

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.016

# 基于 Sentinel-2 卫星数据的南陵—宣城 矿集区矿化蚀变信息提取

殷梦杰<sup>1</sup>, 赵萍<sup>1,2</sup>, 朱翠翠<sup>1</sup>, 申鹏举<sup>1</sup>, 赵月娇<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 空间信息智能分析与应用研究所, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 文章以长江中下游成矿带的南陵—宣城矿集区为研究区, 分析 Sentinel-2 卫星数据波段和研究区主要蚀变矿物光谱特征对应关系, 在对植被、水体、建筑物等干扰信息去除的基础上, 使用主成分分析(principal component analysis, PCA)法和波段比值法进行铁染异常、Al—OH 异常、Mg—OH 异常及碳酸盐异常信息提取, 并通过与研究区已知矿点的叠加分析, 与 Landsat 8 卫星遥感数据提取结果对比。结果表明: 在植被覆盖度较高区域, Sentinel-2 卫星数据具有更高的空间分辨率, 受混合像元影响更小, 对于高密度植被信息提取具有较大优势, 在干扰信息去除的过程中保留的有效信息更多; 从 Sentinel-2、Landsat 8 卫星数据提取的蚀变异常信息与已知矿点的相关比率分别为 69.14%、47.43%, Sentinel-2 卫星数据蚀变提取精度优于 Landsat 8 卫星数据。研究结果可为植被覆盖度较高区域矿产资源遥感调查提供参考, 为南陵—宣城矿集区找矿预测提供依据。

**关键词:** Sentinel-2 卫星数据; Landsat 8 卫星数据; 蚀变信息; 主成分分析(PCA)法; 长江中下游成矿带

中图分类号: P627

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2023)09-1254-09

## Extraction of mineralization alteration information in Nanling-Xuancheng ore district based on Sentinel-2 data

YIN Mengjie<sup>1</sup>, ZHAO Ping<sup>1,2</sup>, ZHU Cuicui<sup>1</sup>, SHEN Pengju<sup>1</sup>, ZHAO Yuejiao<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Institute of Spatial Information Intelligent Analysis and Application, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The Nanling-Xuancheng ore district in the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt (MLYB) was selected as the research object. Through the analysis of the corresponding relationship between the Sentinel-2 data bands and the spectral characteristics of the main alteration minerals in the study area, and on the basis of the removal of disturbance information such as vegetation, water and buildings, the information of iron, Al—OH, Mg—OH and carbonate anomalies was extracted using the principal component analysis (PCA) and band ratio method. The results of data extraction were compared with the results which were extracted from Landsat 8 remote sensing data extraction. The result shows that the Sentinel-2 data has higher spatial resolution and is less affected by mixed pixel, it is more advantageous for information extraction in areas with high vegetation coverage. Its data can retain information more effectively in the process of disturbance information removal. The correlation ratios of alteration anomaly information extracted from the Sentinel-2 data and Landsat 8 data to ore occurrence are 69.14% and 47.43%, respectively, which means that the accuracy of alteration information extraction from Sentinel-2 data is better than that from Landsat 8 data. This study

收稿日期: 2021-03-29; 修回日期: 2021-05-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600209); 安徽省大学生创新训练计划资助项目(S202010359211)

作者简介: 殷梦杰(1995—), 女, 安徽阜阳人, 合肥工业大学硕士生;

赵萍(1975—), 女, 安徽肥东人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: njuzhp@sina.com.

proves that the alteration information extraction based on the Sentinel-2 data can provide reference for the remote sensing survey of mineral resources in areas with high vegetation coverage, and provide basis for prospecting prediction in Nanling-Xuancheng ore district.

**Key words:** Sentinel-2 data; Landsat 8 data; alteration information; principal component analysis (PCA); the Middle-Lower Yangtze River Valley Metallogenic Belt (MLYB)

## 0 引 言

南陵—宣城矿集区是长江中下游成矿带的重要组成部分,热液型矿床发育广泛<sup>[1-3]</sup>,近年来在找矿方面取得重大突破,已发现 10 余处矽卡岩型矿床或矿化,展现出良好的成矿前景<sup>[4]</sup>,但受地质构造、植被覆盖及第四系覆盖等因素的影响,开展常规的地质勘探工作困难较大,成本较高。遥感影像具有宏观性、综合性、客观性,利用遥感影像进行辅助分析,可为地质勘探提供多时空、多光谱、多层次的地质信息。

围岩蚀变是热液矿床成矿作用发生的重要标志之一<sup>[5-8]</sup>。由于遥感影像在波谱差异分析上具有独特优势,应用遥感影像提取矿物蚀变信息是找矿的有效方法。成像光谱技术的发展与搭载平台的多样化,使得遥感影像在岩矿信息提取方面的应用越来越广泛。目前,遥感找矿主要运用国内的高分系列卫星以及国外的 Landsat 系列卫星、ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, 先进星载热发射和反射辐射仪)、HyMap、WorldView、Hyperion 等卫星或航空影像。国内外研究者利用不同的方法对不同区域的遥感矿化蚀变信息提取做了大量研究工作。在植被覆盖度较低区域或裸岩地区,蚀变岩石出露面积大,提取难度小,矿化蚀变信息较易被提取。文献[9]运用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 法、波段比值法和光谱角填图法,提取新疆若羌县罗布泊地区 Hyperion 数据上的铁染、羟基蚀变异常信息;文献[10]基于 Landsat 8 OLI (Operational Land Imager, 陆地成像仪) 数据,利用波段比值-PCA 法对美国亚利桑那州巴林格撞击坑 (Barringer Meteor Crater) 的铁陨石矿物进行有效提取;文献[11]利用 ASTER 数据,结合 PCA 和支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法对新疆东天山尾亚地区的铁染、Al—OH、碳酸根蚀变矿物进行提取;文献[12]利用 HyMap 航空高光谱遥感数据及全光谱便携式光谱分析仪 (FieldSpec Pro FR) 地面波谱数据对新疆东天山成矿带的蚀

