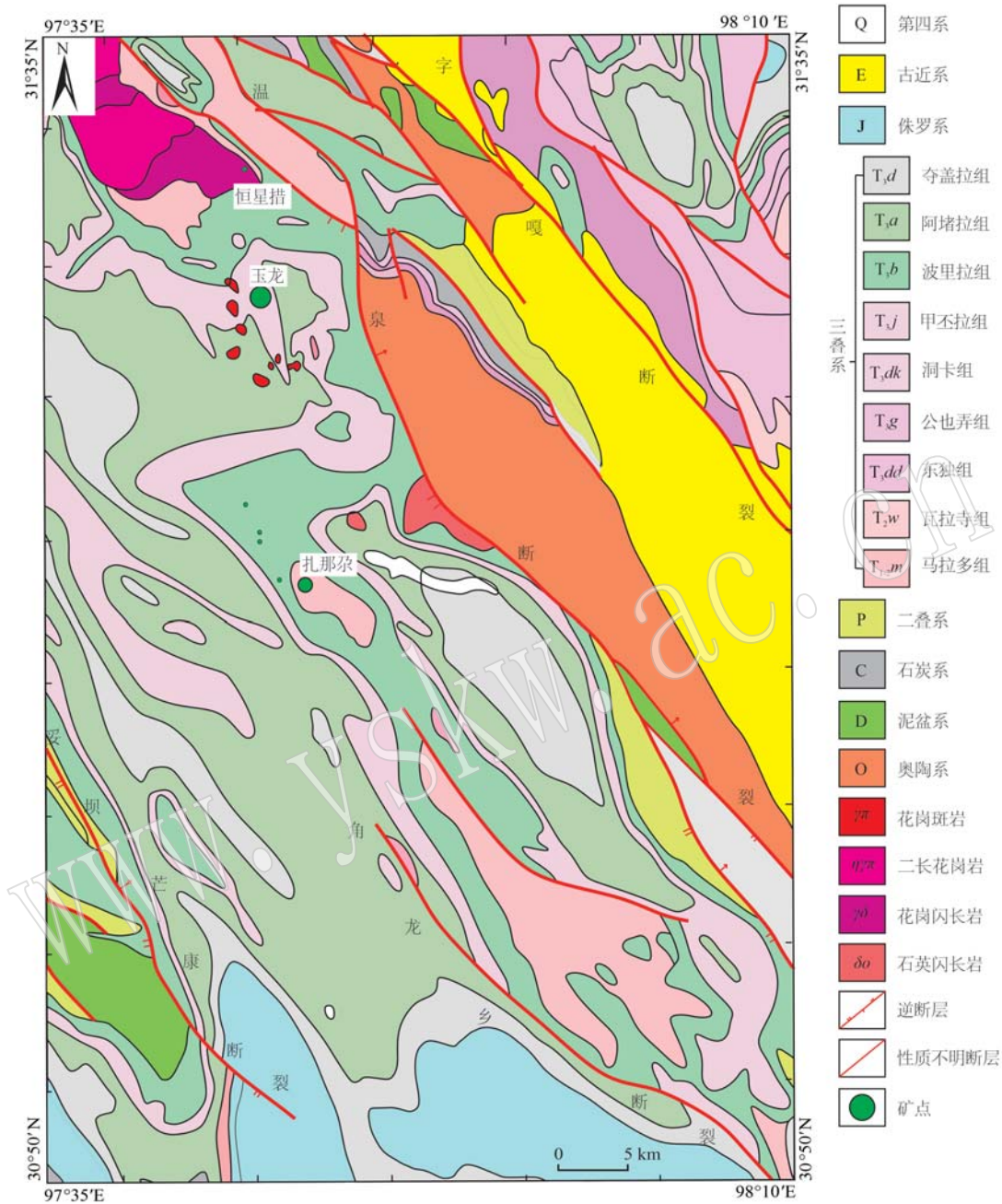


图 1 西藏玉龙地区地质图(底图据付文博, 2014)

Fig. 1 Geological map of the Yulong region of Xizang(modified after Fu Wenbo, 2014)

研究机构 Spectral Science, Inc 和美国空气动力研究实验室共同研发。该算法精度高, ASTER 数据可直接使用进行校正。

3.3 干扰物去除

研究区的主要干扰物为冰雪、植被、山体阴影以及水体。本文采用 ASTER 的 6、3、1 波段进行假彩色合成, 方便辨别出植被、冰雪、云和水体等。接着分别对干扰物进行去除, 并形成掩膜文件 (茹菲

娜·阿力木江等, 2022)。掩膜方法如表 1 所示。

表 1 研究区干扰物及其去除方法
Table 1 Interference of study area and anti-interference method

地物	去除方法	备注
阴影	B9/B1 低端切割	可能会去掉暗色岩体信息
水体	B9 低端切割	目视解译调整阈值
植被	(B3-B2)/(B3+B2)	
冰雪	B2 高端切割	目视解译调整阈值

4 蚀变信息提取

本文以斑岩铜矿为研究目标,应用主成分分析法对玉龙中部地区 ASTER 遥感影像数据铁染蚀变、碳酸盐化、Mg 羟基蚀变和 Al 羟基蚀变信息进行提取,应用成像光谱技术中的最小噪声分量(MNF)变换进行降维压缩,纯净像元指数(PPI)进行波谱端元选择,采用 MTMF 波谱识别方法得到丰度图,最后通过叠加分析两者结果,建立遥感找矿模型并验证已知矿点位置确定找矿靶区。

4.1 典型地物波谱特征分析

4.1.1 铁染蚀变波谱曲线

铁染蚀变的诊断波谱特征是由于组成物质粒子中的中子发生能量变化(电子跃迁)而引起能量吸收,因其能量吸收相比羟基和碳酸盐基团较多,其吸收特征常出现在可见光-近红外波段范围内。由图 2a 可知,含铁矿物在 ASTER1 波段的反射率远远低

于其他波段,而在 ASTER 2 波段具有反射峰。 Fe^{3+} 吸收波段对应 ASTER 3 波段,其反射波段对应着 ASTER 4。

4.1.2 碳酸盐化蚀变波谱曲线

在含 CO_3^{2-} 的矿物中(图 2b),碳酸盐化蚀变矿物在 ASTER 1~4 波段反射率均呈上升趋势,在 ASTER 5、6 波段才出现吸收特征,而在 ASTER 7、8 波段两者均呈现明显吸收特征,且在 ASTER 8 波段存在吸收谷,这与 CO_3^{2-} 在 2.35 μm 和 2.55 μm 附近的分子振动有密切关系。

