

doi: 10.12029/gc20240206001

仝云霄, 栗旭升, 杨俊泉, 汪翡翠, 曹思琦, 魏佳林. 2026. 基于资源一号 02D 高光谱数据的蚀变矿物提取与找矿预测[J]. 中国地质, 53(1): 60–76.

Tong Yunxiao, Li Xusheng, Yang Junquan, Wang Feicui, Cao Siqi, Wei Jialin. 2026. Identification of alteration minerals and linear structures and prediction of metallogenic favorable area based on ZY-1-02D hyperspectral data[J]. Geology in China, 53(1): 60–76 (in Chinese with English abstract).

基于资源一号 02D 高光谱数据的蚀变矿物 提取与找矿预测

仝云霄^{1,2}, 栗旭升^{1,2}, 杨俊泉^{1,2}, 汪翡翠^{1,2}, 曹思琦^{1,2}, 魏佳林^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心(华北地质科技创新中心), 天津 300170; 2. 天津市海岸带地质过程与环境安全重点实验室, 天津 300170)

摘要:【研究目的】高光谱遥感技术能够根据光谱特征快速提取蚀变矿物和线性构造等信息, 基于高光谱遥感技术进行矿物识别等地质应用研究, 对于支撑新一轮找矿突破战略行动具有重要意义。【研究方法】选取内蒙古武川县赵井沟和虎头山地区为研究区, 使用资源一号 02D 卫星高光谱数据, 基于光谱沙漏技术提取了研究区蚀变矿物; 提取了研究区线性构造, 并分析了蚀变矿物和线性构造的空间分布特征。【研究结果】在研究区提取出赤铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、锂云母、黑云母、绿泥石、碳酸盐及高岭石共 8 种蚀变矿物, 同时提取了 127 条线性构造。研究区蚀变矿物和线性构造与地质体岩性关系密切, 多集中在特定地质体的局部地段, 其中线性构造提取结果主要分布于图像的不同色调分界面以及呈线状展布的异常带上, 整体效果较好。综合分析蚀变信息和线性构造遥感解译结果, 圈定了 6 个找矿远景区, 其中 4 个找矿远景区分布有已知矿脉, 吻合度较高, 证实了异常信息可以作为遥感找矿的依据。【结论】高光谱遥感不仅能够准确识别蚀变矿物信息, 也可清晰提取不同岩体、构造等地质体, 可为矿产资源勘查和地质调查工作提供强有力的技术支撑。

关键词: 高光谱遥感; 资源一号 02D 卫星; 蚀变矿物; 线性构造; 主成分分析; 地质调查工程; 矿产勘查工程

创新点: 本文使用资源一号 02D 高光谱数据提取了蚀变矿物与线性构造, 基于蚀变信息和线性构造遥感解译结果预测了找矿远景区, 证实了高光谱遥感技术在地质调查工作的可行性。

中图分类号: P627 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2026)01-0060-17

Identification of alteration minerals and linear structures and prediction of metallogenic favorable area based on ZY-1-02D hyperspectral data

TONG Yunxiao^{1,2}, LI Xusheng^{1,2}, YANG Junquan^{1,2}, WANG Feicui^{1,2}, CAO Siqi^{1,2}, WEI Jialin^{1,2}

(1. Tianjin Centre of China Geological Survey (North China Center for Geoscience Innovation), Tianjin 300170, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Coast Geological Processes and Environmental Safety, Tianjin 300170, China)

Abstract: This paper is the result of mineral exploration engineering.

收稿日期: 2024-02-06; 改回日期: 2024-12-31

基金项目: “稀有金属矿集区无人机高光谱快速探测评价体系构建”(H2326)及中国地质调查局项目(DD20230101)联合资助。

作者简介: 仝云霄, 男, 1994 年生, 硕士, 工程师, 主要从事 InSAR 形变监测和自然资源调查监测研究; E-mail: tyunxiao@126.com。

通信作者: 栗旭升, 男, 1994 年生, 博士, 工程师, 主要从事图像处理及遥感信息提取研究; E-mail: saintlxs@foxmail.com。

[Objective] Hyperspectral remote sensing technology enables the rapid extract of information on alteration minerals and linear structures based on their unique spectral features, and is significant for supporting the next round of prospecting breakthroughs. **[Methods]** This study focuses on the Zhaojinggou and Hutushan areas in Wuchuan County, Inner Mongolia. The alteration minerals were extracted based on spectral hourglass technology using ZY-1-02D satellite hyperspectral data. The linear structures of the study area were extracted by conducting principal component analysis (PCA) and LINE module in PCI Geomatica. Furthermore, the spatial distribution characteristics of altered minerals and linear structures were analyzed. **[Results]** Eight types of alteration minerals were identified—hematite, low aluminum sericite, medium aluminum sericite, lepidolite, biotite, chlorite, carbonate and kaolinite—and 127 linear structures were extracted from the study area. It is found that the alteration minerals and linear structures in the study area are closely related to the lithology of the geological body, and most of them are concentrated in the local section of the specific geological body. The extraction results of linear structures are mainly distributed on the interface of different tones and the abnormal zone with linear distribution in the image, indicating a good overall extraction effect. Based on the comprehensive analysis of alteration information and linear structure, 6 prospecting areas have been delineated, four of which coincide with known ore veins, indicating high consistency and confirming that such anomalies can serve as a basis for remote sensing prospecting. **[Conclusions]** Hyperspectral remote sensing can not only accurately identify altered mineral information, but also clearly extract different rock mass, structure, and other geological bodies, providing strong technical support for mineral resources exploration and geological investigation.

Key words: hyperspectral remote sensing; ZY-1-02D satellite; alteration minerals; linear structures; principal component analysis (PCA); geological survey engineering; mineral exploration engineering

Highlights: In this paper, alteration minerals and linear structures are extracted using the ZY-1-02D hyperspectral data, and the prospecting prospect areas are predicted based on the remote sensing interpretation results of alteration information and linear structures, which confirms the feasibility of hyperspectral remote sensing technology in geological investigation.

About the first author: TONG Yunxiao, male, born in 1994, master, engineer, mainly engaged in the research of InSAR deformation monitoring and natural resources survey monitoring; E-mail: tyunxiao@126.com.

About the corresponding author: LI Xusheng, male, born in 1994, doctor, engineer, mainly engaged in the research of image processing and remote sensing information extraction; E-mail: saintlxs@foxmail.com.

Fund support: Supported by “the Construction of A Rapid Detection and Evaluation System for Rare Metal Mineral Concentration Areas Using Unmanned Aerial Vehicles with Hyperspectral Technology” (No.H2326) and the project of China Geological Survey (No.DD20230101).

1 引言

矿产资源是经济社会发展的重要物质基础, 矿产资源勘查开发事关国计民生和国家安全。中国诸多重要矿产资源属于隐伏矿床, 勘查难度较大, 当前新一轮找矿突破战略行动已全面启动, 对矿产勘查新技术方法提出了更高要求(李万伦等, 2023; 尹传凯等, 2024)。围岩蚀变是热液矿床成矿作用发生的重要特征, 由于蚀变围岩与正常围岩的矿物成分、化学成分、岩石组构和颜色等有差异, 使得蚀变成为非常有效的找矿标志(唐超等, 2013; 吴畅宇等, 2023)。与传统地质、地球物理和地球化学方法相比, 遥感技术具有快速、经济、高效的优势, 可以快速圈定找矿靶区, 为找矿勘探工作提供方向, 利

用遥感影像提取热液蚀变信息已经成为地质找矿的实用手段(宋坤等, 2022; 汪周鑫等, 2023)。

高光谱遥感结合了遥感技术和光谱学, 是遥感学科的前沿领域, 具有“图谱合一”的特点(成宝芝等, 2021; 王聪聪等, 2023), 不仅能够提供地面空间大尺度影像, 而且能在像元尺度上精细探测地表矿物种类和丰度(王润生等, 2010; 董新丰等, 2020)。目前, 高光谱遥感技术已广泛应用于矿物识别、蚀变与线性构造提取、地质填图等领域(Kruse et al., 2006; 刘德长等, 2017; 董新丰等, 2018), 并在找矿预测、扩大找矿有利空间方面取得了显著成效(Samani et al., 2021; 赵志芳等, 2022)。近年来国际上高光谱卫星不断发射升空, 中国也相继发射了天宫一号、高分五号、珠海一号、资源一号 02D 等高

光谱卫星(Zhong et al., 2021; 李万伦等, 2023), 为新一轮找矿突破战略行动提供了丰富的遥感数据来源。中国的资源一号 02D 是当前世界上唯一能够提供短波红外数据的民用在轨卫星, 基于该高光谱卫星的地质应用研究较少(李娜等, 2020; 李根军等, 2021; 秦锦华等, 2024), 迫切需要加强该高光谱数据的应用研究。

本文以内蒙古武川县赵井沟和虎头山岩体及外围为重点研究区, 使用资源一号 02D 高光谱数据提取矿物蚀变与线性构造, 基于蚀变信息和线性构造遥感解译结果进行了找矿远景区预测, 探索了该高光谱数据矿物精细识别的地质应用效果。首先采用最小噪声分离(Minimum Noise Fraction Rotation, MNF)算法、纯净像元指数(Pixel Purity Index, PPI)算法和 N 维可视化(N-Dimensional Visualizer)算法提取端元波谱, 然后利用光谱特征拟合和匹配滤波算法确定端元光谱所属的矿物类别, 最后通过主成分变换, 将信息量最大的第一主分量导入 PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块, 提取了研究区线性构造, 解析高光谱蚀变矿物和线性构造的分布特征, 并圈定了 6 个找矿远景区, 结合已知地质矿产资料进行了验证分析, 以期为后续矿产资源调查提供参考。

2 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区武川县境内, 属于滨太平洋成矿域、华北陆块北缘东段成矿带, 具体位于华北克拉通北缘中段乌拉山—大青山的东部地区(图 1a)(聂凤军等, 2013)。区内发育有多时代地层序列, 主要发育有中元古界渣尔泰山群、石炭系拴马桩组和第四系地层, 其中渣尔泰山群和石炭系拴马桩组在区域内广泛分布, 岩性分别为千枚岩、板岩、变质砂岩、大理岩和片理化浅变质砾岩、杂色浅变质长石砂岩; 新太古界乌拉山群主要为斜长角闪岩、角闪斜长片麻岩、磁铁石英岩、变粒岩和大理岩; 古元古界二道凹群为变中基性火山—沉积岩, 其下部以石英片岩类为主夹大理岩, 上部以阳起石片岩为主夹大理岩(图 2; 李志丹等, 2019)。研究区断裂构造十分发育, 主要包括乌拉特前旗—呼和浩特、察右中旗—固阳和土默特左旗—固阳三大断裂构造(郑翻身等, 2005), 经历了强烈构造作用,