变矿物异常特征进行圈定。然而,在植被覆盖度较高区域,受植被影响,蚀变信息在影像上表现不明显,提取难度较大。近年来,国内外研究者在深入研究蚀变信息提取技术的基础上,改进或创新抗植被干扰技术,并将其应用于植被覆盖度较高区域。文献[13]利用 Landsat 8 OLI 数据对内蒙古白云鄂博西南草原覆盖区的植被进行混合像元分解,并采用 PCA 法对该地区的羟基异常进行提取;文献[14]利用 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus, 增强型专题制图仪) 和 ASTER 影像数据,提出多元数据叠加分析法,在植被覆盖度较高的甘肃省西河县大桥—石峡地区进行铁染和羟基异常矿化蚀变信息提取。

Sentinel-2 卫星是由欧洲航天局和欧洲委员会共同实施的“哥白尼计划”下的多光谱成像卫星,于 2015 年 6 月发射,免费向用户开放。该卫星与 Landsat 系列卫星的波段设置相似,但在可见光、近红外和短波红外波段具有更高的空间、时间、光谱分辨率,并且拥有 3 个红外波段,近年来在农作物提取<sup>[15-16]</sup>、树种分类<sup>[17-18]</sup>、水体提取<sup>[19-20]</sup>、生态环境监测<sup>[21-22]</sup>、土地覆盖变化监测<sup>[23-25]</sup>等方面得到较广泛的应用,但在地质领域的相关应用报道较少。文献[26]采用 PCA 法,在四川康定雅拉地区的 Sentinel-2 卫星数据上提取羟基蚀变异常信息;文献[27]通过图像融合算法,对内蒙古石板井蛇绿岩套和美国 Cuprite 矿区的 Sentinel-2 卫星数据进行蛇纹石化蚀变信息提取;文献[28]基于 Sentinel-2 卫星数据,使用完全约束最小二乘混合像元分解技术及 PCA 法,对内蒙古黄岗梁地区的铁染蚀变矿物进行提取;文献[29]利用多光谱差分植被抑制法,在黑龙江呼玛地区进行 Sentinel-2 卫星数据的铁染和羟基蚀变信息提取。上述研究表明, Sentinel-2 卫星数据对矿化蚀变信息具有较好的识别能力,但研究区域主要集中在植被覆盖度较低区域或裸岩地区,如何充分发挥 Sentinel-2 卫星数据的优势,进行植被覆盖区矿化蚀变信息的提取亟待研究。

本文以 Sentinel-2 卫星多光谱数据为主要数据源,采用 PCA 法、波段比值法,结合掩膜技术,

提取南陵—宣城矿集区的铁染、Al—OH、Mg—OH、碳酸盐类矿化蚀变信息,结合已知的地质矿产资料,对提取的异常信息进行分析验证,并与 Landsat 8 卫星数据提取结果进行对比,旨在为植被覆盖区岩矿信息提取提供参考,拓展 Sentinel-2 卫星数据在地质领域上的相关研究,同时为南陵—宣城地区的矿产勘查提供依据。

## 1 研究区概况

南陵—宣城矿集区处于扬子板块北缘、长江中下游成矿带北东段,西以北东向三里河—河湾断裂与铜陵隆起、繁昌盆地相接;区域内发育北东向的三里镇断裂、江南深断裂、周王断裂和北北西向的庐江—铜陵断裂。区内北东向的九连山—狸桥推覆体将南陵—宣城盆地分隔为南陵盆地和宣

城盆地;区内中生代岩浆活动发育,以白垩世高钾钙碱性、中酸性侵入岩为主,地表大部分被第四系覆盖,第四系之下为白垩纪以来的陆相碎屑沉积岩<sup>[30]</sup>。本文选择南陵—宣城矿集区及其周边为研究区,在 118°03′~118°58′E, 30°50′~31°14′N 之间,面积约为 3 907.42 km<sup>2</sup>,其地质简图如图 1 所示。除近年来新发现规模已达特大型的茶亭铜金矿床外,在九连山—狸桥推覆体上有较多的金属矿床(点)分布,是安徽省矿产勘查较有潜力的地区之一<sup>[31]</sup>。

区内矿化蚀变类型包括黄铁矿化、硅化、矽卡岩化、绿泥石化、绿帘石化、高岭土化、蛇纹石化、钾长石化、碳酸盐化、绢云母化、叶腊石化等。研究区内植被发育,主要以常绿阔叶林为主,山坡多次生灌木和草本,植被覆盖度较高。