4.1.3 Mg 羟基蚀变波谱曲线

以绿泥石、绿帘石为代表的 Mg 羟基类蚀变矿物(图 2c)在 2.17 μm 附近具有反射峰,而在 2.32 μm 附近具有明显吸收特征。波段特征表现为 ASTER 1~4 波段反射率大体呈增长趋势,在 ASTER 5 形成一个反射峰,与 2.17 μm 相对应,在 ASTER 8 波段因 Mg 羟基存在吸收特征而形成吸收谷,在 ASTER 9 波段相对 ASTER 8 无吸收特征。

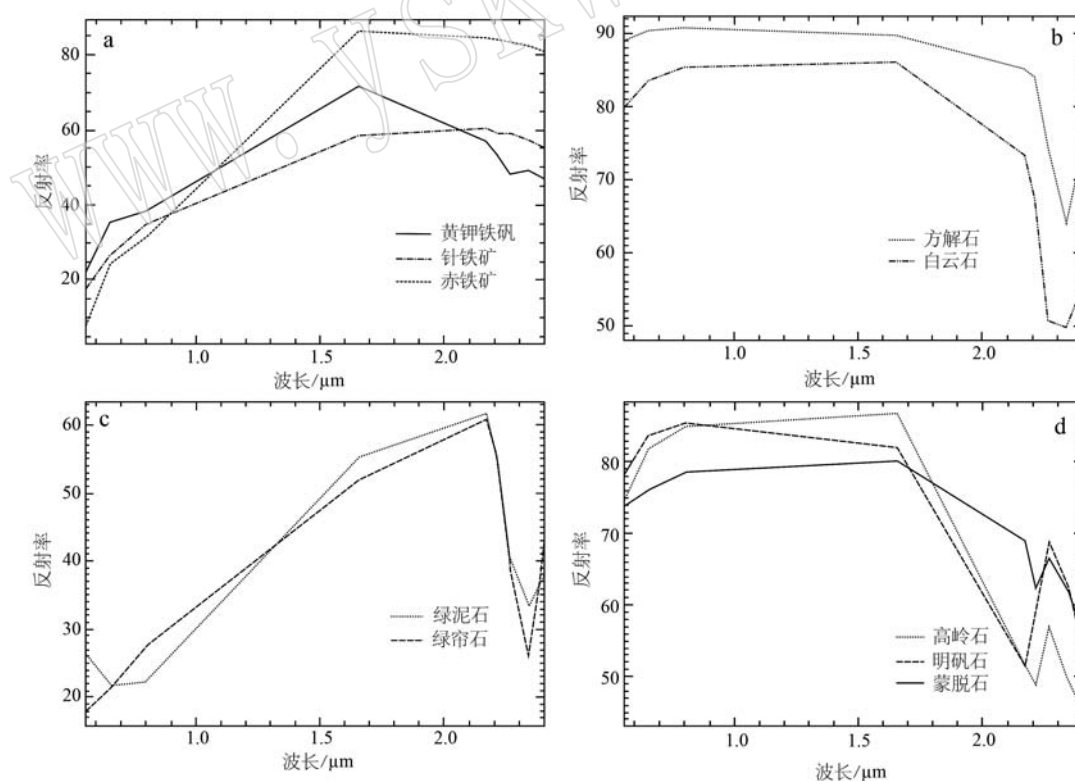


图 2 铁染蚀变矿物(a)、碳酸盐化蚀变矿物(b)、Mg 羟基蚀变矿物(c)和 Al 羟基蚀变矿物(d)的波谱曲线 (据 USGS 波谱库)

Fig. 2 Spectral curves of iron-stained altered minerals(a), carbonated altered minerals(b), Mg—OH altered minerals(c) and Al—OH altered minerals(d) (modified after USGS spectral library)

4.1.4 Al 羟基蚀变波谱曲线

整体上以高岭石、明矾石和蒙脱石为代表的 Al 羟基类蚀变矿物(图 2d)在 2.2 μm 附近均有一个明显的吸收谷,而在 2.27 μm 附近形成反射峰。波段特征大体上呈下降趋势,吸收谷位置对应 ASTER 6 波段,而反射峰位置对应 ASTER 7 波段。

4.2 主成分分析法

主成分分析(PCA)是多光谱遥感常用的蚀变信息提取方法,同时也是重要的增强波段之间差异的方法(Liu *et al.*, 2014; Pournamdari *et al.*, 2014)。PCA 是基于降维的思想,将一系列具有一定相关性的变量,通过正交线性变换转换为独立且不相关的新变量。通过此方法能够有效地减少数据冗余,且数据的主要内容不会产生大的变化。在蚀变信息提取中,为了使蚀变信息集中在某一主分量中,通常选择 4 个主分量作为特征向量。

4.2.1 铁染蚀变提取

铁染蚀变信息提取的主要是针铁矿、赤铁矿等的蚀变信息。根据 Fe^{3+} 的吸收波长出现在 0.5 μm 和 0.9 μm 附近的特征,选择 ASTER 数据的 B1、B2、B3、B4 这 4 个波段做主成分变换(表 2),根据主分量特征诊断,B2 和 B3 符号相反且 B3 与 B4 符号也相反,吸收谷 B3 的符号应为负,而反射峰的 B4 符号为正,所以最佳分量为 PC4,可把 PC4 作为铁染蚀变增强图像。

表 2 ASTER B1、B2、B3、B4 的 PCA 特征矩阵

Table 2 Feature matrix of PCA of ASTER B1, B2, B3, B4

主成分分量	B1	B2	B3	B4
PC1	0.273 774	0.388 465	0.476 060	0.739 939
PC2	0.454 871	0.498 994	0.344 778	-0.652 093
PC3	-0.586 370	-0.209 644	0.764 836	-0.165 062
PC4	-0.611 809	0.745 754	-0.263 668	0.004 487

4.2.2 碳酸盐化蚀变信息提取

碳酸盐类蚀变矿物 CO_3^{2-} 的特征吸收位置在 1.85~2.20 μm 范围内,对应着 ASTER 5 波段,且羟基的吸收特征在 B7、B8 十分明显,为避免提取结果的干扰,选择 B1、B3、B4、B5 进行主成分分析提取蚀变信息。根据此类蚀变最佳分量判别特征,在 B4 处有反射峰,符号为负,B5 具有吸收谷,符号为正,且 B3 与 B5 符号相同。因此在该主成分特征矩阵(表 3)中,满足上述要求的最佳分量为第 4 分量,故选 PC4 进行该类蚀变信息提取。

表 3 ASTER B1、B3、B4、B5 的 PCA 特征矩阵

Table 3 Feature matrix of PCA of ASTER B1, B3, B4, B5

主成分分量	B1	B3	B4	B5
PC1	0.236 055	0.420 810	0.725 406	0.490 901
PC2	0.672 718	0.570 741	-0.444 081	-0.156 514
PC3	0.453 036	-0.558 964	-0.259 190	0.644 312
PC4	0.535 244	-0.429 806	0.457 602	-0.565 138

