

基于遥感数据的内蒙古化德地区矿化蚀变信息提取及找矿指示

洪文斌, 孙 肖*, 张志军, 霍润斌, 王雁亮, 王子彬, 何威荣

中国地质调查局廊坊自然资源综合调查中心, 天津

收稿日期: 2026年8月3日; 录用日期: 2026年8月28日; 发布日期: 2026年9月7日

摘 要

内蒙古乌兰察布市化德县地处华北地台北缘白云鄂博裂谷带东段, 是华北陆块北缘重要的金、银、铜、铅、锌、钨、钼等多金属成矿区, 近年来相继发现了幸福村金矿、二道沟铜金矿、三胜村钨钼矿床、长春沟-达盖滩铅锌矿、达盖滩钼多金属矿等一批矿床(点), 具有较大的找矿潜力。为充分发挥遥感技术在矿产资源勘查中的先导性作用, 本文基于ASTER和Landsat-8 OLI两种遥感数据, 依据研究区典型蚀变矿物的光谱特征, 采用主成分分析方法分别提取了铁染蚀变信息和羟基蚀变信息。通过蚀变异常信息的空间分布规律分析, 结合区域地质图及构造研究成果进行叠加分析, 成功圈定了数条蚀变异常带。研究表明, 化德县遥感蚀变异常的展布方向与区域北西向和近东西向断裂构造带走向基本一致, 成矿热液活动明显受断裂构造控制。本文研究可为华北地台北缘寻找同类型多金属矿床提供遥感技术参考, 对化德县及其外围找矿工作具有一定的指导意义。

关键词

化德县, 多金属矿, 蚀变异常信息, 主成分分析, ASTER, Landsat-8 OLI, 构造控矿

Extraction of Mineralization Alteration Information and Prospecting Indications Based on Remote Sensing Data in the Huade Area, Inner Mongolia

Wenbin Hong, Xiao Sun*, Zhijun Zhang, Runbin Huo, Yanliang Wang, Zibin Wang, Weirong He

Langfang Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Tianjin

Received: August 3, 2026; accepted: August 28, 2026; published: September 7, 2026

*通讯作者。

文章引用: 洪文斌, 孙肖, 张志军, 霍润斌, 王雁亮, 王子彬, 何威荣. 基于遥感数据的内蒙古化德地区矿化蚀变信息提取及找矿指示[J]. 自然科学, 2026, 14(5): 601-610. DOI: 10.12677/ojns.2026.145064

Abstract

The Huade County of Ulanqab City, Inner Mongolia, is located in the eastern segment of the Bayan Obo rift zone on the northern margin of the North China Platform. It is an important polymetallic metallogenic region for Au, Ag, Cu, Pb, Zn, W, and Mo along the northern margin of the North China Craton. In recent years, a number of deposits (occurrences) have been discovered successively in this area, including the Xingfucun gold deposit, Erdaogou copper-gold deposit, Sanshengcun tungsten-molybdenum deposit, Changchungou-Dagaitan lead-zinc deposit, and Dagaitan molybdenum-polymetallic deposit, indicating considerable prospecting potential. To fully leverage the pioneering role of remote sensing technology in mineral exploration, this study utilized both ASTER and Landsat-8 OLI remote sensing data. Based on the spectral characteristics of typical alteration minerals in the study area, the principal component analysis (PCA) method was employed to extract iron-stained alteration information and hydroxyl alteration information, respectively. Through analysis of the spatial distribution patterns of the alteration anomalies, combined with overlay analysis using regional geological maps and structural research results, several alteration anomaly zones were successfully delineated. The results show that the distribution direction of the remote-sensing alteration anomalies in Huade County is generally consistent with the strike of the regional NW-trending and near-E-W-trending fault structural belts, indicating that the hydrothermal mineralization activities are obviously controlled by fault structures. This study can provide a remote-sensing technical reference for the exploration of similar polymetallic deposits on the northern margin of the North China Craton, and has certain guiding significance for prospecting work in Huade County and its surrounding areas.

Keywords

Huade County, Polymetallic Deposits, Alteration Anomaly Information, Principal Component Analysis (PCA), ASTER, Landsat-8 OLI, Structural Ore Control

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

近年来,随着地质勘查工作的不断深入,内蒙古乌兰察布市化德县及其周边地区相继发现了一批金、铜、钨、钼、铅、锌、银等多金属矿床(点)。化德县所属的华北地台北缘成矿带成矿地质条件优越,找矿潜力巨大。然而,受限于该地区自然地理条件及传统地质调查方法的局限,大范围的地面勘查工作难度较大,亟须引入高效、大范围的遥感技术手段辅助找矿工作。