早期表现为韧性剪切带、褶皱为代表的韧性剪切变形, 晚期以脆性断裂和推覆构造为特征(鄂阿强, 2018; 席宏等, 2023), 复杂的岩浆活动和构造作用, 为成矿提供了良好的地质条件, 使得该区域成为华北克拉通北缘重要的成矿带。

研究区岩浆岩主要为古元古代闪长岩、二叠纪中粗粒花岗岩、白垩纪正长花岗岩, 其中白垩纪正长花岗岩与成矿密切相关(李雪等, 2021)。脉岩分布广泛, 种类较多, 有石英脉、含钨石英脉、花岗细晶岩脉、含天河石钠长花岗岩脉、含天河石花岗伟晶岩脉、花岗岩脉、闪长岩脉等, 各种岩脉均受原生构造裂隙的控制, 其中主要的赋矿岩石是含天河石钠长花岗岩, 其次为花岗细晶岩和天河石花岗伟晶岩, 含铌钽的主要矿物为铌钽铁矿, 次为钽锡石。近矿围岩浅部为栓马庄组的灰黑色浅变质含砾砂岩, 深部主要为石英闪长岩和少量花岗岩, 围岩蚀变主要为天河石化、云英岩化、硅化、绢云母化和碳酸盐化等(李志丹等, 2019)。

3 遥感数据源及处理

3.1 高光谱数据

资源一号 02D 卫星是中国自主建造并成功运行的首颗民用高光谱业务卫星, 是国家民用空间基础设施中新型对地观测卫星发展的又一重要成果, 于 2019 年 9 月 12 日在太原卫星发射中心成功发射(王建华等, 2022)。该卫星运行于太阳同步轨道, 轨道高度为 778 km, 可有效获取宽幅高光谱等遥感数据, 搭载有可见短波红外高光谱相机(Advanced HyperSpectral Instrument, AHSI)和可见光/近红外相机(Visible NearInfrared Camera, VNIC)。高光谱相机可获取幅宽 60 km、光谱范围 395~2501 nm、空间分辨率为 30 m 共 166 个波段的高光谱数据, 其中可见光近红外 76 个波段, 光谱范围 395~1040 nm, 光谱分辨率优于 10 nm; 短波红外 90 个波段, 光谱范围 1005~2501 nm, 光谱分辨率优于 20 nm(李娜等, 2020; 孙雨等, 2022), 高光谱载荷主要参数见表 1。

本研究使用的 1 景数据获取于 2022 年 10 月 21 日, 产品级别为 L1A 级, 产品号为 517829。整景影像无云雪覆盖, 研究区范围内影像清晰, 各岩性地层纹理、色调特征明显, 有利于遥感地质解译和信息提取(图 3)。

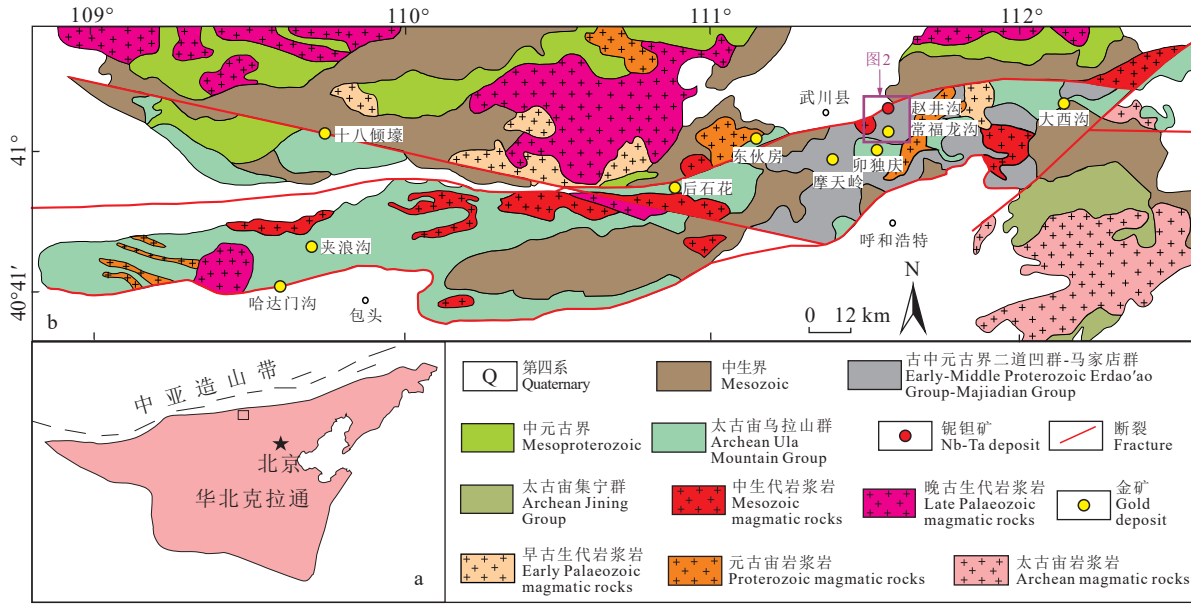


图 1 内蒙古乌拉山—大青山一带地质矿产简图(据李志丹等, 2019 修改)

Fig.1 Simplified geological map of the Wulashan-Daqingshan region, Inner Mongolia (modified from Li Zhidan et al., 2019)

3.2 数据预处理

数据处理是后续开展蚀变信息及构造提取的前提, 成像光谱对地物的识别依赖于地物精细的光谱特征, 为从图像中获取地物真实的光谱特征, 必须进行相关数据的预处理和增强处理, 涉及的预处理包括辐射定标、大气校正、条带去除、波段选择、正射校正及光谱去噪等, 数据处理流程见图 4。

3.2.1 辐射定标

辐射定标将传感器记录的电压或数字量化值 (Digital Number, DN) 转换为绝对辐射亮度值, 或转换为与地表反射率、表面温度等物理有关的相对值, 分为绝对定标和相对定标。绝对定标是基于各种标准辐射源, 建立辐射亮度值与数字量化值之间的定量关系, 获取辐射定标系数。通常可用线性模型来表征二者之间的关系:

$$L_{\lambda} = \text{Gain} \cdot \text{DN} + \text{Offset} \quad (1)$$

式中: L_{λ} 为辐亮度 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \mu\text{m} \cdot \text{sr}$), DN 为像元值, Gain 和 Offset 分别为增益和偏移。原始影像数据中包含定标系数文件, 利用 ENVI 软件可获取各波段的定标系数, 再结合 Radiometric Calibration 工具可实现对原始数据的定标。

3.2.2 大气校正

大气中的气体分子和气溶胶等对电磁波有吸

收、散射作用, 影响进入传感器中电磁波的辐射亮度。FLAASH 模型是目前精度较高的大气校正算法, 广泛应用于多光谱和高光谱数据预处理中。本研究利用 FLAASH 模块对进行大气校正处理, 其主要参数设置如下: 传感器类型 (UNKNOWN-HSI), 传感器高度 (778 km), 地面高程 (1.5 km), 像素分辨率 (30 m), 大气模型 (中纬度夏天), 水汽吸收特征 (1135 nm), 气溶胶模型 (Rural), 初始能见度 (40 km), 且不分块处理。经过大气校正, 像元波谱曲线转化为地物真实的波谱曲线, 光谱曲线特征更为显著。

3.2.3 条带去除

采用“全局去条纹”方法去除影像中的条带噪声 (谭炳香等, 2005)。其原理为: 分别计算待处理图像第 k 波段 i 列的平均值 m_{ik} 和标准差 s_{ik} 以及参考图像第 k 波段 i 列的平均值 $\bar{m}_{ik}$ 和标准差 $\bar{s}_{ik}$, 矫正后图像第 k 波段的 i 列、 j 行的像元值 DN'_{ijk} 为:

$$\text{DN}'_{ijk} = \left(\bar{s}_{ik} / s_{ik} \right) \times \text{DN}_{ijk} + \left(\bar{m}_{ik} - \left(\bar{s}_{ik} / s_{ik} \right) m_{ik} \right) \quad (2)$$

式中: DN_{ijk} 为待处理图像像元亮度值, 实际计算中将参考图像的平均值 $\bar{m}_{ik}$ 和标准差 $\bar{s}_{ik}$ 用整个待处理图像的平均值和标准差表示, 经过处理影像的条带噪声得以有效去除。

3.2.4 波段选择

为减少质量较差波段以及可见光—近红外波

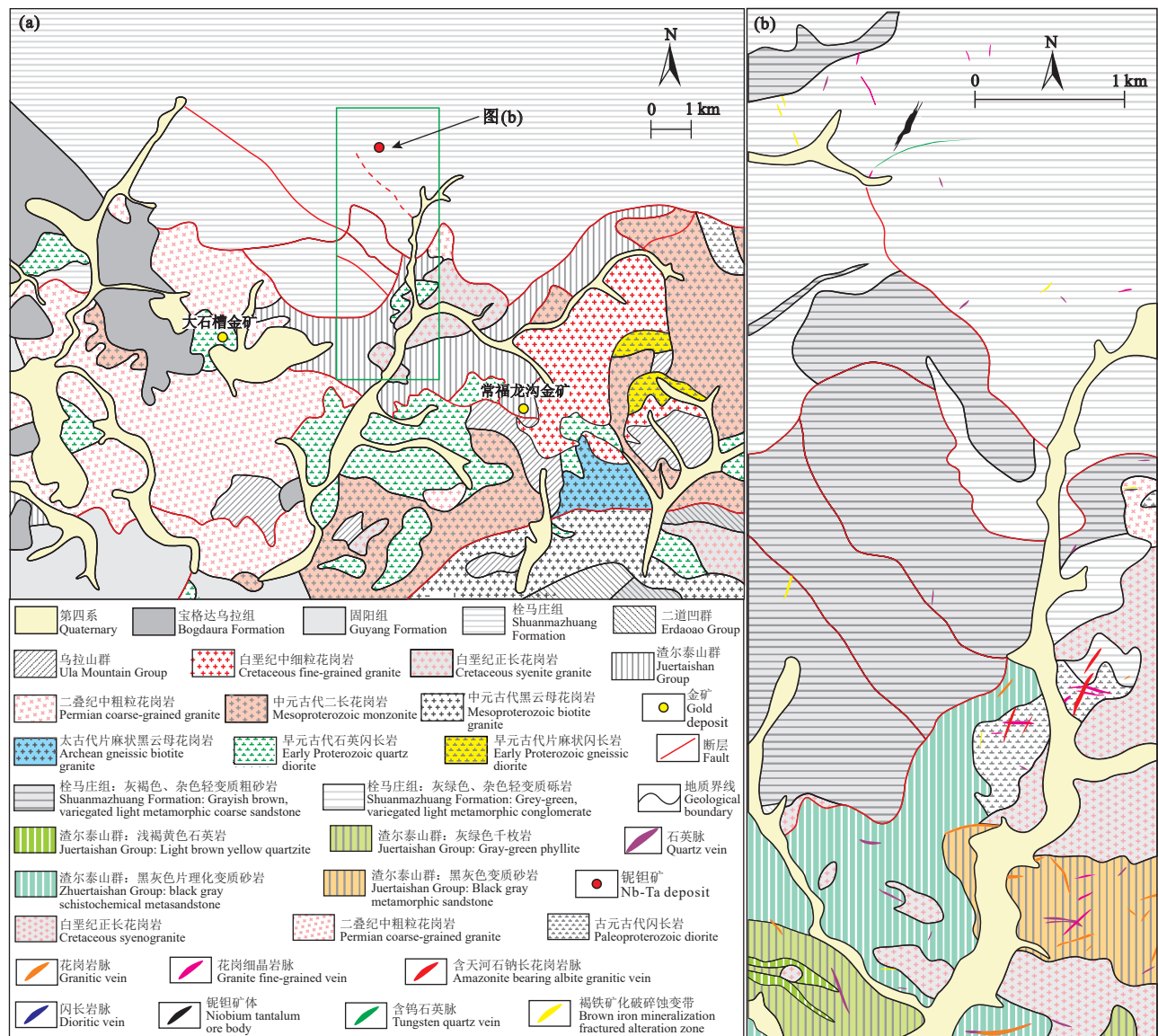


图 2 内蒙古赵井沟铌钽矿区地质图(据李志丹等, 2019 修改)
Fig.2 Geological map of Zhaojinggou Nb-Ta deposit, Inner Mongolia (modified from Li Zhidan et al., 2019)