4.2.3 Mg 羟基蚀变信息提取

Mg 羟基的特征吸收范围是 2.30~2.40 μm ,对应的是 B8,而 B4 具有反射特征,选取 B1、B3、B4、B8 这 4 个波段进行主成分变换,提取 Mg 羟基蚀变信息。根据 Crosta 判定法则判断(表 4),B4 为反射波段,符号为正,而 B8 为吸收波段,符号为负,且 B3 与 B8 符号相同,满足上述条件的最佳分量为第 4 分量,故选 PC4 进行该类蚀变信息提取。

表 4 ASTER B1、B3、B4、B8 的 PCA 特征矩阵

Table 4 Feature matrix of PCA of ASTER B1, B3, B4, B8

主成分分量	B1	B3	B4	B8
PC1	0.237 452	0.422 375	0.721 877	0.494 075
PC2	0.675 709	0.550 203	-0.482 163	-0.090 630
PC3	0.211 238	-0.440 742	-0.356 569	0.796 231
PC4	0.665 141	-0.569 758	0.345 357	-0.337 183

4.2.4 Al 羟基蚀变信息提取

大多数矿物都含有 Al^{3+} ,特别是硅酸盐矿物(代表矿物有白云母、高岭石、蒙脱石等),其特征吸收谷在 2.170~2.210 μm 附近,对应 ASTER 数据的 B6,而 B3 和 B7 呈反射峰,因此选择 B1、B3、B6、B7 这 4 个波段做主成分变换,提取 Al—OH 基团的蚀变信息(表 5)。根据蚀变信息最佳主分量的判定法则进行判断,B6 的特征系数贡献值为正,且贡献最大,B4 和 B7 的特征系数贡献值为负,满足上述要求的最佳分量为取反后的第 4 分量,故对 PC4 进行取反计算,再进行蚀变信息提取。

通过计算“平均值+ n ×标准差”,对各蚀变信息

表 5 ASTER B1、B3、B6、B7 的 PCA 特征矩阵

Table 5 Feature matrix of PCA of ASTER B1, B3, B6, B7

主成分分量	B1	B3	B6	B7
PC1	0.279 254	0.468 980	0.597 111	0.587 821
PC2	0.610 167	0.587 101	-0.375 548	-0.376 792
PC3	0.702 228	-0.623 087	-0.146 099	0.311 919
PC4	-0.237 885	0.217 101	-0.693597	0.644 361

的最佳主分量分别进行阈值切割,按照 2、2.5、3 分别对 n 进行赋值并将蚀变异常划分为一、二、三级蚀变等级。接着为避免“椒盐”现象,采用 3×3 像元窗口中值滤波对所得的蚀变异常分布进行处理,除掉

影像中过于分散的异常像元或者将离散的像元合并至周围聚集的像元中,最终得到研究区遥感蚀变异常信息图。由于研究区范围较大,仅展示三级蚀变异常分布(图 3)。

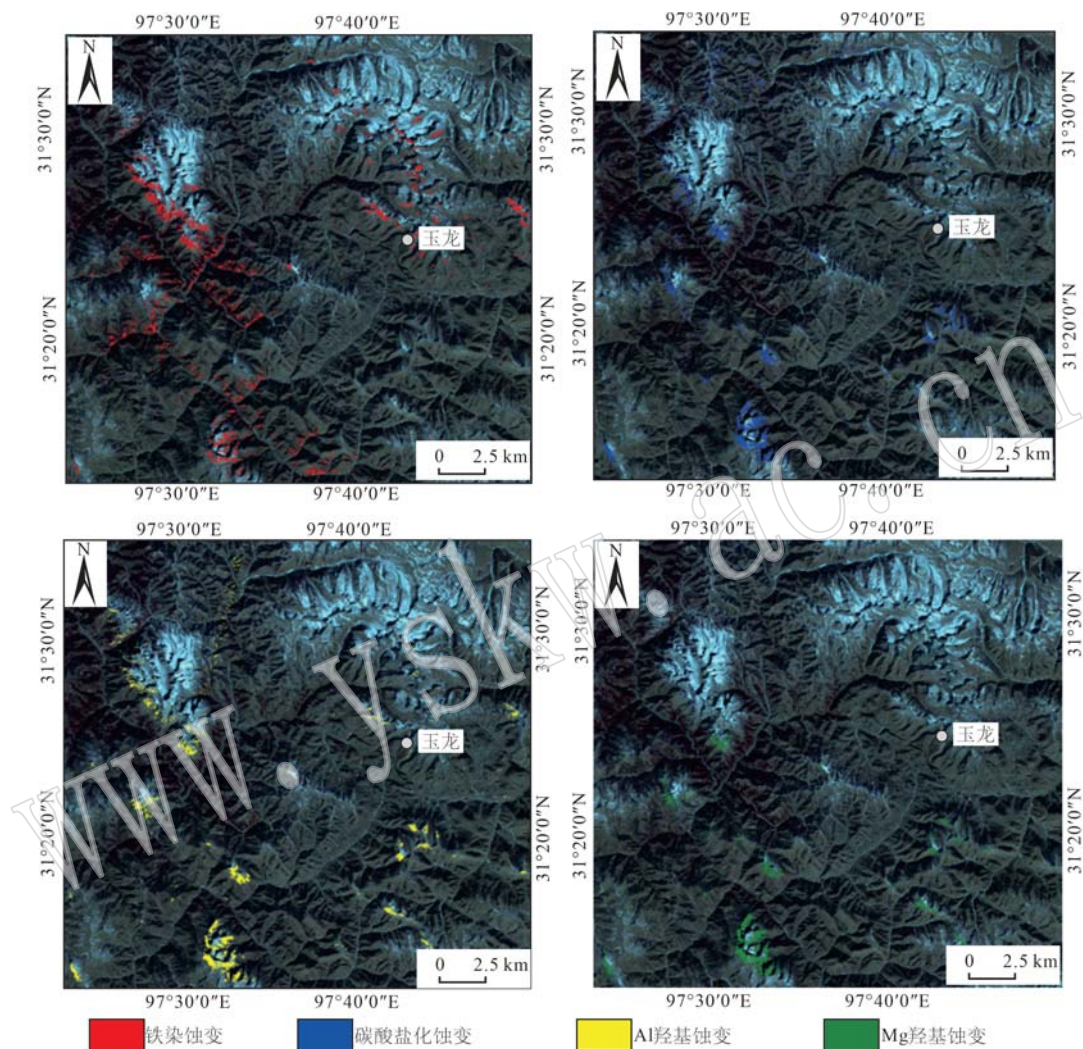


图 3 玉龙斑岩铜矿区遥感蚀变异常信息

Fig. 3 Remote sensing alteration anomaly information in Yulong porphyry copper mining area

