

# 多源遥感技术在风化矿床中的应用现状与发展前景

路隆超, 杨鹏鹏

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月6日; 发布日期: 2026年3月16日

## 摘要

多源遥感技术以其宏观、快速、经济、准确的独特优势为风化矿产资源调查提供了全新技术途径, 目前该技术在风化矿产勘查领域的应用仍相对有限且尚未形成系统性方法体系。本文以风化型铝土矿、镍矿和稀土矿为研究对象, 阐述了多源遥感技术在风化矿产资源调查中的技术优势, 全面总结了多源遥感技术在三类风化矿床找矿预测、开采现状调查及矿山环境监测(水污染、土地破坏、植被覆盖、地质灾害监测)等方面的应用现状与典型研究成果, 展现了其在矿化蚀变识别、开采动态监测、生态环境评估等方面的技术价值。未来, 随着“天-空-地-井”一体化形成, 遥感技术将成为更高效、更精准、更环保的勘察手段。

## 关键词

风化矿产资源, 多源遥感, 地质找矿, 环境监测

# Application Status and Development Prospects of Multi-Source Remote Sensing Technology in Weathered Deposits

Longchao Lu, Pengpeng Yang

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

Received: February 11, 2026; accepted: March 6, 2026; published: March 16, 2026

## Abstract

With its unique advantages of being macroscopic, rapid, economical and accurate, multi-source

remote sensing technology provides a brand-new technical approach for the investigation of weathered mineral resources. At present, the application of this technology in the field of weathered mineral exploration is still relatively limited, and a systematic methodological system has not yet been formed. Taking weathered bauxite, nickel ore and rare earth ore as research objects, this paper expounds the technical advantages of multi-source remote sensing technology in the investigation of weathered mineral resources. It comprehensively summarizes the application status and typical research results of multi-source remote sensing technology in ore prospecting prediction, mining status investigation and mine environmental monitoring (water pollution, land damage, vegetation coverage, geological disaster monitoring) of the three types of weathered deposits, and demonstrates its technical value in mineralization and alteration identification, dynamic mining monitoring, ecological environment assessment and other aspects. In the future, with the formation of the “space-air-ground-well” integration, remote sensing technology will become a more efficient, accurate and environmentally friendly exploration method.

## Keywords

**Weathered Mineral Resources, Multi-Source Remote Sensing, Geological Prospecting, Environmental Monitoring**

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

风化作用是地表物质循环的核心驱动力,在太阳能、风能与化学能等多重能量的协同驱动下,促使岩石圈、水圈、生物圈和大气圈之间的元素发生迁移与再分配[1][2]。当风化过程中特定元素超常富集并达到工业品位时,便形成具有重要经济价值的风化矿床,典型代表包括铝土矿、铁矿、锰矿、镍矿,以及稀土、铌、钽等战略性矿产[3][4]。这类矿床通常规模大、埋藏浅、易开采,且选矿成本低,因而成为全球矿产勘查的重点目标,在当代矿产资源体系中具有不可替代的战略地位[5][6]。因此,如何快速、精准地开展风化矿床的勘查与评价,已成为一项关乎资源保障的重要科学课题。

遥感技术作为一种高效的地学信息获取手段,具有快速、宏观、经济的特点,能够准确提取地表及浅地表信息,在矿产勘查中发挥着日益重要的作用[7][8]。然而,传统遥感找矿方法多依赖单一数据源,在复杂构造区域中的应用存在明显局限性[9][10]。近年来,随着遥感数据在空间、波谱、辐射及时间分辨率上的显著提升,其应用范围与水平不断拓展,多源遥感数据的协同应用也逐渐成为矿产勘查领域的研究热点[11]-[15]。这为风化矿产资源的调查与评价提供了一种全新的技术途径。

运用遥感技术开展大宗矿产资源调查已取得显著进展与丰富成果[11][13][16][17],然而在风化矿产资源勘查领域的应用仍相对有限,尚未形成系统性的方法体系。为此,本文聚焦风化型铝土矿、镍矿和稀土矿矿产资源,阐述遥感技术在风化型矿床调查中的独特优势与多源数据基础,系统梳理遥感技术在找矿预测、开采活动识别及矿山环境监测等方面的应用现状,总结当前研究中存在的主要问题,并对未来技术发展和研究方向提出展望,以期对风化矿产资源的快速、精准勘查提供参考。

## 2. 多源遥感技术在风化矿产资源调查中的技术优势及数据基础

随着遥感技术的持续进步,遥感卫星数量的增加和分辨率的逐步提高[18][19],各类遥感平台从近地轨道、高空、低空等不同高度传回了海量遥感数据,为地表地物的宏观观测、肉眼难以识别的微尺度矿

化特征探测,以及植被覆盖区的隐蔽性成矿信息的挖掘提供了客观、连续、真实的地理空间信息[20][21]。由于不同遥感卫星的轨道参数、传感器类型(多光谱/高光谱/微波)、成像分辨率以及波段范围存在显著差异,所得数据对地面同一地物的反映可能存在较大的偏差[22]。结合风化矿产资源遥感地质调查的实际需求,可针对性选用合适的遥感数据并制定多源数据组合方案,从不同高度和视野精准获取地物的地质构造宏观特征、矿体精细结构、特征蚀变矿物光谱信息、控矿地形地貌参数等各类地质指标,为风化矿产资源的调查与评价奠定理论与数据基础(表 1) [23]-[25]。

**Table 1.** Diagnostic absorption bands of typical altered minerals in weathering deposits and recommended sensors  
**表 1.** 风化矿床典型蚀变矿物诊断性吸收波段及推荐传感器

典型蚀变矿物	矿床类型关联	诊断性吸收波段 ( $\mu\text{m}$ )	推荐传感器	适配遥感类型
三水铝石	红土型铝土矿	2.16~2.33、 1.40、1.90	GF-5、EO-1 Hyperion、机载 HyMap	高光谱
高岭石	离子吸附型稀土矿、 铝土矿	2.20、1.47、1.98	Sentinel-2、GF-1、Headwall Mi- cro-Hyperspec	多光谱/高光谱
针铁矿	红土型镍矿、铝土矿	0.85、1.20、2.25	WorldView-3、ALOS-2、机载 CASI/SASI	多光谱/高光谱
赤铁矿	红土型镍矿、铁矿	0.50、0.60、0.87	Sentinel-2、Landsat 9、GF-5	多光谱/高光谱
氟碳铈矿	碳酸岩型稀土矿	2.34、1.75	EnMAP、GF-5B、HySpex	高光谱

