

冀东撒岱沟门钼矿多源遥感找矿远景预测

那沁¹, 邱昆峰^{1*}, 詹骞¹, 苗群峰², 谭宏婕¹, 彭泽海², 邢丁凡¹

- 1. 中国地质大学(北京), 地质过程与成矿预测全国重点实验室, 深时数字地球前沿科学中心, 地球科学与资源学院, 北京, 100083
- 2. 河北省地矿局第四地质大队, 承德, 067000

摘要: 针对辅助数据有限条件下斑岩型钼矿远景预测难度较大的问题, 本文以撒岱沟门地区为例, 综合 GF-5B 高光谱、DEM 和地质资料, 提取白云母吸收深度、构造线密度和岩体距离, 构建成因约束的模糊逻辑模型, 并以白云母吸收中心、权重敏感性和成功率曲线验证。结果显示, 撒岱沟门和南关白云母吸收中心集中于 2200-2210 nm, 具有富 Al 绢云母特征; 小坝子成矿指示较弱。均权模型 AUC 为 0.985, 前 8.49%高值区覆盖已知采矿区。南关优先级最高 (76.95), 撒岱沟门矿区次之 (60.56), 其西侧外围仍具勘查潜力。白云母吸收深度可表征蚀变强度, 吸收中心可独立约束潜在矿化中心; 研究表明, 多源数据证据层的综合应用, 能够有效识别斑岩型钼矿系统中蚀变、构造与岩体耦合增强的成矿有利部位。

关键词: 华北克拉通; 斑岩型钼矿床; 遥感; 高光谱; 找矿远景预测

中图分类号: P618. 65; P627

收稿日期: 2026-3-31

Multisource Remote Sensing-Based Mineral Prospectivity Prediction of the Sadaigoumen Molybdenum Deposit, Eastern Hebei Province

Na Qin¹, Qiu Kunfeng^{1*}, Zhan Qian¹, Miao Qunfeng², Tan Hongjie¹, Peng Zehai², Xing Dingfan¹

- 1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Frontiers Science Center for Deep-time Digital Earth, School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China
- 2. Hebei Bureau of Geology and Mineral Resources Exploration, Chengde, 067000, China

Abstract: Prospectivity mapping for porphyry Mo deposits remains challenging where ancillary data are limited. Using the Sadaigoumen area as a case study, this study integrates GF-5B hyperspectral data, DEM-derived information, and geological data to extract three evidence layers: white mica absorption depth, lineament density, and distance to intrusions. An ore genesis-constrained fuzzy logic model was constructed and evaluated using white mica absorption-center wavelengths, weight-sensitivity analysis, and success-rate curves. The results show that

基金项目: 国家自然科学基金 (No.42521005); 深时数字地球前沿科学中心项目 (No.2652023001); 河北省地矿局项目 (No.13000025P003294103391); 山东省地矿局第六地质大队技术攻关项目 (No.LDKJ20240101); 泰山学者工程 (No.tstp20240847)。

作者简介: 那沁 (2003-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: naqin123@qq.com, ORCID: 0009-0002-1592-5615

***通讯作者:** 邱昆峰 (1986-), 男, 教授, 博士, 主要从事矿床学研究。E-mail: kunfengqiu@qq.com。

white mica absorption centers in the Sadaigoumen and Nanguan areas are mainly concentrated at 2200–2210 nm, consistent with Al-rich sericite alteration, whereas the Xiaobazi area shows a weaker mineralization signature. The equal-weight model achieves an AUC of 0.985, and the highest 8.49% prospectivity zone encompasses the entire known mining area. Among the predicted targets, Nanguan has the highest priority score of 76.95 and represents the most favorable exploration target, followed by the Sadaigoumen mining area with a score of 60.56. The western periphery of Sadaigoumen also shows further exploration potential. White mica absorption depth effectively characterizes alteration intensity, whereas absorption-center wavelength provides an independent spectral constraint on potential mineralization centers. These results demonstrate that multisource evidence layers can effectively identify favorable sites where alteration, structures, and intrusions are spatially coupled in porphyry Mo systems.

Key words: North China Craton; Porphyry molybdenum deposit; Remote sensing; Hyperspectral; Mineral prospectivity prediction

引言

斑岩型矿床是全球 Cu、Mo 和 Au 等金属资源的重要来源，其形成与中浅成岩浆-热液系统密切相关（Sillitoe, 2010； Qiu *et al.*, 2021； Li *et al.*, 2021； 吴昌益等， 2025）。华北克拉通中生代强烈的岩石圈减薄和大规模岩浆活动（朱日祥等， 2012； Qiu *et al.*, 2024a），形成了以燕辽钼铜成矿带为代表的重要金属成矿区，其中斑岩型钼矿化与中生代侵入活动关系密切（代军治等， 2006； 朱日祥等， 2012； 杨进辉等， 2021）。区域多组构造的叠加发育不仅控制了岩浆侵位，也为成矿流体运移和沉淀提供了有利条件，进而形成以钾化、绢英岩化和绿泥石化为代表的热液蚀变组合（代军治等， 2006； Chen *et al.*, 2021）。总体而言，斑岩型钼矿化的空间分布受成矿岩体、构造导流作用和热液蚀变共同制约（代军治等， 2006； Chen *et al.*, 2021； Zhang *et al.*, 2021； Zhai *et al.*, 2025）。岩体、蚀变和构造信息之间的空间耦合特征对识别有利成矿部位具有重要意义。

近年来，围绕特定矿床类型组织多源证据层并开展成矿远景评价，已成为矿产预测研究的重要思路（汪大明等， 2024； 陈志行等， 2026）。然而，在缺乏地球化学、地球物理或钻探等辅助数据的条件下，如何结合矿床成因认识，从有限遥感与地质信息中提取关键控矿约束，仍是区域找矿预测中的关键问题（代军治等， 2006； Sillitoe, 2010； Leng *et al.*, 2015； Li *et al.*, 2021； He *et al.*, 2025）。

热液蚀变的分布范围通常远大于矿体规模，传统多光谱遥感蚀变识别多侧重于铁染或羟基等广义蚀变信息，这类异常虽可有效反映区域蚀变分布，但其与矿体位置之间的对应关系往往较弱。相比之下，高光谱遥感为热液蚀变矿物的精细识别提供了新的技术手段。GF-5B 卫星搭载的高光谱成像仪（AHSI）具有连续窄波段特征，在含 Al-OH 矿物识别方面具有明显优势（Dong *et al.*, 2022）。已有研究表明，GF-5 系列数据能够较准确地识别热液

蚀变矿物，并揭示区域尺度的蚀变分带特征（Dong *et al.*, 2022；谭宏婕等，2024）。其中，白云母广泛发育于斑岩型钼矿床各蚀变带，其光谱特征对识别矿化中心和指示成矿作用具有重要意义（Asadzadeh *et al.*, 2024a, b；Qiu *et al.*, 2024b）。此外，数字高程模型（DEM）及其衍生晕渲图已被广泛应用于构造信息增强和线性构造识别，并在相关研究中表现出较好效果（Xu *et al.*, 2020；Song *et al.*, 2024）。

河北承德撒岱沟门地区已发现大型斑岩型钼矿床，其矿化与成矿岩体、构造及热液蚀变关系密切，同时矿区外围仍具有进一步找矿需求，是开展岩体-构造-蚀变空间耦合分析与成矿远景评价的理想研究区。因此，本文以撒岱沟门地区为研究区，在辅助数据相对有限的条件下，综合利用 GF-5B 高光谱数据、DEM 及区域地质资料，围绕斑岩型钼矿成矿岩体供源、构造导流和绢云母化蚀变响应三个关键环节，提取白云母吸收深度、线性构造密度和成矿有利岩体距离三类证据层，采用模糊逻辑方法开展成矿潜力预测。与已有研究主要侧重于蚀变矿物识别或多源信息叠加预测不同，本文进一步将白云母吸收中心作为独立的光谱地质约束，用于判别模型高值区是否存在潜在的矿化中心；同时通过不同权重组合下的敏感性分析和已知采矿区覆盖成功率曲线，检验预测结果的稳定性与矿化响应。由此，在有限辅助数据条件下提高证据层构建的成因指向性、模型预测的可解释性和找矿远景区优选的可靠性，并为华北克拉通破坏背景下同类斑岩型钼矿床的找矿勘查提供参考。

1 区域地质背景

研究区位于华北克拉通之上（图 1A）。华北克拉通是中国大陆的主要构造单元，北邻中亚造山带，以赤峰-开源断裂为界；南接秦岭-大别造山带（翟明国，2019）。中生代期间，华北克拉通经历了强烈的克拉通破坏，岩石圈大规模减薄，伴随频繁的岩浆活动与构造变形（朱日祥等，2012；杨进辉等，2021）。区内 Au、Fe、Mo、Cu 等多类金属矿床的成矿时代与这一阶段的大规模岩浆作用高度吻合（朱日祥等，2012；Wen *et al.*, 2017；杨进辉等，2021；He *et al.*, 2024），使华北克拉通成为中国重要的金属成矿带之一。

