

基于Sentinel-2多光谱数据的铜仁铅锌矿区遥感蚀变信息提取与找矿预测

周万尧

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月17日; 录用日期: 2026年8月17日; 发布日期: 2026年8月25日

摘要

铜仁地区铅锌矿资源丰富, 大地构造位置处于扬子陆块东南缘, 江南造山带西段区域构造发育、热液蚀变作用强烈, 具备优越的铅锌成矿地质条件, 是贵州省重要的铅锌多金属成矿。为高效提取铜仁地区矿化蚀变信息、精准开展找矿预测, 本文以Sentinel-2多光谱遥感影像为基础数据源, 在完成影像预处理、去除植被与水体干扰的前提下, 采用主成分分析法结合Crosta蚀变提取技术, 针对性提取研究区与铅锌成矿密切相关的铁染蚀变和羟基蚀变异常信息。结合区域地质构造特征、蚀变空间分布规律与已知矿化点数据, 对蚀变异常进行筛选、分级与验证, 最终圈定6处铅锌找矿预测靶区, 其中I级优质靶区1个、II级有利靶区3个、III级远景靶区2个。结果表明基于Sentinel-2数据的Crosta主成分分析法能够有效识别铜仁铅锌矿区典型热液蚀变异常, 靶区与区域成矿地质条件匹配良好, 可为研究区后续铅锌矿产精细勘查与资源潜力评价提供科学依据与技术支撑。

关键词

Sentinel-2, 铜仁矿区, 铅锌矿, 蚀变信息提取

Remote Sensing Alteration Information Extraction and Ore Prospecting Prediction of Tongren Lead-Zinc Mining Area Based on Sentinel-2 Multispectral Data

Wanyao Zhou

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: July 17, 2026; accepted: August 17, 2026; published: August 25, 2026

文章引用: 周万尧. 基于 Sentinel-2 多光谱数据的铜仁铅锌矿区遥感蚀变信息提取与找矿预测[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1271-1281. DOI: 10.12677/ag.2026.168113

Abstract

Tongren area is rich in lead-zinc mineral resources. Tectonically, it lies on the southeastern margin of the Yangtze Block and the western segment of the Jiangnan Orogenic Belt, where regional structures are well-developed and hydrothermal alteration is intense. Favourable geological conditions for lead-zinc mineralization make it an important polymetallic metallogenic province in Guizhou Province. To efficiently extract mineralized alteration information and accurately carry out ore prospecting prediction in Tongren, Sentinel-2 multispectral remote sensing images were adopted as the basic data source in this study. After image preprocessing and elimination of vegetation and water body interference, the principal component analysis combined with Crosta alteration extraction technique was used to selectively extract iron-stained and hydroxyl alteration anomalies closely associated with lead-zinc mineralization in the study area. Combined with regional geological structural features, spatial distribution rules of alterations and known mineral occurrence data, alteration anomalies were screened, graded and verified. Six prospective target zones for lead-zinc exploration were delineated, including 1 Grade I high-priority target, 3 Grade II favourable targets and 2 Grade III prospective targets. The results show that the Crosta PCA method based on Sentinel-2 data can effectively identify typical hydrothermal alteration anomalies in the Tongren lead-zinc mining area. The delineated target zones are highly consistent with regional metallogenic geological conditions, which can provide scientific reference and technical support for detailed exploration and resource potential evaluation of lead-zinc deposits in subsequent research work.

Keywords

Sentinel-2, Tongren Area, Lead-Zinc Deposit, Alteration Information Extraction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

铅锌是我国重要的紧缺矿产资源，广泛应用于电气、机械、军事、冶金、化学等领域，其资源储备和开发利用至关重要[1]。我国铅锌矿产资源分布广泛，其中扬子陆块周缘是国内核心铅锌成矿区带，川滇黔、湘西-黔东南等矿产集区资源禀赋优越，具有大规模成矿潜力，是华南地区铅锌矿产勘查与地质研究的重要区域[2]。黔东南地区位于扬子准地台北台隆遵义断拱凤岗 NNE 向构造变形区和贵阳构造变形区的沿河-石阡一线以东的地区，包括沿河、松桃、铜仁、玉屏、镇远等地。铅锌矿是区内最具有找矿潜力的矿种之一[3]。雪峰山西缘铜仁地区坐落于贵州省东部，大地构造隶属于扬子陆块东南缘、江南造山带西段，处于川滇黔成矿带与湘西-鄂西成矿带的交汇核心位置，区域内构造活动多期活跃、沉积地层发育完整、岩相古地理条件优越，叠加多期次热液蚀变作用，造就了良好的铅锌成矿地质条件，是华南重要的锰、铅锌、金多金属共生矿带[4]。