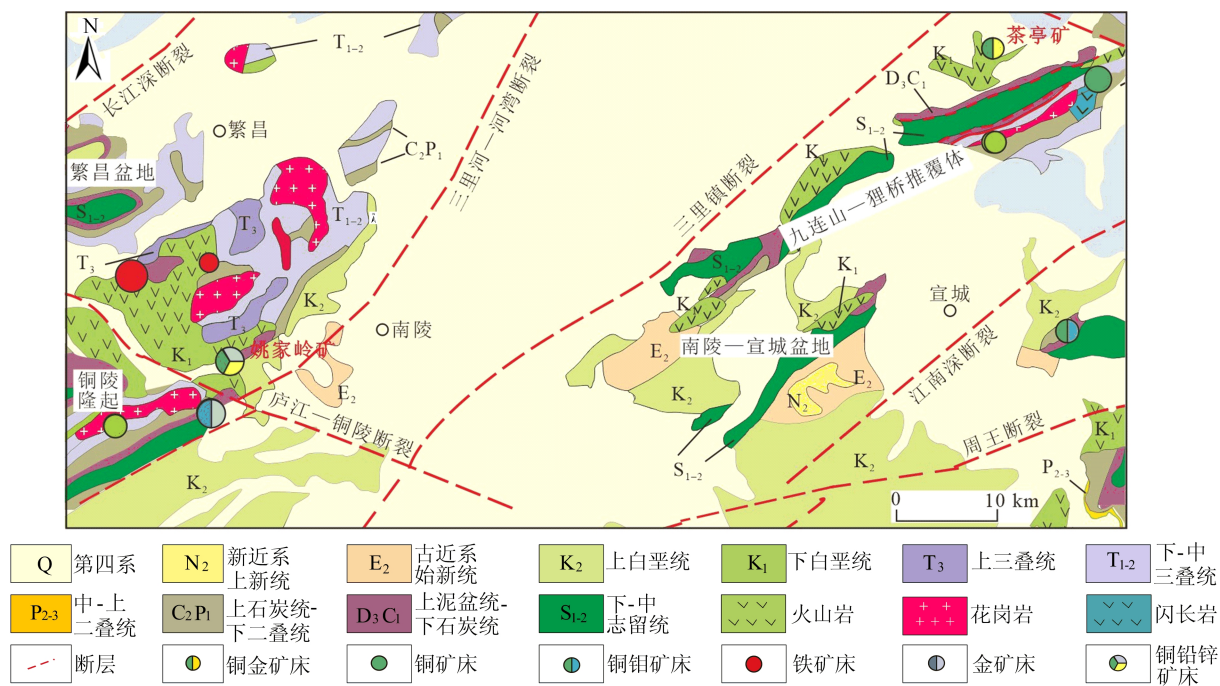


图 1 研究区地质简图

## 2 研究数据概况及预处理

### 2.1 研究数据概况

Sentinel-2 卫星是“哥白尼计划”中实现多光谱高分辨率观测的卫星,分为 2015 年 6 月 23 日发射的 2A 卫星和 2017 年 3 月 7 日发射的 2B 卫星,单星的重访周期为 10 d,双星重访周期为 5 d。本文使用的多光谱数据来自可见光短波红外多光谱相机(MultiSpectral Instrument, MSI)。MSI 数据有可见光、近红外和短波红外 13 个波段,其中有可见光波段 6 个、近红外波段 4 个、短波红外

波段 3 个,空间分辨率有 10、20、60 m 3 种,幅宽为 290 km;该数据具有分辨率高、波段多、幅宽大、重访周期短、免费等优点。本研究使用的数据包括 Sentinel-2A 卫星数据和 Landsat 8 OLI 数据。为减小植被干扰,影像数据采集时间均为冬季。Sentinel-2 卫星数据的成像时间为 2019 年 12 月 8 日,数据质量较好,基本无云覆盖。Landsat 8 卫星数据行列号为 120/38、120/39,成像时间为 2014 年 1 月 2 日。

Sentinel-2A、Landsat 8 卫星波段特征对比见表 1 所列。

表 1 Sentinel-2A、Landsat 8 卫星波段特征对比

波段分布	Sentinel-2A			Landsat 8 OLI		
	波段号	中心波长/ $\mu\text{m}$	分辨率/m	波段号	中心波长/ $\mu\text{m}$	分辨率/m
可见光	1	0.443	60	1	0.443	30
	2	0.490	10	2	0.483	30
	3	0.560	10	3	0.561	30
	4	0.665	10	4	0.655	30
	5	0.705	20	8	0.592	15
	6	0.740	20			
近红外	7	0.783	20	5	0.865	30
	8	0.842	10			
	8a	0.865	20			
短波红外	9	0.945	60			
	10	1.375	60	9	1.373	30
	11	1.610	20	6	1.609	30
中远红外	12	2.190	20	7	2.201	30
				10	10.900	100
				11	12.000	100

## 2.2 数据预处理

本次使用的 Sentinel-2A 卫星的 Level-2A 数据已经过正射校正和大气校正,无云和积雪覆盖,影像清晰,色调对比度好。由于影像具有不同的空间分辨率,在处理系统 SNAP(Sentinel Application Platform,哨兵数据应用平台)环境下使用超分辨率(Super Resolution)扩展模块,将 Sentinel-2 卫星数据的 60、20 m 波段超分辨率合成为 10 m 波段,输出后的波段分别为 B1~B12(除 B10 外)。在 ENVI 软件中对选用的 Landsat 8 卫星数据进行辐射定标和大气校正等预处理。为检验 2 种数据的预处理效果,选取研究区典型地物进行光谱对比,在影像上选择同一点的植被进行光谱对比, Landsat 8、Sentinel-2 卫星影像同名点植被反射率曲线对比如图 2 所示。

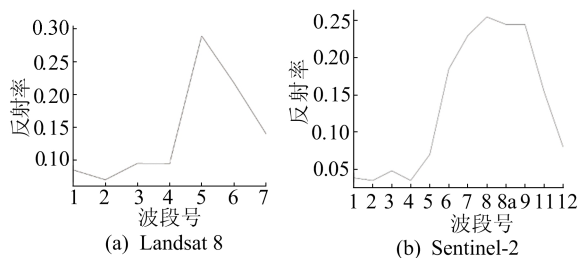


图 2 Landsat 8、Sentinel-2 卫星影像同名点植被反射率曲线对比

从图 2 可以看出, Sentinel-2、Landsat 8 卫星数据谱形特征基本一致,在植被特征谱带范围内谱形吻合度高,且特征吸收位置一致。因此,可以认为 Sentinel-2 卫星超分辨率处理后数据可用于下一步的矿物识别工作。

## 2.3 研究区干扰物剔除

遥感影像中存在的植被、水体、建筑物等会对遥感矿化蚀变信息提取产生干扰。研究区位于丘陵地区,植被资源丰富,植被覆盖度较高,为了提高矿化蚀变信息提取的准确性,利用掩膜技术去除这些干扰因素,具体步骤如下:

1) 通过归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)<sup>[32]</sup>提取植被信息,采用优化阈值分割的方法生成植被掩膜二值图像,被掩膜区域的值为 0,其余值为 1; Landsat 8、Sentinel-2 卫星数据提取的植被掩膜结果分别如图 3a、图 3b 所示。

2) 利用归一化建筑指数(normalized difference building index, NDBI)<sup>[33]</sup>及改进的归一化水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI)<sup>[34]</sup>对研究区的建筑及水体进行提取并生成相应的掩膜。