表 1 资源一号 02D 高光谱载荷主要参数
Table 1 Main parameters of ZY-1-02D satellite hyperspectral payload

名称	参数	
	可见光近红外(VNIR)	短波红外(SWIR)
波段范围/nm	395~1040	1005~2501
光谱分辨率/nm	10	20
空间分辨率/m	30	30
波段数/个	76	90
幅宽/km	60	60
平均轨道高度/km	778	778
单星轨道回归周期/d	55	55

段与短波红外波段之间重复波段对提取结果的影响(Wan et al., 2020),同时考虑到阴离子与阳离子诊

断谱带的分段性(孙永彬等, 2018),本研究分别选取 400~1000 nm(共 70 个波段)和 2014~2451 nm(共 27 个波段)两个波谱区间段的影像数据分别进行研究。

3.2.5 正射校正和光谱去噪

正射校正可对影像同时进行倾斜改正和投影差改正,利用 ENVI 中的 RPC Orthorectification Workflow 模块进行正射校正处理,校正后的影像基于 WGS-84 椭球被投影到 UTM 投影。最后,采用 MNF 正反变换进行去噪和光谱平滑处理。

3.3 主成分分析

主成分分析 (Principal Component Analysis,

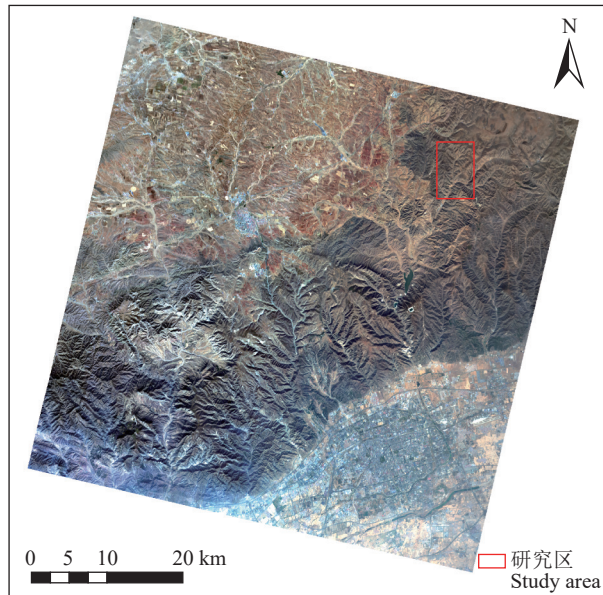


图 3 研究区资源一号 02D 高光谱影像图
Fig.3 ZY-1-02D remote sensing image of the study area

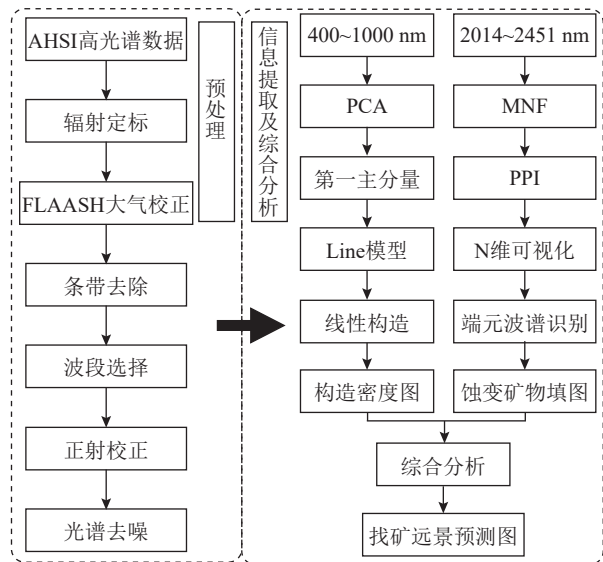


图 4 资源一号 02D 高光谱数据处理流程
Fig.4 Processing flow of ZY-1-02D hyperspectral data

PCA), 又称 K-L 变换, 是一种正交线性变换, 利用该变换能在保证数据总信息量不变的前提下, 去除各波段相关性得到一系列线性不相关的主分量, 各个主分量包含不同的有用信息, 同时使得主要信息集中于前面几个波段, 实现信息压缩、降维。主成分变换后, 第一主分量包含的信息量最多, 往后依次递减, 前几个主分量包含了绝大部分的信息, 后面的组分所含的有用信息非常少, 从而达到突出主

要信息、抑制噪声的目的, 实现了图像增强。由于主成分变换后各主分量之间不相关, 因而以不同主分量合成彩色合图像时, 可以生成更多颜色和饱和度更好的图像, 从而更有利于解译研究。本研究以 400~1000 nm 数据(共 70 个波段)进行主成分分析, 并选取第一主分量进行线性构造提取研究。

4 蚀变和构造信息提取

4.1 蚀变矿物光谱特征

利用成像光谱开展岩矿识别的关键在于岩矿的光谱特征。当太阳光照射到矿物表面时, 不同的物质化学成分和晶体结构会造成特定波长的入射光一部分被吸收, 另一部分则被反射或透射, 从而使其光谱曲线在吸收峰等方面具有一定独特性, 呈现出“诊断性”的光谱特征。这些光谱特征主要包括吸收位置、吸收深度、吸收面积、吸收宽度、吸收对称性、光谱斜率、光谱导数及光谱吸收数目等, 其中吸收位置、吸收深度和吸收对称性最为重要。

大量研究表明, 在可见光—短波红外光谱区间段(0.4~2.5 μm), 矿物吸收光谱特征产生的机理主要受电子跃迁和分子振动的影响, 且这两种作用发生于不同波谱区区间, 其中在 0.4~1.3 μm 波谱区区间内, 矿物的光谱特征受到物体内部电子与晶体场相互作用的影响, 主要表现为三个方面: 晶体场效应和电荷转移(如铁、钴、镍、铬、铜、锰等过渡性金属元素的电子跃迁)、金属卤化物中的色心、半导体材料中的导带跃迁。而在 1.3~2.5 μm 的波谱区区间内, 矿物的光谱吸收特征主要受阴离子基团振动过程的影响, 如组成矿物的水分子(H_2O)、羟基(OH^-)、碳酸根(CO_3^{2-})以及硫酸根(SO_4^{2-})等基团的振动(Hunt, 1970; 甘甫平等, 2003; van der Meer et al., 2012; 张成业等, 2015)。

矿物在可见光—短波红外范围内呈现的光谱吸收现象主要是由 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Al-OH 、 Mg-OH 、 $-\text{OH}$ 及 CO_3^{2-} 等引起, 各阳离子或官能团的特征谱带、主要矿物及吸收特征如表 2 所示。矿物之间诊断性特征的差异为利用光谱数据进行矿物的识别与提取奠定了坚实基础, 如矿物识别分层谱系方法就是在参照或借鉴矿物学的分类方法, 并根据光谱主要谱带特征及其成因的基础上构建的, 该方法成功识别了含 Fe^{2+} 矿物、含 Fe^{3+} 矿物、含 Mn^{2+} 矿物、

表 2 常见蚀变矿物特征谱带及吸收特征 (据卢燕, 2018 修改)

Table 2 Spectral bands and absorption characteristics of common altered minerals (modified from Lu Yan, 2018)			
阳离子和官能团	特征谱带/nm	主要矿物	主要吸收和次级吸收
Fe ²⁺	1000~1100	铁白云石	1060 nm, 1270 nm
		黄铁矿	1000 nm主吸收, 1000~1500 nm宽吸收
Fe ³⁺	600~900	赤铁矿	870 nm主吸收
		褐铁矿	950 nm主吸收
		针铁矿	1000 nm主吸收
Al-OH	2160~2210	叶腊石	2050 nm和2320 nm
		高岭石	2200 nm附近主吸收, 2160 nm次级吸收
		蒙脱石	2215 nm附近主吸收, 2440 nm的次级吸收
		白云母+伊利石	2205 nm附近主吸收, 2355 nm、2440 nm、2115 nm次级吸收
Fe-OH	2250~2300	绿泥石	2330 nm主吸收, 2386 nm、2224 nm两个次级吸收
Mg-OH	2300~2400	绿帘石	2330 nm主吸收, 2225 nm附近次级吸收
		滑石和透闪石	2290~2310 nm附近较宽的双峰谱带和2385 nm附近次级吸收
SO ₄ ²⁻	1700~2160	黄钾铁矾	2270 nm主吸收特征
		明矾石	2175 nm和2325 nm附近两个吸收特征
		石膏	1440~1550 nm主吸收, 1950 nm次级吸收
CO ₃ ²⁻	2335~2386	方解石	2330~2340 nm主吸收
		白云石	2310~2320 nm主吸收, 2140 nm次级吸收

含 Al-OH 矿物、含 Mg-OH 矿物、碳酸盐矿物和水合硫酸盐矿物等 7 类矿物(闫柏琨等, 2016)。此外, 由于高光谱相比较多光谱而言波段数众多, 光谱分辨率高, 因而可以识别由物质本身微小成分变化引起的光谱特征差异(Clark et al., 1990), 如绢云母(白云母)在 2200 nm 附近的 Al-OH 吸收峰对应的波长与云母中六次配位铝(Al^{VI})含量呈负相关(Clark et al., 1990), 据此可区分出低铝绢云母、中铝绢云母及高铝绢云母(叶发旺等, 2018; 董新丰等, 2020), 进而可反演成矿地质条件、温压条件以及成矿流体性质等。