## 2.1. 高光谱遥感数据

高光谱遥感技术以纳米级光谱分辨率捕捉特征蚀变矿物“光谱指纹”,实现非接触式定性识别,精准圈定矿化蚀变带,破解微尺度蚀变识别难题[26][27];可通过建模反演目标矿物富集程度,量化矿化异常,精准定位矿体富集中心,为资源潜力评价提供定量支撑[28]-[30];能捕捉不同深度风化层光谱差异,识别风化壳厚度,总结矿化层垂向延伸规律,建立矿体三维建模与开采设计[31];依据丰富光谱维度,通过光谱识别剔除植被、土壤背景干扰,制定红土区、丘陵蚀变带等复杂地表的精细调查[32][33]。常用的高光谱遥感数据包括高光谱卫星及无人机获取的高光谱遥感数据,具体技术参数见表 2。

**Table 2.** Technical parameter table of hyperspectral satellite data  
**表 2.** 高光谱卫星数据技术参数表

数据类型	典型数据源	技术参数	适配调查场景
卫星高光谱数据	GF-5 (中国)、EO-1 Hyperion (美国)	空间分辨率 30~50 m, 波段数 100+, 覆盖 400~2500 nm	区域大尺度风化矿床普查, 识别 大范围蚀变矿物分区(如红土型矿 区的铁氧化物富集带)
航空高光谱数据	机载 HyMap、 CASI/SASI	空间分辨率 2~10 m, 波段数 200+, 光谱分辨率 5~10 nm	成矿远景区详查, 圈定矿化蚀变 带边界、矿体展布范围
无人机高光谱数据	小型高光谱成像仪 (如 Headwall Mi- cro-Hyperspec)	空间分辨率 0.5~2 m, 波段数 150+, 灵活机动	矿区尺度精细化调查, 识别矿体 精细结构、风化壳垂向分带、矿 化富集中心

## 2.2. 多光谱遥感数据

多光谱遥感技术以广覆盖、低成本的特性快速完成大区域普查, 结合岩性、构造、地貌解译与蚀变指数分析, 高效圈定成矿远景区, 降低野外踏勘盲目性[34]; 通过低中-高分辨率数据, 实现“区域-矿区”的多尺度解译, 构建完整成矿地质模型[35]; 以多时相数据对比, 分析区域风化作用强度变化(如风化壳扩张、侵蚀速率), 反推成矿时空演化, 为资源合理开发和生态修复提供支撑; 且数据多免费开源、处理门槛低, 适合常规普查流程, 性价比突出。目前常用的高空间分辨率遥感数据包括 Landsat 8/9、Sentinel-2、GF-1/2、WorldView-2/3、QuickBird 等[36] [37]。具体技术参数如表 3 所示。

**Table 3.** Technical parameters of multispectral satellite data

**表 3.** 多光谱卫星数据技术参数表

数据类型	典型数据源	技术参数	适配调查场景
低中分辨率多光谱	Landsat 8/9、Sentinel-2	空间分辨率 10~30 m, 波段数 8~12 个(含可见光、近红外、短波红外)	区域尺度成矿背景分析、大范围蚀变异常圈定、风化壳整体分布解译
高分辨率多光谱	GF-1/2、WorldView-2/3、QuickBird	空间分辨率 0.5~8 m, 波段数 4~8 个(含多光谱 + 全色)	矿区尺度矿体边界圈定、控矿构造(小型断裂、节理)解译、地貌植被异常识别

## 2.3. 雷达遥感数据

雷达遥感技术具微波穿透性, 可突破植被、云层及干燥红土层遮挡, 实现全天候、全天时探测, 补充光学遥感盲区[38]; 能精准解译断裂、隐伏裂隙等控矿构造, 为圈定线型矿化体提供依据; 可反演地表粗糙度, 结合光谱数据交叉验证, 提升矿化异常识别准确率, 适合高植被、多雨区及复杂地形的风化矿产调查需求[39]-[41]。常用的雷达数据包括 Sentinel-1、Radarsat-2、ALOS-2、JERS-1、Sentinel-1 InSAR、机载 InSAR 等, 具体技术参数见表 4 所示。

**Table 4.** Technical parameter table of radar data

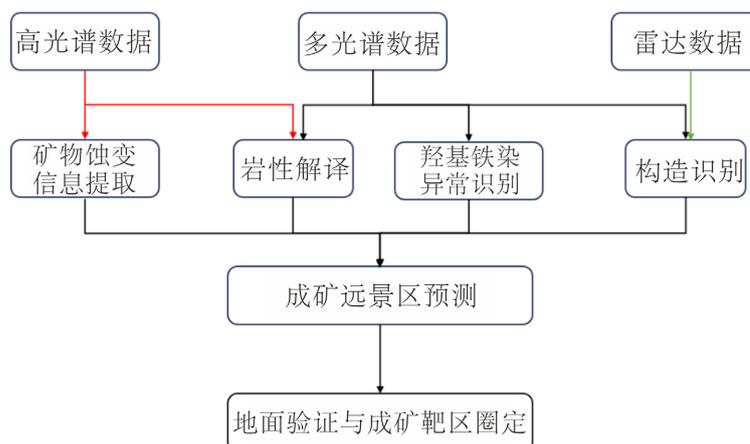
**表 4.** 雷达数据技术参数表

数据类型	典型数据源	技术参数	适配调查场景
C 波段雷达数据	Sentinel-1、Radarsat-2	空间分辨率 10~20 m, 极化方式多样(VV/VH/HH/HV)	中低植被覆盖区控矿构造解译、矿区开采动态监测、地表粗糙度反演
L 波段雷达数据	ALOS-2、JERS-1	空间分辨率 10~50 m, 穿透植被能力强	高植被覆盖区(热带雨林)隐伏构造解译、深部风化壳分布探测
InSAR 地形数据	Sentinel-1 InSAR、机载 InSAR	高程精度米级 - 分米级	矿区三维地形建模、采空区形变监测、控矿地形参数提取

## 3. 多源遥感技术在风化矿产资源找矿中的应用

多源遥感的核心价值不非单一数据源的简单叠加, 而是通过不同数据源的技术互补与信息耦合, 提升矿产勘查精度。圈定矿化异常区时, 依托雷达遥感穿透性剥离植被干扰、捕捉深部地质信息, 结合光学遥感光谱识别能力辨识蚀变矿物、剔除虚假异常, 实现精准圈定; 光谱数据优化上, 利用 DEM 地形数

据进行地形校正, 消除光谱畸变、还原真实光谱, 提升矿化异常提取准确度; 高光谱负责局部精细识别与定量反演, 多光谱实现大范围宏观圈定, 二者结合提升勘查精度与效率, 发挥多源遥感综合优势(图 1)。



**Figure 1.** Technical roadmap for delineating ore-prospecting target areas using multi-source satellite remote sensing data  
**图 1.** 多源卫星遥感数据圈定找矿靶区的技术路线图