3) 最后将三者的掩膜图像相乘,得到研究区干扰物的掩膜。参与矿化蚀变信息提取的各波段与这个掩膜相乘可以得到去除 3 种干扰因素后的剩余图像。Landsat 8、Sentinel-2 卫星数据去除干扰后的剩余图像信息分别如图 3c、图 3d 所示。

从图 3a、图 3b 可以看出,基于 Sentinel-2 卫星数据提取的植被信息面积相对较小,且较为分散,表明在植被覆盖度较高区域, Sentinel-2 卫星数据对高密度植被的提取更加精细。

比较图 3c、图 3d 可知, Sentinel-2 卫星数据受混合像元影响更小,在剔除干扰信息后,留下的有用信息更多。

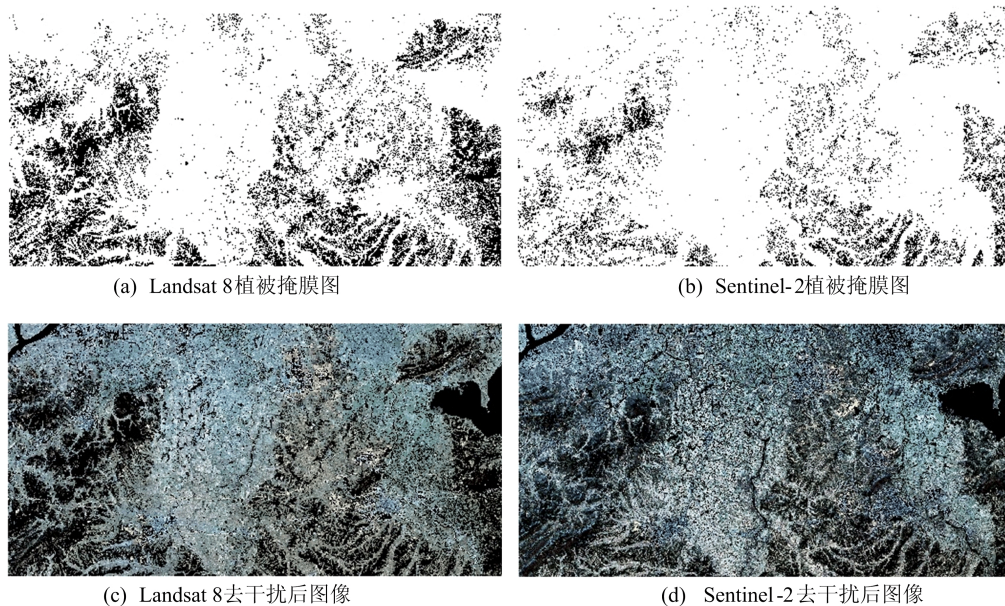


图 3 研究区 Landsat 8、Sentinel-2 卫星影像干扰物提取结果

### 3 矿化蚀变信息提取机理

南陵—宣城矿集区具有黄铁矿化、硅化、矽卡岩化、高岭土化、绿泥石化等围岩蚀变。黄铁矿( $\text{FeS}_2$ )氧化性较强,自然状态下易被风化形成氢氧化铁,如纤铁矿、针铁矿等,脱水后形成稳定的褐铁矿。金属矿床氧化带的地表露头部分常形成针铁矿、纤铁矿及褐铁矿等,覆盖于矿体之上,是重要的找矿标志。

遥感光谱学证明,不同的蚀变矿物在可见光、近红外、短波红外及热红外区域产生不同的吸收光谱带,这些特征光谱与周围的岩石存在明显差异,从而形成具有诊断性的光谱异常<sup>[35]</sup>。遥感影

像上只要有足够面积的蚀变岩石或者矿物出露,就可能被提取<sup>[36]</sup>。

本研究从美国地质勘探局(United States Geological Survey, USGS)波谱库中选择黄钾铁矾、赤铁矿、针铁矿、方解石、白云石、绿泥石、绿帘石、白云母、明矾石等典型矿物的波谱曲线,以分析其诊断性波谱特征位置,各典型矿物的波谱曲线特征如图 4 所示。

铁化蚀变矿物的光谱特征是在  $0.70\sim 0.75\ \mu\text{m}$ 、 $1.52\sim 1.70\ \mu\text{m}$  有明显的反射峰、在  $0.85\sim 0.95\ \mu\text{m}$  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。

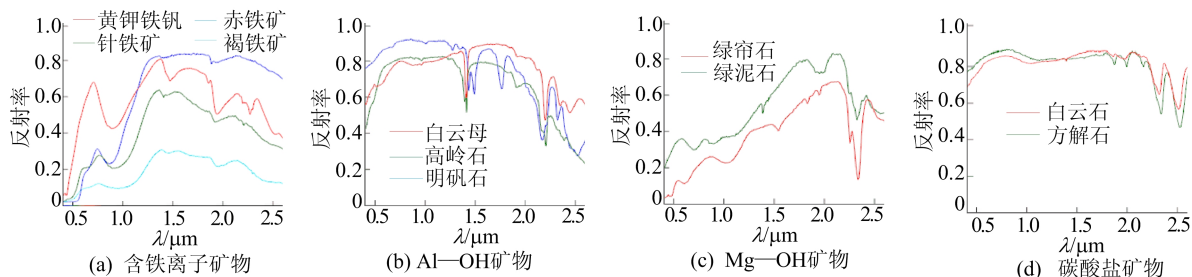


图 4 典型矿物波谱特征

Al—OH 基团矿物在  $1.60\sim 1.70\ \mu\text{m}$  有明显的反射特征,在  $2.20\ \mu\text{m}$  附近有吸收波谱特征,对应 Sentinel-2 卫星的 B11 波段上形成反射峰,在 B12 波段形成吸收谷。