近年来，雪峰山西缘湘西花垣地区超大型铅锌矿床的发现，推动了湘西-黔东南成矿带的地质研究与矿产勘查进程[5]，充分证实该区域具备大型铅锌矿床成矿潜力。铜仁地区毗邻湘西花垣超大型铅锌矿集区，已陆续发现嗅脑、代懂、耙耙寨、团塘、卜口场等多处铅锌矿床(点)，区域矿产资源潜力巨大。但整体来看，区内已发现铅锌矿床普遍存在规模偏小、矿石品位偏低、经济价值有限的问题，相较于邻区丰硕的找矿成果，本区铅锌矿勘查始终未能取得突破性进展，资源开发与勘探潜力严重不匹配。

长期以来,国内外学者针对湘西-黔东南地区铅锌矿开展了大量研究,围绕矿床类型、成矿时代、成矿流体特征、岩相古地理条件、同位素地球化学等单一方向取得了系列研究成果,普遍认为区内铅锌矿床为典型 MVT 型层控铅锌矿床,成矿受地层岩性、沉积岩相、区域构造的多重控制。但现有研究仍存在明显短板与不足,多数研究仅聚焦单一矿床或单一地质要素,缺乏对铜仁全域铅锌矿成矿地质背景、控矿机制、成矿规律的系统性、综合性研究;同时,针对区域蚀变异常精细提取、弱矿化信息识别、隐伏矿体精准预测的技术应用较为薄弱,传统地质勘查手段难以高效破解本区“点多、面广、矿化分散、富矿难找”的勘探难题,严重制约了区域铅锌矿产的深度勘查与资源潜力评价工作。

遥感技术凭借宏观性、高效性、时效性、低成本的优势,已成为矿产勘查、蚀变信息提取、找矿靶区圈定的核心技术手段, Sentinel-2 数据具有空间分辨率高、多光谱、重返周期短和免费等优点,在未来遥感研究领域必将占有一席之地[6]。基于 Sentinel-2 多光谱数据的 Crosta 主成分分析方法,能够精准识别热液成矿作用相关的铁染、羟基蚀变异常,有效区分矿致异常与非矿异常,在层控型铅锌矿床找矿预测中具备极强的适用[7]。本文以雪峰西缘铜仁地区铅锌矿为研究对象,结合区域地质资料、物化探数据与典型矿床研究成果,以 Sentinel-2 遥感影像为核心数据源,通过影像预处理、干扰信息去除、蚀变异常提取与区域地质资料叠加分析,筛选出有效羟基蚀变信息与铁染蚀变信息。结合区域控矿地质条件与已知矿点分布特征圈定找矿预测靶区,利用发现的遥感找矿标志来弥补本区精细找矿预测研究的短板,为铜仁地区铅锌矿以及其他类型矿产的精细勘查、隐伏矿体勘探、资源潜力评价提供科学依据与技术支撑,为华南高植被覆盖地区铅锌矿床找矿工作提供参考。

2. 研究区地质概况

黔东南地区在大地构造位置上地跨扬子地块和华南褶皱带两大构造单元,主要位于扬子陆块东南边缘及其与华南褶皱带之间的过渡带[3]。本次研究区位于贵州省铜仁市及以南区域,范围为 $27^{\circ}29'58''N$, $109^{\circ}4'13''E \sim 27^{\circ}43'42''N$, $109^{\circ}19'11''E$ (图 1)。该区域毗邻湘西超大型花垣铅锌矿集区,成矿地质条件与邻区湘西花垣超大型铅锌矿集区高度相似,具备优越的 MVT 型铅锌成矿潜[8]。地层出露完整,基底由梵净山群、板溪群浅变质火山碎屑岩组成;盖层以南华系、震旦系、寒武系分布最广,奥陶系、志留系零星出露,缺失泥盆-三叠系大部分地层。寒武系为本区核心赋矿地层,其中清虚洞组第二段藻灰岩是铅锌主要容矿岩性,岩性为浅海台地藻丘相灰岩,孔隙、层间裂隙发[9];下寒武统牛蹄塘组黑色炭质页岩富含铅锌元素与还原硫,为成矿提供物质源与硫[10]。震旦系陡山沱组、寒武系敖溪组、娄山关白云岩为次要赋矿层位,泥质页岩、薄层灰岩则形成良好隔水盖层,构成储盖匹配的成矿组合。区域构造以 NE、NNE 向断裂与宽缓褶皱为主体,保铜玉、红石、三阳等区域性深大断裂贯穿全区,为加里东期热卤水长距离运移的主干通道,盘山背斜、铜仁复式向斜等次级褶皱轴部、翼部发育层间滑脱带与张裂隙,是矿体有利富集空间[11]。该区域矿体受地层岩性与构造控制,顺岩层产出。构造演化历经武陵、加里东、印支、燕山多期运动,晚寒武-早奥陶世期间的郁南运动触发盆地流体大规模迁移,为本区域主成矿构造事件。矿区围岩蚀变类型简单且分带清晰,主要发育方解石化、白云石化、褐铁矿化、黄铁矿化,以及少量萤石化、高岭土化、沥青化等,其中铁染蚀变与羟基蚀变是本次遥感信息提取的核心标志。研究区矿床为典型 MVT 型后生层控铅锌矿床,矿体多呈层状、似层状、透镜状产出,矿石以闪锌矿、方铅矿为主,锌品位整体高于铅品位,伴生多种稀散元素,成矿流体为中温、中高盐度热卤水,成矿时代集中于晚寒武世末-早奥陶世初。

