

# 基于遥感融合数据的风化壳型铝土矿矿化异常提取研究—以柬埔寨森莫诺隆地区为例

沈杜衡<sup>1</sup>, 刘严松<sup>1,2</sup>, 刘琦<sup>1</sup>, 赖思翰<sup>1,2</sup>, 何星慧<sup>1,2</sup>, Mayada Jamal<sup>1</sup>, 何博宇<sup>2</sup>, 沈茜<sup>3</sup>

(1. 成都理工大学 自然资源部构造矿成藏重点实验室, 成都 610059;

2. 成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059;

3. 四川三合空间科技有限公司, 成都 610094)

**摘要:** 铝的工业用途广泛, 铝土矿是全球化背景下的重要战略资源, 对于我国国民经济的发展起着关键性的作用。风化壳型铝土矿的分布由于与地形地貌、岩性、地质构造关系密切, 遥感技术在其勘探中的应用越来越广。如何综合各类遥感数据的优势进行控矿因素及蚀变信息提取也成为风化壳型铝土矿找矿勘探工作中探讨的重点。笔者在风化壳型铝土矿地质特征及控矿因素分析的基础上, 以柬埔寨蒙多基里省森莫诺隆地区为研究区, 选择“珠海一号”OHS 高光谱数据与 Landsat-8 多光谱数据进行预处理和数据融合, 采用主成分分析(Principal Component Analysis)方法进行研究区铝土矿矿化异常信息提取, 分析铝土矿异常信息的波谱特征及其找矿指示意义, 筛选铝土矿矿化异常信息, 并进行分级显示。研究结果显示: ①采用高光谱与多光谱遥感数据融合能够依据控矿要素特征进行与成矿物质类型及空间形态特征相关异常信息的提取, 融合数据不仅弥补了所选高光谱数据波段范围有限的缺点, 而且还保留了较高空间分辨率和光谱分辨率的优势; ②基于融合高光谱与多光谱数据所提取的遥感异常信息与区内玄武岩及其风化物、地形地貌的空间展布特征高度相关, 筛选的铝土矿矿化异常分布范围主要集中在区内铝土矿的露天开采区及邻近区域; ③综合异常与已知矿(床)点重合度较高, 并与风化壳型铝土矿的岩性、地形地貌等主要控矿因素的空间相关性较强。研究成果有利于找矿靶区圈定和综合异常潜力区的筛选, 对境外同类型铝土矿的早期勘探和靶区快速优选具有技术支撑作用。

**关键词:** 主成分分析; 铝土矿; 蚀变异常; 数据融合; 高光谱数据

**中图分类号:** P627 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.04.13

## 0 引言

遥感技术在高寒高海拔等地形通达条件较差区域的找矿勘探工作中具有快速、高效、经济的面状信息筛查优势, 已被广泛应用到区域性找矿勘探工作

中<sup>[1-2]</sup>。传统遥感数据由于受空间分辨率、光谱分辨率等因素的影响, 在地物识别、背景干扰信息去除、异常筛选等方面仍面临多解性和精度有限等问题, 异常信息的地质意义往往不明确<sup>[3]</sup>。

因此, 国内外学者一直探讨综合利用各类异常信息提取方法的优势进行遥感与矿化蚀变相关信息

收稿日期: 2023-03-27

基金项目: 四川省自然资源厅基金(KJ2016-16); 中国石油碳酸盐岩储层重点实验室开放基金(2022JS2383); 四川省教育厅基金(18ZB0065); 国家自然科学基金(41402159); 中国地质调查局地调项目(DD20221697)

第一作者: 沈杜衡(1997—), 男, 硕士, 主要从事资源与环境的高光谱遥感应用研究工作, E-mail: shenduheng2022@163.com。

通信作者: 刘严松(1982—), 男, 博士, 副教授, 主要从事资源与环境遥感、地表过程及成灾机理、构造地貌研究, E-mail: liuyansong2012@cdu.edu.cn。

的提取工作,并取得了一定的进展。如代晶晶<sup>[4]</sup>提出面向对象分类的稀土遥感异常信息提取的方法,在一定程度上提高了分类精度。而针对离子吸附型稀土的地质特征,赵汀等<sup>[5]</sup>采用光谱角填图与波段深度分析等方法获得了较高精度的遥感蚀变信息。王宏<sup>[6]</sup>应用波段比值法在一定程度上增强了矿体与富矿围岩的波谱差异。吴一全<sup>[7]</sup>在波段比值法和主成分分析法基础上,进一步运用布谷鸟算法优化下的支持向量机模型对金、铜、铅锌等矿点的蚀变信息进行提取,并取得了更高精度的成果。Suman 等<sup>[8]</sup>利用像元混解与雷达数据融合技术有效圈定了矿化区,且提出了有效区分红土壤和红土型铝土矿的新方法。

铝土矿是全球化背景下的重要战略资源,对于我国国民经济的发展起着关键性的作用。近年来,境外的铝土矿勘查工作不断加强,对快速进行异常提取和靶区筛查提出了需求。由于风化壳型铝土矿的分布与地形地貌、岩性、地质构造关系密切,遥感

