

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

吴畅宇^{1,2}, 代晶晶^{1,2}, 武广², 余宏全², 庞绪勇², 赵天辰³

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 深地探测与矿产勘查全国重点实验室, 北京 100094; 2. 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京 100037; 3. 天津城市建设管理职业技术学院, 天津 300400)

[摘要] 内蒙古赤峰北部地区拥有丰富的铅锌银锡钨铜铋铍钼钽铀铁矿矿产资源, 是大兴安岭南段有色金属-稀有金属-银成矿带的重要组成部分。前人对大兴安岭南段, 特别是赤峰地区开展了大量的地、物、化、遥和矿产等各方面的调查, 但仍缺少有效的浅覆盖区找矿方法。考虑该区成矿地质背景、矿床的空间分布规律等综合因素, 本文采用多源遥感技术对赤峰北部的克什克腾旗和林西县开展矿化蚀变信息提取。利用多光谱数据(Landsat-8、ASTER数据)通过主成分分析法提取了不同类别的矿物蚀变信息; 针对GF-5数据, 采用混合调谐匹配滤波技术对矿化蚀变信息进行提取; 再将三种遥感提取结果进行叠加分析, 完成成矿靶区的圈定, 并开展野外验证, 进一步深化遥感在地质矿产资源调查领域的应用。基于Landsat-8、ASTER两种多光谱数据对铁染、羟基类(Mg-OH、Al-OH)矿物信息进行了提取; 基于GF-5数据识别出了白云母、绿帘石、高岭石3种蚀变矿物。经过野外验证发现, 遥感提取结果与实际蚀变异常对应良好, 并在圈定的靶区内发现了锡铜银铅锌矿化。本次研究结合不同数据源的提取与叠加结果, 同时通过野外验证, 印证了本文使用的矿化蚀变信息遥感提取方法的准确度。多光谱-高光谱遥感数据相结合有助于后续蚀变分带的分析与更精确的成矿预测, 从而更好地服务于矿产资源调查等领域。

[关键词] 多源遥感数据 蚀变信息提取 主成分分析 混合调谐匹配滤波 赤峰地区 内蒙古
[中图分类号] P627 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2025)02-0230-13

Wu Changyu, Dai Jingjing, Wu Guang, She Hongquan, Pang Xuyong, Zhao Tianchen. The extraction of multi-source remote sensing alteration information of polymetallic deposits in the southern Great Xing'an Range: A case study of the Chifeng area in Inner Mongolia[J]. *Geology and Exploration*, 2025, 61(2): 0230-0242.

0 引言

随着遥感科学技术的迅速发展, 人类建立了航天、航空及地面等遥感平台, 从不同尺度获取海量的遥感数据, 为地表宏观及微观地物的快速观测提供了客观真实有效的信息(代晶晶等, 2019)。基于遥感信息提取技术的综合成矿探测系统是一种以

遥感地质解译、遥感矿化蚀变信息提取作为基础, 深入剖析区域地质背景与成矿条件, 综合分析研究区相关地质、物探和化探等成果资料, 依据现代成矿理论圈定找矿靶区的一种准确高效的找矿预测新技术(李智斌和刘泽宇, 2021)。遥感矿化蚀变信息提取技术与传统地质手段结合进行找矿勘探已经取得了巨大的研究进展和丰硕的找矿成果, 对于

[收稿日期] 2024-10-22; **[改回日期]** 2024-12-13; **[责任编辑]** 郝情情。

[基金项目] 中国地质调查项目(编号: DD20230054、DD20230033)、中国地质科学院基本科研业务费专项经费(编号: JKYZD202405)和国家自然科学基金面上项目(编号: 42172332)联合资助。

[第一作者] 吴畅宇(1999年-), 男, 2024年毕业于中国地质大学(北京), 资源与环境遥感专业, 获硕士学位, 主要从事遥感地质方面研究工作。E-mail: wuchangyu199@163.com。

[通讯作者] 代晶晶(1982年-), 女, 2013年毕业于中国地质大学(北京), 地图制图学与地理信息工程专业, 获博士学位, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感地质方面研究工作。E-mail: daijingjing863@sina.com。

矿化蚀变信息遥感提取,国内外地质工作人员陆续采用了诸多方法,如波段比值法、主成分分析法(PCA)、光谱角法(SAM)、混合调谐匹配滤波法(MTMF)等(Rowan and Goetz, 1977; 刘成等, 2003; Pour et al., 2011; 田淑芳和詹骞, 2013; 程潭武等, 2017; 孙永彬等, 2018; 高猛等, 2019)。

大兴安岭南段为我国北方地区最重要的锡银多金属成矿带(Wang et al., 2001; 毛景文等, 2013; Ouyang et al., 2015),被誉为我国北方的“南岭”。自 20 世纪 70 年代以来,在大兴安岭中南段黄岗-甘珠尔庙成矿带相继发现了黄岗锡铁矿、白音诺尔铅锌银矿、大井锡铜铅锌银矿、拜仁达坝及蒙恩陶勒盖银铅锌矿等大型-超大型多金属矿床(刘建明等, 2004)。前人学者利用遥感数据在大兴安岭南段开展了一定的蚀变信息提取工作,为该区域进一步圈定找矿靶区提供了重要参考与依据(荆凤, 2005; 韩耀徽等, 2024),但是所用数据为单一的多光谱数据,仍缺少高光谱在浅覆盖区的应用实践。因此,本文分别采用多光谱(Landsat-8、ASTER)数据及国

产高光谱(GF-5)数据,针对大兴安岭南段的克什克腾旗和林西县部分地区开展矿化蚀变信息提取,对蚀变信息进行叠加分析,圈定研究区找矿靶区,为大兴安岭南段赤峰地区的锡钨铜铍锂找矿工作提供技术支撑。

1 区域地质背景

大兴安岭南段位于中亚造山带东部(图 1a, 张浩等, 2021),为滨西太平洋成矿域与古亚洲成矿域的交汇区域(Ouyang et al., 2015; 杨朝磊等, 2021)。成矿带处于突泉-翁牛特铅锌银锡钨铜钼铁稀土铍铌钽成矿带索伦镇-黄岗铅锌银锡钨铜钼铁铍铌钽成矿亚带(付超等, 2021; 李俊建等, 2021)。该区域岩浆活动频繁,中-晚华力西期、印支期和燕山期的中酸性岩浆岩广泛出露(武广等, 2021)。区域上构造现象明显,地层大多呈陡峭倾斜状态。主要为古生代华力西期形成的一系列褶皱构造和以北东向逆断层为主的断裂构造(李师值, 2020)。

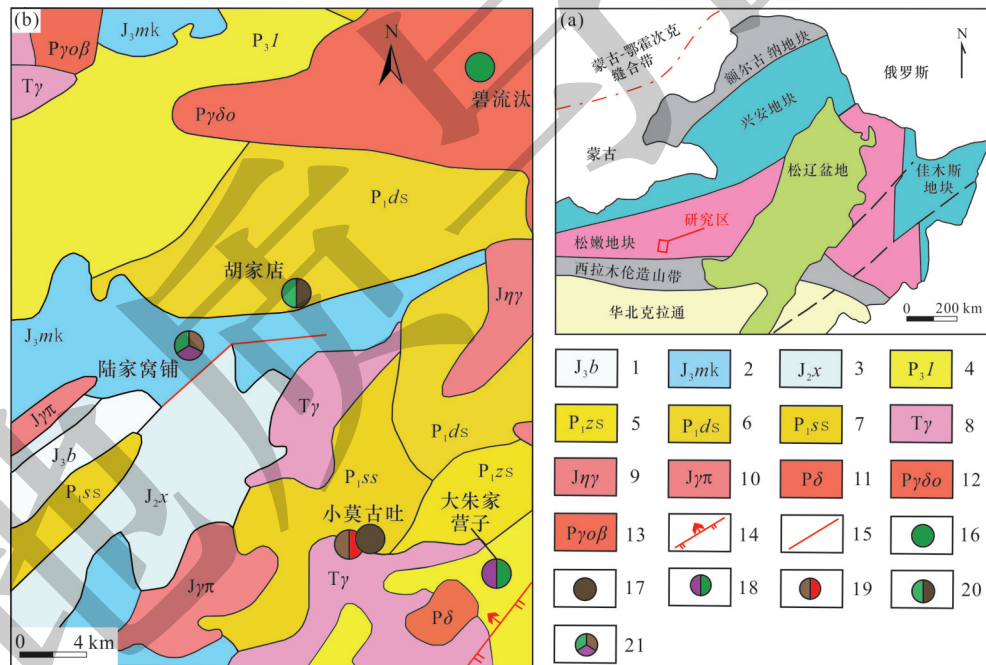


图 1 大兴安岭南段构造位置图(a)和研究区区域地质图(b)