随着卫星遥感技术的不断发展,多光谱遥感数据在矿产资源勘查中的应用日趋成熟。国内外学者在遥感蚀变异常提取方法方面开展了大量研究工作,建立了以主成分分析、波段比值、光谱角填图等为代表的方法体系,并在东天山、北山、蒙古欧玉陶勒盖等多个成矿区带取得了良好的应用效果。在内蒙古地区,遥感蚀变信息提取方法已在朱拉扎嘎金矿、东乌珠穆沁北部地区等多个矿区得到应用验证,证实了该技术方法在草原覆盖区找矿中的有效性。

然而,针对化德县全境的多金属矿化蚀变信息系统的遥感提取研究仍相对薄弱。本文在前人研究基础上,选用 ASTER 和 Landsat-8 OLI 两种遥感数据,针对化德县主要蚀变矿物类型,采用主成分分析方法分别提取铁染和羟基蚀变异常信息,并结合区域地质资料和构造研究成果,分析蚀变异常的空间分布

规律及其与控矿构造的关系, 以期为化德县及外围多金属矿产勘查提供遥感技术支撑。

2. 研究区地质概况

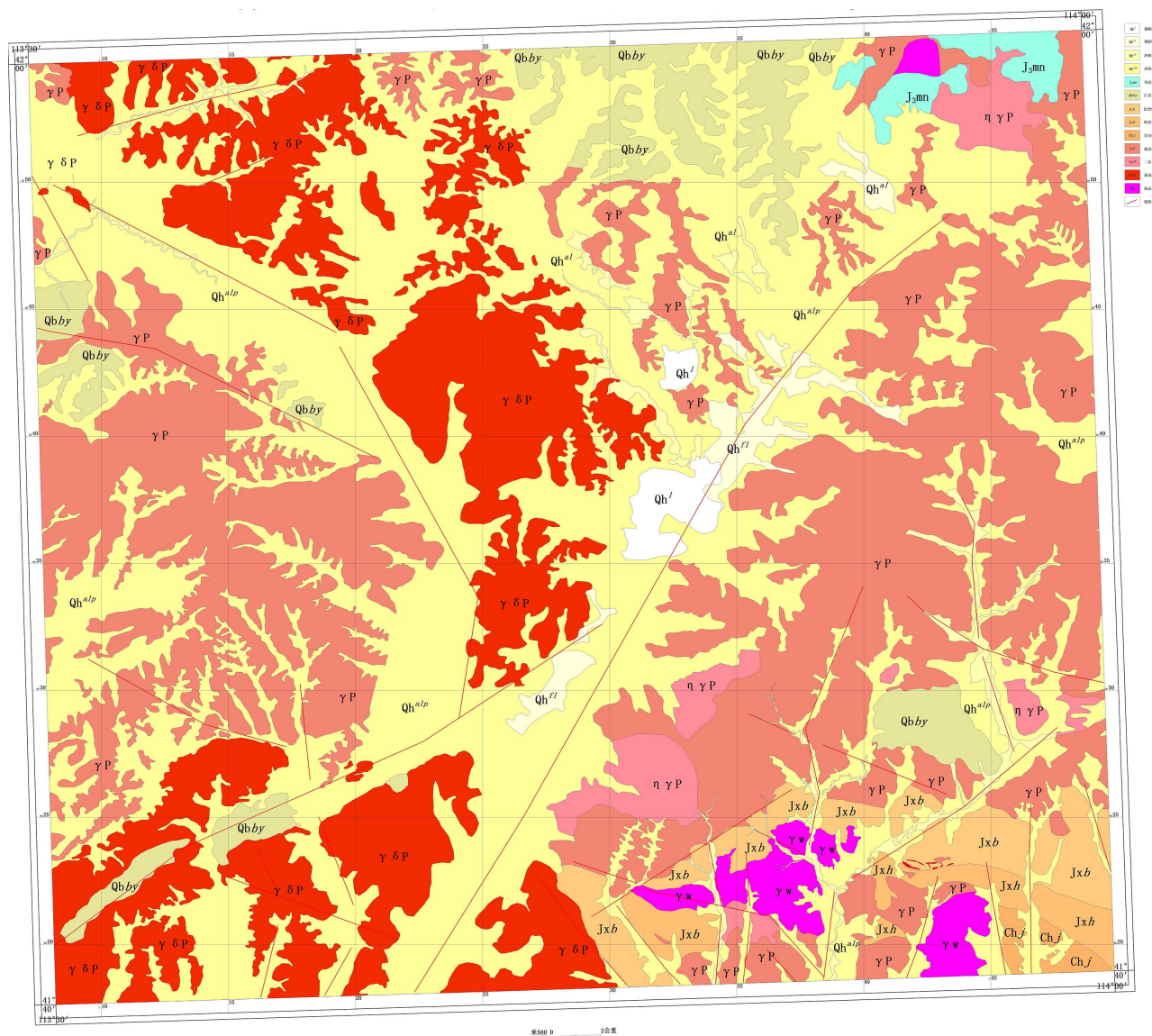


Figure 1. Geological structural map of the study area

图 1. 研究区地质构造图

化德县位于内蒙古自治区乌兰察布市东北部，大地构造位置处于华北地台北缘白云鄂博裂谷带之东段。区域上以川井-白云鄂博-化德槽台断裂为界，南部为华北地台北缘，北部为内蒙古中部地槽褶皱系。化德-赤峰深大断裂属高家窑-乌拉特后旗-化德-赤峰深大断裂带中段的一部分，构成地台区和地槽区的分界线。区域成矿地质条件十分优越。区域地层以太古宇-元古宇变质岩系为主。幸福村金矿[1]含金脉体主要赋存于白云鄂博群比鲁特组千枚岩中。二道沟铜金矿[2]位于华北板块北缘，地处我国重要的华北地台北缘金、银、铜、铅、锌、铂、钼、硼、石墨、滑石成矿区，查证了以中低温热液元素 Au、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Bi 组合为主的异常，赋矿岩石为二叠纪三面井组第二岩段结晶灰岩、粉砂质板岩、

变质粉砂岩。三胜村钨钼矿床[3][4]位于化德县境内,是新近评价出的中型矿床,远景可达大型,为岩浆期后中高温热液型矿床,赋矿地层为下二叠统三面井组砂岩、粉砂岩。长春沟-达盖滩地区铅锌矿[5]是最新发现的多金属矿床,矿床的形成与中生代构造岩浆活动与成矿作用关系密切,矿化类型为热液充填型多金属矿。