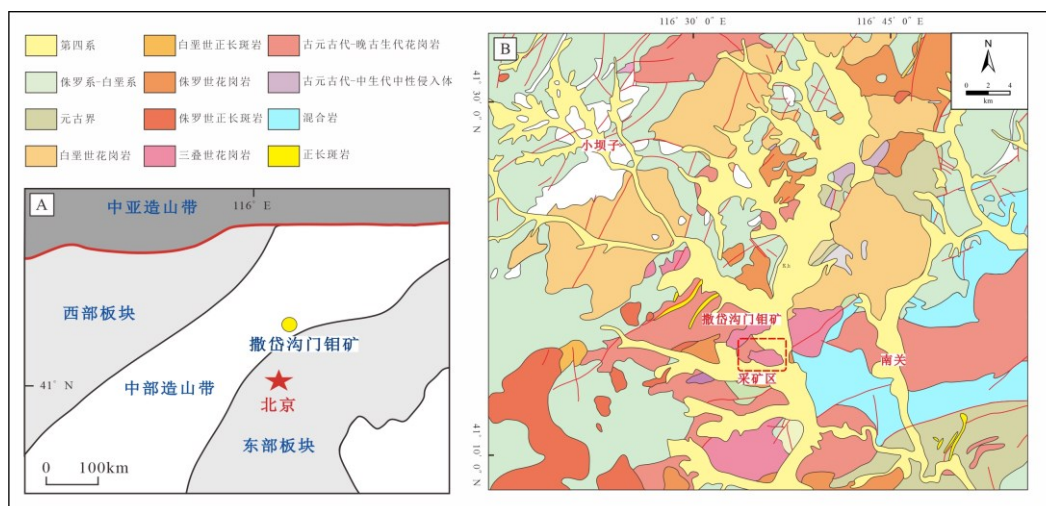


图 1 研究区地理位置及地质图

Fig.1 Location and Geological Map of the Study Area

A. 华北克拉通位置示意图, 据 Zhao *et al.*, 2005; B. 研究区地质图, 改自地质云

撒岱沟门钼矿区位于河北省承德市丰宁满族自治县, 为大型斑岩型钼矿床。根据丰宁满族自治县人民政府公开资料, 截至 2018 年底, 该矿已查明资源储量为钼金属量 25.806 万吨, 矿石量 4.365 亿吨。其所处的燕辽钼铜成矿带是我国第二大钼成矿带, 钼矿多产于含钼花岗岩系侵入体、杂岩或内外接触带中, 矿化蚀变分布与这些断裂、接触带高度吻合 (代军治等, 2006)。区域上, 矿区位于 EW 向构造岩浆岩带和上黄旗-南口 NNE-SSW 向构造岩浆岩带的交汇部位 (Chen *et al.*, 2021), EW、NE 以及 NNE 向断裂是区域的主要控矿构造 (图 1B)。三叠世侵入体如碱长花岗岩和花岗斑岩与矿化密切相关 (图 1B) (Chen *et al.*, 2021)。碱长花岗岩表现出红色和白色两种花岗岩, 两者具有相似的矿物组成。花岗斑岩、石英正长斑岩、闪长玢岩等以岩脉形式侵入到花岗岩中, 与其构成一个复式花岗岩体, 均为同成矿期岩体 (沈光银, 2011; Chen *et al.*, 2020)。

撒岱沟门地区成矿岩石均发生了不同程度的蚀变。热液蚀变包括内部钾化带、绢英岩化带和外部青磐岩化带。钾化与绢英岩化发育于成矿期, 可作为重要的矿化识别标志。青磐岩化带产于矿体外围, 主要矿物为绿泥石、绿帘石等, 可以作为远端找矿标志 (Chen *et al.*, 2021)。

2 数据源

2.1 GF-5B 数据

高分五号 02 星, 即 GF-5B 是《国家民用空间基础设施中长期发展规划 (2015-2025 年)》中的业务星, 也是国家高分辨率对地观测重大专项的收官之星。该卫星运行于高度

705 km的太阳同步轨道，设计寿命8年，共搭载7台探测仪器，覆盖紫外至长波红外谱段，融合成像与高光谱探测技术，可实现空间、光谱与辐射信息的综合观测（表 1）。本研究使用的可见短波红外高光谱相机（AHSI）数据，数据覆盖 400-2500 nm，共 330 个波段，其中可见-近红外（VNIR）150 个波段，短波红外（SWIR）180 个波段。由于 GF-5B 卫星具有较高的光谱分辨率，因此有潜力成为热液蚀变矿物填图的高效数据源。本次研究采用 2024 年 10 月 24 日的 L1T 级产品数据，由于该时期相影像受云层和大气干扰较小，数据质量较高。且该时期植被覆盖较低、地表裸露程度较高，有利于增强矿物的光谱响应特征。数据已完成辐射定标与精密几何校正，具有较高的光谱保真度和空间定位精度，能够满足矿物信息提取与空间分析的需求。

表 1 GF-5B 波段数据
Table 1 GF-5B Band Information

可见短波红外高 光谱相机 (AHSI)	光谱范围 (μm)	波段范围	空间分辨率 (m)	光谱分辨率 (nm)
VNIR	0.4-1.0	1-150	30	5
SWIR	1.0-2.5	151-330	30	10

2.2 ASTER GDEM 数据

ASTER GDEM（Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model）是由美国国家航空航天局（NASA）与日本经济产业省（METI）联合发布的全球数字高程模型。该产品基于搭载于 Terra 卫星的 ASTER 传感器近红外波段立体像对，通过对约 180 万景 Level-1A 数据进行立体相关处理生成，空间分辨率为 30 m，覆盖范围为南北纬 83°之间的全球陆地表面。本研究采用的 ASTER GDEM 数据为 30 m 分辨率产品（基于 ASTER GDEM V1 加工），编号为 ASTGTM_N41E116，时期为 2009 年，数据来源于地理空间数据云平台（<https://www.gscloud.cn>）。该数据为后续地形分析提供了基础支撑，包括 DEM 晕渲图生成、山脊线提取以及线性构造自动识别等，从而为研究区构造特征分析与找矿预测提供重要地形信息依据。

2.3 OreXpress 光谱仪和 Landsat 8 数据

OreXpress 便携式全波段矿物分析光谱仪是一款便携式野外光谱仪，具有结构坚固、性能稳定的特点，主要用于短波红外矿物的快速识别与分析。该仪器光谱范围为 350-2500 nm，波长重现性为 0.1 nm，波长准确性为 ± 0.5 个带宽，能够较好满足蚀变矿物特征吸收信息的识别需求。本研究利用 OreXpress 光谱仪在研究区开展实地光谱测量，采集典型蚀变矿物及其围岩的反射光谱数据。在数据采集过程中，通过标准白板进行辐射定标，并对光谱数据进行预处理，以保证数据质量与一致性。所获取的实测光谱数据用于分析矿物的特征吸收位置与形态特征，对遥感反演结果进行验证与精度评价。仪器详细参数见表 2。

Landsat 8 由美国国家航空航天局（NASA）和美国地质调查局（USGS）发射，包含两个传感器：陆地成像仪（OLI）和热红外传感器（TIRS），时间分辨率为 16 天。本研究选取了 2018 年 11 月 18 日的 OLI 影像，研究区无云覆盖，数据来源于地理空间数据云平台（<https://www.gscloud.cn>）。该数据主要用于线性构造的目视辅助解译，并作为成图底图使用。

3 数据处理和方法

3.1 数据预处理

地物辐射信息在由地表传输至传感器的过程中，容易受到地形起伏、大气散射与吸收以及传感器性能等因素的影响，使得获取的遥感影像产生一定程度的几何畸变和辐射偏差。因此，需要对遥感数据进行系统预处理。对于 GF-5B 高光谱数据，首先进行辐射定标，将原始 DN 值转换为辐射亮度；在此基础上，基于 MODTRAN 辐射传输模型开展大气校正，以反演地表反射率。考虑到大气水汽吸收的影响，剔除 1.36-1.45 μm 和 1.79-1.98 μm 波段。为提高后续矿物信息提取的可靠性，本研究采用小波变换方法对 GF-5B 影像进行去条带处理（图 2）（谭宏婕等，2024），并结合中值滤波抑制随机噪声，以降低其对矿物光谱特征识别的干扰（Gao *et al.*, 2017）。最后利用 DEM 数据进行正射校正，以消除地形起伏造成的几何畸变。

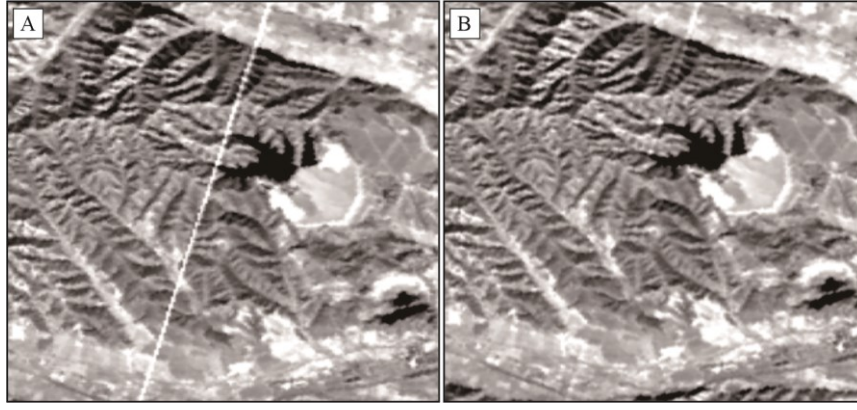


图 2 GF-5B 条带去除前后对比
Fig.2 Comparison of GF-5B Imagery Before and After Destriping
A. 去条带前影像；B. 去条带后影像

本研究中，Landsat 8 OLI 数据主要用于线性构造的辅助目视解译并作为结果成图底图。为保证与 GF-5B 和 DEM 数据的空间一致性，对 Landsat 8 影像进行了几何配准，并在此基础上开展多光谱与全色波段融合，以提高影像空间分辨率，为后续人工解译提供更清晰的影像基础。GF-5B、DEM 及 Landsat 8 数据均统一至 WGS-84 基准下的 UTM 50 N 投影坐标系，并对城镇区域进行了掩膜处理。

3.2 白云母异常证据层提取

绢云母化蚀变是斑岩型钼矿床中重要的找矿标志之一，其本质上以细粒白云母为主要矿物组成，因此可通过高光谱手段对白云母信息进行提取。白云母在约 2200 nm 附近的 Al-OH 吸收深度（2200D）能够反映其丰度变化，而吸收中心位置（2200W）可在一定程度上指示与矿化作用相关的绢云母信息（Asadzadeh *et al.*, 2024a, 2024b）。基于此，本文选取白云母异常作为成矿预测的关键证据层之一。