Fig. 1 Geotectonic location of the southern section of Great Xing'an Range (a) and regional geological map (b) of the study area

1-白音高老组;2-满克头鄂博组;3-新民组;4-林西组;5-哲斯组;6-大石寨组;7-寿山沟组;8-花岗岩;9-二长花岗岩;10-花岗斑岩;11-闪长岩;12-英云闪长岩;13-黑云母斜长花岗岩;14-逆断层;15-实测性质不明断层;16-伟晶岩型铍矿;17-接触交代型锡矿;18-热液型钨铍矿;19-矽卡岩型铁锌矿;20-热液型铜锡矿;21-热液型铜铍银矿

1-Baiyingaolao Formation; 2-Manketouebo Formation; 3-Xinmin Formation; 4-Linxi Formation; 5-Zhesi Formation; 6-Dashizhai Formation; 7-Shoushangou Formation; 8-granite; 9-monzonitic granite; 10-granite porphyry; 11-diorite; 12-tonalite; 13-biotite plagioclase granite; 14-reverse fault; 15- measured fault with unknown nature; 16-pegmatite type Be ore; 17-contact metasomatic Sn ore; 18-hydrothermal W-Be ore; 19-skarn Fe-Zn ore; 20-hydrothermal Cu-Sn ore; 21-hydrothermal Cu-Zn-Ag ore

研究区位于内蒙古赤峰市克什克腾旗北部及林西县西北部地区,面积大约 1074 km²。研究区整体为浅植被覆盖区,适合遥感地质研究的开展。研究区地层(图 1b)包含古生界二叠系以及中生界侏罗系和白垩系。区域内出露有二叠系寿山沟组(P_{1ss})海相碎屑岩、大石寨组(P_{1ds})中酸性凝灰岩、哲斯组(P_{2zs})海相碎屑岩和灰岩以及林西组(P_{3l})陆相湖盆沉积(李树才等,2019;丁伟,2019)。侏罗系主要分布于研究区中部,中侏罗统新民组(J_{2x})与寿山沟组(P_{1ss})断层接触,不整合覆于大石寨组之上。满克头鄂博组(J_{3mk})包括酸性火山熔岩、火山碎屑岩以及火山碎屑沉积岩(李鹏川等,2016),与上部白垩统白音高老组(K_{1b})含角砾晶屑凝灰岩呈喷发不整合接触(张永北等,2003;李帅值,2020)。岩浆岩广泛分布于研究区的南部和北部,约占出露面积的 35%。主要表现为北部大面积出露的云英闪长岩以及南部和中部侵位的众多花岗岩、闪长岩、花岗斑岩岩基和岩株。强烈的岩浆活动使区域上发生了一系列的变质作用,其带来的成矿物质也在区域上形成了众多矿区及矿化点。研究区地处中亚造山带东段,主要在区域中部以及东南角发育有北东-南西向断层,与整体大地构造走向一致(图 1b)。

2 数据和方法

2.1 数据源

Landsat-8 卫星上搭载的 OLI 传感器共分为 9 个波段,其中 6 个波段属于可见光-近红外(Visible and Near-infrared, VNIR)波段,3 个波段属于短波红外(Short-wave Infrared, SWIR)波段(李隽辉等,2022),每 16 天可以完成一次全球覆盖(Chen et al., 2018)。

ASTER 传感器是搭载在美国 Terra 卫星上的星载热量散发和反辐射仪,其空间分辨率处于中等水平,但光谱信息非常丰富,包含了 15 米空间分辨率的可见光-近红外波段、30 米空间分辨率的短波红外波段以及 90 米空间分辨率的热红外(Thermal Infrared, TIR)波段(代晶晶和曲晓明,2012;宋伊圩等,2021)。

高分五号(GF-5)卫星于 2018 年成功发射,它是中国高分辨率对地观测系统中一颗重要的遥感卫星。其可见光-短波红外高光谱相机(AHSI)拥有 VNIR~SWIR 共 330 个波段,可获取幅宽 60 千米、光

谱分辨率为 5~10 纳米、空间分辨率优于 30 米的高光谱数据,为大范围蚀变矿物填图及矿物亚类识别提供了良好的数据源(孙允珠等,2018;白龙洋等,2024)。

2.2 数据预处理

首先,作为高光谱遥感影像,GF-5 数据波段数多达数百个,如果全部参与处理则会导致数据冗余,此外,常见蚀变矿物光谱曲线的诊断性吸收特征主要位于短波红外波段(燕守勋等,2003;代晶晶等,2020),因此本文保留 Band269~Band329(1999.09~2504.8201 nm)共 61 个波段。同时经过逐波段查看,Band327~Band329 三个波段质量较差给予去除,最终保留 58 个波段参与蚀变信息提取。

由于 GF-5 AHSI 传感器由数万个探测元件组成,这些元件相互之间不可避免地会出现相互干扰的问题,导致获取的 GF-5 数据出现很多坏线,因此本文采用坏线两侧相邻列/行的像元平均值代替坏线相应像元值的方法来修复坏线,坏线修复前后影像对比如图 2a 和 b 所示。除坏线之外,高光谱数据的多数波段还会出现不同程度的条纹效应,为此本文采用全局去条纹(谭炳香等,2005)的方法完成了条纹修复。图像条纹去除前后见图 2c 和 d。

多光谱数据需要完成辐射定标及大气校正处理,而对于高光谱数据,还需要采用 Savitzky-Golay 滤波(简称 SG 滤波)器对波谱的锯齿状噪声进行平滑处理。该滤波基于最小二乘法拟合原始波谱曲线(Savitzky and Golay, 2002),其最主要的优点在于既可以消除信号中的锯齿状噪声还可以确保其形状和宽度不发生改变(Liu et al., 2016)。经多次实验可知,将滤波核左右侧点的个数设置为 5、平滑多项式次数为 4 时处理效果最好。SG 滤波处理前后见图 2e 和 f。

2.3 Landsat-8 蚀变异常信息提取

基于铁染蚀变矿物(如黄钾铁矾、针铁矿、赤铁矿等)的 Landsat-8 重采样波谱曲线(图 3a)特征来分析,在 Landsat-8 遥感数据中,铁染信息在 Band2、5 多为吸收特征,而在 Band4、6 多为反射特征,据此本文将 Band2、4、5、6 参与主成分分析用以提取铁染信息。根据 Band2、4、5、6 主分量变化表(表 1)可以看出 PC4 特征向量载荷因子在 Band 2 上为负值,在 Band4 为正值,该特点与铁染蚀变矿物的光谱特征相对应,因此本文利用 PC4 来提取铁染蚀变信息。

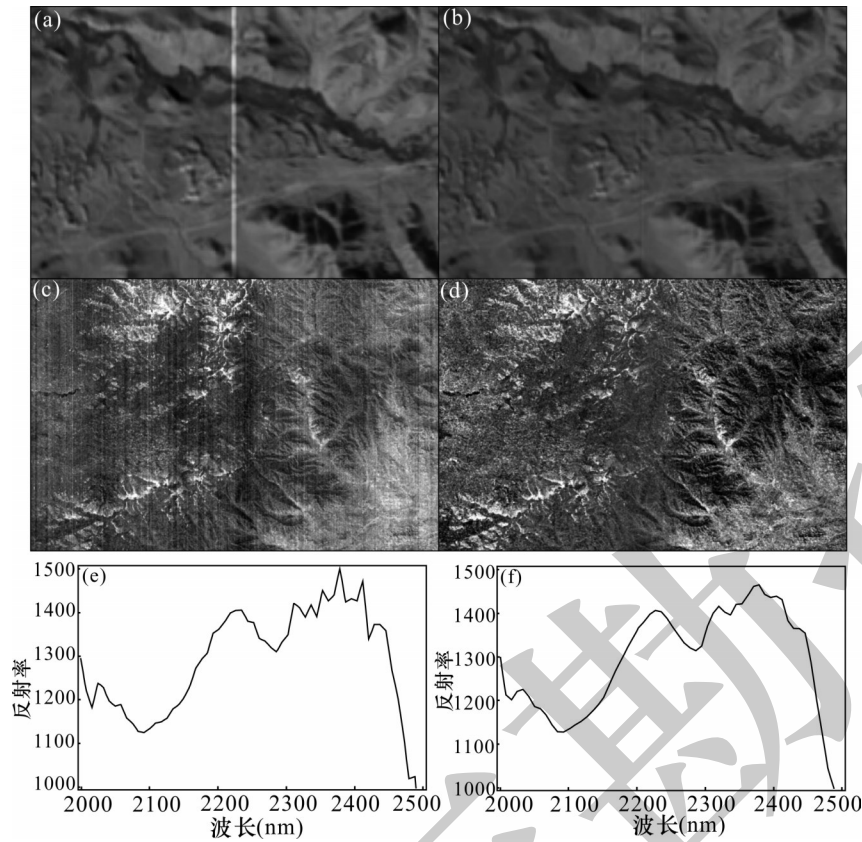


图 2 坏线修复前(a)与坏线修复后(b)对比、条带去除前(c)与条带去除后(d)对比、SG滤波前(e)与SG滤波后(f)对比
 Fig. 2 Comparison of before (a) and after repairing (b) of bad lines, comparison of before (c) and after strip removal (d) and comparison of before (e) and after Savitzky Golay filter processing (f)