4.3 成像光谱法

该方法提取的本质是对端元波谱提取并进行分类,再通过混合谐波匹配滤波对其识别,达到对影像矿物分类识别的目的(高慧等, 2013; 白杨林等, 2023)。该流程需要通过最小噪音分量变换(MNF)对数据进行降维,通过计算纯净像元指数(PPI)与 N 维可视化工具提取圈定纯净像元,然后利用混合谐波匹配滤波(MTMF)对未知端元识别。

4.3.1 最小噪音分量变换(MNF)

最小噪声分量变换用于对影像数据进行降维处

理,减弱数据的噪音,减少随后处理的计算量,使图像的有效信息集中在特征值较大的波段中(林娜等, 2011; 刘汉湖等, 2013); MNF 本质是含有两次叠置的主成分分析: 第 1 次变换基于主成分中的噪声协方差矩阵,以分离和调整影像中的噪声数据; 第 2 次变换则是通过对噪声数据进行主成分变换,从而确定数据的内在维数(张琳珊, 2019)。最小噪音分量变换的对象为预处理后的 VNIR 和 SWIR 波段,随后对 MNF 结果进行纯净像元指数计算。

4.3.2 纯净像元指数 PPI

为了在影像中找到波谱较为“纯净”的像元,纯净像元指数被用来计算并识别这些像元。其方法是将每一个像元看作一个 n 维向量,由 n 维向量组成

的 n 维散点图迭代映射为一个随机单位向量,通过每次迭代记录极值像元和标记为极值的总次数,从而生成一幅像元纯度图像(图4)。PPI 通常选用 MNF 的变换结果,通过调整 ROI 的阈值,进一步处

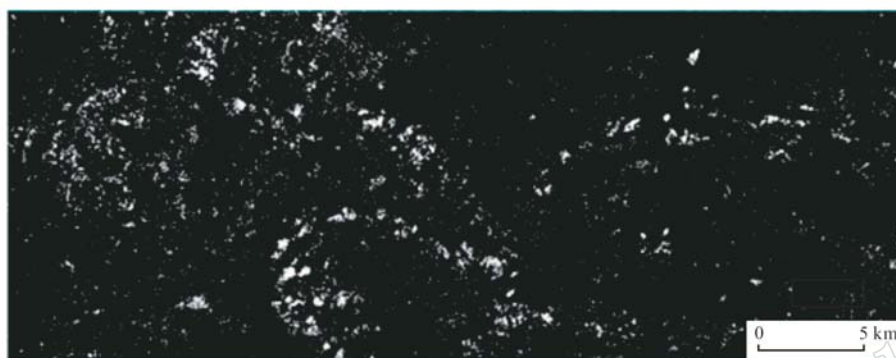


图4 纯净像元指数生成的 PPI 图像

Fig. 4 PPI image generated by pixel purity index

理 ROI 范围内的波段。

4.3.3 n 维可视化

n 维可视化基于 MNF 和 PPI 结果,可以定位、识别、聚焦数据集中最纯净的像元,从而获取端元波谱的纯净信息。

本文采用 MNF 变换后的数据作为输入,在 PPI 框定的潜在纯净像元 ROI 中对 n 维散点图进行分析和选取。具体操作是将代表图像的波段散点投射到 n 维空间中,通过旋转观察散点的离散状况来定位目标单位(图5a)。在勾勒选定的情况下,使用 n 维可

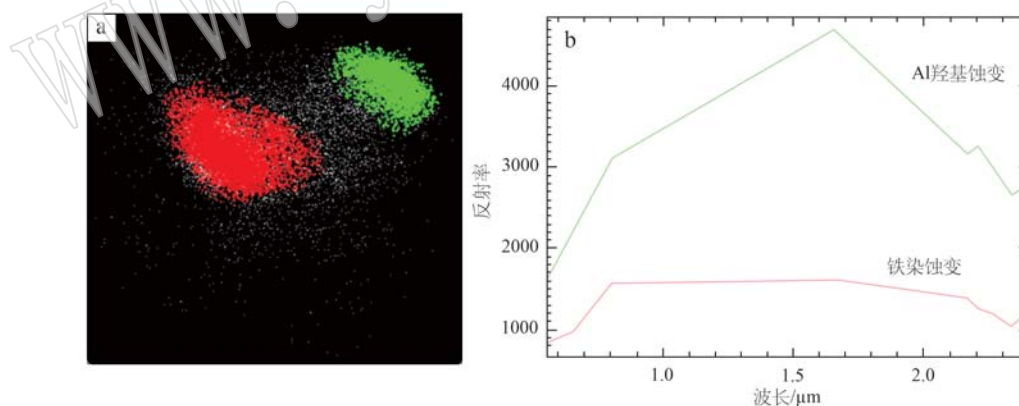


图5 n 维可视化窗口提取端元图(a)和绘图窗口获取的平均波谱曲线(b)

Fig. 5 End element in the n -D visualizer window(a) and average spectral curve obtained by the n -D mean drawing window(b)

视化工具获取目标的波谱曲线(图5b)。

4.3.4 MTMF 处理

混合调谐匹配滤波将线性混合分解与匹配滤波相结合,用于对元素进行解混并估计。MTMF 不要求提供地物光谱信息,消除了线性混合解中各端元素含量为正且总和为 1 的限制条件,因而降低了识别复杂度,同时对岩石中微量矿物成分敏感。对最