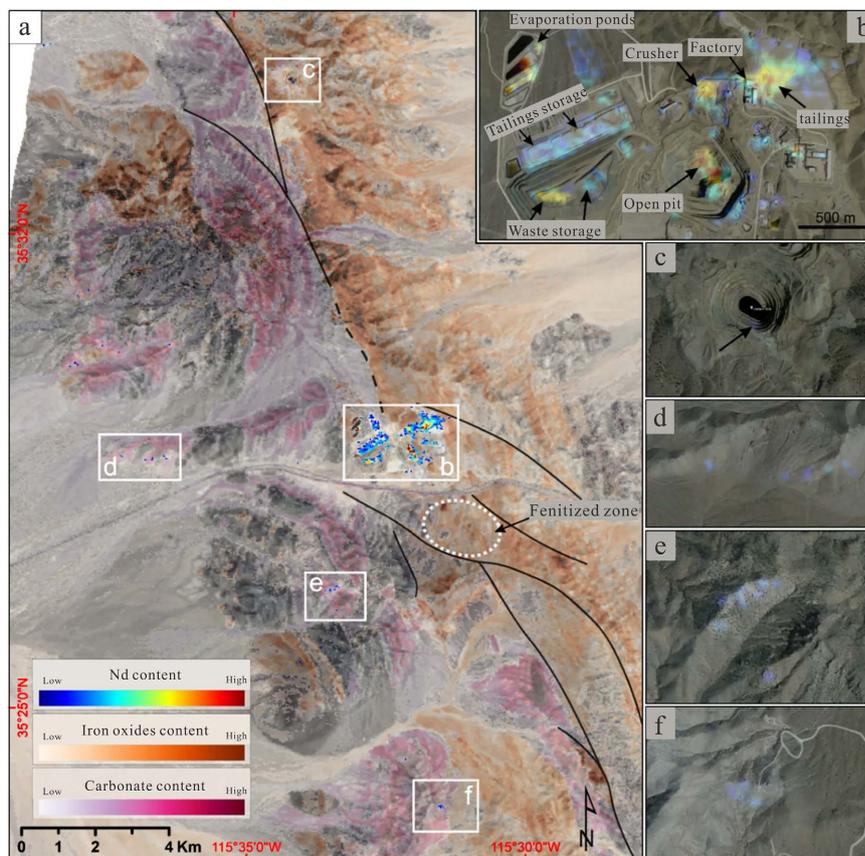
### 3.1. 多源遥感技术在稀土矿床找矿中的应用

高光谱遥感技术已发展成为稀土元素勘查与填图的关键手段, 广泛应用于不同类型稀土矿床的识别与评价。在碳酸岩型稀土矿床研究中, Boesche 等[42]采用 HySpex 高光谱成像仪对挪威泰勒马克郡 Fen 碳酸岩岩体进行稀土元素填图, 基于诊断性光谱吸收特征识别了 Nd、Er、Dy 等稀土元素, 并明确了 Sm、Nd 等元素的专属指示波段。Asadzadeh 等[43]利用 EnMAP 高光谱卫星数据对美国加州 Mountain Pass 碳酸岩型稀土矿床开展探测, 通过曲线拟合与光谱匹配方法有效识别氟碳铈矿中的 Ce、La、Nd 等轻稀土元素, 成功圈定了隐伏碳酸岩脉(图 2)。Bedini and Rasmussen [44]综合机载高光谱与伽马能谱数据, 对格陵兰岛 Sarfartoq 碳酸岩复合体实施稀土勘查, 借助主成分分析与光谱角匹配技术识别稀土及伴生元素异常, 进而圈定高潜力找矿靶区。Boesche 等[42]基于 HySpex 高光谱数据, 通过反褶积技术增强 Nd 光谱反射信号, 实现了对挪威 Fen 碳酸岩 Nd 元素的精细化填图, 显著提升了复杂地表条件下的稀土信号识别能力。

针对离子吸附型稀土矿床, 代晶晶等[45]依托高光谱遥感技术, 根据赣南水体中稀土元素的光谱吸收特征进行浓度定量反演, 实现了水系发达区域的稀土水化学遥感找矿。王耿明[46]针对离子吸附型稀土矿赋存特征, 利用多光谱和高光谱数据提取成矿相关粘土矿物信息, 结合构造、岩性、地貌等成矿条件的遥感解译结果, 快速圈定了南方离子吸附型稀土矿成矿远景区。章钦瑜等[47]融合 SPOT 多光谱、ASTER 蚀变提取与 DEM 地形分析数据, 对浙江板桥离子吸附型稀土矿床开展遥感预测, 通过坡度阈值筛选与风化矿物异常识别, 所圈定找矿靶区经钻探验证均见矿。Li 等[48]集成 ASTER、Sentinel-2、ALOS DEM 与 GF-3 SAR 多源遥感数据, 对云南普雄碱性岩风化壳型稀土矿进行 Nd<sup>3+</sup>离子反演, 结合粘土矿物蚀变信息圈定了高品位稀土矿化区。Ke 等[49]利用地面高光谱测量数据, 通过多元统计建模对离子型稀土矿开展稀土元素总量及单一元素定量反演, 构建了较高精度的预测模型。

此外, 其他研究进一步拓展了高光谱遥感在稀土矿物识别与填图中的应用。郭东旭等[50]利用 VNIR-SWIR-TIR 高光谱数据, 以牦牛坪稀土矿床矿物颗粒粗大的矿石、大陆槽和白云鄂博含氟碳铈矿矿石为研究对象, 总结了氟碳铈矿、独居石等稀土矿物光谱特征, 建立矿区岩矿石光谱库, 实现了岩矿中稀土矿物的精准识别。Rowan and Mars [51]利用 ASTER 多光谱数据, 通过波段比值与主成分分析技术, 对美国

Mountain Pass 矿床开展羟基化、碳酸盐化蚀变识别, 圈定了与稀土矿化密切相关的蚀变晕范围。Chandra-sekar 等[52]利用 Landsat 7 ETM+多光谱数据, 通过波段比值与主成分分析识别印度南部海岸砂矿中独居石等稀土重矿物特征, 实现了沿岸稀土砂矿富集区的快速圈定。



**Figure 2.** Spatial distribution and relative abundance of rare earth elements in a certain area of California. (a) Neodymium anomaly map; (b)-(f) Neodymium anomaly alteration overlay maps (Asadzadeh *et al.*)