含 Mg—OH 矿物在  $2.32\ \mu\text{m}$  附近有 1 个明显的吸收谷,波段特征表现为在 Sentinel-2 卫星

的 B5~B11 波段反射率大体呈增长趋势,在 B12 波段具有吸收谷。

碳酸盐类矿物白云石和方解石在  $0.78\ \mu\text{m}$  附近及  $2.00\sim 2.25\ \mu\text{m}$  具有高反射峰,在  $2.33\ \mu\text{m}$  附近有吸收波谱特征,对应 Sentinel-2 卫星的 B7 和 B12 波段均出现高反射峰。

#### 4 蚀变信息提取

在掩膜的基础上,运用 PCA 法和波段比值法对 Sentinel-2 卫星数据提取铁染异常、Al—OH 异常、Mg—OH 异常及碳酸盐异常信息。Sentinel-2 卫星影像 4 种异常提取结果如图 5a~图 5d

所示。

为了与 Sentinel-2 卫星数据提取的蚀变信息作对比,分别运用 Landsat 8 OLI 数据的 B2、B4、B5、B6 和 B2、B5、B6、B7 波段对研究区的铁染、羟基异常信息进行提取,提取结果如图 5e、图 5f 所示。

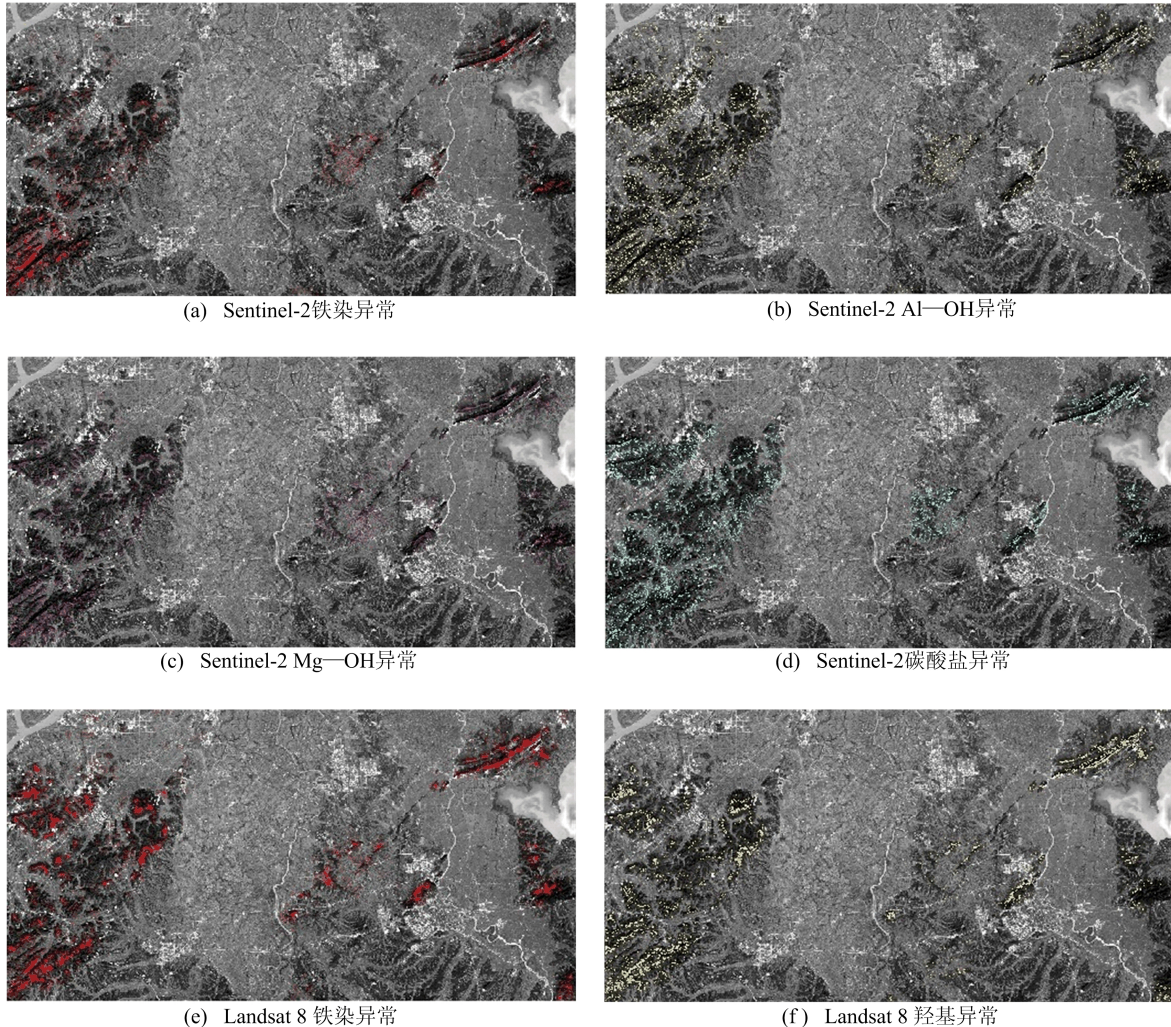


图5 Sentinel-2、Landsat 8 卫星影像蚀变信息提取结果

波段比值法可通过对同一影像上不同波段像元的比值运算增大光谱差异,达到图像增强的目的<sup>[37]</sup>;PCA 法则是通过正交变换实现对数据的降维,获得一组互不相关的分量,可根据各个分量的符号和贡献系数对所需主成分进行筛选<sup>[38]</sup>。PCA 法与波段比值法近年来已被广泛应用到遥感矿化蚀变信息提取中,取得了较好的应用效果。在上述典型蚀变矿物波谱特征分析基础上,利用 PCA 法对 Sentinel-2 卫星数据的铁染蚀变、Al—OH 蚀变、Mg—OH 蚀变进行提取,3 种异常 PCA 特征向量矩阵见表 2 所列。

选取 B2、B5、B8a、B11 波段进行分析,提取铁

染异常信息,异常主成分特点是 B2、B8a 波段的贡献系数与 B5 波段的贡献系数符号相反,从表 2 可以看出,第 3 主成分(PC3)可以作为提取铁染蚀变的指示分量。