为消除背景反射率对吸收形态的影响，首先在 2120-2250 nm 波段范围内进行连续统去除，通过识别吸收谷两侧的反射率极大值构建连续统，并对光谱进行归一化处理，使吸收特征独立于整体光谱趋势（图 3）。对连续统去除后的数据在 2180-2225 nm 范围内进行二次多项式拟合，所得的吸收深度和吸收中心波长分别用于表征白云母的相对丰度及化学成分（Duke, 1994; Asadzadeh *et al.*, 2024b）。多项式拟合函数见公式（1）（Asadzadeh *et al.*, 2016, 2024b）：

$$P(\lambda) = a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_0 \quad (1)$$

其中 $a_0, \dots, a_n$ 是常量， n 是多项式的阶数， λ 为波长，单位 nm。拟合函数用于精确计算吸收中心波长 W 及吸收深度 D ，吸收深度 D 定义为：

$$D = 1 - R_{cr}(\lambda_b) \quad (2)$$

其中, λ_b 代表吸收中心, 单位为 nm。 R_{cr} 表示连续统去除后吸收中心处的反射率值。该方法能够降低离散采样与随机噪声对最小值判定的影响, 提高吸收特征定位精度。对于白云母等 Al-OH 矿物, 其主特征吸收谷位于 2200 nm, 多项式阶数取 2, 二次函数的最小值点 λ_{min} (nm) 可定义为 (Asadzadeh *et al.*, 2016, 2024b) :

$$\lambda_{min} = \frac{-a_1}{(2a_2)} \quad (3)$$

多项式拟合的主要目的是提高吸收谷定位精度, 减弱离散采样及噪声对最小值判定的影响 (Asadzadeh *et al.*, 2016, 2024b)。其中, 吸收深度作为白云母异常证据层的主要定量指标输入成矿预测模型, 吸收中心则主要用于后续地质分析及对预测结果的约束解释。

依据特征波段约束对白云母像元进行判别, 包括: (1) 在约 2200 nm 处存在显著吸收特征; (2) 在 2350 nm 附近存在辅助吸收; (3) 在 2165 nm 附近不出现明显吸收, 以排除高岭石等干扰矿物。在此基础上, 结合研究区 2200D 吸收深度直方图和累计频率分布, 对白云母强吸收异常进行定量约束。吸收深度 P85 分位以上像元主要对应吸收较强且空间上相对连续的白云母异常, 而低值段多表现为背景弱吸收像元。由此, 本文将 2200D 阈值设为 P85 分位对应的吸收深度 0.268, 以剔除背景弱吸收像元并保留主要白云母强吸收异常, 实现白云母异常像元的提取 (Asadzadeh *et al.*, 2024b)。

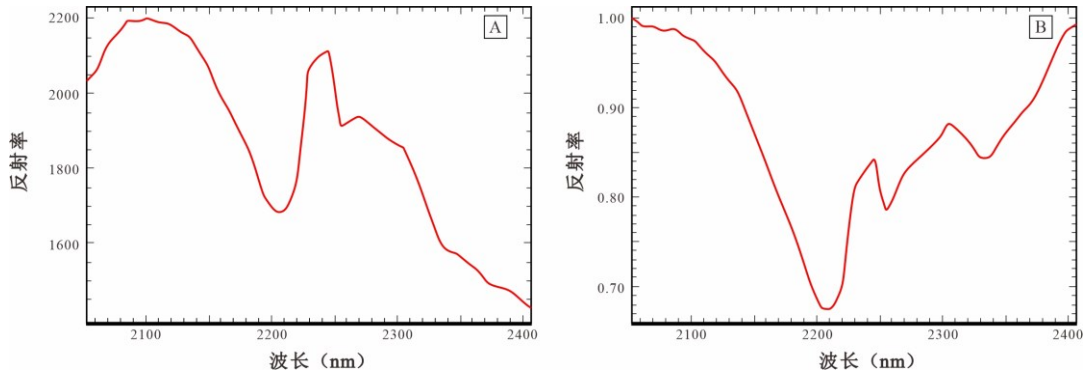


图3 连续统去除前后光谱对比
Fig.3 Comparison of Spectra Before and After Continuum Removal
A. 连续统去除前; B. 连续统去除后

3.3 线性构造证据层提取

断裂构造既控制岩浆侵位, 也为成矿流体运移提供通道, 是斑岩型钼矿成矿的重要控制因素。地质图断裂可反映研究区主要构造格架 (图 1); 为获得与遥感栅格数据尺度一致、连续可量化的构造发育强度, 并识别地貌中反映的更细致小尺度线性构造, 本文基于 DEM 提取线性形迹并计算构造线密度。构造活动通常通过地形表达为线性地貌特征, 因此

可基于 DEM 衍生信息识别构造 (Xu *et al.*, 2020)。晕渲图 (Hillshade) 是由 DEM 派生的地形阴影图, 可通过不同的反射模型生成 (Song *et al.*, 2024)。典型模型为朗伯反射模型 (Lambertian reflector), 其反射率定义为地表法向单位向量与指向光源的单位向量的数量积 (Cooper, 2005)。根据该模型, 反射率表示为:

$$R = \frac{1 + \tan\theta \tan\delta \cos(\phi - \rho)}{\sqrt{1 + \tan^2\theta} \sqrt{1 + \tan^2\delta}} \quad (4)$$

其中 θ 代表光照高度角, ϕ 代表光照方位角, δ 代表地面坡度, ρ 代表坡向, 单位均为度。基于 DEM 生成多方向晕渲图, 可以利用其对走向与光照方向垂直的线性地貌的选择性增强特性, 有针对性地强化构造信息 (Xu *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2024)。

鉴于研究区已知主控构造以 NE 向和 EW 向为主, 本研究旨在最大限度增强并提取与成矿相关的构造, 而非开展区域构造走向统计分析, 因此选取 0° 和 135° 光照方位进行定向增强, 以提高目标构造识别效率; 光照高度角为 0° 和 90° 时, 无法有效检测与山脊和谷地相关的线性构造, 因此选择光照高度角为 45° (Song *et al.*, 2024)。为提高线性构造识别的客观性与精度, 以晕渲图作为输入, 使用 PCI Geomatica 的 LINE 模块进行线性形迹的自动提取。该模块封装了边缘探测和线探测两个功能, 只需对 6 个参数进行设定, 即可进行自动提取, 因此被广泛应用于线性构造自动提取研究。由于 DEM 空间分辨率为 30 m, 地形细节表达能力有限, 过低的长度阈值容易提取短小、破碎的地貌线性特征。因此, 本文根据研究区构造尺度及多次试验结果调整 LINE 模块参数。将 Curve Length Threshold 设为 60 像素, 约对应 1.8 km, 用以保留连续性较好的区域尺度线性构造; 将 Connection Distance Threshold 设为 30 像素, 约对应 0.9 km, 以减少线段碎片化问题。具体参数取值见表 3。

基于单一晕渲图提取的线性地貌往往会被山脊线、人造地物等干扰, 导致结果精度降低。由于山脊线具有分水特性, 因此可以通过提取分水线表征山脊线的分布。利用水文网格分析法提取山脊线信息, 首先对 DEM 数据进行填洼处理以消除伪洼地, 随后采用 D8 算法计算流向与汇流累积量, 该算法常用于确定栅格单元的水流方向, 其基本思想是将每个像元的水流指向八个邻域栅格中坡降最大的方向。具体而言, 对中心像元 i 与其相邻像元 j 之间的坡降进行计算:

$$S_{ij} = \frac{Z_i - Z_j}{d_{ij}} \quad (5)$$

其中, S_{ij} 表示中心像元 i 指向邻域像元 j 的坡降, 无量纲。 Z_i 和 Z_j 分别为中心像元与邻域像元的高程值, d_{ij} 为两像元中心之间的距离, 单位均为 m。由于山脊单元仅存在水流流出而无流入, 其汇流累积量为零, 因此以汇流值为 0 的栅格作为初始山脊。为减少噪声干

扰，引入正地形约束，将原始 DEM 与均值平滑处理结果差值大于 0 的部分对初始结果进行筛选，最终获得校正后的山脊线。将山脊线与 LINE 模块提取的线性形迹进行叠加分析，通过掩膜方式剔除非构造成因的地貌山脊，以降低晕渲图线性特征中的地形干扰。Landsat 8 图像融合生成的 15 m 影像作为辅助数据用于目视判读人工线性地物，如道路及工程建筑物，并在构造筛选过程中予以剔除。对筛选后的线性构造采用 Line Density 工具进行线密度计算，输出像元大小设为 30 m，搜索半径设为 1334 m。该参数依据研究区空间范围确定，用以在区域尺度上表征线性构造的发育程度。

表 3 LINE 模块参数设定
Table 3 LINE Module Parameter Settings

参数	单位	描述	数值
Filter Radius	像素	Canny 边缘检测中用于梯度计算的高斯滤波器的半径大小	10
Edge Gradient Threshold	--	边缘检测的最小梯度值；数值越大，图像中的边缘越少	80
Curve Length Threshold	像素	可被识别为线性构造的最小长度	60
Line Fitting Threshold	像素	当线段被拟合形成线性构造时允许的最大误差	3
Angle Difference Threshold	度	定义两条多段线连接时不能超过的角度。当角度大于两线之间的数值时，不进行连接操作	30
Connection Distance Threshold	像素	指定两个线段连接间的最大距离，如果距离超过此值，则不连接	30

3.4 岩体距离证据层构建

斑岩型钼矿的形成通常与成矿岩体关系密切，撒岱沟门钼矿床在空间和时间上均与三叠纪花岗质岩浆活动密切相关（Chen *et al.*, 2021），因此选取三叠纪花岗岩体作为成矿有利岩体，并进一步构建岩体距离证据层，以表征岩浆热源和成矿物质来源对矿化的空间约束。首先通过研究区地质图筛选出三叠纪花岗岩类岩体，随后对目标岩体进行矢量化处理，形成岩体面状数据，并统一投影坐标系。然而，地质图所反映的岩体出露范围仅代表其地表分布，受后期地质活动影响，部分岩体可能未完全出露。因此，本研究采用 Euclidean Distance 工具，计算研究区各像元到成矿有利岩体的平面欧氏距离，输出像元大小设为 30 m。