技术在其勘探中具有突出的优势。因此,笔者在总结风化型铝土矿床成矿地质特征基础上,分析了风化型铝土矿的找矿标志及其特征光谱,选取多光谱与高光谱数据进行融合和综合蚀变信息提取,分析综合异常特征及找矿指示意义,总结基于融合数据的风化型铝土矿矿化蚀变信息提取方法及流程,为境外该类型矿床的勘探提供技术支持。

## 1 研究区概况

柬埔寨位于世界铝土矿主要分布带之一的东南亚地区,处低纬度范围,属热带季风区,具备铝土矿形成风化的气候条件,研究区位于中南半岛柬埔寨境内南东部蒙多基里省森莫诺隆地区(图 1),区内地层岩性相对简单,主要分布玄武岩、碎屑岩和第四系松散堆积物,区内目前已发现布热曼等铝土矿床(点)多处,是风化型铝土矿床的重要找矿潜力区<sup>[9-11]</sup>。

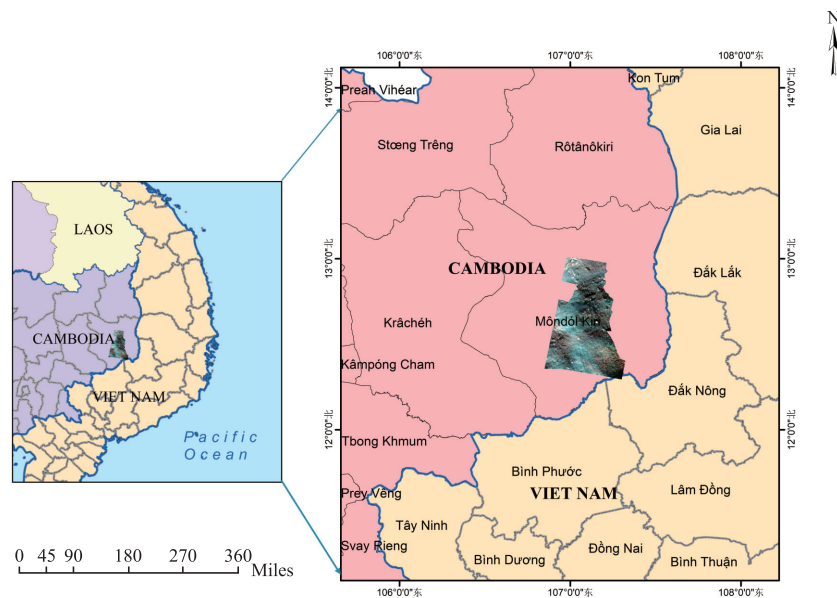


图 1 研究区区位图

Fig. 1 Location map of the study area

## 2 遥感数据选择与预处理

### 2.1 遥感数据源

研究区 11 月至次年 4 月属旱季,夜间天空较为晴朗。因此,在铝土矿光谱特征分析的基础上,本次筛选 2022 年 2 月 11 日 22 点 36 分接收的两景“珠

海一号”03 组 OHS-3B 高光谱卫星数据作为主要数据源,该影像分辨率 10 m,包含 32 个波段,波段范围从蓝波 443 nm~近红外 940 nm。

虽然“珠海一号”影像数据的波段划分较为精细,能够有效提取隐藏在蚀变矿物离子近红外波长范围内的特征信息,但其效果远不如综合考量蓝波、红波、近红外与远红外等多个波长范围内蚀变矿物离子与

其他非特征要素之间的信息差。而 Landsat-8 陆地卫星影像数据虽然空间分辨率仅为 30 m,但其波长范围更广。因此,选择 Landsat-8 陆地卫星影像数据以增加 1 550 nm 中红外~2 350 nm 远红外波段的覆盖。所选 Landsat-8 卫星时相为 2020 年 1 月 14 日 20 时 20 分,影像分辨率 30 m,包含 7 个波段。

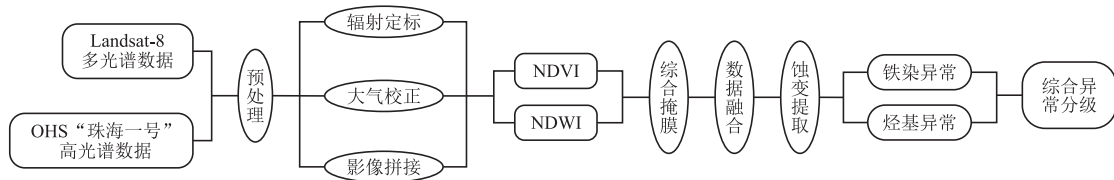


图 2 基于主成分分析的矿化蚀变提取流程图

Fig. 2 The flow chart of mineralization alteration information extraction based on the PCA method

### 2.2.1 辐射定标

辐射定标是将卫星传感器记录的目标区域电压或数据量化值(DN)转换为绝对辐射亮度值(辐射率)的过程,或者转换与地表(表现)反射率、表面温度等物理量有关的相对值的处理过程。正确的定标处理方法不仅能够有效消除传感器本身的误差,还可以精确量化地物在传感器入口处的辐射值,在应用遥感影像提取区域矿化蚀变信息领域,一定程度上避免了由传感器辐射性能改变引起的微小定标偏差,保障了分析结果的正确性<sup>[12-13]</sup>。本次研究对数据源采用 ENVI 自带的辐射定标工具进行预处理,定标后的影像像元较之前消除了数值增益与偏移,像元值转换为直接可用的辐射亮度值。