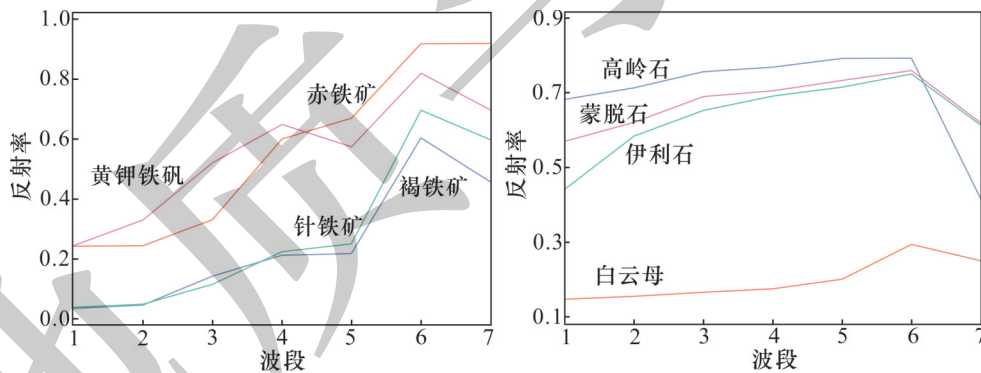


图 3 Landsat-8重采样波谱曲线

Fig. 3 Resampling spectrum curves of Landsat-8 data

a-铁染类蚀变矿物;b-羟基类蚀变矿物

a-iron-stained altered minerals;b-hydroxyl group altered minerals

表 1 Landsat-8数据 Band 2、4、5、6主分量变化表

Table1 Changes of principal components for bands 2, 4, 5 and 6 of Landsat-8 data

Eigenvectors	Band 2	Band 4	Band 5	Band 6
PC1	0.191288	0.395651	0.489405	0.753228
PC2	0.355238	0.501506	0.451404	-0.646940
PC3	-0.610067	-0.349871	0.701241	-0.116917
PC4	-0.681933	0.685231	-0.254909	-0.021127

通过对羟基类蚀变矿物(如蒙脱石、伊利石、白云母等)的 Landsat-8 重采样波谱曲线(图 3b)的分析可知,羟基信息在 Band 6 多为反射特征,Band 7 多为吸收特征,据此可以利用 Band 2、5、6、7 四个波段进行主成分分析,同理根据 Band 2、5、6、7 主分量变化表(表 2),将 PC4 作为羟基类蚀变信息提取的组分。

表 2 Landsat-8数据 Band2、5、6、7主分量变化表

Table 2 Changes in principal components for bands 2, 5, 6 and 7 of Landsat-8 data

Eigenvectors	Band 2	Band 5	Band 6	Band 7
PC1	0.182804	0.446574	0.623148	0.615500
PC2	0.040886	-0.729307	-0.147913	0.666754
PC3	0.629838	0.361882	-0.653697	0.212194
PC4	0.753801	-0.371111	0.403099	-0.362728

最后,为了更直观地体现蚀变异常强度的分布,本次研究采用Crosta方法进行蚀变异常等级的划分,即通过“均值+N×标准方差(σ)”来设置阈值,其中N取值为2、2.5、3时蚀变异常强度分布效果较好。同时,为了去除孤立散点,平滑蚀变异常的边界,再对其进行中值滤波处理。经多次实验后发现,将滤波窗口的大小设置为5×5效果最好,最终得到基于Landsat-8数据的蚀变信息提取结果(图4)。

2.4 ASTER 蚀变异常信息提取

基于铁染类蚀变矿物的ASTER数据重采样波谱曲线(图5a),铁染类蚀变矿物在Band3多为吸收特征,在Band2、4多为反射特征。据此本文选取ASTER数据的Band1、2、3、4四个波段参与主成分分析来提取铁染蚀变,根据其主分量变化表(表3),Band1、3特征值符号为负且Band2、4为正,符合铁染类蚀变在ASTER数据上的波谱特征,故选取PC4作为提取铁染蚀变的组分。

对于地开石、白云母、高岭石等铝羟基类蚀变矿物,根据该类矿物的ASTER数据重采样波谱曲线(图5b)可知,应选择Band1、3、4、6四个波段进行主成分分析。其中,强吸收波段Band6符号为负,Band1、4的特征值符号为正,且贡献率大。根据表4,本文选取满足上述要求的PC4作为提取铝羟基蚀变的组分。

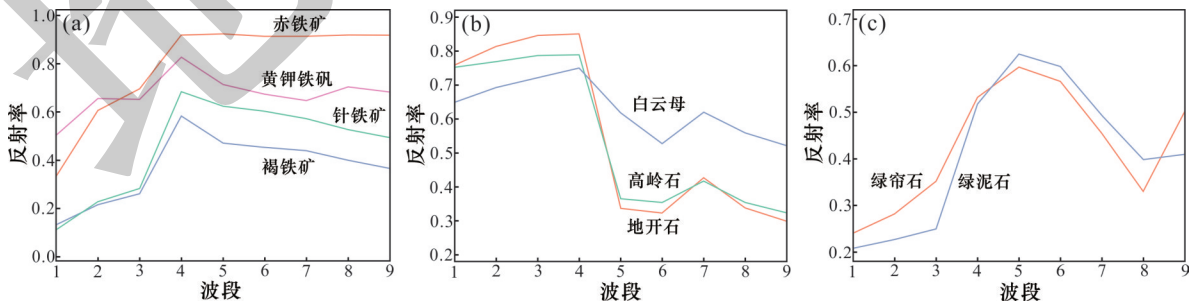


图 5 ASTER 重采样波谱曲线
Fig. 5 The resampling spectrum curves of ASTER

a-铁染类蚀变矿物;b-铝羟基类蚀变矿物;c-镁羟基类蚀变矿物

a-iron-stained alteration minerals;b-Al hydroxyl alteration minerals;c-Mg hydroxyl alteration minerals

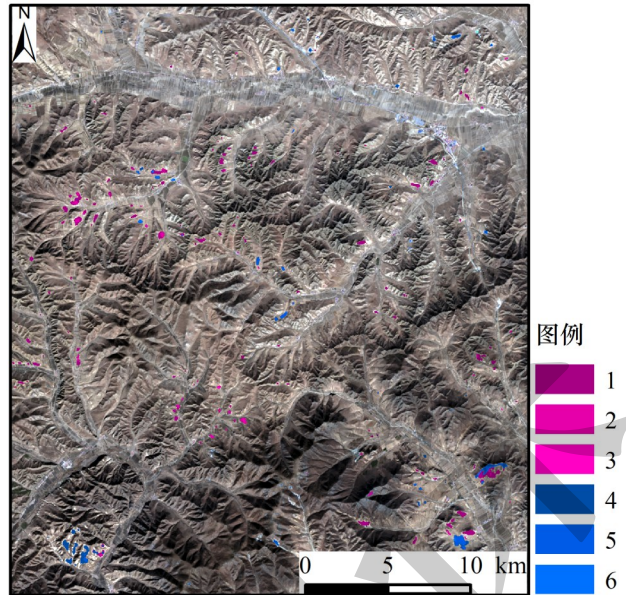


图 4 Landsat-8 蚀变信息提取结果图

Fig. 4 Extraction of alteration information based on Landsat-8 data

1-铁染一级异常;2-铁染二级异常;3-铁染三级异常;4-羟基一级异常;5-羟基二级异常;6-羟基三级异常
1-iron-stained Class 1 anomaly;2-iron-stained Class 2 anomaly;3-iron-stained Class 3 anomaly;4-hydroxyl Class 1 anomaly;5-hydroxyl Class 2 anomaly;6-hydroxyl Class 3 anomaly

变的组分。

同理,对于绿帘石、绿泥石等镁羟基蚀变信息的提取,应选择Band1、3、4、8四个波段进行主成分分析。其中,反射波段Band1、4符号为正,Band3、8的特征值符号为负,且贡献率大。由表5可知,本文选择满足上述要求的PC4作为提取镁羟基蚀变的组分。最后同样采用Crosta方法进行阈值设置与异常分级以及采用5×5中值滤波消除孤立点,实现基于ASTER数据的蚀变信息提取(图6)。