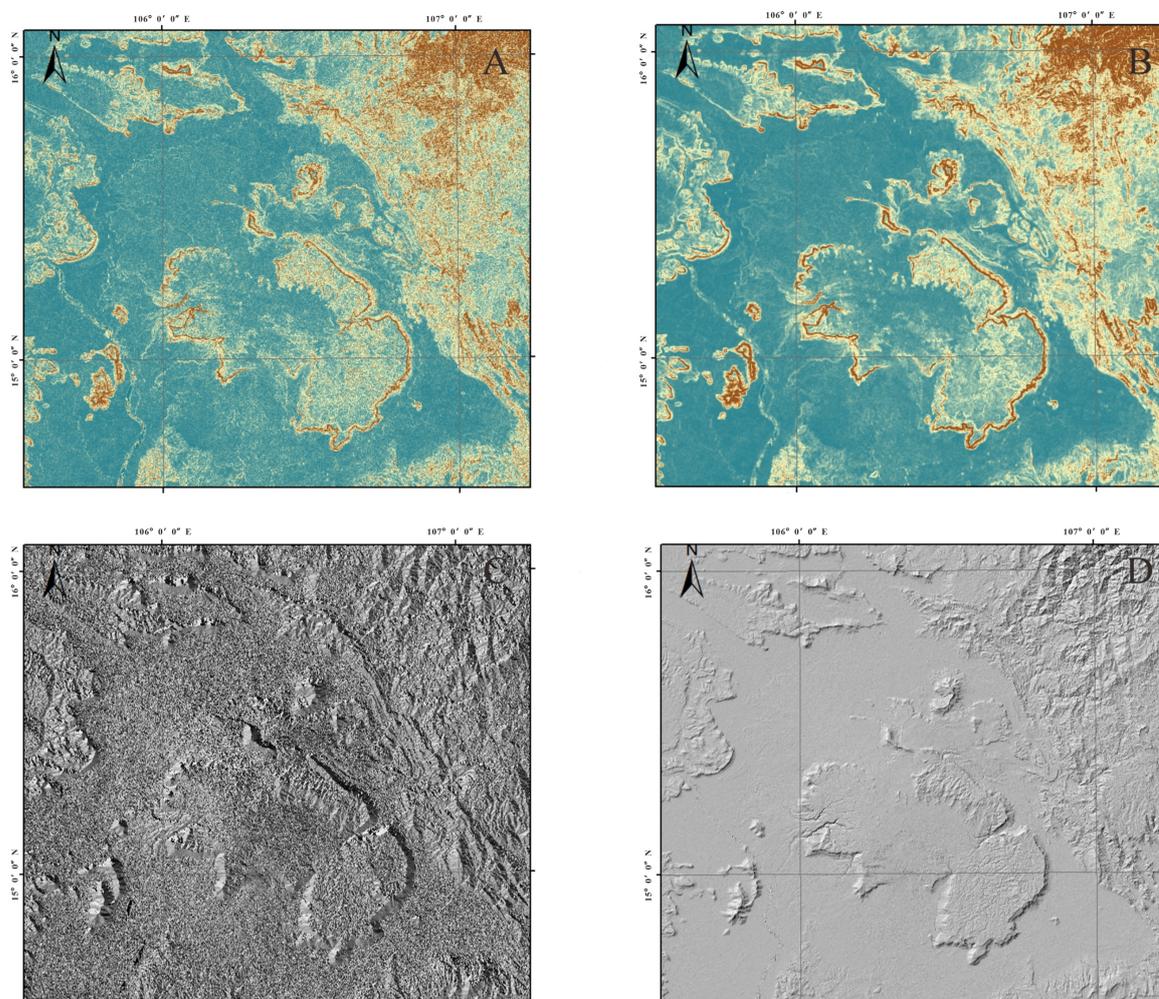
**图 2.** 加利福尼亚州某地区稀土元素的空间分布与相对丰度。(a) 钕异常图; (b)-(f) 钕异常蚀变叠加图(Asadzadeh *et al.*)

### 3.2. 多源遥感技术在红土型铝土矿床找矿中的应用

遥感技术基于铝土矿诊断性光谱特征, 已成为其快速勘查的重要手段。一系列研究表明, 融合多光谱、高光谱与地质数据, 可有效圈定矿化异常与找矿靶区。

成功等[53]利用 ETM+/ASTER 数据, 提取三水铝石在 2.16~2.33  $\mu\text{m}$  短波红外波段的羟基诊断性吸收谱带, 采用 5/1 比值运算、主成分分析与光谱角填图技术在老挝圈定 3 个大型矿带(图 3); 沈杜衡等[54]通过高-多光谱融合数据, 通过主成分分析筛选出与玄武岩风化壳密切相关的铝土矿化异常, 在柬埔寨共圈定 5 个一级找矿靶区, 其中 2 处经野外验证为中型铝土矿床; Ghrefat 等[55]基于 ASTER 多光谱数据与地面反射光谱测量, 通过聚焦铝土矿物在 2.2  $\mu\text{m}$  附近的羟基诊断性吸收谱带, 在沙特阿拉伯成功识别 3 处矿化异常区。黄志强等[56]利用 Landsat ETM+数据, 采用 NDVI 植被指数, 结合羟基吸收特征提取矿化异常, 并叠加岩性、构造、地形及植被指数等多层控矿要素进行 GIS 空间叠置分析, 在广西预测出 12 处铝土矿资源潜力区。刘建楠[57]基于 ASTER 多光谱数据, 应用改进的 Crosta 方法提取与成矿相关的蚀变异常, 结合岩溶地形的构造与岩性解译结果, 构建“岩性-构造-地形-遥感异常”四位一体找矿模型, 在滇东南文山地区圈定 7 处找矿靶区, 工程验证新增资源量 5000 万吨。因此, 遥感技术通过

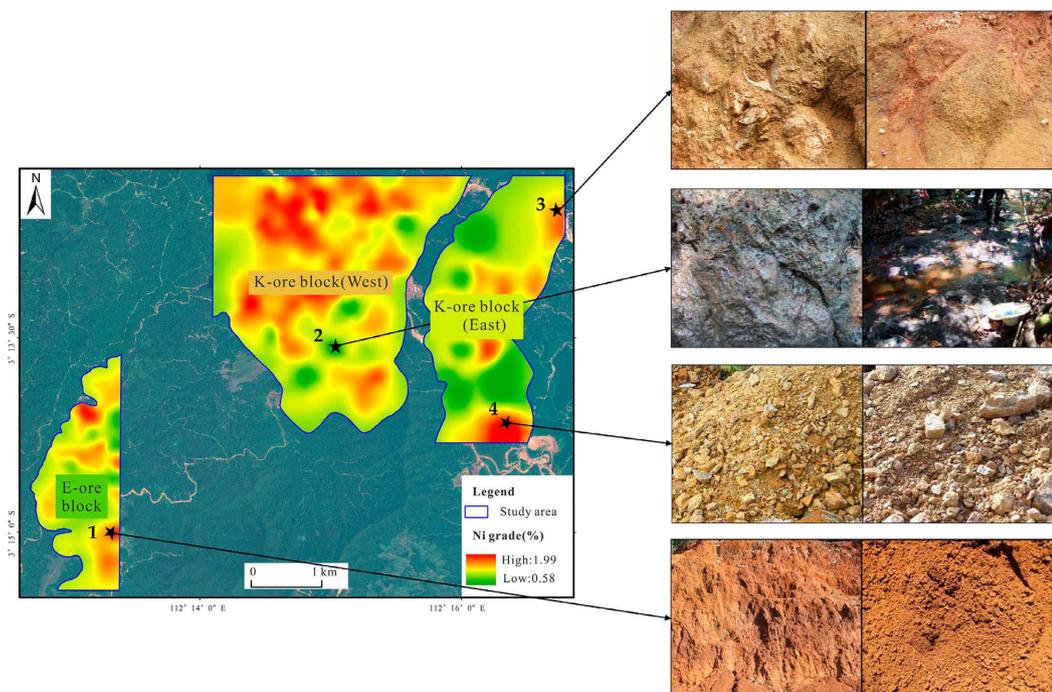
多源数据融合与先进处理方法, 在铝土矿勘查中展现出高效识别与定量反演能力, 显著提升了铝土矿勘查的效率和精度, 为矿产资源勘探提供了科学支撑。