### 2.2.2 大气校正

遥感成像过程中,进入大气的太阳辐射会发生反射、折射、吸收、散射和透射。为消除大气对遥感成像的影响,必须进行大气校正。根据校正计算过程中是否需要考虑大气传输的物理机制,大气校正方法可分为 2 类:基于经验统计的方法(如内部平均法、平场域法、暗目标法、伪不变目标法、经验线性法、快速大气校正等)以及基于辐射传输的方法(如 6S、MORTAN、ATREM、HATCH、ACORN、FLAASH、ACTOR 等)<sup>[14]</sup>。本次研究中 OHS 数据使用其自带的 Open OHS 高光谱数据预处理软件对其进行大气校正及正射校正,大气校正方法采用 6S 法,该方法与传统的大气校正方法相比,在计算气体透过率时考虑了新的一些气体如一氧化碳、甲烷等,并且对于瑞利和气溶胶散射效应计算的精度有所提高<sup>[15]</sup>。而 Landsat-8 数据使用 ENVI 软件下

### 2.2 遥感数据预处理

本次研究选用的遥感影像数据为“珠海一号”卫星 L1B 级产品与 Landsat-8 卫星 L1 级标准产品,在辐射定标的基础上,主要开展了辐射定标、大气校正、图像拼接等预处理工作,以提升遥感影像的质量。本次研究数据预处理及技术流程见图 2。

的 FLAASH 大气校正模块进行处理。通过校正前后影像对比,发现校正后的影像质量有所提升,对比度也有一定的增强。

### 2.2.3 影像拼接与裁剪

尽管本次研究主要使用的两景遥感影像由“珠海一号”卫星同一时段与同一传感器获取,但过程中传感器的位置及方位发生了变化,使得两影像数据在空间对齐和辐射一致性方面存在缺陷。基于此我们使用 ENVI“Seamless Mosaic”工具对影像进行拼接,重叠区域采取羽化 5 个像元值的接边线羽化,并利用色彩直方图对镶嵌后的研究区域颜色均衡化,输出文件以立方卷积法重采样,最终得到整幅研究区影像。考虑到研究区存在部分边缘区上空云量大、云层厚的现象,而云层可能会对后续蚀变信息提取结果造成较大的影响,因此直接将该部分边缘区域进行掩膜或裁剪处理。

## 3 特征波段选择与蚀变信息提取

### 3.1 特征波段选择

特征波段分析与筛选是开展遥感蚀变信息提取的前提。地面上的土壤、植被、水体、岩石等地物都具有发射、反射和吸收电磁波的性质,目标物与电磁波的相互作用,形成与地物相关的特征光谱曲线,成为目标地物遥感探测的依据<sup>[16-17]</sup>。

研究区铝土矿属风化型铝土矿床,主要赋存于玄武岩风化淋滤形成的红土中,红土是区内铝土矿的重要找矿标志<sup>[18]</sup>。红土富含赤铁矿、针铁矿和黄钾铁矾矿,通过对这三种矿物波谱曲线(图 3(a))分析得知,含  $\text{Fe}^{3+}$  矿物在 450 nm~550 nm(可见光绿

波)和 800 nm~900 nm(近红外)波段呈较强的吸收特征,而在 650 nm~800 nm 波段范围具强反射特征<sup>[19]</sup>。张玉君等<sup>[20]</sup>对富镁皂石、多水高岭石、伊利石、叶蛇纹石等 14 种含羟基团矿物波谱曲线分析发

现,在 1 350 nm~1 450 nm、2 150 nm~2 300 nm 处含 OH<sup>-</sup> 矿物存在两个强吸收的突降波谱曲线吸收谷,在 1 600 nm~1 700 nm、2 400 nm 处存在较强的反射特征(图 3(b))。

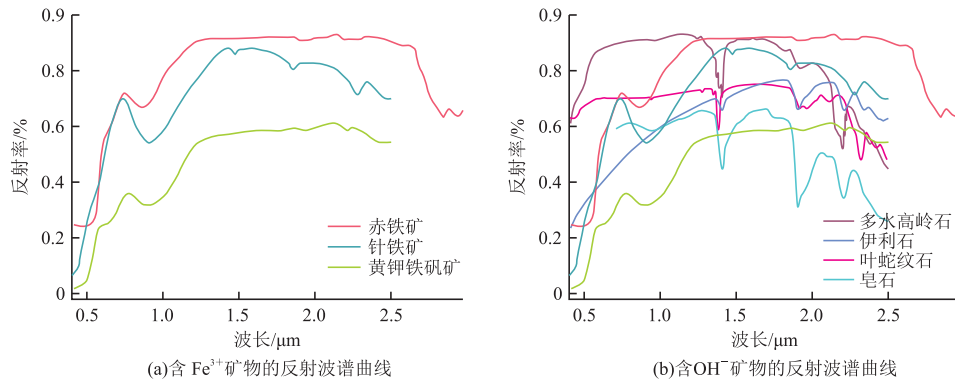


图 3 特征矿物微粒波谱曲线

Fig. 3 The spectral curve of the characteristic mineral particle

因此,基于地物波谱特征和数据源特征,选取 OHS 的第 2(466 nm 吸收)、第 13(665 nm 反射)、第 25(833 nm 吸收)和 Landsat-8 的第 6(1 400 nm 处羟基及碳酸根吸收较弱,有吸收的相对高值)波段进行铁染蚀变异常信息提取;