达盖滩钼多金属矿[6]位于乌力吉-锡林浩特元古代、华力西、燕山期铜、铁、铬、金、萤石成矿带(III级)之卯都房子-毫义哈达钨、萤石成矿带(IV级)上,处于高家窑-化德-赤峰槽台断裂的北侧。化德县五福堂矿区[7]位于康保-围场深大断裂和白云鄂博断裂内,中生代下二叠统额里图组地层金、铜等微量元素含量明显高于区域地球化学背景场值,存在形成多金属矿床的潜在矿源层。化德地区侵入岩发育。三胜村钨钼矿床赋矿的三胜村花岗岩具有高硅、富碱特征,为准铝质-弱过铝质和高钾钙碱性/钾玄岩系列的深源I型花岗岩,成岩年龄为 137 ± 1 Ma,为早白垩世侵入体。后沟钼铅锌多金属矿化[8]主要与晚侏罗世细粒斜长黑云母花岗岩与白垩纪花岗斑岩有关。二道沟铜金矿的成矿作用与侏罗纪晚期石英闪长岩存在空间关系。

化德县构造特征以断裂构造为主(见图1),区域上受高家窑-化德-赤峰槽台断裂控制。次级断裂构造发育,北西向和近东西向断裂是主要的控矿和容矿构造。长春沟地区控矿因素主要为上侏罗纪地层、晚侏罗世花岗岩及北西向断裂构造[9]。

化德县主要矿产类型有中低温热液型金矿、海相火山岩型铁矿、矽卡岩型铜钨矿等。围岩蚀变类型多样,常见的有硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、褐铁矿化等,围岩蚀变可作为找矿的重要间接标志。地表出露的蚀变矿物分布范围广泛,这为遥感蚀变信息提取提供了良好的物质基础。

3. 遥感数据基本特征与蚀变矿物光谱分析

3.1. 遥感数据特点

本研究选用 ASTER 和 Landsat-8 OLI 两种遥感数据。ASTER 搭载于 Terra 卫星,具有 14 个波段,覆盖可见光-近红外(VNIR)、短波红外(SWIR)和热红外(TIR)范围,其中 VNIR 波段空间分辨率为 15 m, SWIR 波段为 30 m。ASTER 数据在短波红外波段光谱信息明显优于 ETM+,使得在 ASTER 波段范围内能够更为详尽地刻画地物波谱,尤其是具有特征谱带的岩石和矿物[10]。Landsat-8 OLI 携带陆地成像仪,共有 9 个波段,覆盖海岸/气溶胶、可见光、近红外和短波红外范围,空间分辨率均为 30 m。两种数据的组合使用可以充分发挥各自优势:ASTER 数据短波红外波段划分更精细,有利于羟基类蚀变矿物的识别;Landsat-8 OLI 数据波段设置合理,在铁染信息提取方面效果良好。本次研究选取了覆盖化德县全境的 1 景 Landsat-8 OLI 数据和 2 景 ASTER 数据,成像时间均选择植被覆盖较少的春季和秋季,以最大限度地减少植被干扰。