**Figure 3.** Maps of slope (A), Topographic relief (B), Aspect (C), and Hillshade (D) of the Bolaven plateau  
**图 3.** 波罗芬高原坡度 (A)、地形起伏度 (B)、坡向 (C)、山体阴影图 (D)

### 3.3. 多源遥感技术在红土型镍矿床找矿中的应用

近年来, 遥感技术已成为红土型镍矿勘查与评价的重要手段。众多学者基于多源、多尺度遥感数据, 发展了多种镍矿信息提取与定量反演方法, 取得了显著进展。Zhang 等[58]利用 WorldView-3 高光谱数据对印度尼西亚北科纳威红土型镍矿构建了随机森林机器学习模型, 基于光谱特征与镍品位间的非线性关系完成找矿靶区圈定, 其镍品位预测精度可达  $R^2 = 0.82$  (图 4)。此外, Elsy 等[59]还利用 Sentinel-2 影像对新喀里多尼亚红土型镍矿进行了矿物化学预测研究, 通过对比 Ridge、Elastic Net 和 LASSO 三种广义线性回归模型, 发现 LASSO 模型对镍含量的预测效果最优, 相关系数  $R^2$  达 0.78。Anifadi 等[60]基于 Sentinel-2 MSI 多光谱数据, 采用线性光谱混合分析方法, 提取了希腊中部 Tsouka 红土型镍矿的褐铁矿、腐岩及基岩等端元信息, 实现了矿体边界识别, 解译结果与已知采矿区的吻合度达到 90%。陈理等[61]则采用面向对象的分类方法, 基于 Pleiades 与高分二号高分辨率影像, 实现了缅甸达贡山镍矿区采矿场、排土场等地物要素的高精度提取。



**Figure 4.** Schematic diagram of remote sensing inversion of Ni grade and field verification map in the Beikenawei mining area [58]

**图 4.** 北科纳威矿区遥感反演 Ni 品位示意图及野外验证图[58]

#### 4. 多源遥感技术在风化矿产资源开采现状调查中的应用

遥感技术凭借快捷、精准的监测优势,可全面掌握矿山开采的基本动态,为相关部门开展矿山规范化管理、严厉打击非法开采活动提供重要技术支撑与数据依据[62][63]。通过解析遥感影像光谱、纹理特征及 DEM 数据,可实现开采区精准识别与边界圈定,构建开采区空间分布图;进一步识别不同矿种对应的开采方式与开采状态,量化测算开采规模与强度;在此基础上,系统排查各类违法违规开采行为,同步监测开采区生态环境破坏程度,识别并动态监测地质灾害隐患、开展灾情评估,全方位为风化矿产开采调查与监管工作提供高效技术支撑。

刘晓雪等[64]以山西省矿区为研究区,融合高分卫星遥感影像与 ArcGIS 技术,建立铝土矿等典型矿种解译标志,识别 2021 年度无证开采 109 处、越界开采 102 处,为矿政执法提供数据支撑。殷亚秋等[65]研究利用 Landsat 系列卫星 2000~2018 年数据,结合高分二号影像,系统评估了长江经济带 4.2 万公顷废弃矿山的生态破坏状况,研究构建了“生态破坏指数”,为生态修复提供了决策依据。吴宏安等[66]研究利用 FS-InSAR 技术对新井露天矿 2021~2023 年的形变进行精细监测,发现北帮中部和西侧边坡、南帮西侧边坡变形严重,存在坍塌风险。结合无人机三维建模,识别出 6 处高风险区域,及时采取了加固措施,避免了可能的人员伤亡和财产损失。

#### 5. 多源遥感技术在风化矿产资源环境监测中的应用

遥感技术作为矿山环境监测的重要技术手段,在风化矿产矿区环境监测中,可有效开展矿区土地、水体、植被的动态变化监测及矿山地质灾害监测工作[67]。风化矿产开采过程多涉及地表剥离、风化层开挖、浸矿作业等,易引发水体污染、土地破坏、植被退化及地质灾害等环境问题,遥感技术凭借大面积覆盖、非接触式调查、快速动态监测、多源数据融合分析的独特优势,可实现对矿产资源开采区环境的

全方位、常态化、定量化监测, 精准捕捉环境变化趋势, 为矿产资源绿色开发、生态环境治理与监管提供科学的数据支撑和技术保障, 已成为矿产资源环境监测的核心技术手段[68] [69]。

李佳琦等[70]基于国产高空间分辨率 GF-1 卫星影像, 系统分析污染河段的空间解译特征与水体光谱特征, 构建污染水体遥感识别指标体系, 补充并完善了城市污染水体遥感识别的理论方法体系与技术体系。马秀强[71]通过多期卫星遥感数据, 分析并提取了水体的影像波谱、灰度等特征信息, 构建水体污染信息梯度图像, 对研究区水体污染信息进行了详细调查和研究。彭燕等[72]选用 2000~2010 年多时相 SPOT 1/2/5、ALOS、Landsat7 等多源遥感影像对赣南多地稀土矿矿区的生态环境进行遥感监测和评估, 准确地了解矿山开采状况和矿山环境信息, 为矿区土壤侵蚀治理提供了数据支撑。马顶等[73]利用多源遥感影像和麦克劳林公式的土地损伤测度模型提取了山西省 2005、2015、2019 年植被覆盖、土地破坏及地表形变信息, 实现了矿区土地损伤的动态变化监测。

马保东等[74]根据矿区的区域环境类型, 基于 SPOT-VGT NDVI (遥感数据源)的矿区植被监测方法, 利用一元线性回归分析和 NDVI 反演的植被覆盖度有效监测矿区植被覆盖度和土地荒漠化变化情况(图 5)。杨显华等[75]基于 1.5 m 空间分辨率的 SPOT6 卫星遥感数据, 对四川省冕宁牦牛坪稀土矿开展矿山开发状况与矿山环境信息提取工作, 精准识别矿区地质灾害、环境污染等系列环境问题, 综合分析后完成矿区环境恢复治理区规划, 并提出对应的综合治理对策与建议。