3. 遥感影像处理

3.1. 数据来源与预处理

本次采用 2025 年 3 月 25 日获取的 Sentinel-2 L2A 级大气底校正多光谱影像(条带号 118, 云量 < 5%)

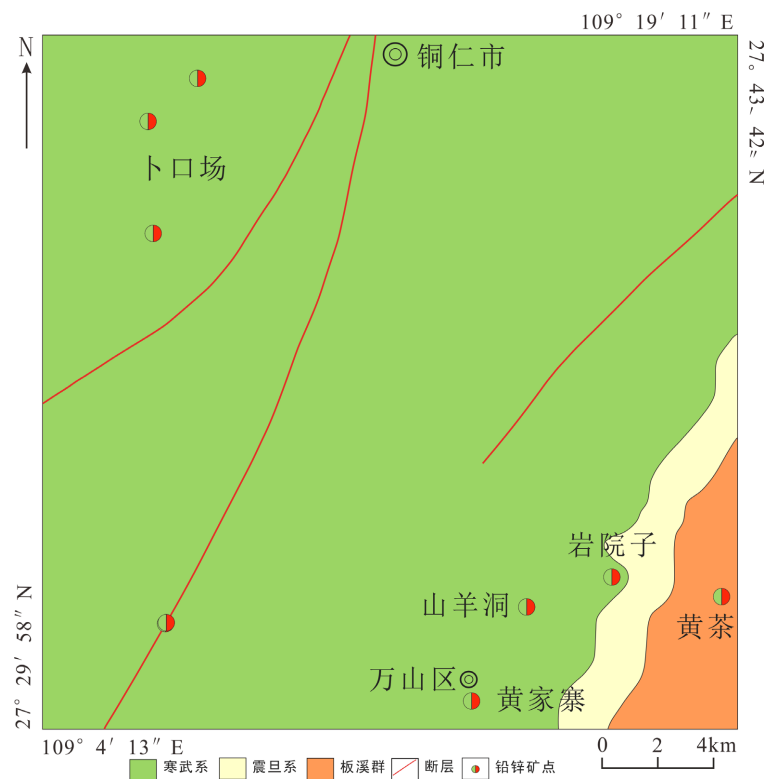


Figure 1. Regional geological and mineral map of the study area (Revised based on Ref. [4])

图 1. 研究区区域地质矿产图(根据文献[4]修编)

作为核心数据源。Sentinel-2 卫星包含 Sentinel-2A、2B 双星，搭载多光谱成像仪 MSI，一共设置了 13 个光谱波段，空间分辨率分为 10 m、20 m、60 m 三档，其中 10 m 波段含 B2 蓝、B3 绿、B4 红、B8 近红外，适用于构造、地表岩性与植被精细解译，20 m 波段包含 B5-B7 红边波段、B8A 短波近红外、B11-B12 短波红外，短波红外区间可捕捉羟基、铁氧化物矿物特征吸收谷，是提取铅锌矿蚀变信息的关键波段，60 m 波段 B1、B9、B10 主要用于大气、云雪校正辅助运算[12]。具体波段参数如表 1 所示。

Table 1. Sentinel-2 data band parameters

表 1. Sentinel-2 数据波段参数

波段编号	波段名称	光谱范围/ μm	空间分辨率/m
Band1	海岸气溶胶波段(Coastal)	0.433~0.453	60
Band2	蓝波段(Blue)	0.458~0.523	10
Band3	绿波段(Green)	0.543~0.578	10
Band4	红波段(Red)	0.650~0.680	10
Band5	红边波段 1 (Red Edge 1)	0.698~0.713	20
Band6	红边波段 2 (Red Edge 2)	0.733~0.748	20
Band7	红边波段 3 (Red Edge 3)	0.773~0.793	20
Band8	近红外波段 1 (NIR1)	0.785~0.900	10
Band8a	近红外波段 2 (NIR2)	0.832~0.852	20

续表

Band9	水汽吸收波段(Water vapor)	0.935~0.955	60
Band10	卷云检测波段(SWIR-Cirrus)	1.360~1.390	60
Band11	短波红外 1 (SWIR1)	1.565~1.655	20
Band12	短波红外 2 (SWIR2)	2.100~2.280	20

L2A 级产品已完成辐射定标、大气校正处理，直接提供地表反射率数据，省去复杂大气校正步骤，大幅简化了蚀变提取流程。后续根据研究区范围裁剪得到底图(图 2 左)，利用 QA60 质量波段提取云、云阴影像元并掩膜去除，消除云雾对光谱的干扰。3 月下旬研究区植被尚未完全繁茂，植被覆盖干扰弱，有利于矿化蚀变信息识别。