表 3 ASTER 数据 Band1、2、3、4 主分量变化表

Table 3 Changes in principal components of band 1, 2, 3 and 4 of ASTER data

Eigenvectors	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4
PC1	0.349317	0.492777	0.592672	0.532811
PC2	0.347558	0.422081	0.179441	-0.817833
PC3	0.680804	0.128669	-0.691622	0.203981
PC4	-0.541928	0.749975	-0.371751	0.075188

表 4 ASTER 数据 Band1、3、4、6 主分量变化表

Table 4 Changes in principal components of band 1, 3, 4 and 6 of ASTER data

Eigenvectors	Band 1	Band 3	Band 4	Band 6
PC1	0.311475	0.478131	0.623313	0.534654
PC2	0.478494	0.653157	-0.315848	-0.494640
PC3	0.504350	-0.211270	-0.595120	0.588921
PC4	0.647810	-0.547852	0.396928	-0.350212

表 5 ASTER 数据 Band1、3、4、8 主分量变化表

Table 5 Changes in principal components of band 1, 3, 4 and 8 of ASTER data

Eigenvectors	Band 1	Band 3	Band 4	Band 8
PC1	0.304497	0.461383	0.607775	0.570103
PC2	0.399629	0.651148	-0.096045	-0.638027
PC3	0.462773	0.077299	-0.741064	0.480303
PC4	0.730355	-0.597626	0.268720	-0.192908

2.5 GF-5 矿物精细化识别

最小噪声分离(MNF)变换常用于遥感数据处理,在减少计算量的同时达到波段降维、噪声分离和图像增强等目的(韩海辉等,2020)。其相当于对遥感数据进行了两次主成分变换:第一次变换减少了数据波段间的相关性;第二次是对噪声白化数据再进行主成分变换(吴畅宇等,2023)。通过 MNF 变换,高光谱数据能在很大程度上降低信噪比,同时把有效数据集集中在靠前的几个或十几个波段。

对于遥感影像而言,当某个像元中存在两种及两种以上的地物信息时,该像元被称为混合像元(宿虎等,2020)。混合像元的反射光谱曲线很难有效地表征某一地物的光谱特征,而由于遥感影像空间分辨率的限制以及地表地物的复杂性,导致遥感影像中普遍存在混合像元现象,因此对于高光谱遥感信息提取,纯像元的提取就成了不可或缺的一步。目前比较成熟的纯像元提取方法有像元纯度指数(PPI)及连续最大角凸锥(SMACC)(王爱云等,2011;靳文凭等,2012)等。本文选用 PPI 方法完成

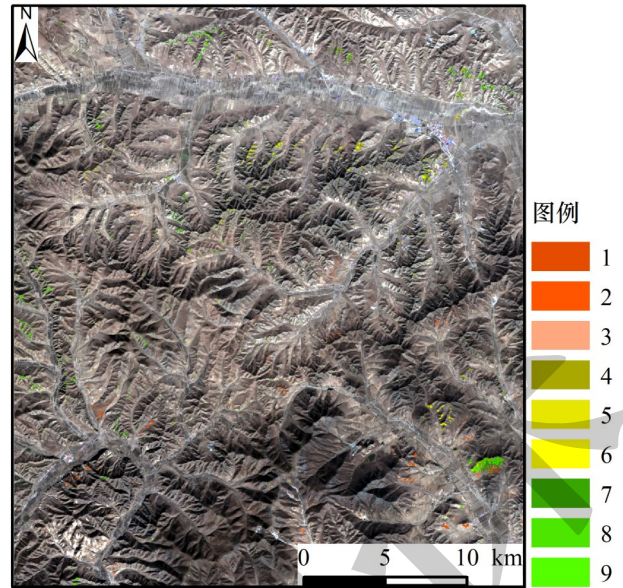


图 6 ASTER 蚀变信息提取结果图

Fig. 6 The alteration information extraction results of ASTER

1-铁染一级异常;2-铁染二级异常;3-铁染三级异常;4-镁羟基一级异常;5-镁羟基二级异常;6-镁羟基三级异常;7-铝羟基一级异常;8-铝羟基二级异常;9-铝羟基三级异常

1-iron-stained Class 1 anomaly;2-iron-stained Class 2 anomaly;3-iron-stained Class 3 anomaly;4-Mg hydroxyl Class 1 anomaly;5-Mg hydroxyl Class 2 anomaly;6-Mg hydroxyl Class 3 anomaly;7-Al hydroxyl Class 1 anomaly;8-Al hydroxyl Class 2 anomaly;9-Al hydroxyl Class 3 anomaly

端元提取,迭代次数一定时,通过设置不同的阈值,能使其曲线斜率逼近于0。本次研究将迭代次数设为5000,阈值取2.5。

基于以上处理结果,本文利用 ENVI5. 3 软件中的 n-Dimensional Visualizer 工具,通过 N 维散点图选取蚀变矿物端元,然后以感兴趣区(Regions of Interest, ROI)的形式展示出来,之后获取纯净端元的光谱数据,据此可以确定本研究区内存在白云母、绿帘石和高岭石这三种羟基蚀变矿物,从而建立本研究区的蚀变矿物经验波谱库(图7)。

最后基于经验波谱库进行蚀变矿物填图。混合调谐匹配滤波(Mixture Tuned Matched Filtering, MTMF)是一种将线性混合分解与匹配滤波结合起来的复合方法(孙雨等,2015)。该方法将匹配滤波无需背景端元波谱信息的优势和线性混合分解方法中像元内各端元占比为正且相加为1的特性有效结合起来(田丰等,2010)。混合调谐匹配滤波的结果可以分为两部分,第一部分是波谱曲线匹配的得分值,得分值高表明二者越为相似;第二部分是不可行性,不可行性高表明结果越不可靠。本文基于

上一步建立的研究区经验波谱库,对GF-5数据进行MTMF处理,选取匹配滤波得分值高且不可行性低的区域进行感兴趣区的圈定,最终完成高光谱遥感蚀变信息提取(图8)。

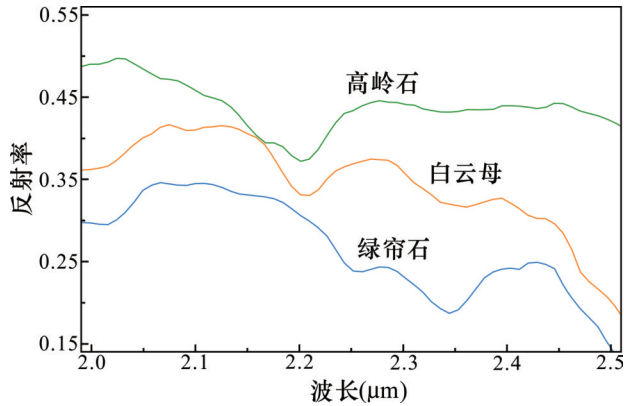


图7 研究区经验波谱库曲线

Fig. 7 Empirical spectrum library curves

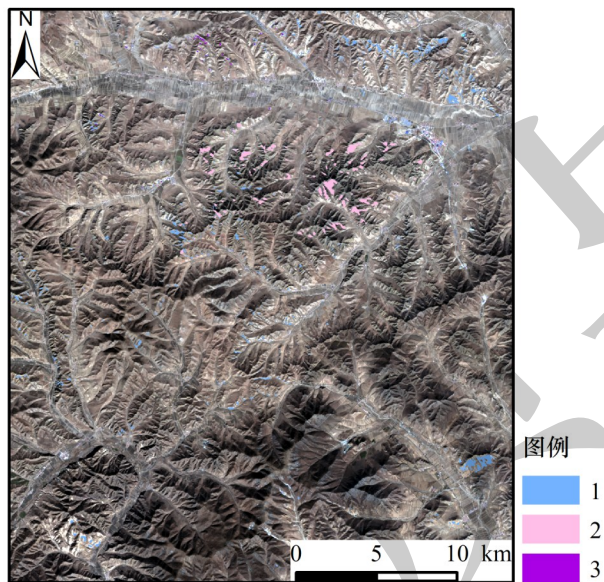


图8 GF-5蚀变信息提取结果图

Fig. 8 The alteration information extraction results of GF-5

1-云母类;2-绿帘石;3-高岭石

1-white mica;2-lepidote;3-kaolinite

3 结果与讨论

3.1 多源遥感找矿应用分析

相较于传统地质手段,遥感信息提取技术能够快速准确地实现矿化蚀变信息的大面积提取,具有巨大的经济效益、社会效益。利用多光谱数据可以获取研究区内的蚀变分布的总体特征,但常常存在将人工或自然导致的基岩裸露区、倒石堆或第四系