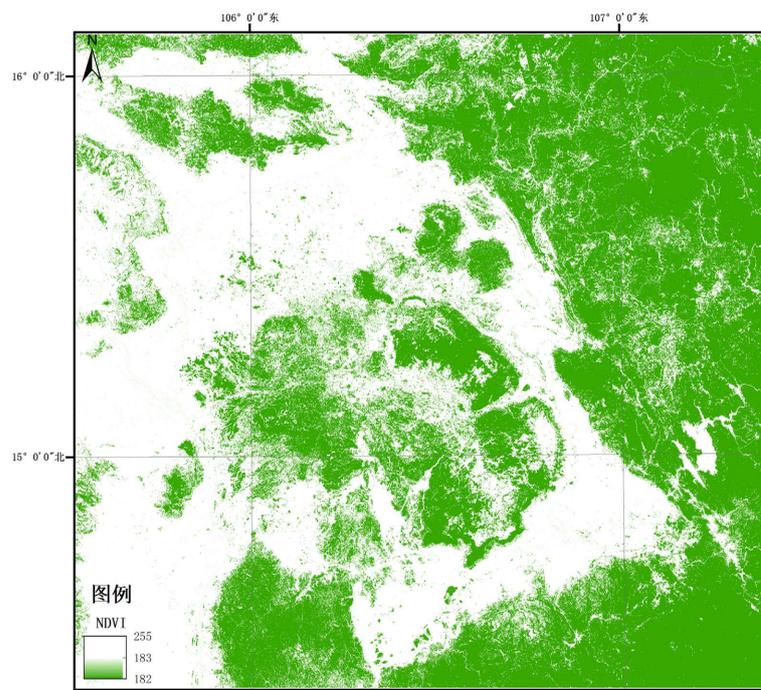


Figure 5. NDVI vegetation coverage of the Bolaven Plateau

图 5. 波罗芬高原 NDVI 植被覆盖度

## 6. 多源遥感技术在风化矿产资源中的存在问题及发展前景

风化矿床作为表生地质作用下形成的重要矿产资源, 其空间展布、蚀变分带与资源富集特征的精准识别, 是保障矿产资源绿色勘查与高效开发的核心前提。多源遥感技术通过融合光学、高光谱、合成孔径雷达(SAR)、热红外等多类型传感器数据, 实现了对风化矿床地表特征、蚀变矿物组合、地形地貌的无接触、大尺度、快速探测, 突破了传统地质勘查方法在复杂地形区的应用局限。然而, 当前多源遥感技

术在风化矿床勘查中的应用仍面临诸多问题: 高光谱遥感信噪比(SNR)不足, 难以捕捉微弱蚀变信息, 易导致矿化异常的漏判与误判; 多源遥感数据获取与预处理适配性不足, 易受地表因素(如植被、大气等)干扰; 矿化蚀变信息提取缺乏专用方法与模型, 低品位矿识别难度大; 以目视解译为主, 主观性强、效率低下, 且解译结果与控矿地质规律融合度不足; 相关基础研究相对薄弱, 多源遥感勘查的标准化体系尚未完善, 专用数据库建设滞后。

尽管存在许多问题, 多源遥感技术在风化矿产资源勘查领域的发展前景依然广阔, 且往智能化、精细化、体系化与可持续化方向稳步发展。深度学习、机器学习算法有望实现矿化异常智能识别与精准分类, 大幅提升信息解译自动化水平与精准度。其次, 传感器技术的进步正不断拓展探测维度。新一代高光谱卫星(如 NASA 的 EMIT)可提供连续的地物波谱, 实现对特定蚀变矿物(如绿泥石化、绢云母化)的精细识别。再次, 通过卫星遥感进行区域成矿带扫描, 无人机遥感实现成矿靶区精细探测, 以及地面光谱仪实地验证, 形成“天-空-地”协同观测体系, 优化勘查资源配置。最后, 遥感技术具备对矿山环境(如水体污染、土地破坏、植被恢复)进行长时序、大范围动态监测, 为绿色矿山建设、生态修复评估提供了重要的数据支撑。

随着遥感技术的不断发展与应用成本的逐步下降, 多源遥感技术有望推动风化矿产资源勘查向更高效、更精准、更环保的方向转型, 最终成为支撑矿产资源可持续开发利用的关键技术, 为我国矿产资源安全保障提供重要技术支撑。

## 参考文献

- [1] Valetton, I. (1994) Element Concentration and Formation of Ore Deposits by Weathering. *Catena*, **21**, 99-129. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(94\)90006-x](https://doi.org/10.1016/0341-8162(94)90006-x)
- [2] Novikov, V.M., Boeva, N.M., Bortnikov, N.S., Zhukhlistov, A.P., Krupskaya, V.V. and Bushueva, E.B. (2018) Chai Mat Kaolin-Bauxite Deposit (South Vietnam): Typomorphic Features of Kaolinite and Formation Mechanism of the Zonal Profile of the Bauxite-Bearing Weathering Crust of Granites. *Geology of Ore Deposits*, **60**, 513-526. <https://doi.org/10.1134/s107570151806003x>
- [3] 陈喜峰. 全球铝土矿资源分布特征、勘查开发格局及展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(7): 59-68.
- [4] 胡鹏, 张海坤, 程湘. 东南亚地区地质成矿特征及找矿潜力分析[J]. 华南地质与矿产, 2019, 35(1): 20-30.
- [5] 张海坤, 胡鹏, 姜军胜, 等. 铝土矿分布特点、主要类型与勘查开发现状[J]. 中国地质, 2021, 48(1): 68-81.
- [6] 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(S1): 271-273.
- [7] 高慧, 吴文贤, 张建龙. 西南山区遥感蚀变异常信息提取综合研究——以云南酒房地区为例[J]. 沉积与特提斯地质, 2017, 37(4): 107-112.
- [8] 代雪健, 聂飞, 董航, 等. 攀西裂谷带德昌地区多源遥感地质解译与蚀变信息提取研究[J]. 沉积与特提斯地质, 2025, 45(4): 833-845.
- [9] 杨金中, 方洪宾, 张玉君, 等. 中国西部重要成矿带遥感找矿异常提取的方法研究[J]. 国土资源遥感, 2003(3): 50-53.
- [10] Liang, S., Zheng, W., Chen, G., Zhang, P., Zhang, D., BI, H., et al. (2022) Late Quaternary Slip Behavior of the Jin-qianghe Fault in the Middle Qilian-Haiyuan Fault Zone, Northeastern Tibetan Plateau. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, **96**, 825-843. <https://doi.org/10.1111/1755-6724.14855>
- [11] 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.
- [12] 杨映春, 李云平, 曹有全. 基于 Landsat 8 和高分一号卫星数据的青海巴尔达吾地区铅、镍多金属矿化信息提取[J]. 矿产勘查, 2024, 15(10): 1824-1833.
- [13] 吴畅宇, 代晶晶, 武广, 等. 大兴安岭南段多金属成矿带多源遥感蚀变信息提取研究——以内蒙古赤峰地区为例[J]. 地质与勘探, 2025, 61(2): 230-242.
- [14] Putri, R.A., de Santo, J. and Jogo, F.S. (2023) Geospatial Analysis Applied to Mineral Exploration: Remote Sensing,