3.2. 干扰信息去除

本文主要采用增强水体指数(EWI)来提取研究区水体信息[13]，采用归一化植被指数(NDVI)来提取研究区植被信息，其计算公式为：

$$EWI = \frac{Green - Red - NIR}{Green + Red + NIR}$$
$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

选取 b3、b4、b8 波段分别对应 EWI 中的 Green、Red、NIR 计算得到水体提取的结果。统计研究区水体 DN 值范围选取 $-0.425 < EWI < 1$ 的阈值范围建立水体掩膜文件。选取 b5 与 b4 对应 NDVI 中的 NIR 与 RED 计算得到植被信息提取结果，统计研究区植被 DN 值范围选取 $0.31 < NDVI < 1$ 的阈值范围建立植被掩膜文件。最后建立 ROI 对大片居民区建立掩膜文件，最终应用于研究区的水体、植被和建筑的掩膜处理(图 2 右)。



Figure 2. Tongren region Sentinel-2 preprocessed images (left)and their masked images (right)
图 2. 铜仁地区 Sentinel-2 预处理影像(左)与掩膜后的影像(右)

4. 蚀变信息提取

4.1. 蚀变光谱特征分析

铅锌矿床热液成矿过程中，含矿流体与围岩发生水岩反应形成特征蚀变组合，目标蚀变矿物具有特征反射波谱是遥感蚀异常信息提取的前提与基础[7]。铅锌矿矿物组合中闪锌矿、方铅矿及黄铁矿等为较为常见金属矿物；而石英、方解石等则为常见脉石矿物。本次研究主要提取铁染蚀变与羟基蚀变，铁染蚀变矿物以褐铁矿、赤铁矿、针铁矿为主，由黄铁矿氧化风化形成，羟基蚀变矿物包含高岭石、伊利石、绿泥石等黏土矿物及白云石、方解石等(表 2)。两类蚀变叠加区域代表热液活动中心，矿化潜力最高，单一蚀变发育区域成矿潜力次之。根据研究区内主要的围岩蚀变类型为白云岩化、方解石化、黏土矿化、黄铁矿化、赤铁矿化，选取及分析相应的岩矿波谱曲线。此次研究中使用的是美国地质调查局准波谱库(USGS)(图 3)。

Table 2. Representative minerals of typical alteration types and the absorption positions of ions in the spectra
表 2. 典型蚀变类型的代表矿物及离子光谱吸收位置

蚀变类型	代表矿物	特征离子/基团	特征光谱吸收峰位置/ μm
铁染蚀变	褐铁矿、赤铁矿、针铁矿	Fe^{3+}	0.45~0.55、0.85~0.90
羟基蚀变(黏土类)	高岭石、伊利石、绿泥石	OH^- 、 Al-OH	2.16~2.21
羟基蚀变(碳酸盐类)	方解石、白云石	CO_3^{2-} 、 Mg-OH	2.30~2.35

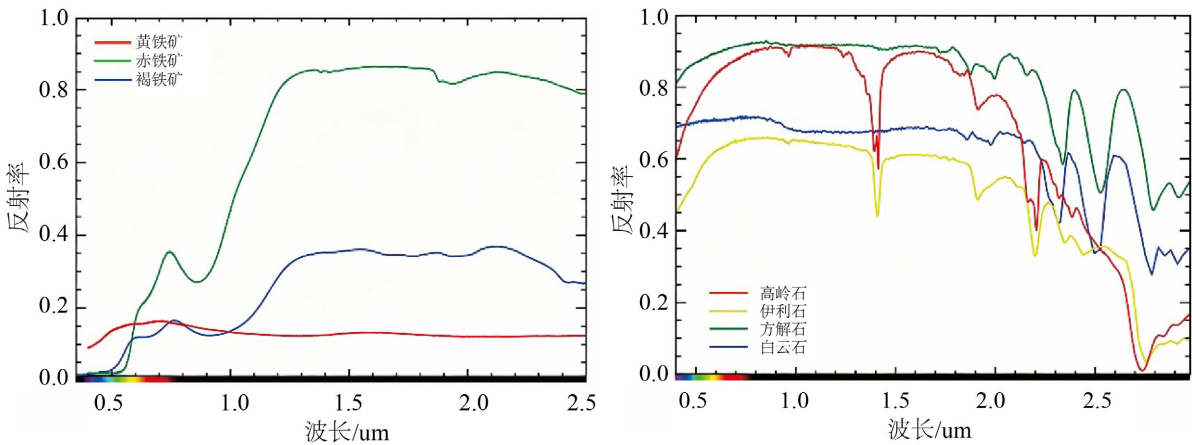


Figure 3. Spectral curves of partial iron-stained alteration minerals (left) and hydroxyl alteration minerals (right)
图 3. 铁染蚀变矿物波谱曲线(左)与羟基蚀变矿物波谱曲线(右)