终的端元波谱结果进行 MTMF 分解,可以对矿物的相对丰度进行估计,得到矿物信息分布图(图6)。

5 蚀变提取结果分析

为了能够更清楚直观地评估两种方法提取结果,更清楚确定蚀变分布特征,更精确地圈定找矿远

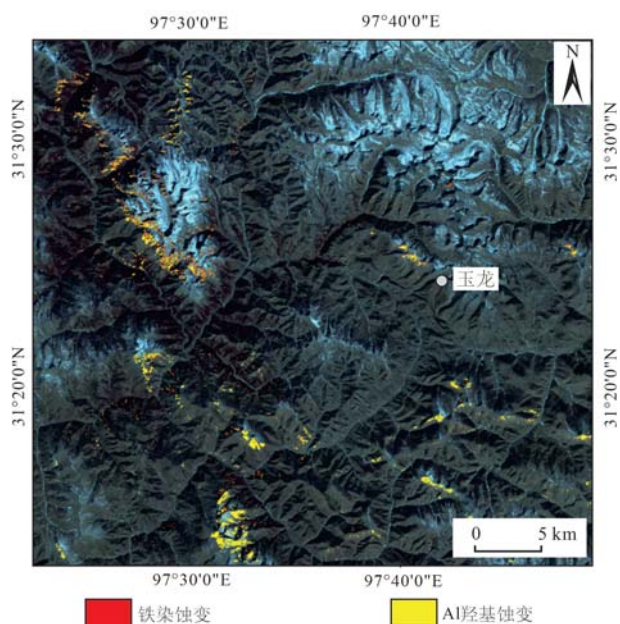


图6 成像光谱法提取蚀变信息

Fig. 6 Extraction of alteration information by imaging spectroscopy

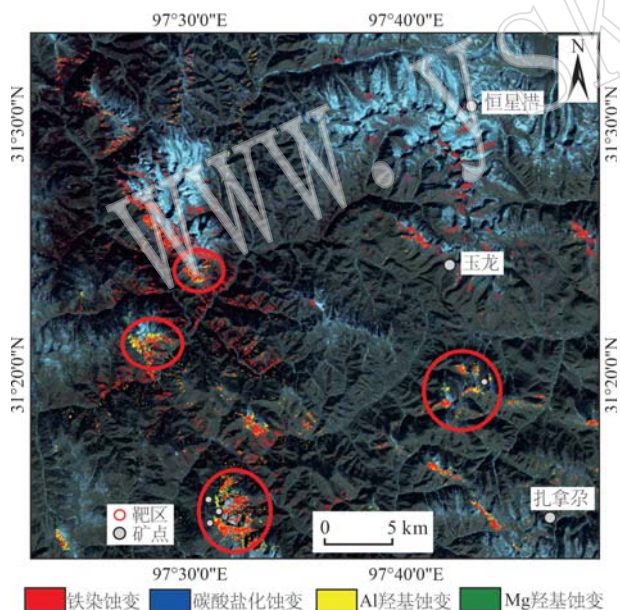


图7 蚀变叠加及找矿靶区

Fig. 7 Alteration superposition and prospecting targets

景区,笔者计算了两种方法的蚀变分布面积。由图7可知,主成分分析法提取的铁染蚀变面积为 22.7 km^2 ,碳酸盐蚀变面积为 12.6 km^2 ,Mg羟基蚀变面积为 3.9 km^2 ,Al羟基蚀变面积为 14.6 km^2 ;成像光谱法提取的铁染蚀变面积为 15.1 km^2 ,羟基蚀变面积为 17.2 km^2 。

将主成分分析法和成像光谱法提取结果放在同一张图像上,发现其蚀变分布结果在一定程度上重叠或相邻,可以起到相互补充、相互验证的作用。通过目视解译发现,主成分分析法相比成像光谱法,提取灵敏度更高,能够同时提取多种蚀变信息如碳酸盐蚀变等,而成像光谱只能提取少数几种蚀变信息。同时主成分分析法提取的铁染蚀变分布比成像光谱法提取的要多,且多较为集中。而对于羟基类蚀变信息的提取,两者提取面积相接近,其重合区域可能是蚀变异常强烈的区域,为野外找矿提供参考。尽管两种蚀变信息提取方法存在差异,但通过综合对比分析两种结果,可以相互验证并补充,提高了提取结果的准确性,更精确地确定蚀变异常的分布范围,进而有助于预测有利的成矿区。

6 遥感成矿模型

研究区坐落于温泉断裂与妥坝-芒康断裂之间(图1),其中,对区内矿床产生深远影响的是位于东缘的温泉断裂。在喜马拉雅的陆内造山时期,印藏板块的剧烈碰撞引发了青藏高原及其毗邻地区的广泛造山活动。此过程中,原本控制昌都盆地的正断层在浅部发生了反转,其基底褶皱变形并逆冲推覆至中生代陆内裂谷时期的层系上。同时,由于区域性的广泛挤压作用,裂谷逐渐封闭,层系普遍褶皱,进而构筑了岩浆运动的通道,促使玉龙斑岩带得以广泛发育。因此,成矿带的岩体和矿床在分布上与褶皱轴和断裂方向高度一致,展现出清晰的串珠状分布格局(秦覃, 2010; 史长义, 2021)。

玉龙地区的斑岩铜矿成矿模式如下:在成矿早期,伴随岩浆的冷凝与结晶,岩体中的小部分铜硫化物开始沉淀。进入中期,随着岩浆持续上升并冷凝结晶,加之天水的不断渗入与岩浆水的对流循环,大量的硫化物开始沉淀,同时外接触带的角岩和大理岩发生了青磐岩化。到了晚期,地壳的抬升导致矿体与地下水之间发生了垂向的氧化淋滤作用,进而形成了氧化淋滤带,这一带在地表呈现为一系列沿露头不连续分布的铁帽(唐菊兴, 2003)。随着地壳的持续抬升和地表剥蚀作用,铜等组分溶解于水中并侧向顺层迁移,最终沉淀下来,从而形成了铜等主要金属的储量(张少颖等, 2024)。

主要的蚀变异常分布在三叠系波里拉组、甲丕拉组、马拉松多组。岩体内部表现出强烈的绢云母

化(Al 羟基蚀变矿物组合),局部出现泥化现象,岩体与周围岩石接触带则呈现青磐岩化(Mg 羟基、Fe 羟基蚀变矿物组合)的蚀变异常。通过对斑岩铜矿

床的成矿地质背景进行分析,结合前人对控矿构造、斑岩型矿床岩性、蚀变特征的研究描述,确定了玉龙地区斑岩铜矿的遥感找矿模型(表6)。

表6 玉龙地区斑岩铜矿遥感找矿模型

Table 6 Remote sensing prospecting model for porphyry Cu deposits in Yulong area

控矿要素	容矿岩性控矿构造	二长花岗斑岩、花岗斑岩和花岗闪长岩以 NWW 向背斜为主,NNW 向断裂为辅
反射光谱	波谱吸收	绢云母化在 2.20 μm 强吸收,铁染蚀变在 0.5 μm 和 0.9 μm 存在吸收,青磐岩化在 2.33 μm 强吸收
影像特征	纹理	纹理细腻,岩体内部地形起伏不大
	形态	主要呈角砾状、条带状、土状和胶状等
	线性构造	以 NWW 向背斜为主,NNW 向断裂为辅
	蚀变特征	岩体内部具有强绢云母化(Al 羟基),局部伴有铁染蚀变,与围岩接触带具有青磐岩化(Mg 羟基)蚀变异常
找矿标志	多种结果综合标志	影像上近 NWW 向、NNW 向次级构造附近;具有强绢云母化(Al 羟基),局部伴有铁染蚀变,与围岩接触带具有青磐岩化(Mg 羟基)