砂土、砂砾岩等分布区识别在内的不足;而高光谱数据可以获取地表地物的连续光谱曲线,进而深入挖掘蚀变矿物的光谱特征,实现对蚀变矿物的精细化精准化分类,对多源遥感蚀变信息提取结果进行综合分析,能够更准确地完成靶区圈定,为野外找矿工作提供技术保障。本文将基于多光谱数据和高光谱数据的蚀变信息提取结果叠加分析,可以发现大部分区域各类蚀变信息提取结果耦合较好,在研究区西南部、东南部以及东北部均具有团斑状蚀变异常聚集发育的特征,高光谱数据提取出的云母和绿帘石在研究区东北部分布面积相对较广。本次研究结合蚀变异常分布特征以及研究区地质资料,共圈出6处成矿靶区,对应蚀变信息叠加及靶区圈定结果见图9。

由于该区矿产地和异常的分布主要受环形构造控制,部分矿产地受断裂控制。经野外检查,这些环形构造主要与火山机构和岩体有关,其中与火山机构关系更密切,构成与早白垩世酸性火山-侵入杂岩有关的锡铜银铅锌稀有金属矿床成矿系列,因此未来可以利用高空间分辨率数据及雷达数据对区域地质构造进行深入解译,构建蚀变信息与构造特征相结合的遥感找矿体系。

3.2 前景分析与野外验证

大兴安岭南段位于滨西太平洋成矿域与古亚洲成矿域的交汇区域,构造岩浆-成矿作用强烈,成矿类型多样(周振华和毛景文,2022),使得该地区形成了著名的多金属成矿带,区内矿床以多成矿元素共生、伴生为特点(张浩等,2021),按成矿特征可分为矽卡岩型、斑岩型、热液脉型等矿床(Zeng et al., 2011; Ouyang et al., 2015)。本研究区内的多金属矿床主要有碧流汰伟晶岩型铍矿、小莫古吐接触交代型锡矿、大朱家营子热液型钨铍矿、胡家店热液型铜锡矿、陆家窝铺热液型铜锌银矿等(Zhou et al., 2012; 王春女等, 2016),因此本区内具有良好的找矿前景。本次研究提取的白云母和羟基蚀变对白云母花岗岩-伟晶岩型矿床及斑岩型矿床等提供了指示信息,绿帘石分布区为寻找矽卡岩型矿化提供找矿方向,而铁氧化物及铁帽与大部分金属硫化物矿床、矿化具有密切关系,因此提取铁染蚀变、寻找铁帽对于进一步找矿具有重要意义。综合蚀变提取结果表明,研究区东部的蚀变叠加集中区为最优找矿区。

对所圈定的靶区进行野外验证(图10)取得了

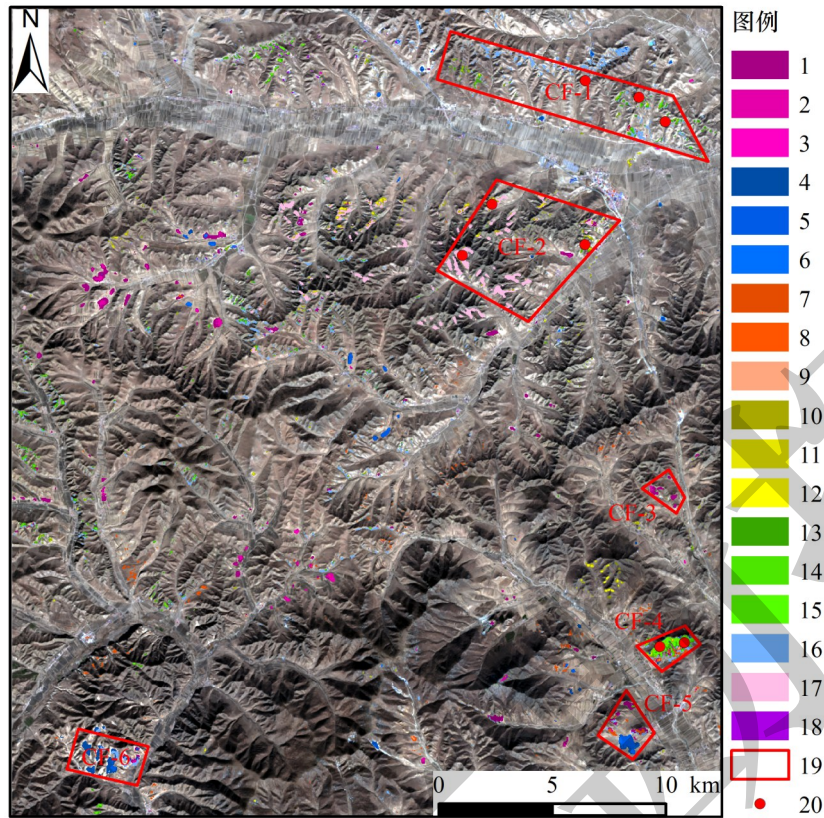


图9 研究区蚀变信息叠加结果及靶区圈定图

Fig. 9 Alteration information superposition results and target area delineation in the study area

1-铁染一级异常(Landsat-8);2-铁染二级异常(Landsat-8);3-铁染三级异常(Landsat-8);4-羟基一级异常(Landsat-8);5-羟基二级异常(Landsat-8);6-羟基三级异常(Landsat-8);7-铁染一级异常(ASTER);8-铁染二级异常(ASTER);9-铁染三级异常(ASTER);10-镁羟基一级异常(ASTER);11-镁羟基二级异常(ASTER);12-镁羟基三级异常(ASTER);13-铝羟基一级异常(ASTER);14-铝羟基二级异常(ASTER);15-铝羟基三级异常(ASTER);16-云母类(GF-5);17-绿帘石(GF-5);18-高岭石(GF-5);19-靶区;20-野外验证点

1-iron-stained Class 1 anomaly (Landsat-8);2-iron-stained Class 2 anomaly (Landsat-8);3-iron-stained Class 3 anomaly (Landsat-8);4-hydroxyl Class 1 anomaly (Landsat-8);5-hydroxyl Class 2 anomaly (Landsat-8);6-hydroxyl Class 3 anomaly (Landsat-8);7-iron-stained Class 1 anomaly (ASTER);8-iron-stained Class 2 anomaly (ASTER);9-iron-stained Class 3 anomaly (ASTER);10-Mg hydroxyl Class 1 anomaly (ASTER);11-Mg hydroxyl Class 2 anomaly (ASTER);12-Mg hydroxyl Class 3 anomaly (ASTER);13-Al hydroxyl Class 1 anomaly (ASTER);14-Al hydroxyl Class 2 anomaly (ASTER);15-Al hydroxyl Class 3 anomaly (ASTER);16-micas (GF-5);17-lepidote (GF-5);18-kaolinite (GF-5);19-target area;20-field verification points

以下发现:遥感提取结果中CF-1区域的蚀变异常由云母类异常所致,与白云母化、云英岩化有关。该区域内碧流汰地区的云英岩化与遥感提取结果中NWW向大面积带状分布的云母类蚀变具有很好的对应关系,该区产出与云英岩化、钠长石化、萤石化相关的钼多金属矿点(图10a~b);CF-2区域异常由绿帘石引起,野外发现,该区存在大量的绿帘石化、绿泥石化、透辉石化、阳起石化,并与锡铜矿化对应(图10c~f),同时结合化探异常、物探异常,在该区施工2个钻孔,发现了矿(化)体;CF-4区域异常在遥感提取结果中显示大片的铁染异常、云母类异常及铝羟基异常,与该区广泛发育的云英岩化、绢英岩化一致(图10g),该地区已有钨钼矿化显示,且

产于上侏罗统满克头鄂博组酸性凝灰岩中,是寻找陆相火山岩型钼矿的有利地区;而在CF-4区域发现少量白云母,且发现少量方铅矿化(图10h);对于CF-3、CF-5、CF-6靶区,由于野外工作条件限制,还有待开展进一步的野外验证工作。此外,遥感提取的小面积团斑状蚀变能与莫古吐锌铁矿、莫古吐锡矿、陆家窝铺铜锌银矿等相贴合。

4 结论

(1)针对大兴安岭南段赤峰地区,本文利用多光谱(Landsat-8和ASTER)数据提取了铁染、羟基异常,在很大程度上反映了区域内的蚀变分布特征。同时,国产GF-5高光谱遥感数据能够实现对蚀变