4.2. Crosta 法蚀变信息提取

Crosta 法依托主成分分析筛选对蚀变矿物敏感波段组合，分离矿化蚀变光谱与地表干扰信息，是多光谱数据提取铁染、羟基蚀变的经典方法[14]。相较比值法、MNF，Crosta 蚀变分离度更高，对弱矿化蚀变识别更灵敏，能够有效适配研究区铅锌矿蚀变提取[15]。针对 Sentinel-2 数据，分别选取铁染敏感波段 B2、B5、B8A、B11 与羟基敏感波段 B5、B8、B11、B12 开展两组主成分变换，提取对应蚀变主成分分量。采用“ $X + N\sigma$ ”密度分割法划分蚀变异常等级， X 为分量均值， σ 为标准差，分别取 $N = 1.5$ 、 2.5 、 3.5 三个阈值： $N = 1.5$ 划定三级弱蚀变异常， $N = 2.5$ 划定二级中等蚀变异常， $N = 3.5$ 划定一级强蚀变异常。强蚀

变区域对应热液活动中心，与铅锌矿化耦合程度最高，为后续综合圈定找矿靶区提供定量蚀变依据。

4.2.1. 铁染蚀变信息提取

铁染蚀变矿物的光谱特征是在 0.70~0.75 μm 、1.52~1.70 μm 有明显的反射峰、在 0.85~0.95 μm 附近形成吸收谷，表现为在 Sentinel-2 卫星的 B5、B6 波段及 B11 波段形成反射峰，在 B8A 波段形成吸收谷，以此构建 B2、B5、B8A、B11 波段组合开展主成分分析得到铁染主成分分析特征向量表(表 3)。经协方差矩阵特征向量判读，第四主成分 PC4 对 Fe^{3+} 光谱响应特征贡献度最高，该分量中铁吸收波段权重为负、铁反射波段权重为正，能够突出铁染蚀变微弱异常，抑制植被、地层背景干扰，最终选取 PC4 作为铁染蚀变特征分量完成后续阈值分级(表 4)，并得到铁染蚀变等级分布图(图 4)。

Table 3. Eigenvectors of iron-stain alteration from Sentinel-2 PCA

表 3. Sentinel-2 铁染主成分分析特征向量表

特征分量	Band2	Band5	Band8A	Band11
PC1	0.274187	0.543328	0.567763	0.554312
PC2	0.123610	0.445532	0.320938	-0.826572
PC3	0.719672	0.283840	-0.633477	0.014652
PC4	-0.625791	0.652481	-0.416355	0.096450

Table 4. Density slicing classification of iron-stain alteration anomaly grades

表 4. 铁染蚀变异常等级密度分割划分表

蚀变异常等级	$N\sigma$	异常值范围	颜色
无异常	Min~1.5 σ	-1152.696533~107.533586	紫色
三级异常	1.5 σ ~2.5 σ	107.533586~179.222643	黄色
二级异常	2.5 σ ~3.5 σ	179.222643~250.911699	蓝色
一级异常	3.5 σ ~Max	250.911699~1882.378052	红色

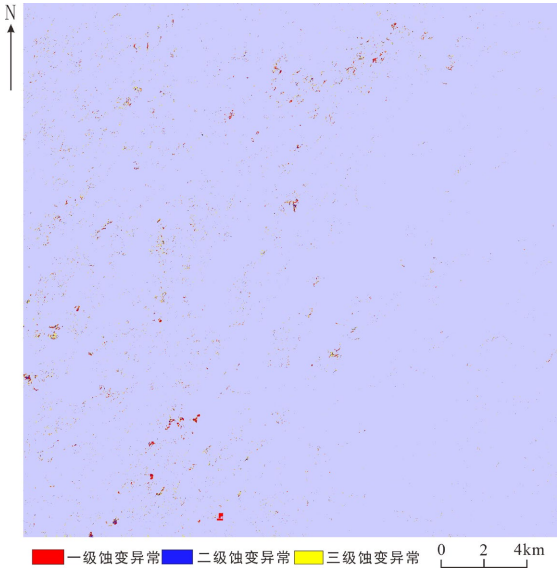


Figure 4. PCA result map of iron-stained alteration

图 4. 铁染蚀变 PCA 结果图

4.2.2. 羟基蚀变信息提取

羟基蚀变矿物晶格 OH^- 、 CO_3^{2-} 基团在 $2.1\sim 2.3\ \mu\text{m}$ 短波红外存在特征吸收谷，对应 Sentinel-2B11、B12 为吸收波段；红边 B2、近红外 B4 为高反射波段，选取 B2、B4、B11、B12 构建波段组合开展主成分变换得到羟基主成分分析特征向量表(表 5)。PC 主分量选取依据为 b2 与 b4、b12 贡献系数符号相反，b4 与 b12 贡献系数符号一致，且绝对数值尽可能大。最终选用 PC4 作为羟基蚀变特征分量，结合 $X+N\sigma$ 法完成三级蚀变异常分级提取(表 6)，并得到羟基蚀变等级分布图(图 5)。