4.2 蚀变矿物提取

蚀变矿物提取是高光谱遥感的主要研究内容之一, 国内外学者进行了广泛的研究(van der Meer et al., 2012; 孙永彬等, 2018), 其中基于特征提取、端元光谱选取和光谱相似性匹配的矿物信息提取技术(即沙漏技术)是最早发展的面向高光谱信息提取的技术(闫柏琨等, 2016), 其包括了最小噪声分离(MNF)、像元纯净指数(PPI)、N 维可视化、端元光谱识别以及矿物填图等, 在矿物填图领域广泛应用(孙雨等, 2015; Tripathi and Govil, 2019)。

4.2.1 最小噪声分离变换

MNF 变换是一种光谱数据降维技术, 其作用包括三个方面: 一是有用信息与干扰信息分离。MNF 变换后的分量按相应特征值由大到小排列, 实

现了信息和噪声的分离, 达到去噪的目的。如图 5a~h 所示, 经过变换前面分量影像清晰, 包含有用信息多, 而后面分量影像逐渐模糊, 噪声增加; 二是减少光谱数据的冗余。MNF 变换消除了原有光谱波段之间的相关性, 使有用信息集中在有限的少数分量中, 减少了数据的冗余度; 三是特征分离。地物光谱信息在 MNF 变换后特征向量空间中发生分离, 光谱在类特征向量集上汇聚, 一些微弱信息则在去噪转化中被增强, 增加了数据对地物的可分性, 提高了矿物识别的可信性。

4.2.2 纯净像元指数

PPI 可用于寻找高光谱图像中最“纯”的像元作为端元的备选, 通过 N 维散点图迭代映射为一个随机单位向量, 记录每次映射的极值像元及每个像元被标记为极值的总次数, 从而生成一幅“像元纯度图像”, 在这幅图像上, 每个像元的 DN 值表示像元被标记为极值的次数, 因此像元值越大, 表示这个像元的纯度越高, 设定阈值可以在 PPI 图像上确定纯像元的范围。

4.2.3 N 维可视化

PPI 的处理结果通常被输入到 N 维可视化器中进行端元波谱的提取。在 N 维可视化工具中, 实质是显示 N 维散点图, 一个 N 维数据到二维平面的映射。波谱可以被认为是 N 维散点图中的点, 点的坐标由 N 个值组成, 它们是每个波段对应的像元值,

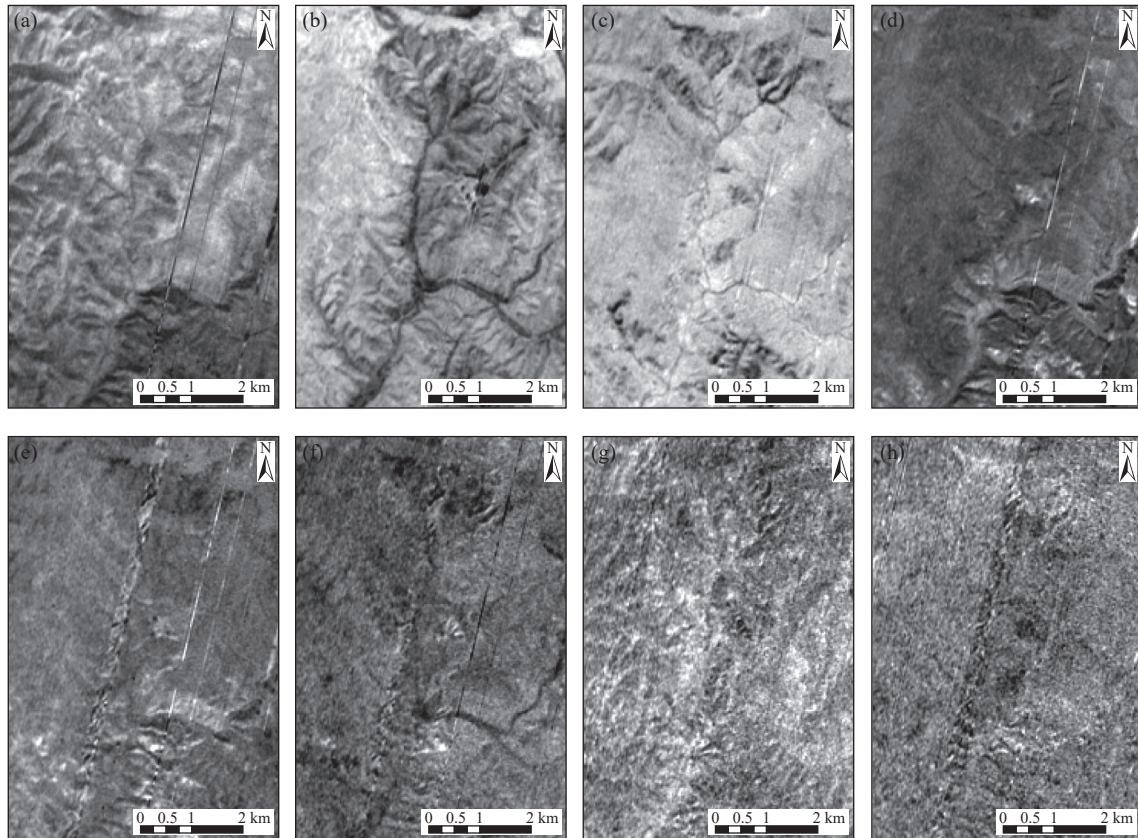


图 5 短波红外波段 MNF 变换后部分主分量特征

a—MN1; b—MN2; c—MN3; d—MN4; e—MN5; f—MN6; g—MN7; h—MN8

Fig.5 Partial principal component characteristics of shortwave infrared band after MNF transformation

通过散点在空间中的旋转对其进行观察与选择, 当许多点形成的集群或出现集群拐角时, 则认为是要提取的端元。

4.2.4 蚀变信息端元识别

在 N 维可视化工具分析提取出图像端元光谱后, 通过与 USGS 标准矿物光谱库中的光谱进行对比, 并结合专家知识, 确定各端元波谱所对应的蚀变矿物类型。具体方法为: 利用光谱特征拟合 (Spectral Feature Fitting, SFF) 进行光谱初步分析, 同时结合专家知识综合分析每条端元光谱的特征吸收位置、吸收深度、吸收宽度和光谱整体形态等, 最终确定端元光谱所属的矿物类别。本研究在短波红外波段共识别出 3 类地质意义明确的端元, 分别为低铝绢云母、中铝绢云母及高岭石, 在可见光—近红外波段识别 1 类地质意义明确的端元, 为赤铁矿。

中铝和低铝绢云母是从光谱学的角度对蚀变矿

物的分类, 以 2200 nm 附近 Al—OH 吸收谷波长大小进行区分。本研究识别的绢云母端元在 2350 nm 附近具有共同的次级吸收特征, 主吸收特征分别出现在 2216 nm 和 2233 nm, 据此将其分别划分为中铝绢云母和低铝绢云母(图 6)。

高岭石化学式为 $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$, 主要由长石和其他硅酸盐矿物风化或在酸性环境下形成, 属于 Al—OH 矿物, 在 2160 nm 附近形成次级吸收峰, 在 2200 nm 附近形成主吸收峰, 二者构成双吸收峰形态, 因而易与其他黏土矿物区分。本研究识别的高岭石端元分别在 2166 nm 和 2199 nm 出现次级和主吸收特征(图 6)。

赤铁矿 Fe_2O_3 属六方晶系氧化物矿物, 可形成于中、低温热液蚀变, 在这种蚀变过程中, 原围岩的铁镁矿物中的铁组分分解, 氧化为微小的赤铁矿晶体。同时, 也可从热液中结晶出部分赤铁矿。赤铁矿属于 Fe^{3+} 离子矿物, 其特征吸收峰位置位于 870 nm

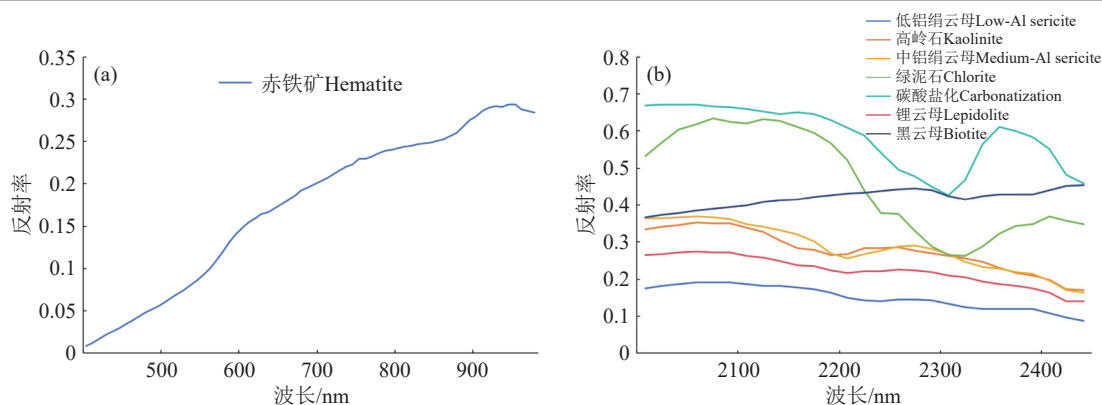


图 6 端元波谱曲线(a—VNIR 数据; b—SWIR 数据)
Fig.6 Spectral curve of endpoint (a—VNIR data; b—SWIR data)

附近。本研究识别的赤铁矿端元在 877 nm 附近存在吸收特征(图 6)。

为全面获取研究区端元波谱,本研究在上述波谱分析的基础上结合研究区地质背景从 USGS 波谱库中选取部分参考端元对初步建立的端元波谱库进行了扩充和完善。考虑到研究区蚀变类型主要有钠长石化、天河石化及云英岩化,另外有绢云岩化、硅化、碳酸岩化,局部见绿泥石化、钾化及高岭土化等。除去可见光—短波红外波段不能识别的长石类蚀变及硅化,本研究从 USGS 标准波谱库中选取了锂云母、黑云母、碳酸盐化及绿泥石光谱对原始端元进行补充,最终获取 8 类端元。

锂云母是最常见的锂矿物,是钾和锂的基性铝硅酸盐,属云母类矿物中的一种,一般产在花岗伟晶岩中。本研究识别的锂云母端元在 2216 nm 附近存在吸收特征(图 6)。

黑云母是云母类矿物中的一种,为硅酸盐矿物,主要产于变质岩中,在花岗岩等其他岩石中也存在。本研究识别的黑云母端元在 2334 nm 附近存在吸收特征(图 6)。

4.2.5 矿物填图

基于上述建立的参考端元,结合填图算法对参考端元和图像光谱进行处理和分析,实现矿物的种类、组成成分或者丰度的反演。填图算法大致可分为基于像素和亚像素方法(Guha, 2020),其中基于像素的光谱角匹配(Spectral Angle Mapper, SAM)和光谱信息散度(Spectral Information Divergence, SID),以及基于亚像素的混合调制匹配滤波