7 找矿远景区圈定

利用建立的遥感找矿模型,基于主成分分析和成像光谱法提取结果,结合控矿要素、影像特征、成矿特征及蚀变信息,圈定了4处找矿靶区。预测的远景区主要分布在矿区的南部和西部,位于上三叠统,其中南部区域的远景区位于夺盖拉组,岩体出露面积较小且羟基蚀变和铁染蚀变较强,区内蚀变分带明显,主成分分析和成像光谱法结果呈明显蚀变特征,碳酸盐化蚀变相对较弱。

西部的蚀变大体沿着 NNW 向妥坝-芒康断裂带分布,大量中酸性岩脉沿这些断裂充填,所圈远景区普遍具有强的绢云母化和高岭石化,多呈带状、面状分布,说明由于玉龙矿床矿化明显与绢云母化有关。南部与西部的靶区均与地图已知矿点位置相吻合,其中南部和西部分别有3个和1个矿点落入本文提取的蚀变异常范围内,而南部的蚀变提取范围也明显大于西部,说明本次提取的蚀变异常与矿化点位置相关性较好(秦覃,2010)。北部两个靶区的蚀变异常与南部和西部类似,因此这两个区域也具有较好的找矿前景。

8 结论

(1) 本文利用主成分分析法和成像光谱法对 ASTER 数据进行了铁染蚀变、碳酸盐化蚀变、Al 羟基蚀变和 Mg 羟基蚀变的提取分析。研究结果显示,

同一区域内,不同提取方法得出的结果存在差异。其中,成像光谱法在矿物提取方面的灵敏度相对较低,仅能识别出部分矿物;相较之下,主成分分析法在提取铁染、羟基等蚀变矿物方面表现出更高的精确度。通过对比两种方法的提取结果,可以相互验证并更全面地了解蚀变矿物的分布情况。

(2) 在优化选择遥感蚀变信息的过程中,本文综合考量了研究区域内的地层、构造以及蚀变分带等多方面信息,并基于此构建了遥感找矿模型。同时,将划定的靶区与已知矿点进行了叠加对比分析,发现蚀变提取结果与已知矿点的位置高度吻合,表明找矿模型符合地质事实,可以应用于找矿勘查。

References

- Bai Yanglin, Lü Fengjun, Su Hongbo, *et al.* 2023. Review of hyperspectral remote sensing altered mineral information extraction[J]. *Remote Sensing Information*, 38(1): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Bie Xiaojuan, Sun Chuanmin, Zhang Tingbin, *et al.* 2014. Extraction and optimization of ASTER remote sensing alteration information in the north of Yulong porphyry copper belt[J]. *China Mining Magazine*, 23(4): 69~74 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fengqi. 2014. The Analyzation of Geological Characteristic of Yulong Copper Deposit, Tibet [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Chen Jianping, Tang Juxing, Cong Yuan, *et al.* 2009. Geological characteristics and metallogenic model in the Yulong porphyry copper depos-

- it, East Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 83(12): 1 887~1 900 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xilian, Huang Wenting, Zou Yinqiao, *et al.* 2016. Zircon U-Pb geochronology and geochemistry of ore-bearing porphyries in the southern Yulong porphyry copper belt, and factors resulting in the differences in scale of mineralization between the southern and northern Yulong porphyry copper belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2 522~2 534 (in Chinese with English abstract).
- Crosta A P and Moore J M. 1989. Enhancement of landsat thematic mapper imagery for residual soil mapping in SW minais Gerais state, Brazil: A prospecting case history in greenstone belt terrain [C]//Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology. Canada: Calgary, 1 173~1 187.
- Du Bin, Li Gao, Wang Lei, *et al.* 2022. Geological characteristics and prospecting indicators of Yulong porphyry Cu(Mo-Au) deposit in eastern Tibet[J]. *Mineral Exploration*, 13(1): 19~28 (in Chinese with English abstract).
- Duan Zhuling and Lü Xiufeng. 1982. A new way to delineate the alteration and mineralization range and zoning of porphyry copper deposits [J]. *Geology and Prospecting*, 18(1): 57~62 (in Chinese).
- Emam A, Zoheir B and Johnson P. 2016. ASTER-based mapping of ophiolitic rocks; Examples from the allaqi-heiani suture, SE Egypt[J]. *International Geology Review*, 58(5): 525~539.
- Fu Wenbo. 2014. Research on Remote Sensing Information Extraction of Porphyry Type Copper Mine in Tibet of Yulong Region[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Gao Hui, Zhang Jianlong, Ouyang Yuan, *et al.* 2013. Lithological classification based on ASTER data by minimum noise fraction transform [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 33(2): 259~265 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Q, Xie Y L, Xu W Y, *et al.* 2007. Yulong deposit, eastern Tibet: A high-sulfidation Cu-Au porphyry copper deposit in the eastern indo-Asian collision zone[J]. *International Geology Review*, 49(3): 235~258.
- Ibrahim W S, Watanabe K and Yonezu K. 2016. Structural and litho-tectonic controls on Neoproterozoic base metal sulfide and gold mineralization in north hamisana shear zone, south eastern desert, Egypt: The integrated field, structural, landsat 7 ETM⁺ and ASTER data approach[J]. *Ore Geology Reviews*, 79: 62~77.
- Li jinbo. 2019. Research on Lithology Extraction Method of Limestone in Northeast Yunnan Based on ASTER [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Li Zhonglie, Zhang Xiaoyong, Cheng Jingliang, *et al.* 2012. Application of remote sensing technology in ultra-large type porphyry copper in Chile[J]. *Mineral Exploration*, 3(4): 549~557 (in Chinese with English abstract).
- Lin Na, Yang Wunian and Liu Hanhu. 2011. Mineral endmember identification and information extraction based on hyperspectral remote sensing[J]. *Remote Sensing Information*, 26(5): 114~117, 99 (in Chinese with English abstract).
- Liu C H, Qiu C X, Wang L Q, *et al.* 2023. Application of ASTER remote sensing data to porphyry copper exploration in the Gondwana Region[J]. *Minerals*, 13(4): 501.
- Liu Chuangtu. 2019. Analysis on geological characteristics the deposit of copper and molybdenum in Yulong, Tibet Autonomous Region, China [J]. *Plateau Science Research*, 3(1): 53~57 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hanhu, Yang Wunian and Yang Ronghao. 2013. The end-member extraction and analysis method for rocks and minerals using hyperspectral remote sensing image[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 213~220 (in Chinese with English abstract).
- Liu L, Li Y, Zhou J, *et al.* 2017. Gold-copper deposits in wushitala, southern Tianshan, Northwest China: Application of ASTER data for mineral exploration[J]. *Geological Journal*, 53: 362~371.
- Liu L, Zhou J, Jiang D, *et al.* 2014. Lithological discrimination of the mafic-ultramafic complex, Huitongshan, Beishan, China: Using ASTER data[J]. *Journal of Earth Science*, 25(3): 529~536.
- Liu Zhi and Zhou Ping. 2017. Information extraction of alteration of Huanishan Region, Gansu Province based on ASTER data[J]. *Journal of North University of China (Natural Science Edition)*, 38(2): 124~132, 139 (in Chinese with English abstract).
- Lü Fengjun, Hao Yuesheng, Shi Jing, *et al.* 2009. Alteration remote sensing anomaly extraction based on aster remote sensing data[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 271~276 (in Chinese with English abstract).
- Pour A B and Hashim M. 2012. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits[J]. *Ore Geology Reviews*, 44: 1~9.
- Pournamdari M, Hashim M and Pour A B. 2014. Spectral transformation of ASTER and Landsat TM bands for lithological mapping of Soghan ophiolite complex, south Iran[J]. *Advances in Space Research*, 54(4): 694~709.
- Qin Qin. 2010. Research of the Ore-Prospecting Direction of Yulong Porphyry-Type Copper Deposit—Based on Mapping the Structural Map of