Table 5. Eigenvectors of hydroxyl alteration from Sentinel-2 PCA

表 5. Sentinel-2 羟基主成分分析特征向量表

特征分量	Band2	Band4	Band11	Band12
PC1	-0.198032	-0.421284	-0.627518	-0.624119
PC2	-0.518976	-0.703194	0.447609	0.189283
PC3	0.075445	-0.241243	-0.609330	0.751550
PC4	-0.828103	0.519461	-0.185968	0.099098

Table 6. Density slicing classification of hydroxyl alteration anomaly grades

表 6. 羟基蚀变异常等级密度分割划分表

蚀变异常等级	$N\sigma$	异常值范围	颜色
无异常	$\text{Min}\sim 1.5\sigma$	$-1783.697754\sim 114.048843$	紫色
三级异常	$1.5\sigma\sim 2.5\sigma$	$114.048843\sim 190.081405$	黄色
二级异常	$2.5\sigma\sim 3.5\sigma$	$190.081405\sim 266.113967$	蓝色
一级异常	$3.5\sigma\sim \text{Max}$	$266.113967\sim 1132.184204$	红色

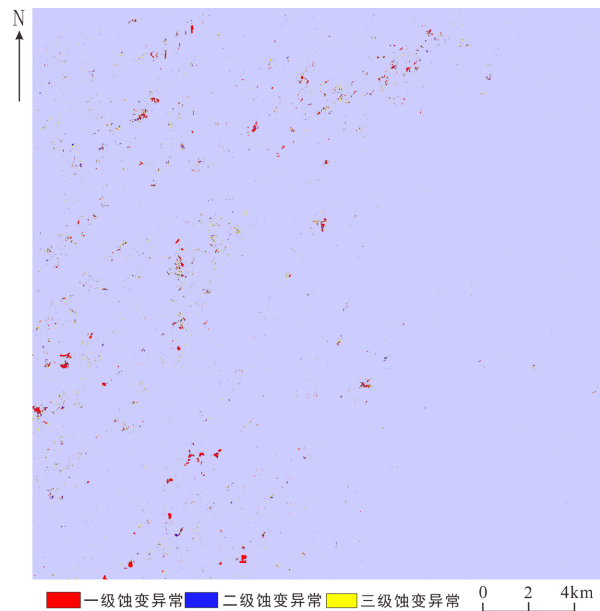


Figure 5. Distribution map of hydroxyl alteration derived from PCA

图 5. 羟基蚀变 PCA 结果分布图

4.3. 噪声去除与伪异常筛选

经 Crosta 法提取并完成 $X + N\sigma$ 阈值分割后得到的铁染、羟基蚀变分级栅格图存在大量零散孤立噪声斑点，多由地形阴影、残余植被混合像元、光谱随机误差形成，易干扰蚀变异常空间分布判读。通过 ENVI 中分类后处理 Clump-Sieve 组合算法能够实现噪声剔除。首先执行 Classification Clumping 连通域聚类，设置 3×3 膨胀、腐蚀窗口，依据 4 邻域连通规则对影像斑块统一编号，区分连续蚀变区域与孤立碎斑，再通过 Classification Sieving 斑块筛选，将最小保留斑块像素阈值设为 10，清除像素总量低于阈值的零散噪点，并填充为背景值。通过聚类标记和面积筛选双重约束，在完整保留连片中、强蚀变异常区边界形态的前提下，有效滤除单点细碎假异常(图 6(a)，图 6(b))。

同时研究区存在的红色彩钢铁皮、红砖、红陶瓦表面同样富含氧化铁颜料、铁质矿物，二者可见光-短波红外光谱曲线形态几乎一致，Crosta 铁染主成分提取时会同步识别为铁染异常信号，形成伪蚀变[16]。分析出 4 处伪异常区域，大都为红色铁皮屋顶与红砖瓦制屋顶(图 6(c)~(f))。