(Mixture Tuned Matched Filtering, MTMF)和匹配滤波(Matched Filtering, MF)等算法都得到了广泛应用。MF 是一种部分解混或光谱分解技术,用于在高光谱图像的每个像素中寻找感兴趣目标的丰度,可最大限度地提高感兴趣目标的响应,抑制复合未知背景的响应(Guha, 2020),其输出结果为匹配滤波得分,当得分越接近 1 表明像元光谱与参考目标越匹配。本研究利用 MF 进行蚀变填图,并结合中值滤波对提取结果进行优化,中值滤波核数值设置为 5。

4.3 线性构造提取

线性构造泛指航空照片和卫星照片上呈现的与构造有关的线形影像,包括节理、断裂构造、劈理、构造裂隙及构造破碎带等(Hobbs, 1904)。线性构造在遥感图像中主要表现为连续或不连续的线性体,由色调差异、地貌特征显示的非人工的线性影像和弧形影像组成,能大致反映一个地区的基本构造格局(张渊等, 2013)。此外,线性构造往往为成矿热液的上升、转移、凝固和富集提供了有利场所,是十分重要的控矿构造因素,研究线性构造对于成矿远景区的预测具有重要的意义(段俊斌等, 2019)。

从遥感影像中提取线性构造,除目视解译外,PCI Geomatica 软件中的 LINE 模块也常用于线性构造自动提取研究(Javhar et al., 2019),该模块以灰度影像为输入,通过边缘探测和线探测来实现线性构造提取,主要涉及 6 个参数(表 3)。本研究以 400~1000 nm 影像经过 PCA 变换后的第一主分量

表 3 LINE 模块不同参数及研究采用值
Table 3 Different parameters and research values of line module

参数	含义	单位	描述	采用值
RADI	滤波半径	像素	指定Canny边缘检测算子中用于梯度计算的高斯滤波器的半径大小	12
GTHR	边缘梯度阈值	无	边缘检测过程中, 作为边缘的梯度最小值, 该值越大, 图像中边缘越少	50
LTHR	曲线长度阈值	像素	被视为线性构造的最小长度	25
FTHR	线拟合阈值	像素	线段拟合形成线性构造时允许的最大误差	3
ATHR	角度差阈值	像素	定义要连接的2条多段线之间不能超过的角度。当2线段之间夹角大于该值时, 则不进行连接操作	20
DTHR	连接距离阈值	像素	指定两条线段之间进行连接处理的最大间距, 当超过该值时, 则不进行连接	1

作为输入, 以提取线性构造。

5 研究结果及找矿远景预测

5.1 蚀变矿物空间分布特征

本研究利用光谱沙漏技术分别从可见光—近红外和短波红外 2 个谱段, 提取了赤铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、锂云母、黑云母、绿泥石、碳酸盐及高岭石共 8 种蚀变矿物, 并结合阈值分割圈定各类蚀变异常, 其中阈值以“均值+n 标准差”的形式进行设置, 通过这些蚀变可以判断出矿体的位置和矿化的强弱, 蚀变矿物空间分布如图 7 所示。

结果显示, 赤铁矿主要呈团块状、星点状出露于研究区东南部区域, 其中在虎头山研究区有一定分布, 在赵井沟调查区有较少分布。在岩性地层上, 该类蚀变主要分布于早白垩世中粗粒黑云二长花岗岩($zcn\beta K_1$)、马家店群深灰色粉砂质板岩(Pt_2mj^1slat)及灰色、深灰色变质砂岩(Pt_2mj^1ss)中(图 7a)。

低铝绢云母主要呈团块状出露于研究区北部和南部, 而在研究区内部偶有分布。在地层岩性上, 该类蚀变主要分布于拴马桩组灰褐色、杂色变质砾岩(C_2shcg)及灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩(C_2shss)中(图 7b)。

中铝绢云母的空间分布与低铝绢云母空间分布相似, 但分布更为广泛, 主要呈团块状出露于研究区北部和南部。在研究区北部局部区段, 可见其位于低铝绢云母内部, 二者呈现套和的现象。此外, 在赵井沟调查区, 也见中铝绢云母大量分布。在岩性地层上, 该类蚀变主要出露于马家店群灰色、深灰色变质砂岩(Pt_2mj^1ss)、拴马桩组灰褐色、杂色变质砾岩(C_2shcg)及灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩(C_2shss)中(图 7c)。

锂云母主要呈斑状、星点状分布研究区南部及

北部地区。在赵井沟研究区, 锂云母分布较广, 可见天河石化钠长花岗(伟晶)岩脉附近出露该型蚀变。在虎头山研究区, 该型蚀变有一定分布, 主要出露于北侧天河石化钠长花岗(伟晶)岩脉周围。在岩性地层上, 该类蚀变主要出露于拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩(C_2shss)、马家店群灰色、深灰色变质砂岩(Pt_2mj^1ss)及早白垩世中粗粒黑云母二长花岗岩($zcn\beta K_1$)中, 局部在岩体边部及岩脉出露出富集(图 7d)。

黑云母主要呈星点状在研究区零星分布。在赵井沟研究区, 该型蚀变多见于天河石化钠长花岗(伟晶)岩脉附近。在虎头山研究区, 黑云母主要出露于该区西南角的早元古世闪长岩($Pt_1\delta$)中, 局部可见该类蚀变出露于早元古世闪长岩内部的花岗岩脉中。在岩性地层方面, 该型蚀变主要出露于各类脉体附近, 局部位于岩体于围岩接触部位(图 7e)。

绿泥石分布范围较小, 主要呈斑状零星出露于全区, 其在虎头山及赵井沟研究区均有一定分布。在岩性地层上, 主要出露于全区拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩(C_2shss)及灰褐色、杂色变质砾岩(C_2shcg)(图 7f)。

碳酸盐化主要呈斑状、星点状出露于全区, 在东部相对集中。在虎头山研究区, 其主要分布于岩体外围的地层中。在岩性地层上, 该类蚀变主要出露于拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩(C_2shss)及灰褐色、杂色变质砾岩(C_2shcg)中(图 7g)。

高岭石主要呈团块状、星点状出露于研究区南部。其在赵井沟研究区有零星分布, 在虎头山研究区分布范围较广。在岩性地层上, 其主要出露于早白垩世中细粒黑云二长花岗岩($zx\eta\beta K_1$)、早白垩世中粗粒黑云二长花岗岩($zcn\beta K_1$)及马家店群灰色、深灰色变质砂岩(Pt_2mj^1ss)中(图 7h)。

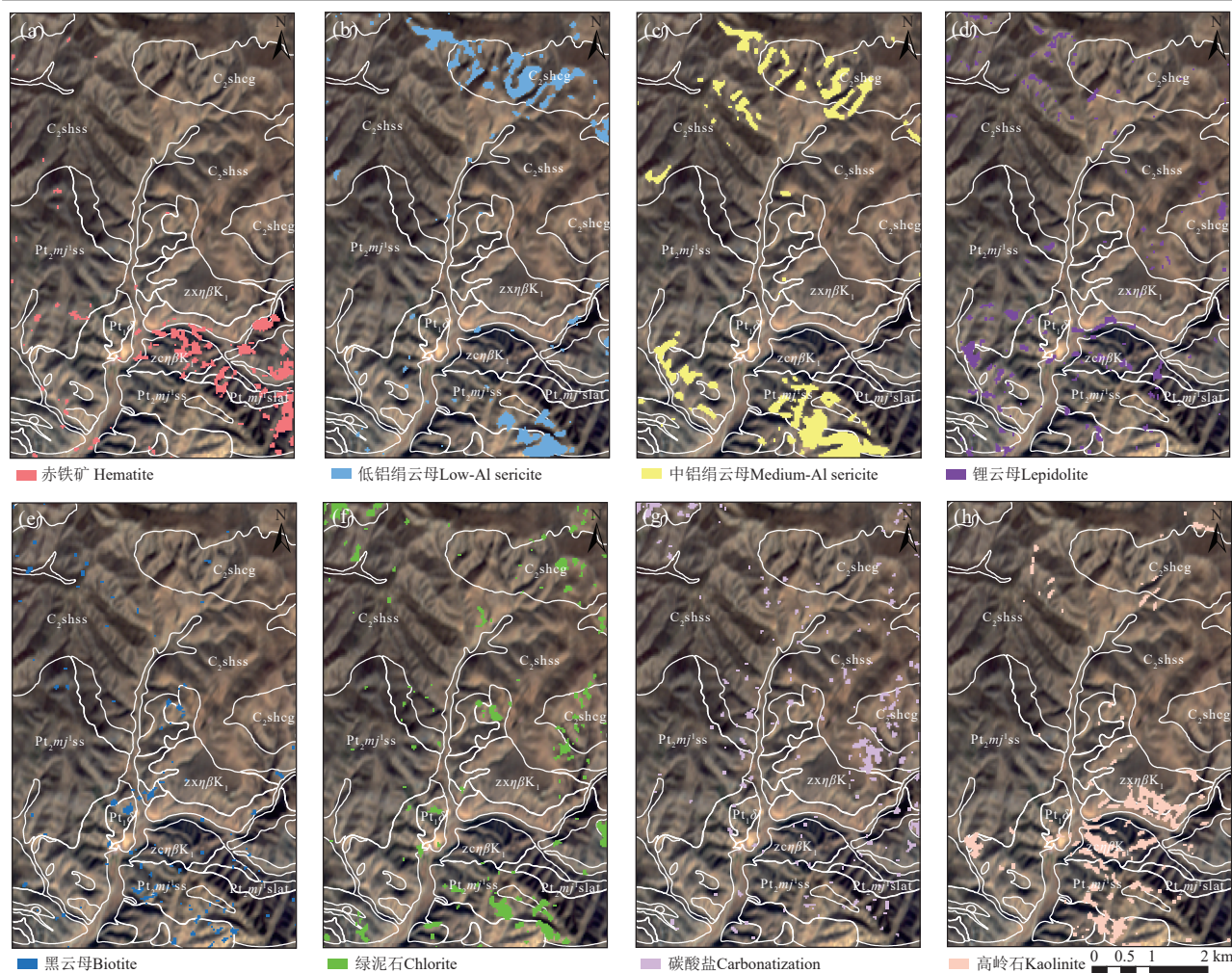


图7 蚀变矿物空间分布
Fig.7 Spatial distribution of altered minerals

已有研究表明,研究区矿区围岩主要为浅部的变质含砾砂岩和深部的石英闪长岩,其中变质含砾砂岩主要由石英、花岗岩、闪长岩及火山岩岩屑组成,含较高含量的基性组分,普遍发育黑云母化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化、黄铁矿化、萤石矿化等;石英闪长岩成分以石英、角闪石、斜长石、屑石、铁矿物等组成,蚀变作用普遍较强,主要有黑云母化、黄铁矿化,局部有绿泥石化、钾化、高岭土化等(鄂阿强, 2018)。这也证实了本研究遥感蚀变信息提取的有效性,说明本研究能够为进一步的找矿提供依据。