对于 Al—OH 蚀变信息提取,选取波段 B6、B8a、B11、B12,异常主成分的特点是 B8a、B11 的贡献系数符号相同且为正,B11、B12 波段的贡献系数符号相反,取反后的 PC3 符合提取要求。

对于 Mg—OH 蚀变信息提取,选用波段 B2、B8a、B11、B12,异常主成分的特点是 B12、B11 波段的贡献系数符号相反,B2、B8a 波段的贡献系数与 B11 波段的贡献系数符号相同,根据此标准,

PC3 为反映 Mg—OH 异常的主分量。

碳酸盐异常信息在 B7 和 B12 波段均具有较高的反射率,经过多次实验,采用 B7/B4 对碳酸盐异常进行提取。

表 2 Sentinel-2 卫星数据 3 种异常 PCA 特征向量矩阵

蚀变异常	波段	特征向量			
		PC1	PC2	PC3	PC4
铁染异常	B2	-0.128 4	-0.375 6	-0.527 9	-0.750 9
	B5	-0.251 5	-0.257 7	0.835 4	-0.415 4
	B8a	-0.544 5	-0.659 6	-0.116 4	0.504 5
	B11	-0.789 8	0.597 9	-0.099 9	-0.093 7
Al—OH 异常	B6	0.362 9	0.454 4	0.649 1	0.490 3
	B8a	0.501 1	0.628 6	-0.366 3	-0.468 5
	B11	0.567 2	-0.331 4	-0.506 8	0.558 2
Mg—OH 异常	B12	0.543 6	-0.537 1	0.433 1	-0.477 9
	B2	0.116 6	0.446 1	0.703 7	0.540 6
	B8a	0.156 6	-0.869 6	0.200 1	0.423 4
	B11	-0.878 7	-0.162 8	0.401 9	-0.199 3
	B12	-0.435 5	0.135 3	-0.550 7	0.699 1

对提取的蚀变异常信息进行  $3 \times 3$  中值滤波,

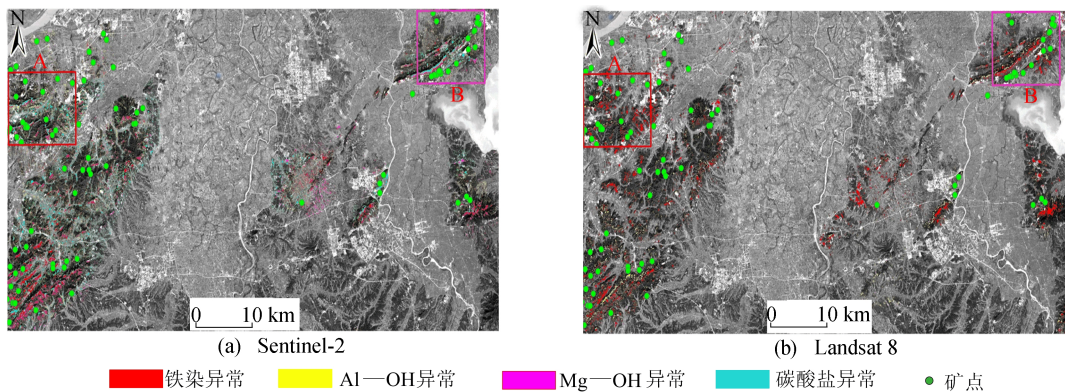


图 6 Sentinel-2、Landsat 8 卫星影像蚀变信息与矿点叠加图

对 2 种数据提取的蚀变异常信息与已知矿点的相关比率进行统计,结果见表 3 所列。

表 3 蚀变信息提取结果与已知矿点的相关比率

数据源	落入蚀变区矿点数	已知矿点数	相关比率/%
Sentinel-2	121	175	69.14
Landsat 8	83	175	47.43

由表 3 可知,Sentinel-2、Landsat 8 卫星数据信息提取结果与 175 个矿点的相关比率分别为 69.14%、47.43%,从 Sentinel-2 卫星数据提取的蚀变异常信息与已知矿点的对应程度更好,验证了利用 Sentinel-2 卫星数据在植被覆盖区进行遥

通过最优密度分割法<sup>[39]</sup>得到蚀变异常提取结果。经计算,从 Sentinel-2 卫星影像提取的铁染蚀变信息面积为 29.94 km<sup>2</sup>,主要分布在研究区西部及东北部,占研究区总面积的 0.77%;Al—OH 异常、Mg—OH 异常面积分别为 22.24、17.97 km<sup>2</sup>,各占研究区总面积的 0.57%、0.46%;碳酸盐异常面积为 53.92 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 1.38%。经计算,从 Landsat 8 卫星数据提取的铁染异常面积为 67.46 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 1.73%,羟基异常分布在铁染异常附近,面积为 45.20 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 1.57%。

## 5 结果分析

将 Sentinel-2、Landsat 8 卫星数据提取的矿化蚀变信息结果与已知的 175 个矿点进行叠加,叠加结果如图 6 所示。结合矿化蚀变信息提取结果的空间分布可以发现,2 种数据提取的蚀变信息在空间展布上基本保持一致,都是集中分布于研究区西部和东北部地区。

感找矿的可行性和有效性。

从 Sentinel-2、Landsat 8 卫星数据提取的铁染异常面积分别为 29.94、67.46 km<sup>2</sup>;从 Sentinel-2 卫星数据提取的 Al—OH 异常、Mg—OH 异常面积分别为 22.24、17.97 km<sup>2</sup>,从 Landsat 8 卫星数据提取的羟基异常面积为 45.20 km<sup>2</sup>,从 Sentinel-2 卫星数据提取的铁染异常信息和羟基异常面积明显小于 Landsat 8 卫星数据,Sentinel-2 卫星数据在矿化蚀变信息提取中更具有针对性。

此外,在蚀变信息提取中,利用 Sentinel-2 卫星数据可以对 Mg—OH 异常、Al—OH 异常、碳酸盐异常进行更精细的提取。

为探究蚀变信息提取结果与矿点的相关关

系,选择图6中矿点分布较为密集的A、B2个区域进行进一步分析,结果如图7所示。A处位于繁昌盆地,B处位于九连山—狸桥推覆体北东段。A、B2处中生代以来地壳活动频繁,印支期、燕山期构造复杂叠加,岩浆活动强烈,伴随广泛的热液