3.2. 蚀变矿物光谱特征

地表岩石的蚀变矿物因内部电子跃迁、分子振动以及晶格结构差异,对不同波长范围的电磁波谱表现出独特的吸收谷和反射峰特征。热液矿床的蚀变围岩通常含有 Fe^{3+} 、 OH^- 、 CO_3^{2-} 等离子(基团),它们的波谱特征是蚀变遥感异常提取的理论基础[11]。化德县多金属矿区常见的蚀变矿物包括褐铁矿(铁染)、绢云母/高岭石(羟基)、绿泥石(羟基)、方解石(碳酸盐化)等。铁染蚀变矿物(如褐铁矿)因 Fe^{3+} 离子的电子跃迁,在可见光-近红外波段(0.4~1.1 μm)具有特征吸收谱带,在 Landsat-8 OLI 的波段 2(蓝光)和波段 4(红光)附近呈现吸收特征,在波段 3(绿光)和波段 5(近红外)附近呈现反射特征[11]。羟基蚀变矿物(如绢云母、高岭石、绿泥石)因 OH^- 基团的振动吸收,在短波红外波段(2.1~2.4 μm)具有诊断性吸收谷,在 ASTER 的波段 8(2.235~2.285 μm)附近具有强烈的吸收谷特征,而在波段 7(2.185~2.225 μm)和波段 9(2.295~2.365 μm)附近具有相对高反射特征。基于 USGS 标准光谱库中典型蚀变矿物光谱曲线,结合化德县矿区实际蚀

变矿物组合特征, 本文选取褐铁矿作为铁染蚀变信息的代表矿物, 选取绢云母/高岭石和绿泥石作为羟基蚀变信息的代表矿物。上述矿物在 ASTER 和 Landsat-8 OLI 数据的特定波段范围内具有明显的光谱差异性, 为主成分分析方法的应用提供了可靠的光谱理论基础。

4. 蚀变信息提取方法与流程

4.1. 实验处理流程

本研究主要采用 ENVI 5.3 软件进行遥感数据处理。基于 ASTER 和 Landsat-8 OLI 数据的不同波段特性, 通过主成分分析将多波段光谱信息压缩至少数几个主成分分量中, 实现蚀变异常信息的增强提取[12]。为消除非地质因素的干扰, 在数据处理前对遥感影像进行了辐射定标、大气校正、几何配准等预处理工作。考虑到化德县部分地区第四系覆盖发育, 可能会产生伪异常, 需要对遥感影像进行掩模处理。同时, 为降低植被、水体、阴影等干扰因素的影响, 采用了归一化植被指数(NDVI)阈值法进行植被掩模。后期对提取的异常信息进行了阈值分割、中值滤波和伪异常剔除等处理。具体实验操作流程为: 数据预处理→掩模处理→主成分分析→异常分级→中值滤波→伪异常剔除→蚀变异常分布图编制, 流程图见图 2。

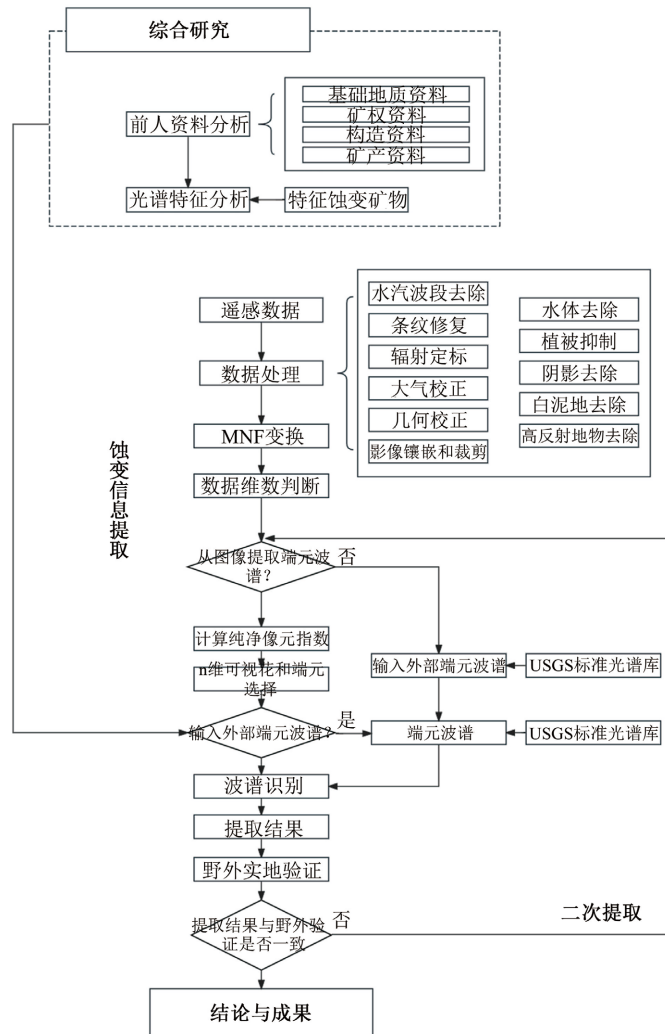


Figure 2. Workflow of alteration information extraction
图 2. 蚀变信息提取流程

4.2. Landsat-8 OLI 铁染蚀变异常提取

ASTER 多光谱遥感蚀变信息提取常用方法包括比值法、光谱角匹配(SAM)、主成分分析法(PCA)。比值法操作简单,但易受地形阴影、植被覆盖干扰,仅能反映单一波段组合差异,对复杂热液蚀变区分能力有限;光谱角匹配需要完备的端元光谱库,研究区地表覆盖复杂时,端元选取主观性较强,大面积区域蚀变提取运算效率偏低。