综合分析蚀变矿物空间分布特征,可以发现研究区的蚀变矿物分布具有一定的规律性。蚀变矿物分布与地质体的岩性关系密切,但蚀变矿物并不

是均匀分布在地质体中,而是集中在地质体的局部地段。例如含铁阳离子的蚀变矿物(赤铁矿)主要发育在花岗岩岩体,含铝羟基的蚀变矿物(各种类型云母)主要产于花岗岩岩体及变质砂岩岩体,含镁羟基的蚀变矿物(绿泥石)主要产于变质地层内,含碳酸根阴离子的蚀变矿物(白云石)主要发育在由碳酸盐成分占主体的变质岩地层内。分析原因蚀变矿物是地质体与热液流体发生交代蚀变作用的产物,受到原岩化学成分和热液成分的影响,而体积巨大的原岩对蚀变矿物的形成起决定性作用(孙雨等, 2022)。

5.2 线性构造空间分布特征

通过对可见光—近红外波段高光谱数据进行主成分分析,基于信息量最大的第一主分量提取了

研究区线性构造, 并结合 ArcGIS Kernel Density 工具, 制作了线性构造密度分布图(图 8)。本研究共获取线性构造 127 条, 提取结果主要分布于图像的不同色调分界面以及呈线状展布的色调异常带上, 整体效果良好。从空间分布来看, 提取线性构造主要集中于研究区南部、西南部、西北部及东部, 尤其南部和西南部分布广泛; 在岩性地层上, 提取的线性构造在各岩体及地层中均有分布, 但在马家店群灰色、深灰色变质砂岩(Pt_2mj^1ss)、早白垩世中细粒黑云二长花岗岩($zx\eta\beta K_1$)等岩性单元中分布较少(图 8); 从线性构造的方位来看, 研究区构造的优势方位为北东向, 其次为北西向(图 9), 这与地质资料显示的该区构造主要由较早期的北西向断裂和较晚的近北东向断裂组成这一事实相符。

5.3 找矿远景区预测

基于 ArcGIS 平台, 以遥感影像为底图, 将提取的赤铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、锂云母、黑云母、绿泥石、碳酸盐及高岭石 8 种蚀变矿物异常信息和线性构造做叠加处理, 并结合收集到的已知岩脉及地质界限等资料, 制作综合分析图(图 10)。分

析发现一些已知岩脉与蚀变信息和线性构造具有很好的拟合关系, 表现以下特征: ①研究区蚀变矿物分布范围较广, 多富集于侵入岩体的顶端、岩体边缘、构造裂隙等部位, 是寻找矿产资源的重要解译标志; ②线性构造及其交汇部位通常是岩浆热液的上侵通道, 岩浆热液型金属矿床往往与岩浆热液的侵入作用密切相关, 岩浆发生结晶分异作用形成矿床(马鸿霖等, 2019)。综合分析上述蚀变信息提取和地质线性构造遥感解译结果, 圈定 6 个找矿远景区(图 10)。

(1)A 找矿远景区。该区域侵入体围岩蚀变发育明显, 有中铝绢云母和低铝绢云母蚀变矿物大量聚集, 发育有小范围的锂云母蚀变矿物, 同时发育若干条不同方向的线性构造, 分别为 NNW、NW、NNW、NEE、EW、NNE 方向, 影纹结构较为复杂, 岩性为拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩, 经验证在该区域的西北部有两处已知的二长花岗岩脉, 更为重要的是, 在该区域西部分布有一例大型铌钽矿床。

(2)B 找矿远景区。该区域发育有大量的中铝

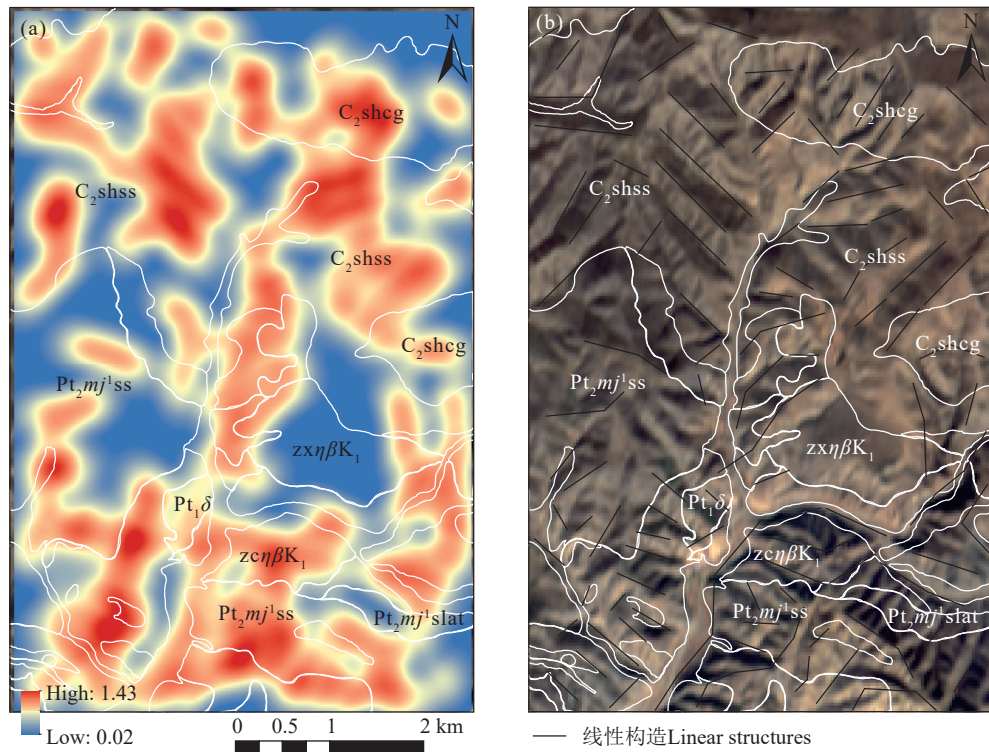


图 8 线性构造空间分布

Fig.8 Spatial distribution of linear structures

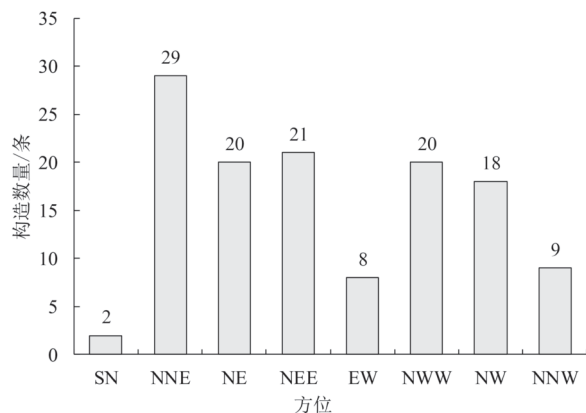


图9 线性构造方位特征

Fig.9 Azimuth characteristics of linear structure

绢云母和低铝绢云母蚀变矿物,并伴有少量的绿泥石蚀变矿物,同时发育2条NE向和3条NNE向线性构造,地层岩性为拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩,在该区域的西南部发现有多处石英脉。

(3)C找矿远景区。该区域发育有赤铁矿、锂云母和高岭石3种蚀变矿物,发育有3条NNW向和3条NEE向的线性构造,地层被早白垩世中粗粒黑云二长花岗岩覆盖,该区地层较为破碎,遥感影像纹理复杂,尽管该区域目前尚未发现大型矿区,

根据蚀变信息和线性构造等推断该区域是一个很好的找矿场所。

(4)D找矿远景区。该区域聚集赤铁矿、碳酸盐及绿泥石3种蚀变矿物,发育有NNE、NW、NNW向各1条线性构造,地层岩性为拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩及乌拉山岩群灰色蛇纹石化大理岩,在该区域的西部发现一处较大型石英脉。

(5)E找矿远景区。该区域发育中铝绢云母和锂云母2种蚀变矿物,发育有若干条NNW、NE、NNE、NNW、NW向线性构造,地层岩性为拴马桩组灰褐色、杂色变质含砾粗砂岩,在该区域的东部发现两处石英脉。

(6)F找矿远景区。该区域侵入岩的围岩蚀变强烈,遥感蚀变信息异常明显,发育有中铝绢云母、低铝绢云母、锂云母、黑云母、碳酸盐、绿泥石及高岭石7种蚀变矿物,此外,该区线性构造较复杂,发育有若干条NE、NS、NNW、NNW、NNE、EW向线性构造,表明有较大概率形成热液通道和储矿空间,地层被深灰色变质砂岩及早白垩世黑云二长花岗岩覆盖,尽管该区域目前尚未发现大型矿区,但

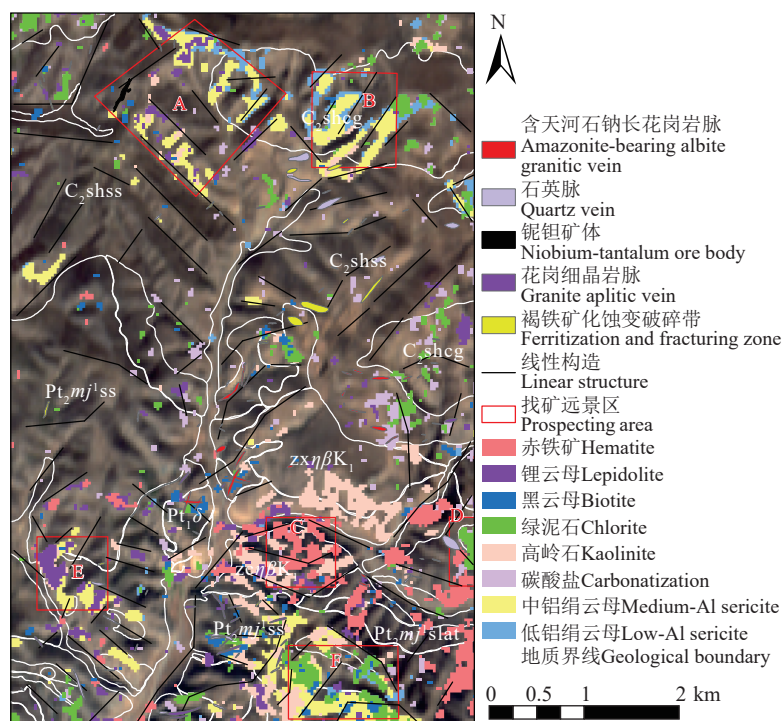


图10 研究区找矿远景预测

Fig.10 Prediction of prospecting in the study area

具备形成矿区的有利条件, 可以列为找矿远景区。

综上所述, 本文采用的蚀变信息及线性构造提取方法可行, 根据提取的赤铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、锂云母、黑云母、绿泥石、碳酸盐及高岭石 8 种蚀变矿物异常信息和线性构造圈定了 6 个找矿远景区, 其中 4 个找矿远景区均分布有已知矿脉, 吻合度较高, 表明异常信息提取结果可作为找矿的指示性要素, 为高光谱遥感地质找矿方向提供参考。