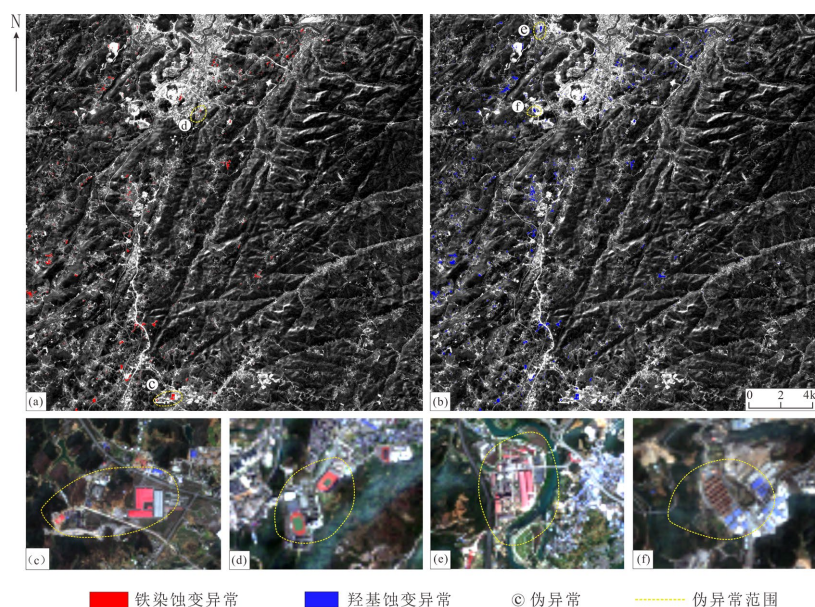


Figure 6. Screening map of false alteration anomalies in Tongren mining area
图 6. 铜仁矿区伪异常筛选图

5. 结果分析与找矿靶区圈定

本区 MVT 矿床成矿流体为中高盐度含铅锌热卤水，沿北东向断裂、层间裂隙运移至寒武系清虚洞藻灰岩容矿空间沉淀，流体与围岩发生水岩反应，生成方解石、白云石、高岭石等羟基类黏土矿物，形成羟基蚀变，直接记录流体运移通道与赋矿围岩反应痕迹，是热液活动的直接遥感标识。矿体埋藏浅处经长期风化氧化，闪锌矿、方铅矿、黄铁矿等硫化物分解析出褐铁矿、针铁矿，形成铁染蚀变，对应地表氧化铁帽，为矿体出露的表层标志。研究区内羟基蚀变较强，铁染蚀变较弱。以羟基蚀变、铁染蚀变、断裂构造、赋矿地层、已知铅锌矿点作为成矿证据层开展权重叠加分析，结合地质图约束剔除第四系、无出露区域，以蚀变叠加、构造发育、赋矿围岩出露为判定标准划分 I、II、III 级找矿靶区，同时对比已有矿点完成靶区可靠性验证，得到最终分级靶区成果(图 7)。将 6 处找矿预测靶区与 8 个矿点叠加，发现两处预测靶区与铅锌矿点吻合，其中有 3 个矿点分布在 I 级预测靶区内，1 个矿点分布在 II 级预测靶区内，蚀变捕捉率为 50%。预测靶区(图 7 中的①~⑥)均位于寒武系清虚洞组地层，其中预测靶区①所在的卜口

场地区内断裂构造发育，主构造线方向为 NE 和 NNE [17]。主要出露一套寒武系浅海台地相碳酸盐岩地层，主要岩石类型为粘土岩、泥岩、页岩、泥晶灰岩与白云岩，蚀变类型主要为重结晶作用、黄铁矿化，白云石化，方解石化、沥青化及褪色现象，其中以重结晶作用、方解石化、白云石化和黄铁矿化较为发育。研究区内植被覆盖严重，茂密的植被将其下的岩石土壤全部遮挡，致使遥感数据无法有效获得其岩性信息，这对于该地区的蚀变信息提取是不利的[18]。山羊洞、岩院子、黄家寨、黄茶矿点蚀变信息不明显可能是由于该区域植被覆盖率过高，露头面积过小导致。

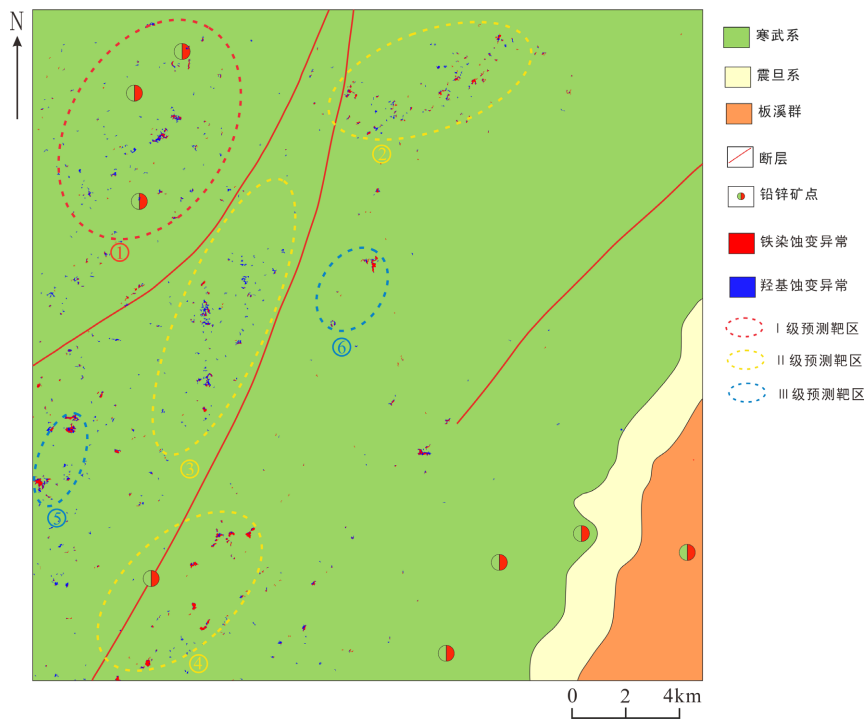


Figure 7. Distribution map of prospective target zones in Tongren mining are
图 7. 铜仁矿区预测靶区分布图