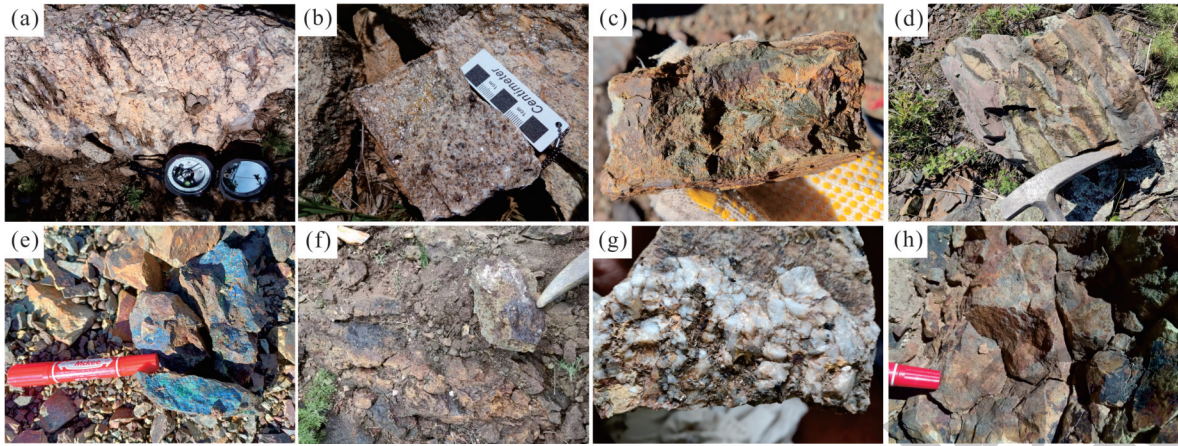


图 10 研究区蚀变及矿化野外照片

Fig. 10 Field photos of alteration and mineralization in the study area

(a)-CF-1(碧流汰)地区钠长花岗岩伟晶岩;(b)-CF-1(碧流汰)地区白云母花岗岩;(c)-CF-2(胡家店西)地区绿泥石化细砂岩;(d)-CF-2(胡家店西)地区绿帘石化细砂岩;(e)-CF-2(胡家店西)地区铜蓝和孔雀石;(f)-CF-2(胡家店西)地区绿泥石化和锡矿化露头;(g)-CF-4(大朱家营子)地区云英岩化流纹岩;(h)-CF-4(大朱家营子)地区方铅矿化流纹岩

(a)-albitite pegmatite in CF-1 (Biliutai) area; (b)-muscovite granite in CF-1 (Biliutai) area; (c)-green mud fine sandstone in CF-2 (Hujiadian West) area; (d)-epidote fine sandstone in CF-2 (Hujiadian West) area; (e)-copper blue and malachite in CF-2 (Hujiadian West) area; (f)-chlorinated and tin mineralized outcrops in CF-2 (Hujiadian West) area; (g)-dolomitic rhyolite in CF-4 (Dazhujiayingzi) area; (h)-galena rhyolite in CF-4 (Dazhujiayingzi) area

矿物类别的鉴定,在研究区内提取了白云母、绿帘石及高岭石三种矿物,将其与基于多光谱数据的提取结果叠加分析,相互印证效果良好。

(2)相较于多光谱数据,基于高光谱数据利用MTMF方法能够更加深入的获取蚀变矿物的光谱特征,更加精确地实现蚀变矿物类型的分类。

(3)通过野外查证发现本次研究所得到的蚀变信息与实际吻合良好,并在该研究区发现了锡铜矿、钨铍矿、铍矿及铁锌锡矿等多种不同类型矿床(矿种),为野外找矿工作提供了指示,同时证明了利用多源遥感提取蚀变信息与找矿的可靠性与准确性。此外,在今后的研究中可以利用遥感高分辨率数据及雷达数据解译区域地质构造,将蚀变信息与地质构造相结合,进一步提高找矿精度。

[References]

Bai Longyang, Dai Jingjing, Wang Nan, Li Baolong, Liu Zhibo, Li Zhijun, Chen Wei. 2024. Extraction of mineral alteration information and mineralization prospecting analysis based on GF-5 hyperspectral in Zhule-Mangla, Tibet[J]. *Geology in China*, 51(3): 995-1007(in Chinese with English abstract).

Chen Fang, Yu Bo, Li Bin. 2018. A practical trial of landslide detection from single-temporal Landsat8 images using contour-based proposals and random forest: A case study of national Nepal[J]. *Landslides*, 15(3): 453-464.

Chen Yonggan, Han Xianju, Zhang Huiyu, Wang Meijuan, Tang Yuanyuan, Fu Yang, Chang Chunjiao. 2011. Extracting remote sensing alteration information from areas with various covers based

on decomposition of mixed pixels: An example of the Zhaishang gold mine in min county of Gansu Province[J]. *Geology and Exploration*, 47(6): 1171-1176(in Chinese with English abstract).

Cheng Tanwu, Chen Jianguo, Xu Mengyang. 2017. Application of mixed pixel decomposition in mineralization and alteration information extraction in vegetation-covered area: A case study of the Dahaoshan gold deposit in Jiangxi Province [J]. *Journal of Geology*, 1(3): 492-498(in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Qu Xiaoming. 2012. Structural pattern and alteration information derived from remote sensing data and their significance for ore search in the Duolong copper-ore concentration area of Tibet[J]. *Geology and Exploration*, 48(4): 815-822(in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Wang Denghong, Wang Haiyu. 2019. A review of the three type rare mineral resources survey in China using remote sensing [J]. *Acta Geologica Sinica*, 93 (6) : 1270-1278 (in Chinese with English abstract).

Dai Jingjing, Zhao Longxian, Jiang Qi, Wang Haiyu, Liu Tinyue. 2020. Review of thermal-infrared spectroscopy applied in geological ore exploration [J]. *Acta Geologica Sinica*, 94 (8) : 2520-2533(in Chinese with English abstract).

Ding Wei. 2019. Geological characteristics and sedimentary environment of the Daxing'anling metallogenic belt [J]. *World Nonferrous Metals*, 34(6): 195-200(in Chinese with English abstract).

Gao Meng, Fu Zehan, Chen Chuan. 2019. Hetian jade metallogenic factors Identification and prospecting prediction by remote sensing technology: Example from Tashisayi area in South Altyn [J]. *Northwestern Geology*, 52(3): 240-252(in Chinese with English abstract).

Han Haihui, Wang Yilin, Ren Guangli, Yang Min, Zhang Zhuan.