3.5 成矿潜力预测模型构建

基于区域控矿因素，本文最终选取白云母异常、构造线密度和岩体距离三类证据层，分别表征热液蚀变特征、构造导流作用和成矿岩体约束，并在此基础上采用模糊逻辑方法对多源异构证据进行统一融合（Cheng *et al.*, 2007; Zhang and Zhou, 2015）。该方法通过引入隶属度（membership value），将不同类型的地质、遥感及构造信息映射到统一的[0, 1]区间，用以表征不同空间位置的成矿有利程度。相比传统布尔逻辑的二值划分方式，模糊集合能够避免硬阈值带来的信息离散化问题，从而更连续地反映地质过程的渐变特征。设某一证据层中像元值为 x ，其对应隶属度为：

$$\mu(x) \in [0,1] \quad (6)$$

当 $\mu(x)$ 越接近 1 时，表示该像元越有利于成矿；越接近 0，则表示越不利。白云母吸收深度和构造密度与成矿有利性呈正相关，因此采用正向增长型（Large）隶属度转换；岩体距离与成矿有利性呈负相关，即距岩体越近成矿有利性越高，因此采用反向衰减型（Small）隶属度转换。参数采用推荐设置，即 midpoint 为输入栅格值域中点，spread 为 5。各证据层经模糊化处理后，采用加权幂乘形式构建成矿潜力指数：

$$F = \mu_M(x)^{w_1} \times \mu_S(x)^{w_2} \times \mu_R(x)^{w_3} \quad (7)$$

其中， $\mu_M(x)$ 、 $\mu_S(x)$ 和 $\mu_R(x)$ 分别为白云母吸收深度层、构造密度层和岩体距离层的隶属度值， w_1 、 w_2 、 w_3 为对应权重，且满足：

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (8)$$

该模型本质上为加权几何平均形式，在保持各证据层连续变化特征的同时，对多因子同时具备较高隶属度的区域具有更强响应，从而突出潜在成矿有利区。以上处理均基于 ArcMap 10.8 以及 ENVI 5.6 平台完成。

4 结果

4.1 白云母异常分布特征

利用 GF-5B 数据提取的白云母异常显示，研究区白云母分布广泛，但在空间上并不均一，主要集中于东部南关地区、中部撒岱沟门钼矿区及西北部小坝子地区（图 4A-B）。其中，撒岱沟门钼矿区的白云母异常主要包括已知采矿区及其西侧外围两部分，共同构成研究区中部主要白云母异常带（图 4E-F）。

南关地区整体表现为较高吸收深度，异常沿线性展布方向连续发育（图 4C）。撒岱沟门钼矿区整体吸收深度较高，其中采矿区白云母吸收深度为研究区最高，仅边部发育中等值带（图 4E）；矿区西侧外围吸收深度略低但仍存在吸收高值中心，并发育一定规模的离散异常（图 4E）。相比之下，小坝子地区虽具有较广的白云母异常分布范围，但整体吸收深度偏低（图 4G）。

从吸收中心特征来看，研究区白云母吸收中心总体集中于 2200-2220 nm 范围（图 4B）。撒岱沟门钼矿区吸收中心总体集中于 2200-2210 nm，其中采矿区表现出较清晰的空间分带特征，核心区域主要为 2200-2210 nm，边部逐渐向长波方向偏移（图 4F，图 5）。矿区西侧外围吸收中心与采矿区总体差异较小，亦以偏短波特征为主（图 4F）。南关地区白云母吸收中心亦主要集中于 2200-2210 nm 范围（图 4D），而小坝子地区则分布于 2210-2220 nm 之间（图 4H）。由此可见，研究区白云母异常在吸收深度和吸收中心上均表现出明显的空间分异。

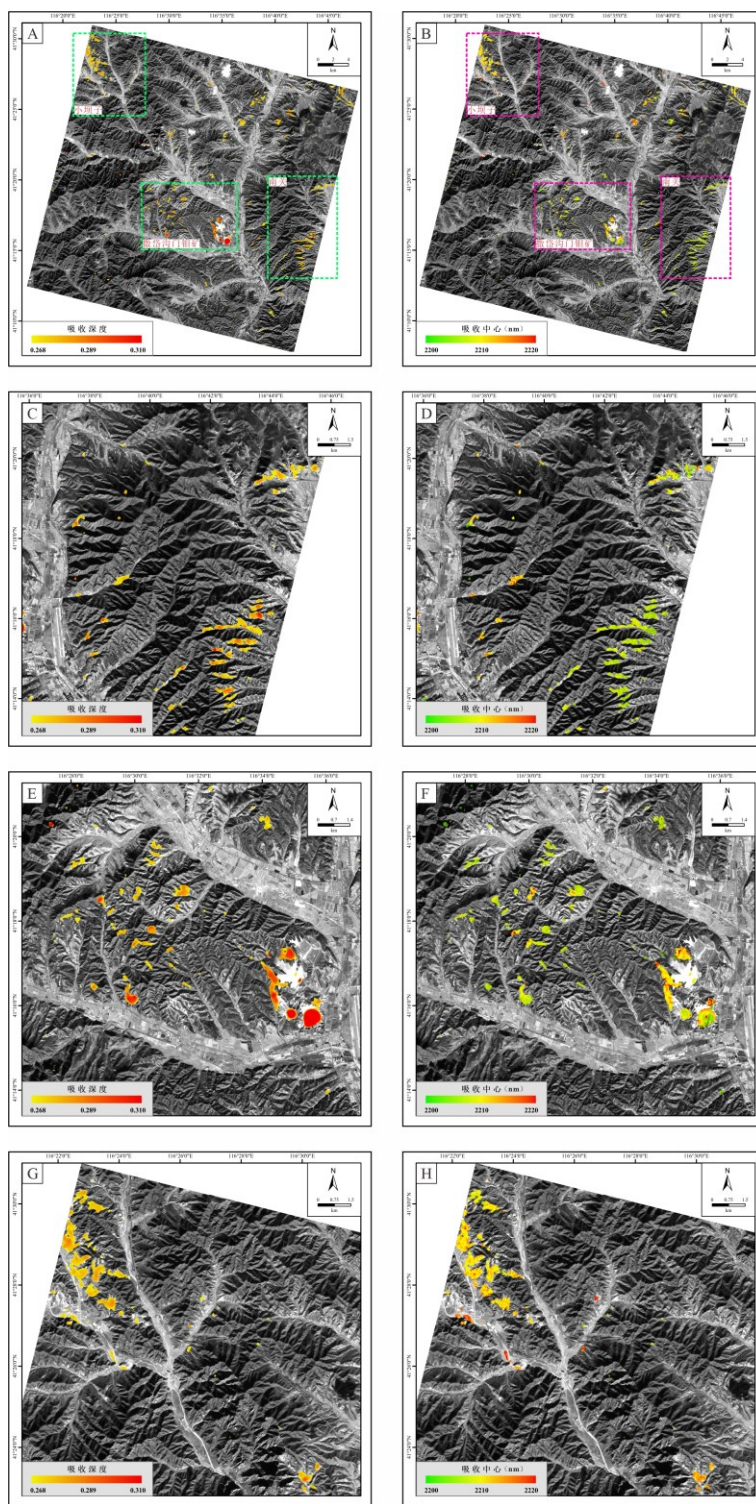


图 4 研究区白云母异常分布图

Fig.4 Distribution Map of White Mica Anomalies in the Study Area

底图为 GF-5B 波段 46 的单波段影像

- A. 白云母吸收深度；B. 白云母吸收中心；C. 白云母吸收深度南关地区放大图；D. 白云母吸收中心南关地区放大图；E. 白云母吸收深度撒袋沟门矿区放大图；F. 白云母吸收中心撒袋沟门矿区放大图；G. 白云母吸收深度小坝子地区放大图；H. 白云母吸收中心小坝子地区放大图；

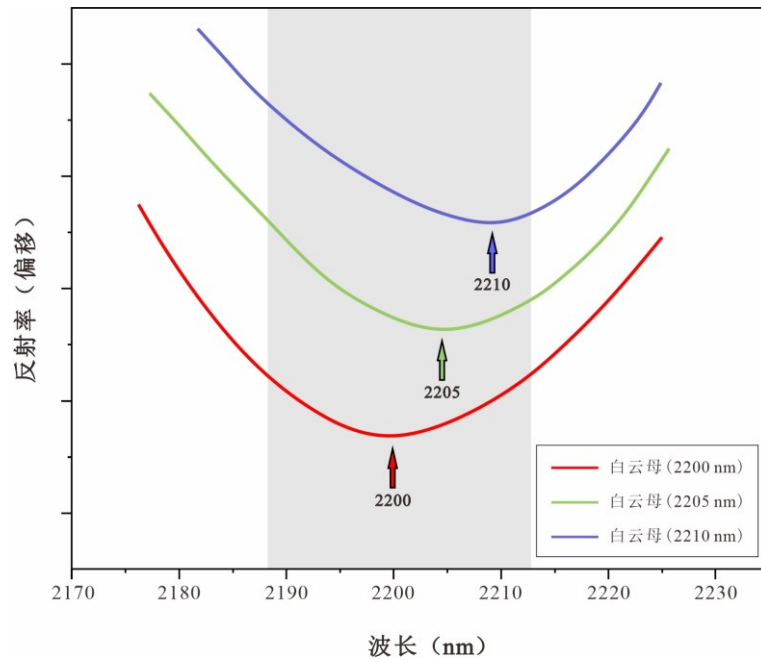


图 5 采矿区白云母拟合光谱
Fig.5 Fitted Spectra of White Mica from the Mine Pit

4.2 线性构造分布特征

Hillshade 影像在不同光照条件下表现出明显的方向响应差异。0°光照条件下，EW 向线性地貌特征增强较为明显，同时可见少量 NE 向与 NW 向线性特征（图 6A）；135°光照条件下，NE 向和 NNE 向线性地貌特征增强更为突出，并伴有少量 NS 向特征（图 6B）。经山脊线（图 6C）及人工线性地物剔除后，获得了研究区线性构造空间分布（图 6D）及构造线密度分布（图 7）。从空间分布特征看，线性构造在研究区西部、北部及东部较为发育，表现为多个高密度分布区（图 7）。与区域地质图对比可见，DEM 提取的线性形迹在 NE、NNE 及 EW 向主要展布方向上与已标绘断裂总体吻合，西部、北部及南关一带的线性形迹密集区也与地质图主要构造发育部位相对应（图 1）；同时，DEM 线性形迹更为细致，可反映部分小尺度构造或地貌线性响应。