- Gis, Geochemical, and Geophysical Applications to Mineral Resources. Elsevier Inc, 326 p.
- [15] 代晶晶. 埃塞俄比亚西部岩浆熔离型铁矿遥感找矿模型[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 380-386.
- [16] Dai, J., Wang, D., Dai, H., et al. (2018) Reflectance Spectral Characteristics of Rocks and Minerals in Jiajika Lithium Deposits in West Sichuan. *Rock and Mineral Analysis*, **37**, 507-517.
- [17] Pour, A.B., Hashim, M., Makoundi, C. and Zaw, K. (2016) Structural Mapping of the Bentong-Raub Suture Zone Using PALSAR Remote Sensing Data, Peninsular Malaysia: Implications for Sediment-Hosted/Orogenic Gold Mineral Systems Exploration. *Resource Geology*, **66**, 368-385. <https://doi.org/10.1111/rge.12105>
- [18] 代晶晶, 王登红, 王海宇. 我国三稀矿产资源遥感调查综述[J]. 地质学报. 2019, 93(6): 1270-1278.
- [19] 胡杰, 张莹, 谢仕义. 国产遥感影像分类技术应用研究进展综述[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(3): 1-13.
- [20] Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Kokaly, R.F., Sutley, S.J., Dalton, J.B., et al. (2003) Imaging Spectroscopy: Earth and Planetary Remote Sensing with the USGS Tetracorder and Expert Systems. *Journal of Geophysical Research: Planets*, **108**, Article No. 5131. <https://doi.org/10.1029/2002je001847>
- [21] Ding, H., Jing, L., Xi, M., Bai, S., Yao, C. and Li, L. (2023) Research on Scale Improvement of Geochemical Exploration Based on Remote Sensing Image Fusion. *Remote Sensing*, **15**, Article 1993. <https://doi.org/10.3390/rs15081993>
- [22] Mishra, G., Govil, H., Guha, A., Kumar, H., Kumar, S. and Mukherjee, S. (2024) Comparative Evaluation of Airborne AVIRIS-NG and Spaceborne PRISMA Hyperspectral Data in Identification and Mapping of Altered/Weathered Minerals in Jahazpur, Rajasthan. *Advances in Space Research*, **73**, 1459-1474. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.09.047>
- [23] De Boissieu, F., Sevin, B., Cudahy, T., Mangeas, M., Chevrel, S., Ong, C., et al. (2018) Regolith-Geology Mapping with Support Vector Machine: A Case Study over Weathered Ni-Bearing Peridotites, New Caledonia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **64**, 377-385. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.05.012>
- [24] 王桂珍, 张立福, 孙雪剑, 等. 基于 SREM 融合数据的矿物蚀变信息提取[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2015, 40(8): 1330-1338.
- [25] 祁昌炜, 董基恩, 程旭, 等. ZY-102D 高光谱数据在柴北缘荒漠区蚀变矿物填图及找矿中的应用[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 31-42.
- [26] 谭宏婕, 邱昆峰, 刘洪成, 等. 西秦岭李坝造山型金矿床围岩蚀变特征: 基于高分五号 02 星(GF-5B)星载高光谱数据信息提取[J]. 岩石学报, 2024, 40(6): 1784-1800.
- [27] 郭娜, 卓焯鑫, 周维瑞, 等. 西藏斑岩成矿系统蚀变矿物的高光谱响应及找矿指示[J]. 岩石学报, 2025, 41(5): 1490-1508.
- [28] 田青林, 潘蔚, 李瑶, 等. 基于小波包变换和权重光谱角制图的岩心高光谱蚀变信息提取[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(4): 41-46.
- [29] 曹旺, 毛亚纯, 文杰, 等. 基于高光谱图像的鞍山式铁矿区品位反演方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(12): 3494-3503.
- [30] 吴德文, 鲁佳, 杨自安, 等. 高光谱蚀变矿物与成矿元素异常耦合及定量反演研究[J]. 矿产勘查, 2025, 16(5): 1220-1230.
- [31] 秦绪文, 唐壮, 陈伟涛. 基于高分辨率卫星遥感技术的风化层厚度制图方法[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 195-201.
- [32] 叶发旺, 王建刚, 邱骏挺, 等. 面向地质应用的航空高光谱 CASI-SASI 数据大气校正方法对比研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(9): 2677-2685.
- [33] 王珊珊, 周可法, 周曙光, 等. 风化面、荒漠漆及地衣在岩矿表面对高光谱遥感的影响[J]. 地质科学, 2018, 53(2): 739-748.
- [34] 黄理善, 李学彪, 荆林海, 等. 基于遥感手段的高寒山区矿产资源远景区快速圈定与综合评价技术集成[J]. 中国地质, 2022, 49(1): 253-270.
- [35] 范玉海, 王辉, 杨兴科, 等. 基于高分辨率遥感数据的稀有金属矿化带勘查[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(1): 128-134.
- [36] 于彩虹, 李庆哲, 祁亚辉, 等. 中高空间分辨率多光谱遥感数据在坦桑尼亚鲁夸地区找矿预测中的应用[J]. 矿产勘查, 2015, 6(4): 478-486.
- [37] 白龙洋, 代晶晶, 王楠, 等. 基于 GF-5 卫星的西藏珠勒-芒拉地区矿物蚀变信息提取及找矿前景分析[J]. 中国地质, 2024, 51(3): 995-1007.
- [38] 朱建军, 付海强, 汪长城. 极化干涉 SAR 地表覆盖层“穿透测绘”技术进展[J]. 测绘学报, 2022, 51(6): 983-995.
- [39] 郑鸿瑞, 徐志刚, 甘乐, 等. 合成孔径雷达遥感地质应用综述[J]. 国土资源遥感, 2018, 30(2): 12-19.