选取 OHS 的第 2(466 nm)、第 25(833 nm)和 Landsat-8 的第 6(1 400 nm 处羟基及碳酸根吸收较弱,有相对高值)、第 7(2 200 nm 处碳酸根强吸收)波段组合进行羟基蚀变异常信息提取(表 1)。

表 1 森莫诺隆地区矿化蚀变信息提取影像波段选取

Tab. 1 Image bands selection for mineralized alteration information extraction in Semonolong area

Characteristic ion	Wavelength range/nm	Response type	Selection of characteristic bands				
			Sensor	Fe <sup>3+</sup> alteration	Wavelength range/nm	OH <sup>-</sup> alteration	Wavelength range/nm
Fe <sup>3+</sup>	450~550	Absorption	OHS-3B C MOS2	Band2	462~469	Band2	462~469
	650~800	Reflection		Band13	661~668	/	/
	800~900	Absorption		Band25	828~837	Band25	828~837
OH <sup>-</sup>	1 350~1 450	Absorption	Landsat OLI	/	/	/	/
	1 600~1 700	Reflection		Band6	1 570~1 650	Band6	1 570~1 650
	2 150~2 300	Absorption		/	/	Band7	2 110~2 290
	2 400	Reflection		/	/	/	/

### 3.2 蚀变异常信息提取

#### 3.2.1 提取方法及过程

本次采用主成分分析法进行蚀变异常信息提取。为充分发挥高光谱与多光谱数据的优势,减少植被、水体等干扰,对预处理后的数据进行数据融合、综合掩膜等工作。

数据融合采用 OHS 数据的全色波段与 Landsat-8 数据的 B6(中红外)、B7(远红外),合成后的影像包含蓝波 443 nm~远红外 2 201 nm 的 34 个波段范围,分辨率 10 m。同时,分别选取 OHS 数据的

14 波段和 25 波段、8 波段和 25 波段计算 NDVI 和 NDWI 以获取植被和水体的分布信息,并利用阈值分割获得植被-水体的综合掩膜<sup>[19]</sup>,对融合后的遥感影像进行掩膜处理和主成分分析(PCA)蚀变异常信息提取。

经 PCA 处理,分别获得铁染及羟基异常的特征矩阵(表 2、表 3)。铁染蚀变特征矩阵的 PC4 中,OHS\_band13 与 OHS\_band2、OHS\_band25 符号相反,与 Landsat-8\_band6 符号相同;在羟基蚀变异常特征矩阵的 PC4 中,Landsat-8\_band6 符号

与 OHS\_band25、Landsat-8\_band7 符号相反。因此,参照 PCA 方法主分量的判断原则,确定铁染异常信息的主分量为 PC4,羟基异常信息的主分量为 PC4<sup>[21]</sup>。

3.2.2 结果分析

在得到研究区羟基与铁染蚀变主分量波段后,为突出蚀变区域与背景区域之间的差异,更加直观地了解蚀变区域分布、准确圈定靶区位置,研究采用门限法对各蚀变主分量进行异常值的密度分割,即“区域平均异常值( $\kappa$ ) +  $\delta$  \* 标准差”<sup>[22]</sup>。经多次对比确定本研究铁染异常  $\delta$  值分别为 2、2.5、3,羟基异常  $\delta$  值分别为 2.3、2.8、3.3(表 4、图 4)。依据各级异常阈值进行密度分割,最终获得研究区综合异常信息分布图(图 5)。

表 2 铁染异常特征矩阵

Tab. 2 Feature matrix of Fe<sup>3+</sup> alteration

PC	OHS_band2	OHS_band13	OHS_band25	Landsat-8_band6
PC1	0.596 258	0.429 717	0.510 148	0.446 731
PC2	0.374 941	0.403 704	-0.832 252	0.061 628
PC3	0.501 299	-0.807 674	-0.145 640	0.274 137
PC4	0.502 588	-0.005 375	0.160 917	-0.849 401

表 3 羟基异常特征矩阵

Tab. 3 Feature matrix of OH<sup>-</sup> alteration

PC	OHS_band2	OHS_band25	Landsat-8_band6	Landsat-8_band7
PC1	-0.589 771	-0.518 460	-0.449 948	-0.425 343
PC2	-0.455 476	0.842 831	-0.135 181	-0.252 792
PC3	0.665 966	0.112 599	-0.451 454	-0.583 095
PC4	0.034 649	0.090 315	-0.758 593	0.644 345

表 4 研究区 Fe<sup>3+</sup>、OH<sup>-</sup> 蚀变异常分级统计信息

Tab. 4 Statistical information on the classification of Fe<sup>3+</sup> and OH<sup>-</sup> alteration anomalies in the research area