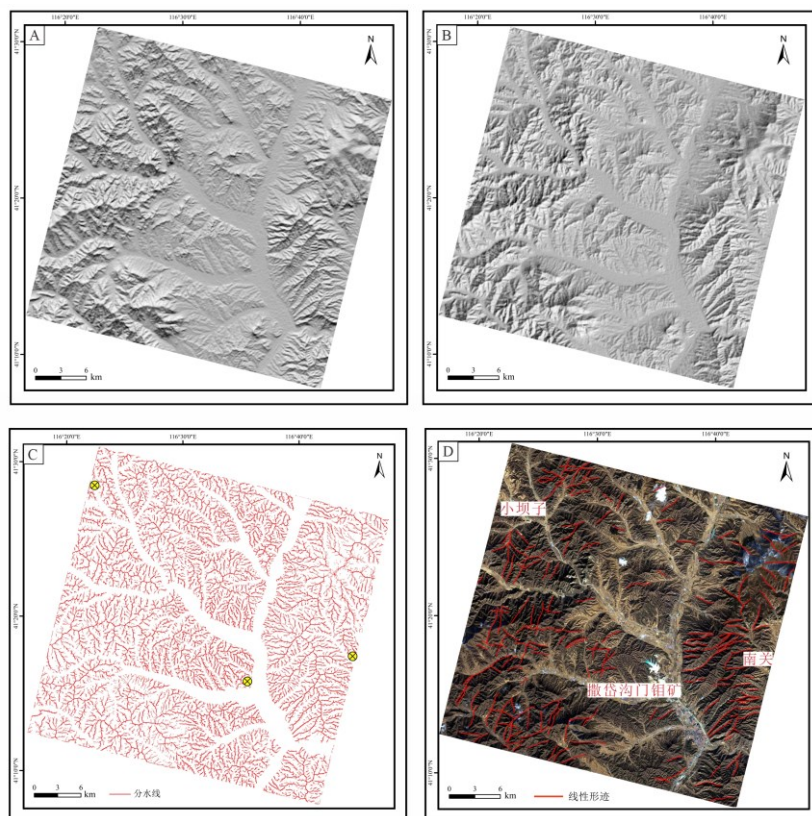


图 6 Hillshade 增强与线性形迹提取结果

Fig.6 Results of Hillshade Enhancement and Lineament Extraction

底图为融合后 Landsat 8 真彩色图像

A. 为 0° 光照条件 Hillshade 图；B. 为 135° 光照条件 Hillshade 图；C. 为分水线示意图；D. 为研究区线性形迹分布图

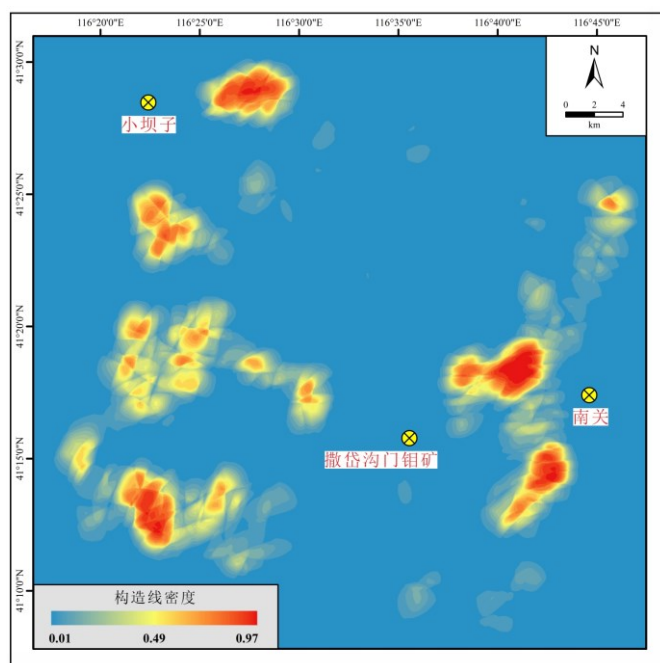


图 7 研究区构造线密度分布图

Fig.7 Structural Line Density Map of the Study Area

4.3 岩体距离证据层特征

研究区共识别出 6 处三叠纪花岗岩体出露，主要分布于中部及南部区域。岩体距离证据层在空间上呈现明显的梯度分布特征（图 8），高值区主要集中于岩体出露范围及其周缘，并随距岩体距离增加逐渐降低。撒岱沟门钼矿区位于三叠纪花岗岩体附近，其空间位置与岩体距离证据层高值区具有良好的对应关系。相比之下，小坝子地区距离岩体较远，对应证据层整体表现为低值分布。岩体距离证据层在空间上表现出连续变化特征，能够在区域大尺度上较好地约束成矿有利区域的空间分布。

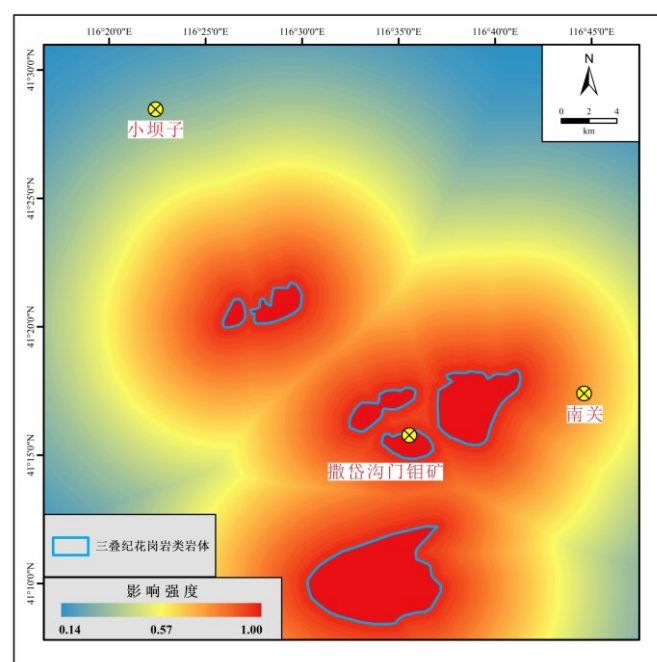


图 8 研究区成矿有利岩体距离分布图
Fig.8 Distribution of Distance to Ore-Forming Intrusions in the Study Area

4.4 成矿潜力预测结果

基于岩体距离、白云母吸收深度及构造线密度三类证据层，采用模糊逻辑加权幂乘模型对研究区成矿潜力进行综合评价。在均权条件下（ $w_1 = w_2 = w_3 = 0.33$ ），各证据层被视为具有相同重要性，因此该结果反映了在不强调单一控矿因素前提下，多源找矿信息的综合响应，可作为研究区成矿潜力空间分布的基准情形。根据预测结果，研究区可划分出 4 个主要成矿潜力分区（图 9）。

区域（a）位于小坝子地区，整体潜力处于低至中等水平，潜力区范围较大但分布较为离散，高值区连续性较差。区域（b）位于杨树梁地区，与区域（a）特征相似，整体潜力

亦表现为低-中等水平。区域（c）位于撒岱沟门钼矿区，表现出两个相对独立的高潜力中心，其中东侧高值区对应钼矿采矿区位置，西侧高值区位于采矿区外围。区域（d）位于南关地区，在均权条件下表现出研究区内最高的成矿潜力，其高值区分布范围最广且连续性较好。总体来看，研究区成矿潜力在空间上呈现明显分异特征，不同区域之间在潜力等级及空间连续性方面存在显著差异。

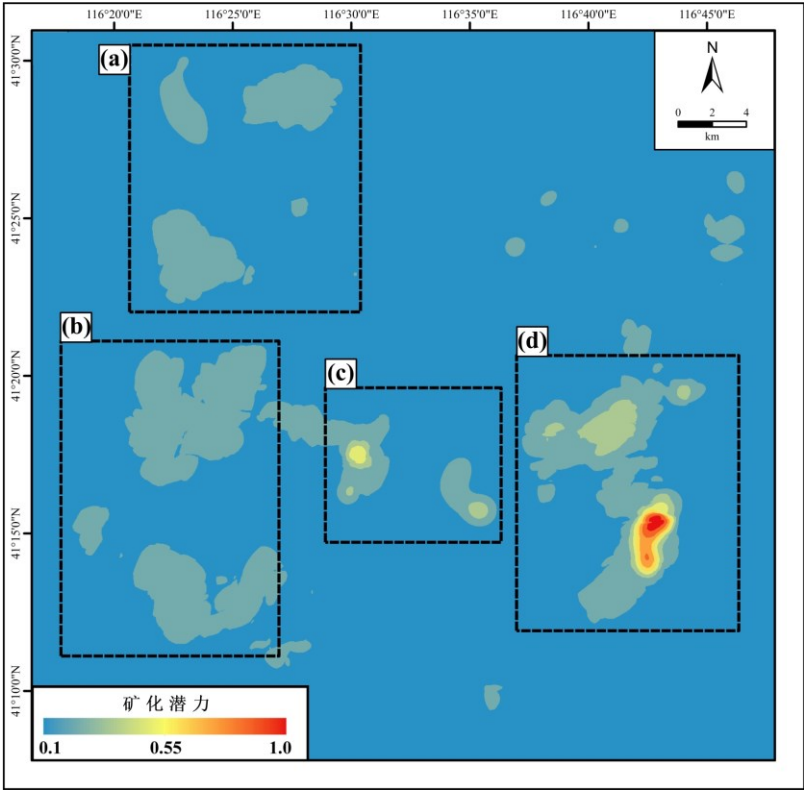


图 9 研究区均权条件下成矿潜力预测图
Fig.9 Mineral Prospectivity Map of the Study Area Under Equal-weight Conditions