- Qamdo and the Research of Typical Ore Deposits [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Rowan L C, Hook S J, Abrams M J, *et al.* 2003. Mapping hydrothermally altered rocks at cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system[J]. *Economic Geology*, 98(5): 1 019~1 027.
- Rowan L C and Mars J C. 2003. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 350~366.
- Rufeina Alimujiang, Chen Chuan, Gao Lingling, *et al.* 2022. The extraction of remote sensing alteration information based on ASTER data: A case study of murantau area in western Tianshan Mountains[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 43(2): 235~245 (in Chinese with English abstract).
- Salem S M, Arafa S A, Ramadan T M, *et al.* 2013. Exploration of copper deposits in Wadi El Regeita area, Southern Sinai, Egypt, with contribution of remote sensing and geophysical data[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(2): 321~335.
- Shi Changyi. 2021. Research on prospecting prediction for the Yulong Cu metallogenic belt and its peripheral areas based on the model for spatial structures of regional geochemical multi-element anomalies, Tibet [J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(11): 3 163~3 177 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe R H. 2010. Porphyry copper systems[J]. *Economic Geology*, 105(1): 3~41.
- Son Y S, Kang M K and Yoon W J. 2014. Lithological and mineralogical survey of the Oyu Tolgoi region, Southeastern Gobi, Mongolia using ASTER reflectance and emissivity data[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26: 205~216.
- Sun Maoyu, Qu Huanchun, Li Qiuyun, *et al.* 2015. Recognition of the ore forming porphyry in the Yulong Cu deposit and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 34(4): 493~504 (in Chinese with English abstract).
- Tang Juxing. 2003. The Study on Metallogeny and Localizing Forecast of Yulong Porphyry Copper-Molybdenum Mineralization, Xizang(Tibet) [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Wang Xi, Cheng Sanyou, Lin Haixing, *et al.* 2022. Research on alteration information extraction in Saishiteng area of Qinghai based on Aster and Landsat8 data[J]. *Geological Review*, 68(1): 262~280 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yingxue, Liu Xinxing, Zhang Juan, *et al.* 2023. Remote sensing exploration of fluorite ore based on TM and ASTER data—a case study of the north-central region of Inner Mongolia[J]. *Journal of Hebei GEO University*, 46(2): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Xue G Q, Qin K Z, Li X, *et al.* 2012. Discovery of a large-scale porphyry molybdenum deposit in Tibet through a modified TEM exploration method[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17(1): 19~25.
- Yang Bin, Li Maojiao, Wang Shiju, *et al.* 2015. Anomaly information extraction of mineralization alteration in taxkorgan with ASTER[J]. *Remote Sensing Information*, 30(4): 109~114 (in Chinese with English abstract).
- Yang Jiajia, Jiang Qigang, Zhao Jing, *et al.* 2008. Remote sensing alteration information extraction based on ASTER and ETM⁺ data—A case study of tarigen aobao area in Inner Mongolia[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 38(S1): 153~158 (in Chinese).
- Yang Rihong, Li Zhizhong and Chen Xiufa. 2012. Information extraction of typical alteration mineral assemblage in porphyry copper using ASTER satellite data, Arequipa Province of South Peru[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 14(3): 411~418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hong, Liang Huaying, Zhao Yan, *et al.* 2018. Investigation of the geochemical characteristics of apatite trace elements from the Yulong porphyry copper belt, Eastern Tibet[J]. *Geochimica*, 47(1): 14~32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jie. 2017. Study on Extraction Method of Remote Sensing Alteration Information in Yulong Porphyry Copper Belt [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Zhang Jinshu, Duo Ji, He Zhengwei, *et al.* 2008. Analysis of metallogenic regularity in north tibeten Yulong porphyry copper belt[J]. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research*, 23(3): 199~203 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lin. 2011. Geological Characteristics of Yulong Copper Mine in Tibet and the Environmental Impact of Mining[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Zhang Linshan. 2019. Research on Quantitative Extraction of Tangka Mineral Pigments Information based on Hyperspectral Technology [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology (in Chinese).
- Zhang Nanman and Zhou Kefa. 2016. Research on identification methods of porphyry alteration zones based on Aster data[J]. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 51(3): 990~1 001 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shaoying, He Wenyan, Gao Xue, *et al.* 2024. Alteration zonation