6 结论

本文使用 ZY-1-02D 高光谱数据, 对内蒙古武川县赵井沟和虎头山地区及围岩进行了蚀变矿物和线性构造的提取, 并基于提取的信息开展了地质找矿有利部位分析预测, 得到以下主要结论:

(1) 基于光谱沙漏技术分别从可见光—近红外和短波红外 2 个谱段提取了赤铁矿、低铝绢云母、中铝绢云母、锂云母、黑云母、绿泥石、碳酸盐及高岭石共 8 种蚀变矿物, 结合阈值分割圈定各类蚀变异常, 分析了蚀变矿物的空间分布和岩性地层特征, 发现研究区蚀变矿物与地质体岩性地层关系密切, 不是均匀分布在地质体, 多集中在特定地质体的局部地段。

(2) 对可见光—近红外波段高光谱数据的 PCA 变换, 基于第一主分量提取了研究区线性构造 127 条, 发现提取结果主要分布于图像的不同色调分界面以及呈线状展布的色调异常带上, 整体效果较好。研究区构造的优势方位为北东向, 其次为北西向, 与已有地质资料描述较为一致。

(3) 综合分析蚀变信息和地质线性构造遥感解译结果, 在研究区圈定了 6 个找矿远景区, 经过野外实地验证, 发现其中 4 个找矿远景区分布有已知矿脉, 吻合度较高。资源一号 ZY-1-02D 高光谱数据经过预处理和信息增强处理后, 可清晰反映对不同蚀变矿物以及线性构造等信息, 为地质调查工作提供遥感地质判断, 证实了高光谱遥感技术在矿产资源勘查领域的应用潜力。

References

Cheng Baozhi, Zhao Chunhui, Zhang Lili. 2021. Research advances of anomaly target detection algorithms for hyperspectral imagery[J].

Electronics Optics & Control, 28(5): 56–59, 65 (in Chinese with English abstract).

Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G A, Vergo N. 1990. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B8): 12653–12680.

Dong Xinfeng, Gan Fuping, Li Na, Yan Baikun, Zhang Lei, Zhao Jiaqi, Yu Junchuan, Liu Rongyuan, Ma Yanni. 2020. Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. *Journal of Remote Sensing*, 24(4): 454–464 (in Chinese with English abstract).

Dong Xinfeng, Yan Bokun, Li Na, Zhao Zhe, Liu Genyuan, Liu Rongyuan, Chen Yaowen. 2018. Prospecting prediction of sedimentary metamorphic type iron deposits based on airborne hyperspectral remote sensing: A case study of the Jingtieshan area in the northern Qilian Mountains[J]. *Geology and Exploration*, 54(5): 1013–1023 (in Chinese with English abstract).

Duan Junbin, Peng Peng, Yang Zhi, Liu Le. 2019. Prediction of polymetallic metallogenic favorable area based on ASTER data[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(3): 193–200 (in Chinese with English abstract).

E Aqiang. 2018. Ore characteristics and ore controlling factors of rare metal deposits of typical granite type in the middle of the Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 9(2): 62–69 (in Chinese with English abstract).

Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ainai. 2003. Spectral identification tree(sit) for mineral extraction based on spectral characteristics of minerals[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(2): 445–454 (in Chinese with English abstract).

Guha A. 2020. Mineral Exploration Using Hyperspectral Data[M]// *Hyperspectral Remote Sensing*. Elsevier, 293–318.

Hobbs W H. 1904. Lineaments of the Atlantic Border region[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 15: 483–506.

Hunt G R. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I silicate minerals[J]. *Modern Geology*, 1: 283–300.

Javhar A, Chen X, Bao A, Jamshed A, Yunus M, Jovid A, Latipa T. 2019. Comparison of multi-resolution optical Landsat-8, Sentinel-2 and radar Sentinel-1 data for automatic lineament extraction: A case study of Alichur area, SE Pamir[J]. *Remote Sensing*, 11(7): 778.

Kruse F A, Perry S L, Caballero A. 2006. District-level mineral survey using airborne hyperspectral data, Los Menucos, Argentina[J]. *Annals of Geophysics*, 49(1): 83–92.

Li Genjun, Yang Xuesong, Zhang Xing, Li Xiaomin, Li Delin, Du Cheng. 2021. Application and analysis of ZY1-02D hyperspectral data in geological and mineral survey[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 33(2): 134–140 (in Chinese with English abstract).

Li Na, Dong Xinfeng, Gan Fuping, Yan Baikun. 2020. Application Evaluation of ZY-1-02D Satellite Hyperspectral Data in

- Geological Survey[J]. *Spacecraft Engineering*, 29(6): 186–191 (in Chinese with English abstract).
- Li Wanlun, Chen Jing, Zhao Xiaoping. 2023. New Progress in the Application of Hyperspectral Remote Sensing Technology in Mineral Exploration [C]//The Professional Committee of Metal Mineral Exploration of the Chinese Geophysical Society. Proceedings of the Second National Mineral Exploration Conference. Geological Literature Center of the China Geological Survey (China Geological Library), 5(in Chinese).
- Li Xue, Wang Keyong, Sun Guosheng, Sun Jiuda, Liu Genyi, Zhang Jitian, Han Lei, Wang Guangwei. 2021. Discussion on metallogenesis of Zhaojinggou Ta–Nb deposit in Inner Mongolia: Evidence from amazonitization and albitization granite geochronology and geochemistry[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 37(6): 1765–1784 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhidan, Li Xiaoguang, Cui Yurong, Li Guozhan, Zhang Jia, Guo Hu, Liu Wengang, Zhang Chao, Yu Ren'an, Xie Yu, Wang Jiaying. 2019. Yanshanian mineralization of Zhaojinggou Nb–Ta Deposit, Inner Mongolia: Evidences from the monazite and zircon LA–MC–ICP–MS U–Pb and biotite ^{40}Ar – ^{39}Ar geochronology[J]. *Earth Science*, 44(1): 234–247 (in Chinese with English abstract).
- Liu Dechang, Tian Feng, Qiu Juntong, Ye Fawang, Yan Pukun, Sun Yu, Wang Zitao. 2017. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the Liuyuan–Fangshankou Area[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91(12): 2781–2795 (in Chinese with English abstract).
- Lu Yan. 2018. Applications of Hyperspectral Mineral Mapping in Mineral and Petroleum Exploration [D]. Beijing : China University of Geosciences (Beijing), 1–106 (in Chinese with English abstract).
- Ma Honglin, Jia Weijie, Fu Changliang, Li Wei 2019. Extraction of geological structural and alteration information and the prediction of metallogenic favorable locations in northeastern Jeddah, Saudi Arabia [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 31(3): 174–182(in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Wang Fengxiang, Zhao Yu'an, Sun Yan, Chai Hua. 2013. Geological features and origin of Zhaojinggou Nb–Ta deposit in Wuchuan County, Inner Mongolia[J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 731–744 (in Chinese with English abstract).
- Qin Jinhua, Wang Denghong, Wang Yan, Guo Zhiqiang, Liu Shanbao, Huang Fan, Zhao Ruyi. 2024. Metallogenic law and exploration prospect of the middle part of Nanling metallogeny belt[J]. *Geology in China*, 51(4): 1095–1122 (in Chinese with English abstract).
- Samani P, Prizomwala S P, Rajawat A S. 2021. Assessing the mineral alteration in Ambaji–Deri Region (Northwestern India) using hyperspectral remote sensing[J]. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 49(2): 249–257.
- Song Kun, Wang Ende, Fu Jianfei, Yao Yuzeng, Sun Jian 2022. Extraction of remote sensing alteration anomaly information based on Landsat 8 data in Gongchangling Mining Area[J]. *Metal Mine*, (4): 149–157 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yongbin, Wang Ruijun, Wei Benzan, Wang Bing, Dong Shuangfa, Li Cunjin, Li Mingsong. 2018. The application of hyperspectral remote sensing ground–air integrated prediction method to the copper gold deposit prospecting in Kalatag area, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 45(1): 178–191 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yu, Liu Jiajun, Zhai Degao, Liu Zhenjiang, Zhang Fangfang, Zhao Yingjun, Liu Pengfei, Wang Zitao. 2022. Alteration minerals mapping and identification of gold mineralization belt based on ZY1 – 02D hyperspectral data in the Toudiaoquan – Nandan area, Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 58(2): 399–409 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yu, Nie Jiangtao, Tian Feng, Qin Kai, Yang Weifang, Wang Jian. 2015. Alteration mineral mapping of the Xiangshan uranium core using HySpex imaging hyperspectral data and its geological significance[J]. *Geology and Exploration*, 51(1): 165–174 (in Chinese with English abstract).
- Tan Bingxiang, Li Zengyuan, Chen Erxue, Pang Yong. 2005. Preprocessing of EO–1Hyperion hyperspectral data[J]. *Remote sensing information*, (6): 36–41 (in Chinese with English abstract).
- Tang Chao, Chen Jianping, Zhang Ruisi, Pei Yingru. 2013. Alteration from Aster remote sensing data in Ban NuMetallogenic Belt, Gaize, Tibet[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 28(1): 122–128 (in Chinese with English abstract).
- Tripathi M K, Govil H. 2019. Evaluation of AVIRIS–NG hyperspectral images for mineral identification and mapping[J]. *Heliyon*, 5(11): e02931.
- van der Meer F D, van der Werff H M A, van Ruitenbeek F J A, Hecker C A, Bakker W H, Noomen M F, Woldai T. 2012. Multi–and hyperspectral geologic remote sensing: A review[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1): 112–128.
- Wan L, Lin Y, Zhang H, Wang F, Liu M, Lin H. 2020. GF–5 hyperspectral data for species mapping of mangrove in Mai Po, Hong Kong[J]. *Remote Sensing*, 12(4): 656.
- Wang Congcong, Chen Chuan, Li Yunpeng, Wang Zhichun, Gao Yihang, Gao Lingling, Li Shunda. 2023. Hyperspectral remote sensing alteration characteristics of the Paergangtagexi porphyry copper deposit in eastern Tianshan Mountains and their indicative significance for prospecting[J]. *Geology and Exploration*, 59(6): 1171–1181 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jianhua, Li Yang, Liang Shuneng, Sun Xiaofei. 2022. The study of land desertification recognition and extraction based on hyperspectral satellite data[J]. *North China Geology*, 45(4): 60–67