本研究采用主成分分析(PCA)提取铁染、羟基蚀变异常。PCA 通过正交变换对 ASTER 多波段光谱信息进行降维,将蚀变矿物的特征光谱信息集中到少数主成分分量中,能够有效压制背景噪声,分离蚀变信息与岩石、植被、地形等干扰信息;ASTER 短波红外波段对羟基类蚀变矿物光谱响应灵敏,PCA 法可针对性选取对目标蚀变矿物敏感波段参与主成分运算,兼顾提取效率与区域适应性,适合本研究区植被中等、岩性复杂的热液蚀变信息提取工作。

PCA 得到的主成分分量需要确定阈值划分蚀变异常等级,本研究采用统计直方图 + 均值- n 倍标准偏差法确定异常阈值:

阈值选择依据:对蚀变主成分分量做统计分析,以像元灰度直方图为基础,取 $T=\mu+\eta\sigma$ 作为异常下限(μ 为分量均值, σ 为标准差)。铁染蚀变: $\eta=2.0$ 为三级异常下限, $\eta=2.5$ 为二级异常下限, $\eta=3.0$ 为一级异常下限;羟基蚀变: $\eta=1.8$ 为三级异常下限, $\eta=2.4$ 为二级异常下限, $\eta=3.0$ 为一级异常下限。该阈值方式基于像元统计分布,避免人工阈值的主观随意性。

ASTER 的 PCA 经典蚀变提取中,铁染蚀变选用 B1、B2、B3、B4 波段参与 PCA;羟基蚀变选用 B1、B3、B4、B6 波段。PCA 判别准则:铁染蚀变信息主要集中于 PC4,铁染异常主要由 PC4 贡献;羟基蚀变主要由 PC3 贡献。具体见表 1、表 2。

Table 1. PCA eigenvector matrix for iron-staining anomalies
表 1. 铁染 PCA 主成分分析特征向量表

波段	PC1	PC2	PC3	PC4
ASTER B1 (0.52 μm)	0.321	-0.712	0.415	0.453
ASTER B2 (0.63 μm)	0.374	-0.554	0.226	-0.718
ASTER B3 (0.79 μm)	0.433	-0.396	-0.741	0.324
ASTER B4 (1.65 μm)	0.752	0.183	0.473	-0.421

Table 2. PCA eigenvector matrix for hydroxyl anomalies
表 2. 羟基 PCA 主成分分析特征向量表

波段	PC1	PC2	PC3	PC4
ASTER B1 (0.52 μm)	0.287	-0.654	0.521	0.468
ASTER B3 (0.79 μm)	0.412	-0.483	-0.687	0.345
ASTER B4 (1.65 μm)	0.693	0.215	0.438	-0.527
ASTER B6 (2.205 μm)	0.516	0.538	-0.246	-0.621

经统计显示,研究区总面积 426.30 km^2 ;组合异常区为铁染与羟基异常空间重叠部分,不与单类异常面积简单累加;已剔除 NDVI 掩模、伪异常过滤之后的有效蚀变图斑统计结果。

从统计结果可见,区内以三级蚀变异常分布最广,一级蚀变异常规模有限。铁染、羟基组合异常区

共 11 处，面积 22.48 km²，占全区 5.27%，多分布于岩体接触带与断裂交汇位置，是成矿有利地段。三级羟基、铁染异常空间上与中酸性侵入岩体边界耦合程度高，单一断裂带仅发育中低等级蚀变异常。

主成分分析后，选取特征向量中波段 2 和波段 4 与波段 3 和波段 5 载荷符号相反的主分量作为铁染蚀变信息增强分量。这一选择依据与褐铁矿的波谱特征相吻合，能够有效突出铁染蚀变信息[13]。对选取的主分量进行异常信息提取，采用阈值分割法对铁染蚀变异常进行分级处理。异常统计值以均值加 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍标准差为分级依据，分别划分为三级、二级和一级异常。通过 3×3 中值滤波处理消除椒盐噪声，并结合地质资料剔除第四系覆盖等引起的伪异常，最终获得化德县蚀变异常分布图及各级蚀变异常区面积，蚀变异常分布图见图 3，各级蚀变异常区面积见表 3。