- [40] 匡薇, 孙卫东, 常玲, 等. 合成孔径雷达遥感地质应用综述[J]. 西部资源, 2020(2): 141-143.
- [41] 李志忠, 陈圣波, 刘德长, 等. 近年国内外遥感地质找矿主要进展[J]. 西北地质, 2025, 58(3): 183-195.
- [42] Boesche, N.K., Rogass, C., Mielke, C., Herrmann, S., Körting, F., Papenfuß, A., *et al.* (2016) Hyperspectral Rare Earth Element Mapping of Three Outcrops at the Fen Complex, Norway. In: De Lima, I.B. and Filho, W.L., Eds., *Rare Earths Industry*, Elsevier, 235-265. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802328-0.00016-4>
- [43] Asadzadeh, S., Koellner, N. and Chabrilat, S. (2024) Detecting Rare Earth Elements Using EnMAP Hyperspectral Satellite Data: A Case Study from Mountain Pass, California. *Scientific Reports*, **14**, Article No. 20766. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71395-2>
- [44] Bedini, E. and Rasmussen, T.M. (2018) Use of Airborne Hyperspectral and Gamma-Ray Spectroscopy Data for Mineral Exploration at the Sarfartoq Carbonatite Complex, Southern West Greenland. *Geosciences Journal*, **22**, 641-651. <https://doi.org/10.1007/s12303-017-0078-5>
- [45] 代晶晶, 王瑞江, 王登红. 高空间分辨率遥感数据在离子吸附型稀土矿山调查中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2014, 29(6): 935-942.
- [46] 王耿明 黄铁兰, 朱俊凤, 徐燕君. 离子吸附型稀土矿资源潜力遥感定量预测——基于 SPOT5 数据的地貌研究[J]. 国土资源遥感, 2012(1): 127-131.
- [47] 章钦瑜, 张登荣, 黄国成, 等. 板桥稀土矿遥感找矿信息提取与矿产预测研究[J]. 国土资源遥感, 2012(1): 120-126.
- [48] Li, Y., Yuan, X., Gan, S., Mu, C., Lin, Z., Duan, X., *et al.* (2025) Environmentally Sustainable Lithium Exploration: A Multi-Source Remote Sensing and Comprehensive Analysis Approach for Clay-Type Deposits in Central Yunnan, China. *Sustainability*, **17**, Article 3732. <https://doi.org/10.3390/su17083732>
- [49] Ke, D., Wang, W., Mo, H., Ye, F., Chen, W., Zhang, W., *et al.* (2025) Hyperspectral Inversion of Rare Earth Element Concentration Based on SPA-PLSR Model. *Ore and Energy Resource Geology*, **18**, Article 100086. <https://doi.org/10.1016/j.oreoa.2025.100086>
- [50] 郭东旭, 史维鑫, 郭锐, 等. 高光谱(VNIR-SWIR-TIR)技术对碳酸岩型稀土矿床中氟碳铈矿的识别与应用[J]. 光谱学与光谱分析, 2025, 45(6): 1700-1711.
- [51] 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. *Remote Sensing of Environment*, **84**, 350-366. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(02\)00127-x](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(02)00127-x)
- [52] Chandrasekar, N., Mujabar, P.S. and Rajamanickam, G.V. (2011) Investigation of Heavy-Mineral Deposits Using Multispectral Satellite Data. *International Journal of Remote Sensing*, **32**, 8641-8655. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.545448>
- [53] 成功, 朱战军, 高泽润. ETM+与 ASTER 数据在老挝红土型铝土矿勘查中的应用[J]. 轻金属, 2012(10): 6-10.
- [54] 沈杜衡, 刘严松, 刘琦, 等. 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[J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(4): 481-489.
- [55] Ghrefat, H., Al Mutairi, Y., ElAraby, H., Galmed, M. and Mohamed, E. (2021) Using Reflectance Spectroscopy and Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Data to Identify Bauxite Deposits in Vicinity of Az Zabirah, Northern Saudi Arabia. *Arabian Journal of Geosciences*, **14**, Article No. 820. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07155-7>
- [56] 黄志强, 胡自宁, 龙斌, 等. GIS 空间叠置分析在广西红土型高铁三水铝土矿资源遥感地质调查中的应用[J]. 矿床地质, 2010(S1): 681-684.
- [57] 刘建楠. 滇东南文山地区铝土矿遥感资源评价[J]. 云南地质, 2010, 29(4): 444-447.
- [58] Zhang, G., Chen, Q., Zhao, Z., Zhang, X., Chao, J., Zhou, D., *et al.* (2023) Nickel Grade Inversion of Lateritic Nickel Ore Using Worldview-3 Data Incorporating Geospatial Location Information: A Case Study of North Konawe, Indonesia. *Remote Sensing*, **15**, Article 3660. <https://doi.org/10.3390/rs15143660>
- [59] Ibrahim, E., Barnabé, P., Ramanaidou, E. and Pirard, E. (2018) Mapping Mineral Chemistry of a Lateritic Outcrop in New Caledonia through Generalized Regression Using Sentinel-2 and Field Reflectance Spectra. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **73**, 653-665. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.004>
- [60] Anifadi, A., Sykioti, O., Koutroumbas, K., Vassilakis, E., Vasilatos, C. and Georgiou, E. (2024) Discrimination of Fe-Ni-Laterites from Bauxites Using a Novel Support Vector Machines-Based Methodology on Sentinel-2 Data. *Remote Sensing*, **16**, Article 2295. <https://doi.org/10.3390/rs16132295>
- [61] 陈理, 张仙, 李伟, 等. 基于分层次多尺度分割的缅甸达贡山镍矿矿区信息提取与动态变化监测[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 55-61.

- [62] 杨金中, 秦绪文, 聂洪峰, 等. 全国重点矿区矿山遥感监测综合研究[J]. 中国地质调查, 2015, 2(4): 24-30.
- [63] 刘立, 李长安, 高俊华, 等. 多源卫星遥感的湖南矿山违法开采时空变化[J]. 遥感学报, 2022, 26(3): 528-540.
- [64] 刘晓雪, 陈东磊, 黄旭红, 等. 遥感技术在矿山开采状况监测中的应用——以山西省为例[J]. 华北地质, 2023, 46(3): 82-88.
- [65] 殷亚秋, 杨金中, 汪洁, 等. 长江经济带废弃矿山占损土地遥感调查与生态修复对策[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 170-176.
- [66] 吴宏安, 张永红, 康永辉, 等. 利用 FS-InSAR 技术精细监测内蒙古新井露天矿地表形变[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, 49(3): 389-399.
- [67] 李万伦, 甘甫平. 矿山环境高光谱遥感监测研究进展[J]. 国土资源遥感, 2016, 28(2): 1-7.
- [68] 李飞跃, 李军, 肖武, 等. 中国矿区生态环境质量遥感评价研究进展[J]. 矿业科学学报, 2025, 10(3): 363-383.
- [69] 薛庆, 吴蔚, 李名松, 等. 遥感技术在辽宁省矿山环境监测中的应用[J]. 中国地质调查, 2016, 3(5): 54-59.
- [70] 李佳琦, 李家国, 朱利, 等. 太原市黑臭水体遥感识别与地面验证[J]. 遥感学报, 2019, 23(4): 773-784.
- [71] 马秀强. 高光谱遥感在大冶铜铁矿区水环境监测中的应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [72] 彭燕, 何国金, 张兆明, 等. 赣南稀土矿开发区生态环境遥感动态监测与评估[J]. 生态学报, 2016, 36(6): 1676-1685.
- [73] 马顶, 赵尚民. 山西省西山煤田土地损伤状况的动态监测[J]. 测绘科学, 2022, 47(5): 107-114.
- [74] 马保东, 陈绍杰, 吴立新, 等. 基于 SPOT-VGT NDVI 的矿区植被遥感监测方法[J]. 地理与地理信息科学, 2009, 25(1): 84-87.
- [75] 杨显华, 黄洁, 田立, 等. 基于高分辨率遥感数据的矿山环境综合治理研究——以冕宁牦牛坪稀土矿为例[J]. 国土资源遥感, 2015(4): 115-121.