- (in Chinese with English abstract).
- Wang Runsheng, Gan Fuping, Yan Baikun, Yang Suming, Wang Qinghua. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. Remote sensing for Land & Resources, (1): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhouxin, Liu Guanglian, Zhang Aikui, Fang Dawei. 2023. Remote sensing anomaly information extraction and prospecting prediction of alteration in Amunike Area, Northern Margin of Qaidam[J]. Journal of Hebei GEO University, 46(3): 63–70 (in Chinese with English abstract).
- Wu Changyu, Dai Jingjing, Chen Wei, Jiang Biao, Wang Denghong, Wang Chengliang, Wang Wenjun, Sun Hongzhang, Wang Qiang, Chen Wei, Pu Xiulang, Ma Wenwen. 2023. Extraction of remote sensing alteration information and its ore prospecting indication in Sumochagan Obao fluorite mining area, Inner Mongolia[J]. Mineral deposits, 42(4): 845–858 (in Chinese with English abstract).
- Xi Hong, Li Junjian, Li Huaming, Fu Chao, Party Zhicai, Tang Wenlong. 2023. Geochemical characteristics of Late Paleozoic magmatic rocks in southern Mongolia[J]. North China Geology, 46(4): 10–21 (in Chinese with English abstract).
- Yan Baikun, Dong Xinfeng, Wang Zhe, Yang Suming, Yu Junchuan, Li Na, Gan Fuping. 2016. Mineral information extraction technology by airborne hyperspectral remote sensing and its application progress: An example of mineralization belts of western China[J]. Geological Survey of China, 3(4): 55–62 (in Chinese with English abstract).
- Ye Fawang, Meng Shu, Zhang Chuan, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Wu Ding. 2018. Minerageny study of high-Al, medium-Al and low-Al sericites identified by airborne hyperspectral remote sensing technology[J]. Acta geologica sinica, 92(2): 395–412 (in Chinese with English abstract).
- Yin Chuankai, Wang Chunlian, You Chao, Liu Dianhe, Yan Kai, Sun Peijie, Liang Zhen, Ning Pengyuan. 2024. Zircon resource characteristics, deposit types, key applications and prospecting prospects in China[J]. Geology in China, 51(6): 1930–1945 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengye, Qin Qiming, Chen Li, Wang Nan, Zhao Shanshan. 2015. Research and development of mineral identification utilizing hyperspectral remote sensing[J]. Optics and Precision Engineering, 23(8): 2407–2418 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuan, Qian Jianping, Xie Biaowu, Zhao Xiaoxing. 2013. Application of remote sensing technique to extract alteration and linear structure information for resources prognosis in the Zhulang periphery mining area, Ali, Tibet[J]. Geoscience, 27(1): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhifang, Zhang Xinle, Chen Qi, Zhang Ruisi, Li Wenchang, Cao Xiaomin. 2022. Mapping of alteration minerals and prospecting potential analysis of Pulang porphyry copper deposit: Evidence from remote sensing data of Ziyuan-1 02D satellite[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 42(1): 17–29 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Fanshen, Xu Guoquan, Feng Zhen, Zhang Zhenfa, Cai Hongjun. 2005. Geological characteristics and prospective value of greenstone type gold deposits of central part of Inner Mongolia Autonomous Area[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 232–248 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Y, Wang X, Wang S, Zhang L. 2021. Advances in spaceborne hyperspectral remote sensing in China[J]. Geo-spatial Information Science, 24(1): 95–120.

附中文参考文献

- 成宝芝, 赵春晖, 张丽丽. 2021. 高光谱图像异常目标检测算法研究进展[J]. 电光与控制, 28(5): 56–59, 65.
- 董新丰, 甘甫平, 李娜, 闫柏琨, 张磊, 赵佳琪, 于峻川, 刘镕源, 马燕妮. 2020. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报, 24(4): 454–464.
- 董新丰, 闫柏琨, 李娜, 赵哲, 刘根源, 刘镕源, 陈耀文. 2018. 基于航空高光谱遥感的沉积变质型铁矿找矿预测——以北祁连镜铁山地区为例[J]. 地质与勘探, 54(5): 1013–1023.
- 段俊斌, 彭鹏, 杨智, 刘乐. 2019. 基于 ASTER 数据的多金属成矿有利区预测[J]. 国土资源遥感, 31(3): 193–200.
- 鄂阿强. 2018. 内蒙古中部典型花岗岩型稀有金属矿床特征和控矿因素[J]. 有色金属科学与工程, 9(2): 62–69.
- 甘甫平, 王润生, 马嵩乃. 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别[J]. 地学前缘, 10(2): 445–454.
- 李根军, 杨雪松, 张兴, 李晓民, 李得林, 杜程. 2021. ZY1-02D 高光谱数据在地质矿产调查中的应用与分析[J]. 国土资源遥感, 33(2): 134–140.
- 李娜, 董新丰, 甘甫平, 闫柏琨. 2020. 资源一号 02D 卫星高光谱数据地质调查应用评价[J]. 航天器工程, 29(6): 186–191.
- 李万伦, 陈晶, 赵小平. 2023. 高光谱遥感技术在矿产勘查中的应用新进展[C]//中国地球物理学会金属矿勘查专业委员会. 第二届全国矿产勘查大会论文集. 中国地质调查局地质文献中心 (中国地质图书馆).
- 李雪, 王可勇, 孙国胜, 孙九达, 刘根驿, 张纪田, 韩雷, 王广伟. 2021. 内蒙古赵井沟钽铌矿床成矿作用探讨——来自天河石化、钠长石化花岗岩年代学、岩石地球化学的证据[J]. 岩石学报, 37(6): 1765–1784.
- 李志丹, 李效广, 崔玉荣, 李国占, 张佳, 郭虎, 刘文刚, 张超, 俞初安, 谢瑜, 王佳营. 2019. 内蒙古赵井沟钽铌矿床燕山期成矿: 来自 LA-MC-ICP-MS 独居石、锆石 U-Pb 和黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄的证据[J]. 地球科学, 44(1): 234–247.
- 刘德长, 田丰, 邱骏挺, 叶发旺, 闫柏琨, 孙雨, 王子涛. 2017. 柳园-方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果[J]. 地质学

- 报, 91(12): 2781–2795.
- 卢燕. 2018. 高光谱矿物填图技术在金属矿产和油气勘查中的应用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 1–106.
- 马鸿霖, 贾伟洁, 付长亮, 李伟. 2019. 沙特阿拉伯吉达东北部地质构造与蚀变信息提取及找矿有利部位预测[J]. *国土资源遥感*, 31(3): 174–182.
- 聂凤军, 王丰翔, 赵宇安, 孙艳, 柴华. 2013. 内蒙古赵井沟大型铌钽矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 32(4): 731–744.
- 秦锦华, 王登红, 王岩, 郭志强, 刘善宝, 黄凡, 赵如意. 2024. 南岭成矿带中段成矿规律与找矿前景分析[J]. *中国地质*, 51(4): 1095–1122.
- 宋坤, 王恩德, 付建飞, 姚玉增, 孙健. 2022. 基于 Landsat 8 数据的弓长岭矿区遥感蚀变异常信息提取[J]. *金属矿山*, (4): 149–157.
- 孙永彬, 王瑞军, 魏本赞, 汪冰, 董双发, 李存金, 李名松. 2018. 高光谱遥感地空综合预测方法在新疆卡拉塔格地区铜金矿床找矿中的应用[J]. *中国地质*, 45(1): 178–191.
- 孙雨, 聂江涛, 田丰, 秦凯, 杨国防, 王健. 2015. 相山铀矿岩芯 HySpex 成像高光谱数据蚀变矿物提取及其地质意义[J]. *地质与勘探*, 51(1): 165–174.
- 孙雨, 刘家军, 翟德高, 柳振江, 张方方, 赵英俊, 刘鹏飞, 王子涛. 2022. 基于资源一号 02D 卫星高光谱数据的甘肃头吊泉–南大滩地区蚀变矿物填图及金矿化带识别[J]. *地质与勘探*, 58(2): 399–409.
- 谭炳香, 李增元, 陈尔学, 庞勇. 2005. EO-1 Hyperion 高光谱数据的预处理[J]. *遥感信息*, (6): 36–41.
- 唐超, 陈建平, 张瑞丝, 裴英茹. 2013. 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*, 28(1): 122–128.
- 汪周鑫, 刘光莲, 张爱奎, 房大为. 2023. 柴北缘阿木尼克地区蚀变遥感异常信息提取及找矿预测[J]. *河北地质大学学报*, 46(3): 63–70.
- 王聪聪, 陈川, 李云鹏, 王智纯, 高一航, 高玲玲, 李顺达. 2023. 东天山帕尔岗塔格西斑岩铜矿高光谱遥感蚀变特征及其对找矿的指示意义[J]. *地质与勘探*, 59(6): 1171–1181.
- 王建华, 李阳, 梁树能, 孙小飞. 2022. 基于高光谱卫星数据的土地沙化识别及提取研究[J]. *华北地质*, 45(4): 60–67.
- 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 杨苏明, 王青华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. *国土资源遥感*, (1): 1–13.
- 吴畅宇, 代晶晶, 陈伟, 江彪, 王登红, 王成良, 王文君, 孙洪章, 王强, 陈玮, 蒲秀浪, 马文文. 2023. 内蒙古苏莫查干敖包萤石矿区遥感蚀变信息提取及其找矿指示意义[J]. *矿床地质*, 42(4): 845–858.
- 席宏, 李俊建, 李华明, 付超, 党智财, 唐文龙. 2023. 南蒙古地区晚古生代岩浆岩的地球化学特征[J]. *华北地质*, 46(4): 10–21.
- 闫柏琨, 董新丰, 王喆, 杨苏明, 于峻川, 李娜, 甘甫平. 2016. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例[J]. *中国地质调查*, 3(4): 55–62.
- 叶发旺, 孟树, 张川, 徐清俊, 刘洪成, 武鼎. 2018. 航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究[J]. *地质学报*, 92(2): 395–412.
- 尹传凯, 王春连, 游超, 刘殿鹤, 颜开, 孙珮婕, 梁震, 宁鹏远. 2024. 中国铅矿资源特征、矿床类型、关键应用及找矿远景[J]. *中国地质*, 51(6): 1930–1945.
- 张成业, 秦其明, 陈理, 王楠, 赵姗姗. 2015. 高光谱遥感岩矿识别的研究进展[J]. *光学精密工程*, 23(8): 2407–2418.
- 张渊, 钱建平, 谢彪武, 赵小星. 2013. 遥感蚀变和线性构造信息提取在西藏阿里住浪矿区一带的找矿应用[J]. *现代地质*, 27(1): 99–107.
- 赵志芳, 张新乐, 陈琪, 张瑞丝, 李文昌, 曹晓民. 2022. 普朗斑岩型铜矿区矿化蚀变特征矿物填图及找矿潜力分析: 来自资源一号 02D 遥感卫星的证据[J]. *沉积与特提斯地质*, 42(1): 17–29.
- 郑翻身, 徐国权, 冯贞, 张振法, 蔡红军. 2005. 内蒙古中部地区绿岩型金矿地质特征及成矿远景预测[J]. *地质学报*, 79(2): 232–248.