4.5 实地验证

遥感提取结果显示，撒岱沟门钼矿采矿区白云母吸收深度整体较高，吸收中心主要分布于 2200-2210 nm，表现出明显的空间分带特征（图 4E-F）。为验证遥感识别结果的可靠性，本研究在采矿区不同位置采集样品并开展光谱测量与岩相学分析（图 10A），同时记录了相应的经纬度信息（表 4）。野外与镜下观察显示，采矿区内发育明显的钾化与绢云母化蚀变分带；绢云母与黄铁矿、辉钼矿共生，指示其与矿化作用密切相关（图 10B-G）。实测光谱结果显示，不同采样点白云母吸收中心主要分布于 2200-2209 nm 范围内，并整体表现出由内向外逐渐向长波方向偏移的趋势（图 11），该变化特征与遥感提取结果在空间分布上具有一致性。

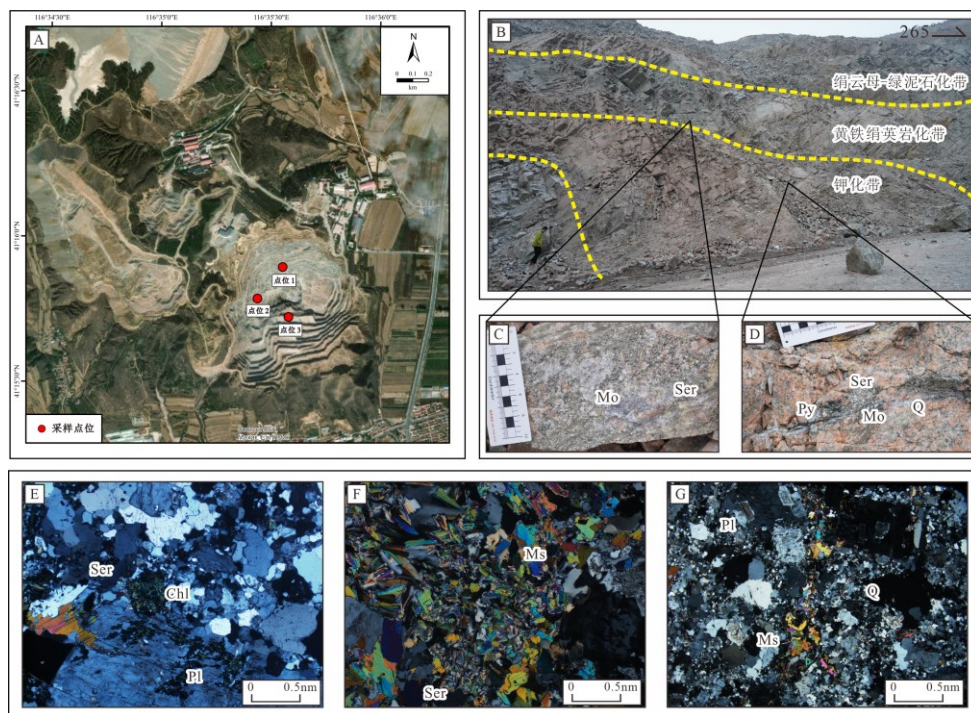


图 10 采矿区实地验证点位置、野外照片及镜下照片
Fig.10 Locations of Field Validation Sites, Field Photographs, and Microscopic Photographs from the Mining Area
底图为 ArcMap 10.8 内置卫星影像

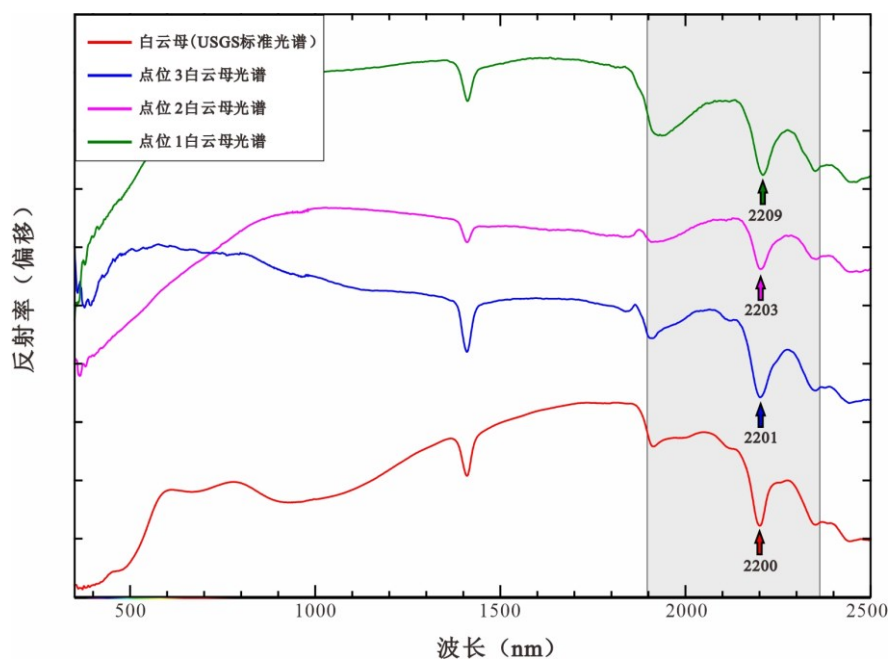


图 11 验证样品实测光谱与对应像元光谱对比图
Fig.11 Comparison Between Field-Measured Spectra of Validation Samples and Corresponding Image Spectra

5 讨论

5.1 白云母光谱特征及其成矿指示意义

白云母在约 2200 nm 附近的 Al-OH 吸收特征对其化学组成具有指示意义，不同吸收中心位置反映了白云母成分及其形成环境的差异（Asadzadeh *et al.*, 2024b）。这一变化本质上受 Tschermak 置换过程控制，其表现为白云母晶体结构中八面体位 Al^{3+} 被 $\text{Fe}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ 取代，同时四面体位 Al^{3+} 被 Si^{4+} 取代，从而导致白云母由 Al-rich 向 Al-poor 转变，并伴随吸收中心向长波方向移动（Duke, 1994; van Ruitenbeek *et al.*, 2012），该置换过程受热液体系物理化学条件控制。与吸收中心主要表征成分不同，白云母在约 2200 nm 处主吸收特征的吸收深度主要反映该矿物的相对丰度，可作为白云母富集程度的半定量指标（van Ruitenbeek *et al.*, 2006）。因此，吸收中心与吸收深度分别提供白云母的成分信息与丰度信息，二者刻画了热液蚀变过程中白云母的空间变化特征，并在斑岩型矿床中表现出明显的分带规律。

与许多其他浅层斑岩系统中记录的典型分带一致（Alva-Jimenez *et al.*, 2020; Asadzadeh *et al.*, 2024a, b），撒岱沟门钼矿采矿区的矿化中心表现为吸收中心位置向短波方向偏移，而边部区域则表现为吸收中心位置向长波方向偏移，该分带受垂向和横向流体演化共同控制，本质上反映了 Tschermak 置换程度在空间上的变化：垂向上，随着流体上升与温度降低，白云母由深部高温环境下形成的富铁镁的 Al-poor 类型逐渐过渡为浅部低温条件下的 Al-rich 类型。横向上，分带主要受流体化学性质如 pH 条件及流体-岩石相互作用控制。靠近矿化中心区域通常具有较高的流体-岩石比及更酸性的流体环境，有利于形成 Al-rich 白云母，其吸收中心表现为向短波偏移；而在外围区域，随着化学条件变化，白云母逐渐向 Al-poor 转变，吸收中心向长波方向偏移（Asadzadeh *et al.*, 2024a, b; Ren *et al.*, 2024）。相比之下，白云母吸收深度在撒岱沟门采矿区亦表现出一定的分带特征，半定量反映了白云母的相对高丰度，并指示热液流体作用强度由矿区中心向外围逐渐减弱。上述分带特征从光谱上指示了高流体-岩石比条件下形成的绢云母-石英-黄铁矿组合在矿化中心的富集（Qiu *et al.*, 2021; Asadzadeh *et al.*, 2024a, b）。

实测光谱与镜下观察共同表明（图 10-11），采矿区富白云母样品吸收中心集中于 2200-2209 nm 范围内，且广泛发育于绢云母化蚀变带中；前人基于矿物学的工作证明，绢云母发育于成矿期，与辉钼矿化联系密切（Chen *et al.*, 2022）。结合上述分析与实地验证可以认为，本研究基于遥感识别的 Al-rich 白云母异常，能够有效表征绢云母化蚀变，并可

作为识别矿化中心的光谱地质约束。需要指出的是，采矿区中心局部出现的 2220 nm 长波异常可能与落石堆积有关（图 4F），不代表原生蚀变分带特征。因此，白云母吸收深度与吸收中心在本文中承担不同作用。吸收深度作为白云母富集程度的半定量指标，被用作热液蚀变强度证据层进入成矿潜力模型；吸收中心则不参与模型计算，而是作为独立的光谱地质约束，用于判断白云母异常是否具有矿化中心指示意义。