作用,是引起蚀变异常的原因,提取结果能较好地反映该区域的成矿状况;在远离矿点的区域,A、B2处均有伪蚀变信息出现,与Landsat 8卫星数据相比,Sentinel-2卫星数据提取的伪蚀变信息更少。

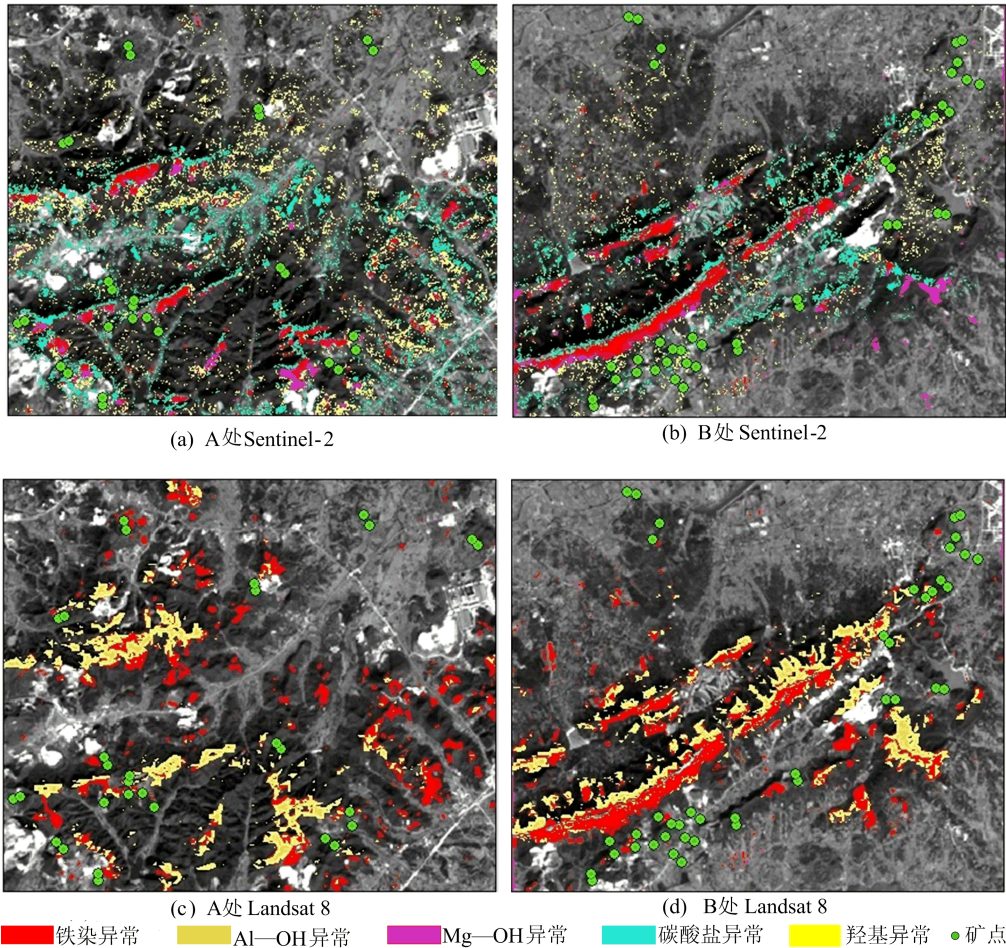


图7 Landsat 8、Sentinel-2 卫星影像中A、B处蚀变信息提取结果放大情形

## 6 结 论

1) 利用 Sentinel-2 卫星数据提取矿化蚀变信息,不仅能对蚀变矿物的大类进行提取,更能进一步提取不同类型的含羟基矿物蚀变异常信息与碳酸盐蚀变异常信息。

2) 通过与已知地质矿产资料对比验证发现,实验提取的蚀变异常信息与研究区矿点信息相关比率较高,Sentinel-2 卫星影像蚀变异常信息的准确性与可靠性较好。

3) 在植被覆盖度较高区域,Sentinel-2 卫星数据对高密度植被的提取有较大优势,在干扰信息去除过程中保留的有效信息更多。由于 Sentinel-2 卫星数据具有更高的空间分辨率,受混合像

元影响更小,蚀变信息提取精度明显优于 Landsat 8 卫星数据,表明其在植被覆盖度较高区域矿产资源勘查中具有重要潜力。

由于“异物同谱”与“同谱异物”现象的存在,提取的蚀变信息中会存在伪异常,此外,Sentinel-2 卫星数据在短波红外波段较少,后续的研究中还需进一步结合 Sentinel-2 卫星数据光谱特征,融合其他多波段的数据,在蚀变信息提取时加入地形、岩性、时序等多特征因素,提高 Sentinel-2 卫星数据蚀变信息识别能力。

## [参 考 文 献]

- [1] 常印佛,周涛发,范裕.长江中下游成矿带矿产勘查-科研工作回顾和展望[J].岩石学报,2017,33(11):3333-3352.
- [2] 常印佛,刘湘培,吴言昌.长江中下游铜铁成矿带[M].