Classification statistics of Fe <sup>3+</sup>				
Pixel brightness value (Normalization)	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation( $\delta$ )
	-1.201 003	0.675 921	0.000 000	0.068 747
Abnormal statistics	Statistical value		Applied value	
	$\kappa + \delta * 2$		0.137 494	
	$\kappa + \delta * 2.5$		0.171 868	
$\kappa + \delta * 3$		0.206 241		
Classification statistics of OH <sup>-</sup>				
Pixel brightness value (Normalization)	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation( $\delta$ )
	-0.874 877	0.930 685	0.000 000	0.045 535
Abnormal statistics	Statistical value		Applied value	
	$\kappa + \delta * 2.3$		0.104 731	
	$\kappa + \delta * 2.8$		0.127 498	
$\kappa + \delta * 3.3$		0.150 266		

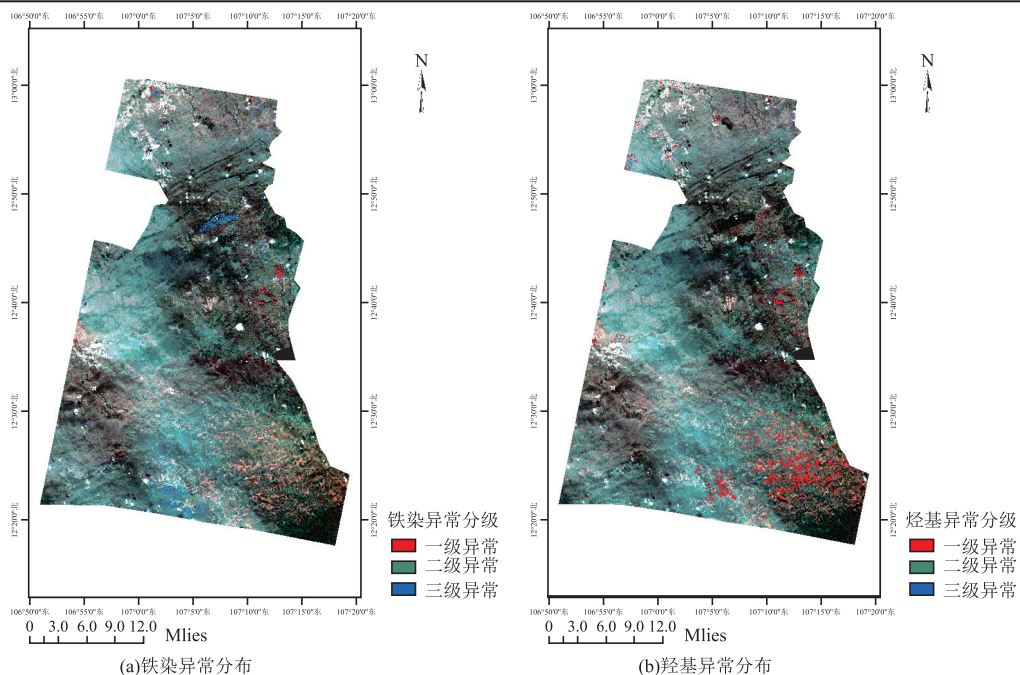
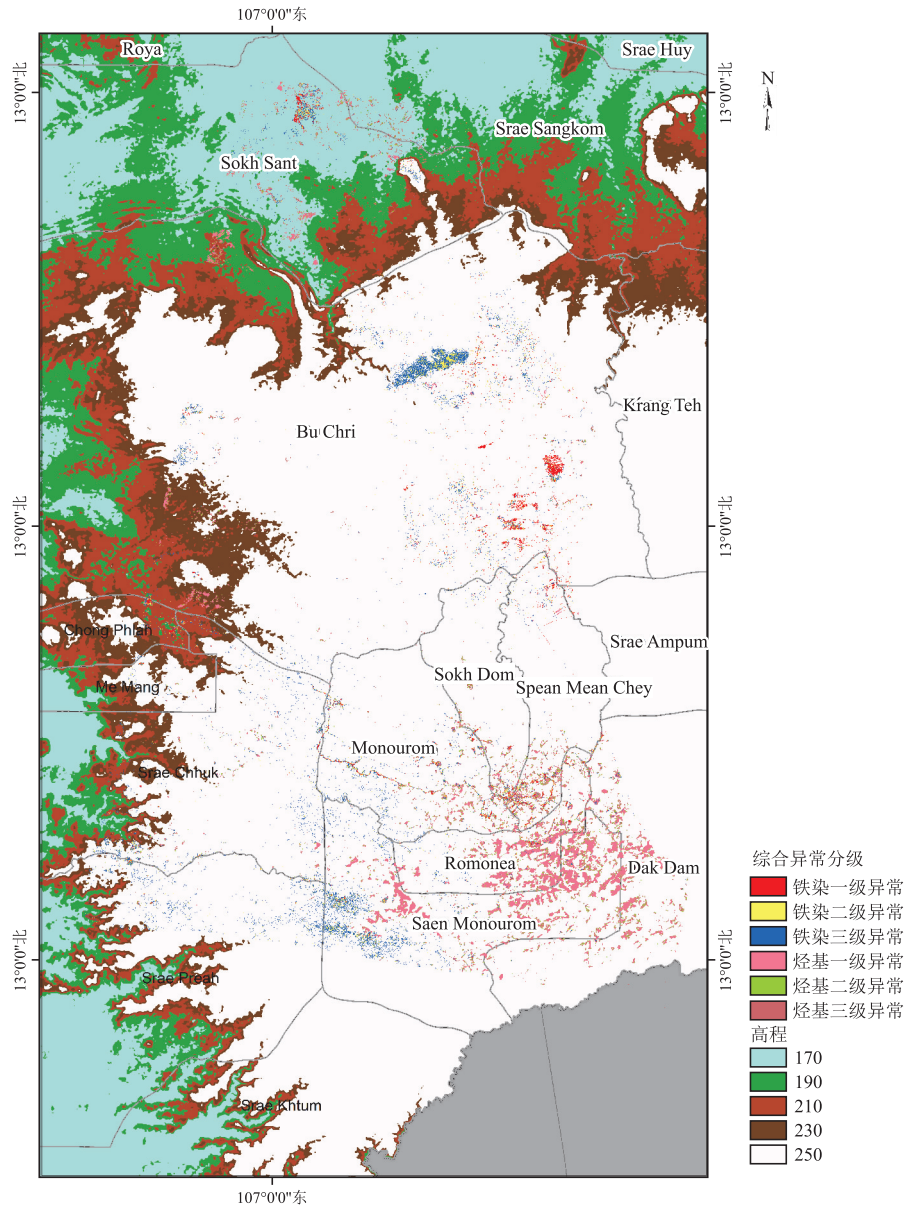