基于上述分析，南关地区及撒岱沟门钼矿区白云母整体表现为较高吸收深度和偏短波吸收中心，说明这些异常更可能对应与矿化有关的绢云母化蚀变（Asadzadeh *et al.*, 2024a, b; Ren *et al.*, 2024）。相比之下，在小坝子地区，白云母吸收中心主要分布于 2210-2220 nm 的较长波段范围（图 4H），与撒岱沟门矿区存在明显差异。这一差异可从以下两方面解释：一方面，小坝子区域三叠纪岩体出露面积极为有限，缺乏绢云母化蚀变所需的热液来源；另一方面，该区域地表第四系沉积物覆盖广泛，碎屑成因的白云母或风化产物可能对遥感光谱信号产生干扰，导致吸收中心向长波方向偏移，其效应类似于 Reko Diq 矿床中风积砂覆盖对光谱异常造成的干扰（Asadzadeh *et al.*, 2024b）。因此，小坝子地区白云母光谱异常与热液成矿作用之间的关联性仍有待进一步的地表地质验证加以厘清。

与前人经典斑岩型矿床研究结果相比（Asadzadeh *et al.*, 2024a, b），本研究采用的 GF-5B 传感器空间分辨率为 30 m，与 EnMAP 相当，可在区域尺度上有效开展蚀变填图。但受像元尺度限制，小尺度蚀变脉体可能受到混合像元效应影响而被削弱，这在一定程度上解释了矿区外围白云母异常分布较为离散的现象。

5.2 岩浆-构造对热液白云母的控制作用

研究区白云母异常主要分布于三叠纪岩体内部及其周缘，并在断裂交汇部位形成局部高值区，表明白云母的空间分布受岩体与构造共同控制（图 12）。对于斑岩型系统而言，岩体周缘接触带及断裂构造通常是热液活动和蚀变作用较为集中的部位（Chen *et al.*, 2020, 2021; Qiu *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2021），蚀变矿物与岩体、构造之间的空间耦合关系，常被用作判别成矿流体活动范围及潜在矿化中心的重要依据。

从空间关系上看，研究区白云母异常可归为两类。第一类主要见于南关地区及撒岱沟门矿区（图 12B-C），这些区域的白云母异常均靠近三叠纪岩体，并主要分布于 NE、NNE 及 EW 向线性构造交汇部位或构造较为集中的区域，表现出明显的岩体与构造共同控制特征。与这种空间关系相对应，这些区域的白云母显示出 Al-rich 白云母富集的特征，指示潜

在矿化中心，表明岩体-构造耦合部位是热液活动和矿化富集的有利空间。第二类以小坝子地区为代表（图 12D），该区白云母异常虽有一定分布，但与岩体及构造的空间对应关系较弱，区域内缺乏三叠纪岩体出露，线性构造发育程度也相对较低。与之相应，小坝子地区遥感异常可能更多受风化产物影响。这从反面说明，在缺乏岩体与构造协同控制的条件下，通常难以形成与矿化密切相关的热液蚀变。

总体而言，研究区最有利的控矿空间并非单纯的近岩体或近构造部位，而是岩体与构造耦合增强的区域。岩体提供热源与成矿物质，构造控制流体运移路径与沉淀位置。构造交汇部位因渗透性增强，更有利于热液流体聚集，形成蚀变与矿化区。从区域尺度看，这种岩体-构造-蚀变耦合关系可视为华北克拉通破坏背景下三叠纪岩浆-热液活动在研究区的空间响应：岩浆活动提供物质与热动力条件，NNE、NE 及 EW 向断裂构造则为岩浆上侵和热液运移提供通道，二者共同控制白云母异常和潜在矿化区的空间分布（朱日祥等，2012；Qiu *et al.*, 2024a；He *et al.*, 2024）。因此，白云母异常与岩体、构造之间的空间对应关系，本质上反映了岩浆供源、构造导流与热液蚀变响应的综合作用，从地质成因角度说明本文所构建的多源证据层模型具有合理性，可为潜在矿化区识别提供可靠约束。

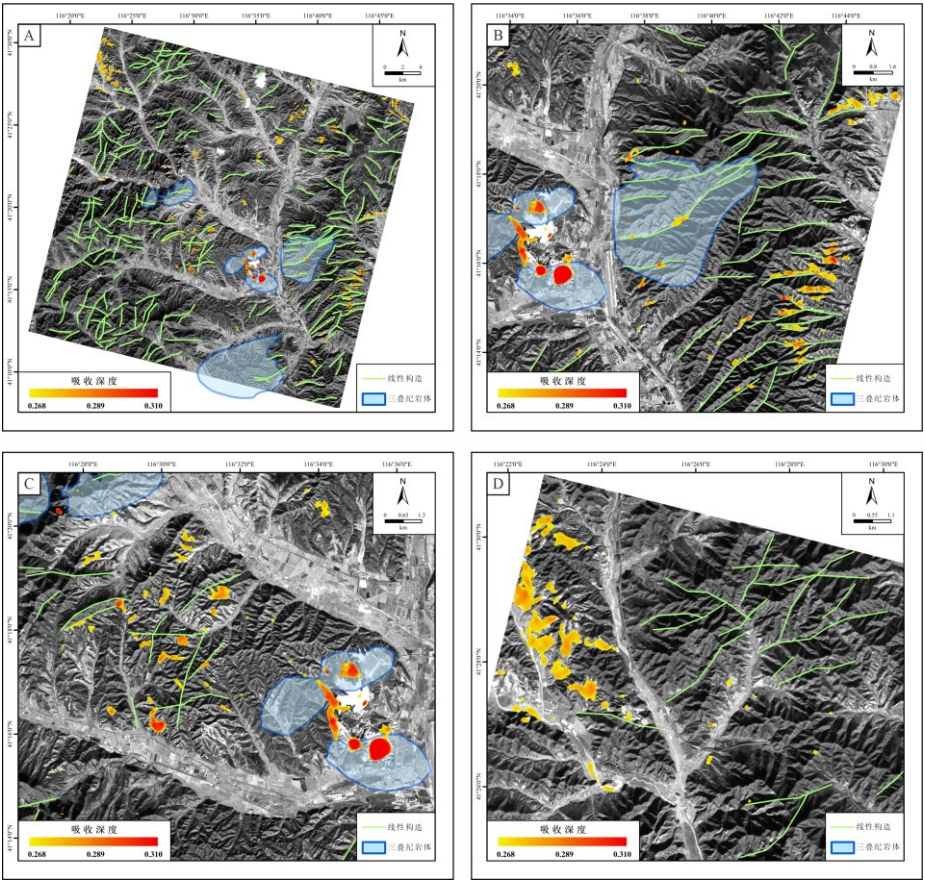


图 12 研究区构造-蚀变-岩体叠加图
Fig.12 Overlay Map of Structures, Alteration, and Intrusive Bodies in the Study Area
底图为 Landsat 8 波段 4 灰度影像

5.3 模型验证与敏感性分析

在研究区已知矿点数量有限的条件下，为检验成矿潜力预测结果对权重设定的稳定性，本文在均权方案基础上进一步设计了 9 组不同权重组合（表 5），并采用统一的分级标准进行对比分析（图 13）。9 组不同权重组合得到的成矿潜力预测结果与均权模型总体相近，主要高值区空间展布具有较好一致性，整体围绕已知矿化区及地质有利地段分布（图 13）。

表 5 不同权重组合方案
Table 5 Different Weight Combinations Used in the Mineral Prospectivity Modeling

模型编号	白云母蚀变	构造线密度	岩体距离	权重类型	图号
M1	0.2	0.2	0.6	岩体主导	图 13 A
M2	0.6	0.2	0.2	白云母主导	图 13 B
M3	0.2	0.6	0.2	构造主导	图 13 C
M4	0.4	0.2	0.4	岩体+白云母 主导	图 13 D
M5	0.2	0.4	0.4	岩体+构造主 导	图 13 E
M6	0.4	0.4	0.2	白云母+构造 主导	图 13 F
M7	0.35	0.25	0.4	中等偏重	图 13 G
M8	0.4	0.25	0.35	中等偏重	图 13 H
M9	0.25	0.4	0.35	中等偏重	图 13 I

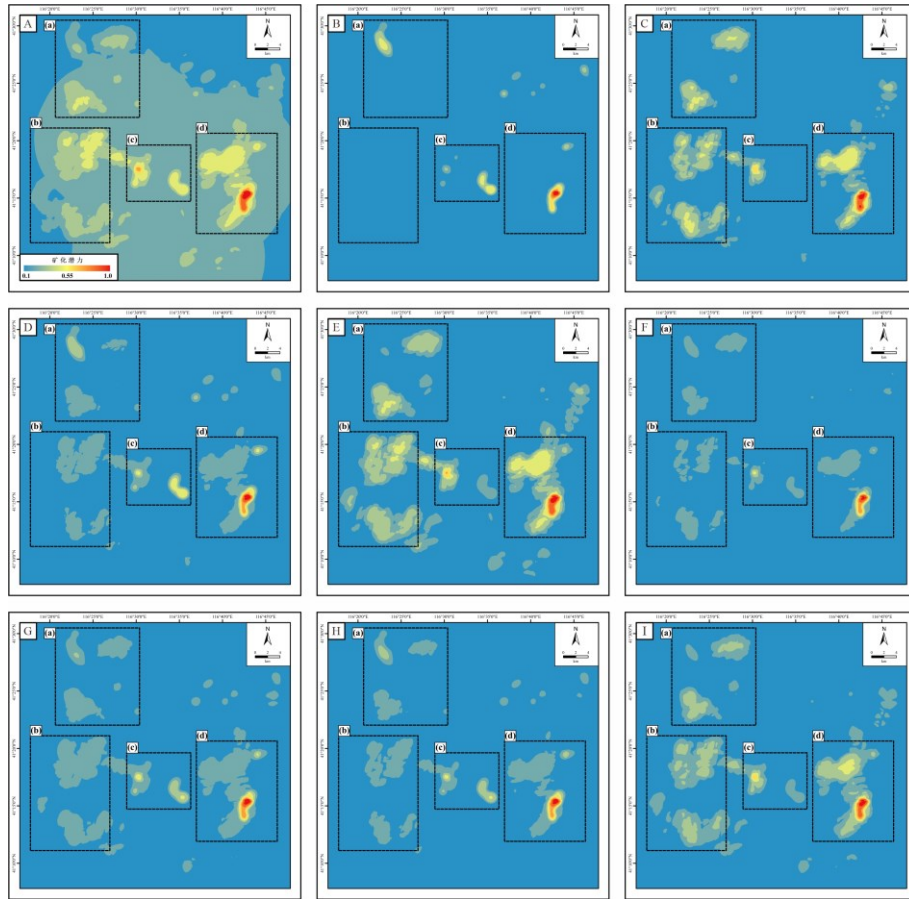


图 13 不同权重组合下成矿潜力预测结果对比

Fig.13 Comparison of Mineral Prospectivity Results Under Different Weight Combinations