- and metallogenic mechanism of porphyry copper deposits: A case study of thermodynamic equilibrium simulation of fluid-rock interactions in Yulong deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 40(6): 1 837~1 852 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoxu, Tang Juxing, Lin Bin, *et al.* 2022. Mineralogical characteristics of the Mamupu copper polymetallic deposit in the southern section of the Yulong copper belt, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 2 062~2 077 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yujun, Yang Jianmin and Yao Fojun. 2007. The potential of multi-spectral remote sensing techniques for mineral exploration-Taking the Mongolian Oyu togoi Cu-Au deposit as an example[J]. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 63~70 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yujun and Zeng Chaoming. 2012. Study of optimum discriminator of multi-channel remote sensing anomaly for recognition of porphyry Cu deposits in Gangdese belt[J]. *Mineral Deposits*, 31(4): 671~698 (in Chinese).
- Zhang Yujun, Zeng Zhaoming and Chen Wei. 2003. The methods for extraction of alteration anomalies from the ETM*(tm) data and their application: Method selection and technological flow chart[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 15(2): 44~49, 78 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhifang, Tan Shucheng, Wang Fengde, *et al.* 2012. Research on extraction method of alteration anomaly information based on ASTER data[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 29(6): 44~50 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 白杨林, 吕凤军, 苏鸿博, 等. 2023. 高光谱遥感蚀变矿物信息提取研究综述[J]. *遥感信息*, 38(1): 1~10.
- 别小娟, 孙传敏, 张廷斌, 等. 2014. 玉龙斑岩铜矿带北段 ASTER 遥感蚀变信息提取与优选[J]. *中国矿业*, 23(4): 69~74.
- 陈丰琪. 2014. 西藏玉龙铜矿床地质特征解析[D]. 成都: 成都理工大学.
- 陈建平, 唐菊兴, 丛源, 等. 2009. 藏东玉龙斑岩铜矿地质特征及成矿模型[J]. *地质学报*, 83(12): 1 887~1 900.
- 陈喜连, 黄文婷, 邹银桥, 等. 2016. 玉龙斑岩铜矿带南段含矿斑岩体锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及南北段成矿规模差异分析[J]. *岩石学报*, 32(8): 2 522~2 534.
- 杜斌, 李高, 王磊, 等. 2022. 藏东玉龙斑岩型铜(-钼-金)矿床地质特征及找矿标志[J]. *矿产勘查*, 13(1): 19~28.
- 段祝龄, 吕秀峰. 1982. 圈定斑岩铜矿蚀变矿化范围及分带的新途径[J]. *地质与勘探*, 18(1): 57~62.
- 付文博. 2014. 西藏玉龙地区斑岩型铜矿遥感信息提取研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 高慧, 张建龙, 欧阳渊, 等. 2013. 基于最小噪声分量变换的 ASTER 遥感数据岩性分类[J]. *桂林理工大学学报*, 33(2): 259~265.
- 李进波. 2019. 基于 ASTER 影像的滇东北灰岩岩性提取方法研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 李忠烈, 张晓永, 成静亮, 等. 2012. 遥感技术在智利超大型斑岩型铜矿勘查中的应用研究[J]. *矿产勘查*, 3(4): 549~557.
- 林娜, 杨武年, 刘汉湖. 2011. 基于高光谱遥感的岩矿端元识别及信息提取研究[J]. *遥感信息*, 33(5): 114~117.
- 刘创脱. 2019. 西藏玉龙铜钼矿床地质特征分析[J]. *高原科学研究*, 3(1): 53~57.
- 刘汉湖, 杨武年, 杨容浩. 2013. 高光谱遥感岩矿端元提取与分析方法研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 213~220.
- 刘知, 周萍. 2017. 基于 ASTER 数据的甘肃花牛山地区蚀变信息提取[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 38(2): 124~132, 139.
- 吕凤军, 郝跃生, 石静, 等. 2009. ASTER 遥感数据蚀变遥感异常提取研究[J]. *地球学报*, 30(2): 271~276.
- 秦覃. 2010. 玉龙式斑岩型铜(钼)矿床找矿方向研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 茹菲娜·阿力木江, 陈川, 高玲玲, 等. 2022. 基于 ASTER 数据的遥感蚀变信息提取——以西天山穆龙套地区为例[J]. *地球学报*, 43(2): 235~245.
- 史长义. 2021. 西藏玉龙 Cu 成矿带及其外围地区异常结构模式找矿预测研究[J]. *地质学报*, 95(11): 3 163~3 177.
- 孙茂好, 曲焕春, 李秋耘, 等. 2015. 西藏玉龙铜矿床成矿斑岩的厘定及地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 34(4): 493~504.
- 唐菊兴. 2003. 西藏玉龙斑岩铜(钼)矿成矿作用与矿床定位预测研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 王曦, 程三友, 林海星, 等. 2022. 基于 Aster 和 Landsat8 数据在青海赛什腾地区蚀变信息提取研究[J]. *地质论评*, 68(1): 262~280.
- 王瑛雪, 刘新星, 张娟, 等. 2023. 基于 TM 和 ASTER 数据的萤石矿的遥感找矿研究——以内蒙古中北部地区为例[J]. *河北地质大学学报*, 46(2): 1~11.
- 杨斌, 李茂娇, 王世举, 等. 2015. ASTER 数据在塔什库干地区矿化蚀变信息的提取[J]. *遥感信息*, 30(4): 109~114.
- 杨佳佳, 姜琦刚, 赵静, 等. 2008. 基于 ASTER 和 ETM+数据的遥感蚀变信息提取——以内蒙古塔日根敖包地区为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 38(S1): 153~158.

- 杨日红,李志忠,陈秀法. 2012. ASTER 数据的斑岩铜矿典型蚀变矿物组合信息提取方法——以秘鲁南部阿雷基帕省斑岩铜矿区为例[J]. 地球信息科学学报, 14(3): 411~418.
- 张红,梁华英,赵燕,等. 2018. 藏东玉龙斑岩铜矿带磷灰石微量元素地球化学特征研究[J]. 地球化学, 47(1): 14~32.
- 张洁. 2017. 玉龙斑岩铜矿带遥感蚀变信息提取技术方法研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张金树,多吉,何政伟,等. 2008. 西藏玉龙斑岩铜矿带北段成矿规律分析[J]. 地质找矿论丛, 23(3): 199~203.
- 张林. 2011. 西藏玉龙铜矿床地质特征及矿山开采对环境的影响[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张琳琳. 2019. 基于高光谱技术的唐卡矿物颜料信息定量提取研究[D]. 成都: 成都理工大学.
- 张楠楠,周可法. 2016. 基于 Aster 数据的斑岩铜矿蚀变分带识别方法研究[J]. 地质科学, 51(3): 990~1 001.
- 张少颖,和文言,高雪,等. 2024. 斑岩铜矿蚀变分带与成矿机制: 玉龙矿床水-岩反应热力学平衡模拟例析[J]. 岩石学报, 40(6): 1 837~1 852.
- 张晓旭,唐菊兴,林彬,等. 2022. 西藏玉龙铜矿带南段马牧普铜多金属矿床矿物学特征[J]. 地质学报, 96(6): 2 062~2 077.
- 张玉君,杨建民,姚佛军. 2007. 多光谱遥感技术预测矿产资源的潜能——以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例[J]. 地学前缘, 14(5): 63~70.
- 张玉君,曾朝铭. 2012. 西藏冈底斯地区斑岩铜矿识别的最佳多光谱遥感异常判据研究[J]. 矿床地质, 31(4): 671~698.
- 张玉君,曾朝铭,陈薇. 2003. ETM⁺(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——方法选择和技术流程[J]. 国土资源遥感, 15(2): 44~49, 78.
- 赵志芳,谈树成,王锋德,等. 2012. ASTER 数据矿化蚀变异常信息提取方法研究[J]. 国土资源科技管理, 29(6): 44~50.

www.yskw.ac.cn