图 4 铁染与羟基蚀变异常分布

Fig. 4 Comparison of abnormal distribution of iron-stained and hydroxyl alteration



数据来源: 高程数据为ASTER GDEM 30M分辨率数字影像

0 3.0 6.0 9.0 12.0 Miles

图5 森莫诺隆地区遥感综合异常信息分布

Fig. 5 Distribution of remote sensing integrated anomaly information in Semonolung area

综合蚀变异常信息提取结果显示(表5),研究区综合异常总面积达 216.98 km<sup>2</sup>,占研究区面积的 8.314 3%,其中一、二级中高异常区面积 160.94 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的 6.166 8%。

表5 森莫诺隆地区遥感综合异常面积及占比  
Tab. 5 Area and proportion of remote sensing comprehensive anomaly in Semonolung area

Comprehensive anomaly classification	I	II	III
Area/km <sup>2</sup>	68.322 3	92.616 6	56.044 6
Percent/%	2.628 0	3.548 9	2.147 5

区内异常总体为南北向展布。遥感异常类型以

羟基异常为主,部分羟基异常区域分布在铁染异常外围,综合异常与区内地貌及岩性相关性明显。在综合异常空间分布方面,Romonea 与 Sean Monourom 地区集中分布羟基异常,但未出现明显铁染异常信息,分析为第四系松散堆积物产生的假异常,不具找矿指示。Romonea 东、Dak Dam 西部区域大量分布羟基异常,Romonea 与 Monourom 之间蚀变综合异常较为发育,从中心向四周具有强度降低的趋势。研究区北侧的 Sokh Sant 地区分布有较高的遥感综合异常,综合异常与岩性、地貌相关性较高,异常区内存在地表开挖,显示具有较好找矿潜力,为区

内今后勘探的重要靶区。

## 4 结论

1) 高光谱与多光谱数据在矿化蚀变信息方面具有各自的优势。OHS 珠海一号高光谱数据的空间分辨率及光谱分辨率优于 Landsat-8 数据,但其波段分布范围不及 Landsat-8 数据。因此,应针对拟分析目标地物的光谱特征进行波段选择和数据融合,以充分利用不同遥感数据在蚀变异常信息提取中的优势。采用高光谱与多光谱遥感数据融合能够依据控矿要素特征进行与成矿物质类型及空间形态特征相关异常信息的提取,融合数据不仅弥补了所选高光谱数据波段范围有限的缺点,而且还保留了较高空间分辨率的优势。

2) 成矿地质背景与特征光谱分析是开展遥感蚀变信息提取的前提。针对研究区风化型铝土矿与岩性、地貌的空间相关性及其风化产物中富含铁离子、羟基团等特征,本次研究选择综合利用高光谱与多光谱数据,采样主成分分析方法进行铁染和羟基异常信息的提取,并进行综合分析和异常筛选,获得综合异常。综合异常主要集中在区内铝土矿的露天开采区及邻近区域,与风化壳型铝土矿的岩性、地形地貌等主要控矿因素的空间相关性强,具有较好的找矿指示意义。

3) 遥感技术在境外找矿勘探中具有特殊的优势,能够快速提取与热液蚀变及风化淋滤型作用相关矿床的面状蚀变信息,对于靶区筛选具有重要作用。但是,由于植被、水体等干扰而影响提取的精度,综合异常筛选存在一定困难。因此,在今后的工作中,应加强典型地物特征波谱及影响因素的总结,以针对性采取不同的蚀变信息提取方法来提高综合异常提取的精度和找矿指示意义的定量化辨识,为境外找矿勘探提供更高层次的定量化技术支撑。

### 致谢

感谢中国地质科学院矿产综合利用研究所、中国地质调查局成都地质调查中心及成都理工大学地球科学学院刘严松老师及团队为野外调查和资料分析提供的帮助;

本研究使用的“珠海一号”OHS 高光谱遥感数据由欧比特珠海一号遥感数据服务平台(<https://www.obtdata.com/>)提供,在此一并致谢!