2020. A comparative analysis of several hyperspectral methods in the extraction of altered minerals: A case study of Laojinchang in Beishan area [J]. *Northwestern Geology*, 53(4): 223-234 (in Chinese with English abstract).
- Han Yaohui, Wang Cuizhi, Wu Zhijie, Lv Guxian, Zhang Baolin, Zhang Qipeng. 2024. Remote sensing geological interpretation, alteration information extraction, and mineral prospecting prediction in the Chaihulanzhi gold field, Chifeng, Inner Mongolia [J]. *Geoscience*, 38(4): 1076-1091 (in Chinese with English abstract).
- Jin Wenping, Xiao Keke, Zeng Yongnian. 2012. Comparison of endmember extraction methods from hyperspectral image [J]. *Modern Surveying and Mapping*, 35(4): 19-21 (in Chinese with English abstract).
- Jing Feng. 2005. The integrated remote sensing and multi-source information study of the polymetallic mineralization belt in the southern section of the Greater Khingan Range, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-63 (in Chinese).
- Li Junhui, Yan Zhen, Fu Changlei, Wang Yang, Chen Lei, Li Wufu. 2022. Application of remote sensing geological interpretation in thematic geological mapping of accretionary complex: A case study of the Tuomoerite accretionary complex in the northern margin of Qaidam Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(4): 1478-1487 (in Chinese with English abstract).
- Li Junjian, Peng Yi, Zhang Tong, Song Lijun, Ni Zhenping, Zhou Jihua, Bai Libing, Guo Guohai, Dang Zhicai. 2021. Division of metallogenic units in North China [J]. *North China Geology*, 44(3): 4-24 (in Chinese with English abstract).
- Li Pengchuan, Li Shichao, Liu Zhenghong, Li Gang, Bai Xinhui, Wan Le. 2016. Formation age and tectonic environment of volcanic rocks from Manketouebo Formation in Linxi area, Inner Mongolia [J]. *Global Geology*, 35(1): 77-88 (in Chinese with English abstract).
- Li Shuaizhi. 2020. Study on the ore-forming rule of the tungsten-tin polymetallic ore in the southwest of the Daxing'an Mountains and the evaluation of the resource potential [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing): 1-58 (in Chinese with English abstract).
- Li Shucai, Zhang Xionghua, Li Yuanbai, Yang Xinjie, Zhang Liangyuan. 2019. Geological age of Linxi Formation in Linxi, Inner Mongolia, and its sedimentary environment [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 38(1): 1-7 (in Chinese with English abstract).
- Li Zhibin, Liu Zeyu. 2021. The application of Landsat_8OLI data in remote sensing prospecting prediction [J]. *China Metal Bulletin*, 29(2): 76-77 (in Chinese with English abstract).
- Liu Cheng, Wang Danli, Li Xiaomei. 2003. Extracting clay alteration information of medium vegetation covered areas based on linear model of spectral mixture analysis [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 18(2): 95-98 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jianming, Zhang Rui, Zhang Qingzhou. 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269-277 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanping, Dang Bo, Li Yue, Lin Hongbo, Ma Haitao. 2015. Applications of Savitzky-Golay filter for seismic random noise reduction [J]. *Acta Geophysica*, 64(1): 101-124.
- Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Wu Guang, Jiang Sihong, Liu Chenglin, Li Houmin, Ouyang Hegen, Liu Jun. 2013. Metallogenic regularity and minerogenetic series of ore deposits in Inner Mongolia and adjacent areas [J]. *Mineral Deposits*, 32(4): 716-730 (in Chinese with English abstract).
- Ouyang Hegen, Mao Jingwen, Zhou Zhenhua, Su Huiming. 2015. Late Mesozoic metallogeny and intracontinental magmatism, southern Great Xing'an Range, northeastern China [J]. *Gondwana Research*, 27(3): 1153-1172.
- Pour B A, Hashim M, Marghany M. 2011. Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran [J]. *International Journal of Physical Sciences*, 6(4): 917-929.
- Rowan L C, Goetz A F H, Ashley R P. 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near-infrared multispectral images [J]. *Geophysics*, 42: 522-535.
- Savitzky A, Golay M J E. 2002. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures [J]. *Analytical Chemistry*, 36(8): 1627-1639.
- Song Yiwei, Wang Peng, Li Chengqin, Dai Xuejian, Wang Bin. 2021. Lithologic mapping and alteration information extracting based on ASTER spectral signature: An example from Nianzha gold deposit [J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 126-136 (in Chinese with English abstract).
- Su Hu, Chen Meiyuan, Zhang Danqing, Ji Zhonghe, Yang Jing. 2021. Study on the method of extracting information of mineralization alteration by using remote sensing in high vegetation coverage area——Taking Daqiao-Shixia area of Xihe County, Gansu Province for example [J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 126-136 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yongbin, Wang Ruijun, Wei Benzan, Wang Bing, Dong Shuangfa, Li Cunjin, Li Minsong. 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, Zhao Yingjun, Li Hanbo, Lu Donghua, Tian Feng, Qin Kai, Yang Guofang, Zhou Jiajing, Liu Pengfei. 2015. HySpex hyperspectral mineral mapping of Asiha gold ore district in Dulan County, Qinghai Province and its prospecting implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 195-203 (in Chinese with English abstract).
- Sun Yunzhu, Jiang Guangwei, Li Yunduan, Yang Yong, Dai Haishan, He Jun, Ye Qinghao, Cao Qiong, Dong Changzhe, Zhao Shaohua, Wang Weihe. 2018. GF-5 satellite: Overview and application prospects [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 39(3): 1-13 (in Chinese with English abstract).
- Tan Bingxiang, Li Zenguan, Chen Erxue, Pang Yong. 2005. Preprocessing of EO-1 Hyperion hyperspectral data [J]. *Remote Sensing Information*, 20(6): 36-41 (in Chinese with English abstract).
- Tian Feng, Dong Lina, Yang Suming, Wang Runsheng. 2010. Application of combined spectra of mixed minerals to mapping altered minerals: A case study in the Yunnan region based on hyperion data [J]. *Geology and Exploration*, 46(2): 331-337 (in Chinese with English abstract).

- Chinese with English abstract).
- Tian Shufang, Zhan Qian. 2013. Remote sensing geology(2nd Edition)[M]. Beijing: Geological Publishing House: 256-263(in Chinese).
- Wang Aiyun, Wang Anjian, Li Lihui. 2011. Mapping mineralogical alteration using MNF transform and mineral in vegetated areas[J]. Geology and Exploration, 47(4): 710-718(in Chinese with English abstract).
- Wang Chunnv, Wang Quanming, Yu Xiaofei, Han Zhenzhe. 2016. Metallogenic characteristics of tin and ore-search prospect in the southern part of Da Hinggan Mountains[J]. Geology and Exploration, 52(2): 220-227(in Chinese with English abstract).
- Wang Jingbin, Wang Yuwang, Wang Lijuan, Uemoto T. 2001. Tin-polymetallic mineralization in the southern part of the Da Hinggan Mountains, China[J]. Resource Geology, 51(4): 283-291.
- 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).
- Wu Guang, Liu Ruilin, Chen Gongzheng, Li Tiegang, Li Ruihua, Li Yinglei, Yang Fei, Zhang Tong. 2021. Mineralization of the Weilasituo rare metal tin-polymetallic ore deposit in Inner Mongolia: Insights from fractional crystallization of granitic magmas[J]. Acta Petrologica Sinica, 37(3): 637-664(in Chinese with English abstract).
- Yan Shouxun, Zhang Bing, Zhao Yongchao, Zheng Lanfen, Tong Qingxi, Yang Kai. 2003. Summarizing the VIS-NIR spectra of minerals and rocks[J]. Remote Sensing Technology and Application, 18(4): 191-201(in Chinese with English abstract).
- Yang Chaolei, Zou Tao, Zhu Xinyou, Yang Shangsong, Jiang Haoyuan, Yuan Weiheng, Peng Weigang, Liu Yulong, Ma Yiqi. 2021. Chronology and geochemistry of Mogutu granite in Inner Mongolia and its effect of crustal extension and thinning[J]. Geology in China, 48(1): 247-263(in Chinese with English abstract).
- Yin Zhigang, Hao Ke, Liu Chenglong, Wang Yang, Li Haina, Li Min, Gong Zhaomin, Zhang Shengtin. 2019. Geochronological and geochemical characteristics of rhyolite in the Manketou'ebo Formation of Dong Ujimqin Banner, Inner Mongolia, and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 38(11): 1825-1835(in Chinese with English abstract).
- Zeng Qingdong, Liu Jianming, Yu Changming, Ye Jie, Liu Hongtao. 2011. Metal deposits in the Da Hinggan Mountains, NE China: Styles, characteristics, and exploration potential[J]. International Geology Review, 53(7): 846-878.
- Zhang Hao, Wang Xinli, Liu Daorong, Sun Yinqiang, Cheng Muli. 2021. Ore-forming conditions and exploration potential of typical Ag-Sn polymetallic deposits in the central-southern Da Hinggan Mountains [J]. Geology and Exploration, 57(1): 39-52(in Chinese with English abstract).
- Zhang Yongbei, Sun Shihua, Hongma Hiroji, Mao Qian. 2003. Magma contamination of acidic rocks in Linxi area in southern Da Hinggan Mountains, northeast China[J]. Acta Petrologica Sinica, 19(3): 369-384(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhenhua, Mao Jingwen. 2022. Metallogenic patterns and ore deposit model of the tin polymetallic deposits in the southern segment of Great Xing'an Range[J]. Earth Science Frontiers, 29(1): 176-199(in Chinese with English abstract).
- Zhou Zhiguang, Wu Jiangwei, Niu Yi, Wang Guosheng, Wu Chen, Liu Changfeng, Ju Juncheng. 2020. Geochemistry of the Mesoproterozoic intrusions, geochronology and isotopic constraints on the Xiaonanshan Cu-Ni deposit along the northern margin of the North China Craton[J]. Journal of Earth Science, 31(4): 653-667.
- [附中文参考文献]
- 白龙洋, 代晶晶, 王楠, 李宝龙, 刘治博, 李志军, 陈伟. 2024. 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, 51(3): 995-1007.
- 陈勇敢, 韩先菊, 张慧玉, 王美娟, 汤媛媛, 傅扬, 常春郊. 2011. 基于混合像元分解提取多种类覆盖区遥感蚀变信息——以甘肃省岷县寨上金矿区为例[J]. 地质与勘探, 47(6): 1171-1176.
- 程潭武, 陈建国, 徐梦扬. 2017. 混合像元分解法在植被覆盖区矿化蚀变信息提取中的应用——以江西大浩山金矿区为例[J]. 地质学刊, 41(3): 492-498.
- 代晶晶, 曲晓明. 2012. 西藏多龙铜多金属矿集区构造及蚀变遥感信息提取[J]. 地质与勘探, 48(4): 815-822.
- 代晶晶, 王登红, 王海宇. 2019. 我国三稀矿产资源遥感调查综述[J]. 地质学报, 93(6): 1270-1278.
- 代晶晶, 赵龙贤, 姜琪, 王海宇, 刘婷玥. 2020. 红外外高光谱技术在地质找矿中的应用综述[J]. 地质学报, 94(8): 2520-2533.
- 丁伟. 2019. 大兴安岭成矿带中段林西组的地质特征及沉积环境研究[J]. 世界有色金属, 34(6): 195-200.
- 付超, 李俊建, 党智财, 张彤, 彭翼, 宋立军, 侯占国, 倪振平. 2021. 华北地区铅锌矿资源特征及成矿规律[J]. 地质找矿论丛, 36(1): 1-11.
- 高猛, 付翰泽, 陈川. 2019. 遥感技术在和田玉成矿要素识别与找矿预测中的应用——以南阿尔金山塔什萨依一带为例[J]. 西北地质, 52(3): 240-252.
- 韩海辉, 王艺霖, 任广利, 杨敏, 张转. 2020. 几种高光谱分析法在蚀变矿物信息提取中的对比分析——以北山老金厂为例[J]. 西北地质, 53(4): 223-234.
- 韩耀徽, 王翠芝, 吴志杰, 吕古贤, 张宝林, 张启鹏. 2024. 内蒙古赤峰柴胡栏子金矿田遥感地质解译和蚀变信息提取与找矿预测[J]. 现代地质, 38(4): 1076-1091.
- 靳文凭, 肖可可, 曾永年. 2012. 高光谱遥感影像端元提取方法对比[J]. 现代测绘, 35(4): 19-21.
- 荆凤. 2005. 内蒙古大兴安岭南段多金属成矿带遥感多源信息综合研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-63.
- 李隽辉, 闫臻, 付长垒, 汪洋, 陈雷, 李五福. 2022. 遥感地质解译在增生杂岩专题地质填图中的应用——以柴达木盆地北缘托莫尔日特增生杂岩为例[J]. 地质学报, 96(4): 1478-1487.
- 李俊建, 彭翼, 张彤, 宋立军, 倪振平, 周继华, 白立兵, 郭国海, 党智财. 2021. 华北地区成矿单元划分[J]. 华北地质, 44(3): 4-24.