Table 3. Area statistics of alteration anomaly zones at different grades
表 3. 各级蚀变异常区面积统计

蚀变类型	异常等级	异常块数	总面积(km ²)	占研究区比例(%)
铁染蚀变	一级	8	18.74	4.40
铁染蚀变	二级	17	36.21	8.49
铁染蚀变	三级	29	54.63	12.81
羟基蚀变	一级	7	15.32	3.59
羟基蚀变	二级	15	31.86	7.47
羟基蚀变	三级	26	47.95	11.25
组合异常区	——	11	22.48	5.27

4.3. ASTER 羟基蚀变异常提取

针对化德县多金属矿区常见的绢云母化、绿泥石化等羟基类蚀变，利用 ASTER 数据短波红外波段的精细划分优势进行提取。羟基蚀变矿物(含 OH⁻)在 ASTER 的波段 8 (2.235~2.285 μm)附近具有强烈的吸收谷特征，而在波段 7 (2.185~2.225 μm)和波段 9 (2.295~2.365 μm)附近具有相对高反射特征[14]。据此，选取 ASTER 的波段 5、7、8、9 进行主成分分析，构建羟基蚀变特征矩阵模型。在主成分分析结果中，选取波段 7 和波段 9 与波段 8 载荷符号相反的主分量作为羟基蚀变信息增强分量。这一选择依据与绢云母、绿泥石等羟基矿物的波谱特征相吻合，能够有效突出羟基蚀变信息。对选取的主分量进行异常信息提取，采用与铁染蚀变相同的阈值分割方法进行分级处理，同样以 1.5 倍、2.0 倍、2.5 倍标准差为分级依据[15]。通过中值滤波和伪异常剔除等后期处理，获得化德县 ASTER 羟基蚀变异常分布图。

4.4. 多源数据综合分析与异常圈定

将 Landsat-8 OLI 提取的铁染蚀变异常和 ASTER 提取的羟基蚀变异常进行叠加分析。两种数据提取的蚀变异常信息可以相互验证和补充：铁染蚀变异常主要反映地表氧化带和褐铁矿化信息，羟基蚀变异常则反映热液蚀变过程中的黏土化、绢云母化等信息。两者叠加区域往往指示了热液活动强烈、蚀变发育的有利成矿地段。在异常圈定过程中，以遥感蚀变异常分布图为基础，叠加区域地质图、构造解译图等多元地学信息。综合蚀变异常的强度、规模、空间展布特征及其与已知矿点、断裂构造的空间关系，圈定蚀变异常带。同时，结合化德县已有矿产勘查成果和野外调查资料，对圈定的蚀变异常带进行初步验证和评价。