### 参考文献:

[1] LYU P Y, HE L, HE Z W, et al. Research on re-

mote sensing prospecting technology based on multi-source data fusion in deep-cutting areas[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 138: 104359.

[2] GOETZ A F H, ROCK B N, ROWAN L C. Remote sensing for exploration; an overview[J]. *Economic Geology*, 1983, 78(4): 573—590.

[3] LIU P. A survey of remote-sensing big data[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2015, 3: 45.

[4] 代晶晶, 吴亚楠, 王登红, 等. 基于面向对象分类的稀土开采区遥感信息提取方法研究[J]. *地球学报*, 2018, 39(1): 111—118.

DAI J J, WU Y N, WANG D H, et al. Object-oriented classification for the extraction of remote sensing information in rare earth mining areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(1): 111—118. (In Chinese)

[5] 赵汀, 王登红, 王钊钊, 等. 滇缅地区离子吸附型稀土矿高光谱遥感信息提取方法研究[J]. *矿床地质*, 2014, 33(增刊 1): 1205—1206.

ZHAOT, WANG D H, WANG Z Z, et al. Study on extraction method of hyperspectral remote sensing information of ion adsorption rare earth minerals in Yunnan and Myanmar[J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33 (Suppl 1): 1205—1206. (In Chinese)

[6] 王宏, 范英霞, 李晓青. 基于遥感技术的新疆大南湖一带地区矿化蚀变信息提取[J]. *测绘与空间地理信息*, 2018, 41(10): 24—26.

WANG H, FAN Y X, LI X Q. Extraction of mineralized alteration information in the area of Xinjiangda'nanhu based on remote sensing technology[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2018, 41 (10): 24—26. (In Chinese)

[7] 吴一全, 盛东慧, 周杨. PCA 和布谷鸟算法优化 SVM 的遥感矿化蚀变信息提取[J]. *遥感学报*, 2018, 22 (5): 810—821.

WU Y Q, SHENG D H, ZHOU Y. Remote sensing mineralization alteration information extraction based on PCA and SVM optimized by cuckoo algorithm[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5): 810—821. (In Chinese)

[8] SUMAN BABU P, MAJUMDAR T J, BHATTACHARYA A K. Study of spectral signatures for exploration of Bauxite ore deposits in Panchpatmali, India[J]. *Geocarto International*, 2015, 30(5): 545—559.

[9] 陈喜峰, 陈秀法, 叶锦华. 东南亚中南半岛晚新生代玄武岩及其红土型铝土矿矿化特征[J]. *地质论评*, 2019, 65(增刊 1): 271—273.

CHEN X F, CHEN X F, YE J H. Mineralization

- characteristics of late Cenozoic basalt and laterite bauxite in indo-China peninsula of southeast Asia[J]. *Geological Review*, 2019, 65(Suppl 1): 271-273. (In Chinese)
- [10] 陈德稳, 詹勇, 马林霄, 等. 柬埔寨蒙多基里上川龙铝土矿地质特征及成矿元素不同粒级富集规律研究[J]. *河南科技*, 2019(19): 125-130.  
CHEN D W, ZHAN Y, MA L X, et al. Research on the geological characteristics and ore-forming elements enrichment in different grade of krong bauxite deposit in mondoul kiri of Cambodia[J]. *Henan Science and Technology*, 2019(19): 125-130. (In Chinese)
- [11] 曾祥婷, 朱华平, 刘书生, 等. 柬埔寨上川垅铝土矿元素地球化学特征与成矿作用关系探讨[J]. *中国矿业*, 2017, 26(11): 154-161.  
ZENG X T, ZHU H P, LIU S S, et al. Elemental composition and their roles during metallization at Kirirom bauxite deposit, Cambodia[J]. *China Mining Magazine*, 2017, 26(11): 154-161. (In Chinese)
- [12] 陈峰, 王辰星, 孙倩, 等. 高分一号宽幅多光谱影像辐射定标偏差及其植被指数影响[J]. *生态学报*, 2023, 43(5): 1861-1873.  
CHEN F, WANG C X, SUN Q, et al. Radiometric calibration bias of the Gaofen-1 WFV multispectral imagery and its influence on vegetation index[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(5): 1861-1873. (In Chinese)
- [13] 许和鱼. 空间高光谱遥感器星上辐射定标方法与应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.  
XU H Y. Research on on-board radiometric calibration method and application of space hyperspectral remote sensor[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020. (In Chinese)
- [14] 孔卓, 杨海涛, 郑逢杰, 等. 高光谱遥感图像大气校正研究进展[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(4): 1-10.  
KONG Z, YANG H T, ZHENG F J, et al. Research advances in atmospheric correction of hyperspectral remote sensing images[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(4): 1-10. (In Chinese)
- [15] 郑伟, 曾志远. 遥感图像大气校正方法综述[J]. *遥感信息*, 2004, 19(4): 66-70.  
ZHENG W, ZENG Z Y. A review on methods of atmospheric correction for remote sensing images[J]. *Remote Sensing Information*, 2004, 19(4): 66-70. (In Chinese)
- [16] 王桥. 地表异常遥感探测与即时诊断方法研究框架[J]. *测绘学报*, 2022, 51(7): 1141-1152.  
WANG Q. Research framework of remote sensing monitoring and real-time diagnosis of earth surface anomalies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(7): 1141-1152. (In Chinese)
- [17] 成功, 李嘉璇, 王朝鹏, 等. 离子型稀土矿含量高光谱定量反演研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2019, 39(5): 1571-1578.  
CHENG G, LI J X, WANG C P, et al. Study on hyperspectral quantitative inversion of ionic rare earth ores[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2019, 39(5): 1571-1578. (In Chinese)
- [18] 陈庆刚, 陈群, 谢江涛. 柬埔寨王国蒙多基里省红土型铝土矿床地质特征及成因浅析[J]. *贵州地质*, 2016, 33(1): 19-23.  
CHEN Q G, CHEN Q, XIE J T. Analyses of deposit characteristics and genesis of lateritic bauxite inmondulkiri province, Cambodia [J]. *Guizhou Geology*, 2016, 33(1): 19-23. (In Chinese)
- [19] 金谋顺, 王辉, 张微, 等. 高分辨率遥感数据铁染异常提取方法及其应用[J]. *国土资源遥感*, 2015, 27(3): 122-127.  
JIN M S, WANG H, ZHANG W, et al. Method for extraction of ferric contamination anomaly from high-resolution remote sensing data and its applications[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2015, 27(3): 122-127. (In Chinese)
- [20] 张玉君, 曾朝铭. 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*, 2012, 31(4): 671-698.  
ZHANG Y J, ZENG Z M. Study of optimum discriminator of multi-channel remote sensing anomaly for recognition of porphyry Cu deposits in Gangdese belt [J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(4): 671-698. (In Chinese)
- [21] 黄炜华. 浅析遥感蚀变信息提取中羟基异常与钨矿的关系[J]. *中国金属通报*, 2021(6): 184-185.  
HUANG W H. Analysis on the relationship between hydroxyl anomaly and tungsten ore in remote sensing alteration information extraction[J]. *China Metal Bulletin*, 2021(6): 184-185. (In Chinese)
- [22] 徐兮, 潘建平, 冯晓. 灰度门限法在遥感图像信息提取中应用[J]. *城市勘测*, 2008(2): 60-62.  
XU X, PAN J P, FENG X. The application of graythreshold in remote sensing image information extraction [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2008(2): 60-62. (In Chinese)