- 北京:地质出版社,1991:270-273.
- [3] 周涛发,范裕,陈静. 长江中下游成矿带关键金属矿产研究现状与进展[J]. 科学通报,2020,65(33):3665-3677.
- [4] 胡训宇. 南陵—宣城矿集区成矿过程数值模拟与三维成矿预测[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [5] ZHOU T F, FAN Y, YUAN F, et al. Geochronology and significance of volcanic rocks in the Ning-Wu Basin of China [J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(2): 185-196.
- [6] 唐超,周可法,张楠楠,等. 基于 Landsat-8 OLI 和 ASTER 数据集成和融合的矿化蚀变信息提取:以包古图斑岩型铜矿为例[J]. 地质科技情报,2018,37(6):211-217.
- [7] 唐超,陈建平,张瑞丝,等. 基于 Aster 遥感数据的班怒成矿带矿化蚀变信息提取[J]. 遥感技术与应用,2013,28(1):122-128.
- [8] 吕凤君,郝跃生,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.
- [9] 饶俊. 基于 Hyperion 的新疆罗布泊地区蚀变提取与应用[D]. 南昌:东华理工大学,2017.
- [10] 崔静月,董玉森,岳文丽,等. 基于遥感蚀变信息提取巴林格撞击坑周边铁陨石[J]. 地质科技通报,2021,40(1):209-216.
- [11] 唐淑兰,曹建农,王凯. 结合 PCA、多尺度分割及 SVM 的 ASTER 遥感蚀变信息提取[J]. 遥感学报,2021,25(2):653-664.
- [12] 王永军,王瑞军,孙永彬,等. 新疆东戈壁地区高光谱遥感蚀变特征及找矿分析[J]. 矿床地质,2019,38(2):439-448.
- [13] 程思思,汪冰,范芳,等. 基于混合像元分解的 OLI 影像草原植被覆盖区遥感岩矿信息提取研究[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(4):575-581.
- [14] 宿虎,陈美媛,张丹青,等. 高植被覆盖区遥感矿化蚀变信息提取方法研究:以甘肃省西河县大桥—石峡地区为例[J]. 西北地质,2020,53(1):146-161.
- [15] 刘昊. 基于 Sentinel-2 影像的河套灌区作物种植结构提取[J]. 干旱区资源与环境,2021,35(2):88-95.
- [16] 蔡文婷,赵书河,王亚梅,等. 结合 Sentinel-2 光谱与纹理信息的冬小麦作物茬覆盖度估算[J]. 遥感学报,2020,24(9):1108-1119.
- [17] 郭云开,刘雨玲,许敏,等. 植被叶面积指数估算的红边指数建模分析[J]. 测绘科学,2021,46(1):93-98.
- [18] 蒙良莉,凌子燕,蒋卫国,等. 基于 Sentinel 遥感数据的红树林信息提取研究:以广西茅尾海为例[J]. 地理与地理信息科学,2020,36(4):41-47.
- [19] 赵金龙,韩颖娟,李阳,等. Sentinel-2 MSI 卫星数据在水体信息提取中的应用[J]. 测绘与空间地理信息,2021,44(1):43-46.
- [20] 张戈,夏建新,杜蕾,等. Landsat 8 和 Sentinel-2A 的水体指数比较与协同应用:以黑河流域典型区为例[J]. 应用基础与工程科学学报,2020,28(6):1361-1368.
- [21] 刘海秋,任恒奎,牛鑫鑫,等. 基于 Sentinel-2 遥感影像的巢湖蓝藻水华提取方法研究[J]. 生态环境学报,2021,30(1):146-155.
- [22] 蔡江涛,付波霖,陈铁喜,等. 基于 Sentinel-2 卫星多光谱数据的会仙喀斯特湿地植物理化参数反演研究[J]. 湿地科学,2020,18(6):693-705.
- [23] 邵安冉,李新举,周晶晶. 基于 Sentinel-2A 影像的矿区土地利用信息提取方法[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2020,51(3):441-446.
- [24] 赵亚杰,王立辉,孔祥兵,等. 基于 Sentinel-2 和 Landsat 8 OLI 数据融合的土地利用分类研究[J]. 福建农林大学学报(自然科学版),2020,49(2):248-255.
- [25] 张卫春,刘洪斌,王伟. 基于随机森林和 Sentinel-2 影像数据的低山丘陵区土地利用分类:以重庆市江津区李市镇为例[J]. 长江流域资源与环境,2019,28(6):1334-1343.
- [26] 王磊,杨斌,李丹,等. 基于 Sentinel-2A 的矿化蚀变异常信息提取应用[J]. 西南科技大学学报,2018,33(1):55-61,74.
- [27] 戈文艳. 面向岩性信息增强的多源遥感数据融合研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2018.
- [28] 陈东磊. 基于 Sentinel-2 数据的植被覆盖区蚀变信息提取方法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [29] 赵恒谦,高尉,杨天艺,等. 基于多光谱差分植被抑制法的蚀变信息提取[J]. 矿业科学学报,2020,5(4):364-373.
- [30] 徐晓春,安显华,许心悦,等. 安徽南陵—宣城地区岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及元素地球化学特征[J]. 地球科学与环境学报,2020,42(1):15-35.
- [31] 叶睿. 南陵—宣城矿集区麻姑山矿田三维地质建模及成矿预测[D]. 合肥:合肥工业大学,2020.
- [32] 贾坤,姚云军,魏香琴,等. 植被覆盖度遥感估算研究进展[J]. 地球科学进展,2013,28(7):774-782.
- [33] 熊鹰,章芳. 基于多源数据的长沙市人居环境效应及其影响因素分析[J]. 地理学报,2020,75(11):2443-2458.
- [34] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报,2005,9(5):589-595.
- [35] 李娜,董新丰,甘甫平,等. 高光谱遥感技术在基岩区区域地质调查填图中的应用[J]. 地质通报,2021,40(1):13-21.
- [36] GUO N, CUDAHY T, TANG J X, et al. Mapping white mica alteration associated with the Jiama porphyry-skarn Cu deposit, central Tibet using field SWIR spectrometry [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019, 108: 147-157.
- [37] 邓佳音,陈建平. 多光谱影像波段比值法消除地形阴影的定量分析[J]. 地质学刊,2018,42(3):501-506.
- [38] SHIRMARD H, FARAHBAKHS E, BEIRANVAND A P, et al. Integration of selective dimensionality reduction techniques for mineral exploration using ASTER satellite data[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1261-1267.
- [39] 张远飞,吴德文,袁继明,等. 遥感蚀变信息多层次分离技术模型与应用研究[J]. 国土资源遥感,2011(4):6-13.

(责任编辑 张淑艳)