6. 结论

本文以铜仁地区寒武系层控型铅锌矿为研究对象，基于 Sentinel-2 多光谱遥感影像，结合区域地质资料完成蚀变信息提取与找矿靶区圈定。

(1) 首先通过建立掩膜来剥离植被、水体、建筑光谱干扰，再采用 Crosta 主成分分析法分别提取铁染、羟基两类矿化蚀变信息。针对未剔除干净的建筑与植被引发的伪异常和孤立噪声，在剔除明显伪异常斑块后运用 ENVI 的 Clump-Sieve 聚类筛选算法剔除细碎伪异常，得到纯净蚀变异常分布图。

(2) 结合研究区寒武系地层控矿规律，以铁染蚀变、羟基蚀变、断裂构造、赋矿寒武系白云岩、已知铅锌矿点为证据层，采用权重叠加分析划分一级重点找矿靶区与二、三级次要找矿靶区。

(3) 铜仁寒武系中上部岩层为铅锌矿主要赋矿围岩，北东向断裂与两类蚀变重叠区成矿潜力最优，圈定靶区与已有矿点空间匹配度较高，验证了遥感蚀变信息结合多源地质证据开展靶区预测的可行性。本次研究通过干扰信息掩膜、斑块筛选等流程有效削弱植被、建筑、水体及阴影带来的虚假蚀变，提升了弱蚀变异常识别精度。研究构建的遥感蚀变提取+多要素权重叠加预测流程，可为黔东南寒武系分布区铅锌矿快速勘查提供技术参考，圈定的重点靶区可作为后续野外地质查证的优先工作区域。

参考文献

- [1] 朱瑞丰. 云南省龙头山铅锌矿区遥感蚀变弱信息提取与找矿预测[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 云南大学, 2023.
- [2] 刘文周, 徐新煌. 论川滇黔铅锌成矿带矿床与构造的关系[J]. 成都理工学院学报, 1996(1): 71-77.
- [3] 兰天龙. 浅议黔东北地区铅锌矿地质特征与找矿方向[J]. 地质找矿论丛, 2013, 28(2): 216-223.
- [4] 谢小峰. 雪峰西缘铜仁地区铅锌矿成矿规律与成矿预测研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2022.
- [5] 周云. 湘西花垣 MVT 型铅锌矿集区成矿作用研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [6] 田颖, 陈卓奇, 惠凤鸣, 等. 欧空局哨兵卫星 Sentinel-2A/B 数据特征及应用前景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 57-65.
- [7] 吴志春, 叶发旺, 郭福生, 等. 主成分分析技术在遥感蚀变信息提取中的应用研究综述[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(11): 1644-1656.
- [8] 李胜明. 湘西北花垣铅锌矿田沉积-构造控矿机理及成矿远景预测[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [9] 赵爽, 潘文, 杨胜堂, 等. 湘西-黔东南地区下寒武统铅锌矿床地质特征及成因探讨[J]. 贵州地质, 2016, 33(4): 257-264.
- [10] 李堃, 吴昌雄, 汤朝阳, 等. 湘西黔东南地区铅锌矿床 C、O 同位素地球化学特征及其对成矿过程的指示[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1608-1619.
- [11] 刘丽萍, 李三忠, 戴黎明, 等. 雪峰山西侧贵州地区中生代构造特征及其演化[J]. 地质科学, 2010, 45(1): 228-242.
- [12] 李星哲. 基于 Sentinel-2A 卫星数据蚀变信息提取的研究——以北衙金矿为例[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2021.
- [13] 闫霏, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数(EWI)和 GIS 去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007(6): 62-67.
- [14] 荆凤, 陈建平. 矿化蚀变信息的遥感提取方法综述[J]. 遥感信息, 2005(2): 62-65+57.
- [15] Crósta, A.P. and Moore, J.M. (1989) Geological Mapping Using Landsat Thematic Mapper Imagery in Almeria Province, South-East Spain. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 505-514. <https://doi.org/10.1080/01431168908903888>
- [16] 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.
- [17] 吴自成, 田景江, 吴位远. 贵州铜仁卜口场铅锌矿地质特征及成因浅析[J]. 技术与市场, 2012, 19(5): 145+147.
- [18] 吴夏涛, 陈辉, 张晓飞, 等. 植被覆盖区多源遥感卫星数据成矿要素信息提取与靶区圈定——以云南易门地区为例[J]. 地质与勘探, 2025, 61(2): 268-278.