## A research on extracting mineralization anomalies of weathering crust bauxite based on remote sensing fusion data: taking the Sammonolong area of Cambodia as an example

SHEN Duheng<sup>1</sup>, LIU Yansong<sup>1,2</sup>, LIU Qi<sup>1</sup>, LAI Sihan<sup>1,2</sup>,  
HE Xinghui<sup>1,2</sup>, Mayada Jamal<sup>1</sup>, HE Boyu<sup>2</sup>, SHEN Qian<sup>3</sup>

- (1. Chengdu University of Technology, Key Laboratory of Tectonic Mineralization and Accumulation, Ministry of Natural Resources, Chengdu 610059, China;
2. Chengdu University of Technology, Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology, Ministry of Education, Chengdu 610059, China;
3. Sichuan Sumhope Spatial Technology Co., Ltd, Chengdu 610094, China)

**Abstract:** Aluminum has a wide range of industrial uses. Bauxite is an essential strategic resource in the background of globalization and plays a crucial role in the development of our national economy. Because the distribution of weathering crust bauxite is closely related to topography, lithology, and geological structure, remote sensing technology is being applied more and more widely in its exploration. How to synthesize the advantages of all kinds of remote sensing data to extract ore—controlling factors and alteration information has also become the focus of weathering crust type bauxite exploration work. Based on the analysis of geological characteristics and ore—controlling factors of weathered bauxite, this paper selected the Semonolong area of south—eastern Cambodia as the research area and selected the OHS hyperspectral data of “Zhuhai No. 1” and Landsat—8 multispectral data for preprocessing and data fusion. The Principal Component Analysis method was used to extract the abnormal information of bauxite mineralization in the study area, analyze the spectral characteristics of the abnormal information of bauxite and its prospecting indication significance, screen the abnormal information of bauxite mineralization, and carry out hierarchical display. Results show: ① Using high spectral and multi—spectral remote sensing data fusion can according to the characteristics of ore—controlling factors and metallogenic material type and space characteristics related to abnormal information extraction, fusion data not only make up for the selected band limited range of hyperspectral data but also retain the advantages of high spatial resolution and high spectral resolution; ② The remote sensing anomaly information extracted based on the fusion of hyperspectral and multispectral data is highly correlated with the spatial distribution characteristics of the basalt and its weathering, topography and geomorphology in the area; The abnormal distribution range of bauxite mineralization is mainly concentrated in the open—cut and adjacent areas of the bauxite mine. ③ Comprehensive anomaly and the known ore (bed) coincidence degree is higher, and weathering crust type bauxite main ore—controlling factors such as lithology, and topography of spatial correlation is strong. The results of this study is suitable for prospecting the screening of potential target zone and the synthesis anomaly area, the early exploration of foreign same—type bauxite, and rapid optimization targets with technical support.

**Keywords:** principal component analysis; bauxite; alteration anomalies; data fusion; hyperspectral data