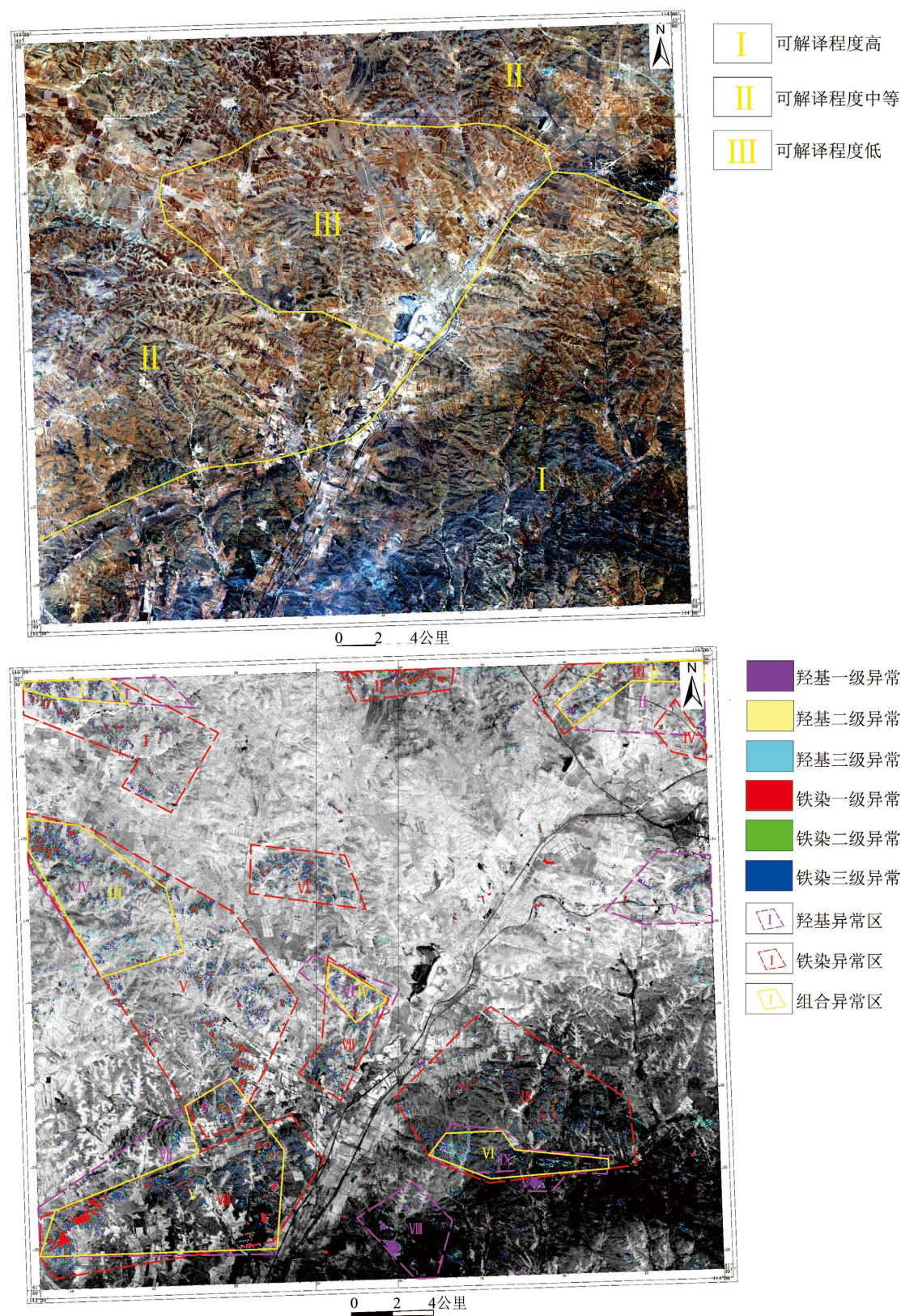


Figure 3. Satellite imagery and extracted mineralized alteration results of the study area
图 3. 研究区卫星影像和矿化蚀变信息提取结果图

5. 蚀变信息分布规律与构造控矿分析

5.1. 化德县构造特征

化德县地处华北地台北缘, 区域构造演化历史悠久, 经历了多期次的构造变形和岩浆活动。区域上受高家窑 - 化德 - 赤峰槽台断裂的控制, 该断裂带是华北板块与兴蒙造山带的重要构造边界。次级断裂构造十分发育, 以北西向和近东西向断裂为主。北西向断裂带是区内重要的控矿构造, 化德县长春沟 - 达盖滩铅锌矿的矿体即呈脉状、似层状产出, 矿化主要受北西向断裂带控制[5]。五福堂矿区由区域上康保 - 围场深大断裂、白云鄂博断裂派生的次一级断裂构造也形成了良好的导矿和容矿空间。化德地区二叠纪 - 三叠纪花岗质侵入体广泛发育, 华力西晚期 - 燕山期的构造 - 岩浆活动为多金属成矿提供了热液来源和成矿动力。侵入岩与围岩的接触带及其派生的断裂构造系统是矿化热液运移和沉淀的重要通道和场所。

5.2. 蚀变异常空间分布特征

利用 ASTER 数据在短波红外(SWIR)波段(特别是以 $2.2\ \mu\text{m}$ 和 $2.3\ \mu\text{m}$ 为中心的波段)的光谱优势, 结合地质图(图 1)与蚀变异常图(图 3)的叠加分析, 不仅能识别大类的羟基蚀变, 还可进一步对不同波段特征进行比值组合, 将羟基蚀变异常初步区分为 Al-OH 类(如绢云母、高岭石)和 Mg-OH 类(如绿泥石、绿帘石、蛇纹石), 其空间分布呈现出明显的岩性 - 构造专属性: Al-OH 类羟基异常(如图 3 中的紫色、黄色一级、二级异常): 主要呈斑点状或团块状, 高度集中分布于 NW 向断裂带与燕山期酸性侵入岩(如图 1 中标注的花岗质岩体)的接触带附近, 表明其与中酸性岩浆热液交代作用密切相关, 常伴随绢英岩化、高岭石化。这类异常具有中心强、向外变弱的环状分带特征, 是寻找浅成 - 中温热液脉状矿床(如铅锌、铜金)的直接标志。Mg-OH 类羟基异常(如图 3 中的青色三级异常): 分布范围较广, 多呈大面积面状展布, 常受古生代地层(如二叠纪地层)或近东西向次级断裂控制, 指示了绿泥石化、绿帘石化等青磐岩化蚀变。这类异常通常作为热液活动的外带, 指示了区域性的热液流动方向。铁染蚀变异常(图 3 中的红、绿、蓝异常): 呈带状和串珠状分布, 其走向与北西向和近东西向断裂带基本吻合, 反映了断裂带内的褐铁矿化、赤铁矿化。在已知的幸福村金矿、二道沟铜金矿及三胜村钨钼矿床外围, Al-OH 类羟基异常与铁染异常往往出现高度的空间套合与重叠。这种“高温(Al-OH 为主) + 高氧(铁染)”的组合异常, 通常位于构造交汇或岩体隆起的有利部位, 标志着成矿热液作用的中心区域。