- 李鹏川, 李世超, 刘正宏, 李刚, 白新会, 万乐. 2016. 内蒙古林西地区满克头鄂博组火山岩形成时代及构造环境[J]. 世界地质, 35(1): 77-88.
- 李树才, 张雄华, 李沅柏, 杨欣杰, 张亮元. 2019. 内蒙古林西地区林西组地质时代及沉积环境[J]. 地质科技情报, 38(1): 1-7.
- 李帅值. 2020. 大兴安岭西南段钨锡多金属成矿规律研究及资源潜力评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京): 1-58.
- 李智斌, 刘泽宇. 2021. Landsat_8OLI数据在遥感找矿预测中的应用[J]. 中国金属通报, 29(2): 76-77.
- 刘成, 王丹丽, 李笑梅. 2003. 用混合像元线性模型提取中等植被覆盖区的粘土蚀变信息[J]. 遥感技术与应用, 18(2): 95-98.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲. 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征[J]. 地学前缘, 11(1): 269-277.
- 毛景文, 周振华, 武广, 江思宏, 刘成林, 李厚民, 欧阳荷根, 刘军. 2013. 内蒙古及邻区矿床成矿规律与成矿系列[J]. 矿床地质, 32(4): 716-730.
- 宋伊圩, 王鹏, 连琛芹, 代雪健, 王斌. 2021. 基于ASTER光谱特征的岩性填图和蚀变信息提取: 念扎金矿例析[J]. 西北地质, 54(2): 126-136.
- 宿虎, 陈美媛, 张丹青, 靳仲娥, 杨菁. 2020. 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, 53(1): 146-161.
- 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, 赵英俊, 李瀚波, 陆冬华, 田丰, 秦凯, 杨国防, 周家晶, 刘鹏飞. 2015. 青海省都兰县阿斯哈金矿区HySpex高光谱矿物填图及其找矿意义[J]. 地质学报, 89(1): 195-203.
- 孙允珠, 蒋光伟, 李云端, 杨勇, 代海山, 何军, 叶擎昊, 曹琼, 董长哲, 赵少华, 王维和. 2018. “高分五号”卫星概况及应用前景展望[J]. 航天返回与遥感, 39(3): 1-13.
- 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, 20(6): 36-41.
- 田丰, 董丽娜, 杨苏明, 王润生. 2010. 混合矿物组合光谱在蚀变矿物填图中的应用——以云南香格里拉地区Hyperion数据蚀变矿物填图为例[J]. 地质与勘探, 46(2): 331-337.
- 田淑芳, 詹骞. 2013. 遥感地质学(第二版)[M]. 北京: 地质出版社: 256-263.
- 王爱云, 王安建, 李丽辉. 2011. 基于最大噪声分量变换(MNF)和矿物标识的植被区蚀变信息提取[J]. 地质与勘探, 47(4): 710-718.
- 王春女, 王全明, 于晓飞, 韩振哲. 2016. 大兴安岭南段锡矿成矿特征及找矿前景[J]. 地质与勘探, 52(2): 220-227.
- 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.
- 武广, 刘瑞麟, 陈公正, 李铁刚, 李睿华, 李英雷, 杨飞, 张彤. 2021. 内蒙古维拉斯托稀有金属-锡多金属矿床的成矿作用: 来自花岗岩岩浆结晶分异的启示[J]. 岩石学报, 37(3): 637-664.
- 燕守勋, 张兵, 赵永超, 郑兰芬, 童庆禧, 杨凯. 2003. 矿物与岩石的可见-近红外光谱特性综述[J]. 遥感技术与应用, 18(4): 191-201.
- 杨朝磊, 邹滔, 祝新友, 杨尚松, 蒋昊原, 袁伟恒, 彭伟刚, 柳玉龙, 马一奇. 2021. 内蒙古莫古吐花岗岩年代学、地球化学与地壳伸展-减薄作用[J]. 中国地质, 48(1): 247-263.
- 尹志刚, 郝科, 刘成龙, 王阳, 李海娜, 李敏, 官兆民, 张圣听. 2019. 内蒙古东乌旗地区满克头鄂博组流纹岩年代学、地球化学特征及其地质意义[J]. 地质通报, 38(11): 1825-1835.
- 张浩, 王新利, 刘道荣, 孙引强, 程幕利. 2021. 大兴安岭中南段典型银锡多金属矿床成矿条件与找矿潜力[J]. 地质与勘探, 57(1): 39-52.
- 张永北, 孙世华, 本间弘次, 毛骞. 2003. 大兴安岭南段林西地区中生代酸性岩类岩浆的混染作用[J]. 岩石学报, 19(3): 369-384.
- 周振华, 毛景文. 2022. 大兴安岭南段锡多金属矿床成矿规律与矿床模型[J]. 地学前缘, 29(1): 176-199.

The Extraction of Multi-Source Remote Sensing Alteration Information of Polymetallic Deposits in the Southern Great Xing'an Range: A Case Study of the Chifeng Area in Inner Mongolia

WU Changyu^{1,2}, DAI Jingjing^{1,2}, WU Guang², SHE Hongquan², PANG Xuyong², ZHAO Tianchen³

(1. State Key Laboratory of Deep Earth and Mineral Exploration, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100094; 2. MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037; 3. Tianjin Urban Construction Management & Vocation Technology College, Tianjin 300400)

Abstract: The northern Chifeng region of Inner Mongolia contains abundant lead-zinc, silver, tin, tungsten, copper, lithium, beryllium, niobium, tantalum, molybdenum, and iron resources, making it significant in the nonferrous metal-rare metal-silver metallogenic belt of the southern Great Xing'an Range. Previous studies have conducted extensive geological, geophysical, geochemical, remote sensing, and mineral resource surveys in the southern Great Xing'an Range, particularly in the Chifeng area. However, there is still a lack of effective prospecting methods for shallow overburden areas. Considering the metallogenic geological background and spatial distribution patterns of deposits in this region, this study employed multi-source remote sensing technology to extract mineralization alteration in Hexigten Banner and Linxi County, northern Chifeng. Multispectral data (Landsat-8, ASTER) were used to extract alteration of different mineral types through principal component analysis. For GF-5 data, the mixed-tuned matched filtering technique was applied to extract mineralization alteration. The results from the three remote sensing methods were then integrated for comprehensive analysis to delineate prospective metallogenic targets. We also conducted field verification, further advancing the application of remote

sensing in geological and mineral resource exploration. Based on Landsat-8 and ASTER multispectral data, iron-stained and hydroxyl-bearing (Mg-OH, Al-OH) mineral information was extracted. Three alteration minerals of muscovite, epidote, and kaolinite were identified based on the GF-5 data. Field verification confirmed that the remote sensing extraction results corresponded well with actual alteration anomalies, and tin-copper-silver-lead-zinc mineralization was discovered within the delineated target areas. This study, by combining extraction and overlay results from different data sources and validating them through field surveys, demonstrates the accuracy of the remote sensing methods used for mineralization alteration extraction. The integration of multispectral and hyperspectral remote sensing data facilitates subsequent alteration zoning analysis and more precise metallogenic prediction, thereby better serving mineral resource exploration and related fields.

Key words: multi-source remote sensing data, alteration information extraction, principal component analysis, hybrid tuned matched filtering, Chifeng area, Inner Mongolia