6. 结论

- 1) 在内蒙古乌兰察布市化德县利用 Landsat-8 OLI 数据成功提取了铁染蚀变异常信息, 利用 ASTER 数据成功提取了羟基蚀变异常信息。两种蚀变异常信息的综合提取与相互验证, 有效提高了遥感蚀变信息识别的准确性和可靠性。
- 2) 将提取的蚀变异常信息与化德县地质图和构造图进行叠加分析, 清晰地显示出蚀变异常信息的空间展布方位与已知矿点、断裂构造带吻合程度较好。可以大致圈出数条北西向和近东西向的蚀变矿化异常带, 这些异常带是寻找金、铜、钨、钼等多金属矿床的重要遥感标志。
- 3) 对比化德县区域控矿构造的分布特征, 可以看出多金属成矿热液活动明显受北西向和近东西向断裂构造带的控制。遥感蚀变异常区的分布范围与断裂构造带走向基本一致, 指示了构造控矿的主导作用。
- 4) 利用 ASTER 和 Landsat-8 OLI 等多源遥感数据开展蚀变矿化信息提取研究, 可有效识别化德县及其外围的矿化蚀变异常。结合区域地质矿产调查成果, 对在化德县及其外围开展多金属矿产勘查具有重要的先导性指导意义。

基金项目

中国地质调查局“内蒙古化德-商都地区区域地质调查(编号: DD20230251)” ; “燕赵山水科创基金(编号: YZSSJJ202403-001)”。

致谢

感谢中国地质调查局相关单位提供的数据和内蒙古化德-商都地区区域地质调查项目及燕赵山水科创基金对本论文的支持。

参考文献

- [1] 刘君, 孙乃明, 徐桓, 等. 内蒙古幸福村金矿成矿特征及找矿方向[J]. 黄金科学技术, 2014, 22(1): 22-27.
- [2] 高树起. 内蒙古化德县二道沟铜金矿区地质特征及找矿意义[J]. 世界有色金属, 2023(19): 55-57.
- [3] 周勇. 内蒙古化德县三胜村钨钼矿床的成矿作用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
- [4] 李俊建, 等. 内蒙古化德县三胜钨钼矿床辉钼矿 Re-Os 同位素年龄及其地质意义[J]. 地质通报, 2016, 35(4): 521-527.
- [5] 刘俊杰, 赵九峰, 秦增刚, 等. 内蒙古化德县长春沟-达盖滩铅锌矿地质特征及找矿远景分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2018, 70(5): 60-65.
- [6] 孙连云. 内蒙古化德县达盖滩钼多金属矿地质特征与找矿潜力分析[J]. 西部资源, 2013(5): 68-71.
- [7] 张海峰, 李明, 王磊. 内蒙古自治区化德县五福堂矿区地质特征及矿床成因分析[J]. 资源信息与工程, 2016, 31(6): 12-15.
- [8] 刘志强, 王永军, 赵志刚. 内蒙古化德县后沟钼铅锌多金属矿地质特征及找矿方向分析[J]. 西部资源, 2013(5): 72-74.
- [9] 杨文斌, 陈志勇, 刘俊杰. 内蒙古化德县长春沟地区铅锌银铜多金属矿地质特征及成矿规律[J]. 西部资源, 2013(4): 56-59.
- [10] 孙雨, 赵明, 李志军, 等. 基于 ASTER 数据的内蒙古东乌珠穆沁北部地区遥感蚀变信息提取[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(6): 1135-1140.
- [11] 张玉君, 杨建民, 陈薇. ETM+(TM)蚀变遥感异常提取方法研究与应用——地质依据和波谱前提[J]. 国土资源遥感, 2002, 54(4): 31-36.
- [12] 丛丽娟, 胡凤翔, 杨俊才, 等. 利用 ASTER 数据提取蚀变异常方法研究——以内蒙古朱拉扎嘎金矿为例[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2007, 26(6): 645-650.
- [13] 王建平, 张彤, 刘建明, 等. 遥感蚀变信息提取在金属矿产调查中的应用[J]. 甘肃冶金, 2023, 45(5): 78-82.
- [14] 张玉君, 杨建民, 姚佛军. 多光谱遥感技术预测矿产资源的前景——以蒙古国欧玉陶勒盖铜金矿床为例[J]. 地学前缘, 2007, 14(5): 64-70.
- [15] 刘建宇, 陈玲, 李伟, 等. 基于 ASTER 数据韧性剪切带型金矿蚀变信息提取方法优化[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(1): 229-236.