为检验预测结果与已知矿化空间分布之间的对应关系，本文以研究区已知采矿区范围作为验证对象（图 1B），统计其在不同预测高值区比例下的累计覆盖情况，并绘制成功率曲线（图 14）。该方法可定量反映已知采矿区在成矿潜力排序中的位置，从而评价模型预测结果对已知矿化区的识别能力。成功率曲线结果显示，10 组权重模型的曲线整体均位于随机期望线之上，表明已知采矿区在预测高值区中具有明显富集特征（图 14）。其中，均权模型的成功率曲线下面积（AUC）为 0.985，前 8.49% 的高值预测区即可实现已知采矿区 100% 覆盖，说明基准模型对已知矿化区具有较好的识别能力。不同权重模型中，白云母主导模型、岩体+白云母模型以及部分中等权重模型的曲线更靠近左上方，AUC 接近或高于 0.994，且仅需前 1.27%-2.13% 的高值预测区即可覆盖已知采矿区，表明其对已知矿化具有较高捕获效率；相比之下，构造主导、岩体+构造及 M9 中等权重模型的曲线相对右移，达到 100% 覆盖所需的高值区面积比例分别为 20.79%、15.87% 和 14.25%，说明在这些权重组合下，已知采矿区的高值覆盖效率相对较低。总体来看，所有模型均能在前 20.79% 的高值预测区内实现已知采矿区 100% 覆盖，模型预测结果与实际矿化空间分布具有较好一致性。

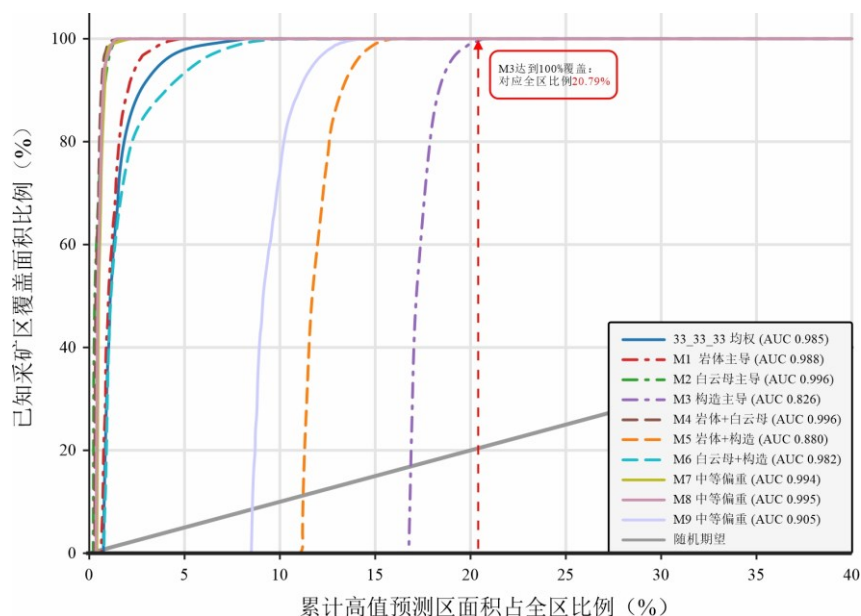


图 14 不同权重模型下已知采矿区覆盖成功率曲线

Fig.14 Success-Rate Curves for Known Mining Area Coverage under Different Weight Models

为了定量评价不同权重组合下预测结果的空间一致性，本文进一步引入 Spearman 秩相关系数、前 5%高值区 Jaccard 重叠率和重叠系数 Overlap coefficient 三个指标。将 10 组权重模型的预测结果进行两两组合，共形成 45 组成对比较（表 6）。进一步按照权重组合特征，将模型划分为单因子主导模型（M1-M3）、双因子组合模型（M4-M6）和中等权重模型（M7-M9）三类，并分别统计每类模型与其它模型之间的 21 组成对比较结果（表 6）。其中，Spearman 秩相关系数用于表征不同权重模型下全区预测值空间排序的一致性；前 5%高值区 Jaccard 重叠率用于评价各模型极高预测值区域的空间重合程度；Overlap coefficient 则用于衡量不同模型前 5%高值区核心部分的相互包含关系。通过上述指标，可从全区预测格局和高值靶区空间稳定性两个层面评价权重扰动对成矿潜力预测结果的影响。

表 6 不同权重模型预测结果的敏感性与空间一致性统计

Table 6 Sensitivity and Spatial Consistency Statistics of Prediction Results under Different Weight Models

比较范围	成对模型数	Spearman 相关系数	前 5%高值区 Jaccard 重叠率/%	前 5%高值区 Overlap coefficient/%
全部模型	45	0.9817 (0.0155)	61.83 (14.99)	75.33 (11.76)
单因子主导模型	21	0.9777 (0.0141)	58.64 (13.71)	72.95 (11.34)
双因子组合模型	21	0.9840 (0.0142)	64.35 (15.22)	77.24 (11.65)
中等权重模型	21	0.9860 (0.0104)	65.48 (14.42)	78.19 (10.88)

注：括号内数值为标准差（StDev）。

结果表明，10 组权重模型之间的全区预测值排序具有较高一致性，说明权重变化并未

显著改变研究区成矿潜力预测的总体空间格局（表 6）。前 5%高值区在不同模型之间也表现出较明显的空间重叠（表 6）。分组结果进一步显示，单因子主导模型的空间一致性相对较低，而双因子组合模型和中等权重模型表现更稳定。综上，模型预测结果在整体空间格局和主要高值靶区识别方面表现稳定，表明该模型对权重设定变化不敏感。

5.4 成矿潜力预测及找矿意义

鉴于单因子主导模型与其它模型之间的空间一致性相对较低，后续分区评价中剔除该类权重方案，以降低单一证据层对评价结果的影响。基于剩余 7 组非单因子主导模型，本文从两个方面对四个潜力分区进行综合评价：一是统计各分区在不同权重模型下的分区预测均值分位和预测值前 5%高值面积占比，用于评价潜力分区在权重扰动下的稳定性；二是提取各模型前 5%预测高值像元在分区内的平均值，经指数增强、标准化和 S 型函数转换后获得相对优先级评分，用于表征各分区高值中心的强度差异（表 7）。

结果显示，南关（d 分区）的稳定性和相对优先级评分均最高，表明该区预测响应强且稳定，可作为最优找矿远景区。撒岱沟门矿区（c 分区）的相对优先级评分仅次于南关，说明其具有较好的找矿潜力，但其前 5%高值面积占比的变异系数较高，表明极高值区范围对权重变化相对敏感。杨树梁（b 分区）的相对优先级评分最低，且前 5%高值面积占比稳定性较低，找矿优先级相对较低；但其分区均值分位相对较高，说明该区整体预测响应具有一定强度，但缺少稳定而突出的高值中心。小坝子（a 分区）的稳定性较好，但相对优先级评分较低，表明该区在不同权重模型下均表现为较低的找矿优先级。总体来看，南关和撒岱沟门矿区为主要高值优先区。其中，南关区的综合稳定性更强，可作为最优找矿远景区；撒岱沟门矿区的整体高值响应，一方面与已知撒岱沟门钼矿采矿区相对应，另一方面在矿区西侧外围表现为较稳定的高值中心（图 13），表明撒岱沟门钼矿外围仍具有进一步找矿勘查潜力。

表 7 分区稳定性分析及相对优先级评分
Table 7 Zone Stability Analysis and Relative Prospecting Priority Scores

分区	分区均值分位/%	前 5%高值面积占比/%	相对优先级评分	排名
a	79.83 (0.92 ; 1.15)	7.44 (1.24 ; 16.64)	33.21	3
b	83.53 (1.65 ; 1.97)	9.61 (3.07 ; 31.98)	28.18	4

c	83.67 (2.34 ; 2.80)	12.11 (4.68 ; 38.66)	60.56	2
d	87.65 (0.59 ; 0.67)	18.67 (1.05 ; 5.60)	76.95	1

注：括号内数值依次为标准差（StDev）和变异系数（CV）/%。

从地质背景看，各潜力分区预测响应的差异主要受白云母蚀变、构造发育程度及成矿岩体空间关系的共同控制。南关区白云母吸收深度较高，吸收中心主要集中于 2200-2210 nm，且位于三叠纪岩体边缘和构造发育部位，蚀变、构造和岩体三类信息在空间上耦合较好，因此表现出强而稳定的高值响应。撒岱沟门矿区西侧外围邻近成矿有利岩体，并发育具有成矿指示意义的白云母异常，说明该区仍具有较好的找矿勘查潜力；相比之下，小坝子区虽存在白云母异常，但吸收中心主要偏向 2210-2220 nm，且与岩体和构造耦合较弱，杨树梁区则远离成矿岩体且无明显白云母异常。上述分区差异表明，模型从白云母吸收深度、构造线密度和岩体距离综合识别出的高潜力区，与白云母吸收中心所指示的潜在矿化中心具有较好对应关系，说明预测结果与研究区成矿地质认识相一致，并具有较明确的光谱地质支撑。

从邻区矿化信息看，南关区邻近南关乡三道沟钼矿床（张磊等，2019）。前人研究表明，三道沟钼矿是该区找矿工作的关键突破，其成矿与斑状二长花岗岩及绢云母化-硅化-钾化蚀变密切相关（张磊等，2019）。此外，前人对撒岱沟门钼矿床的研究进一步指出，矿区外围已依据控矿因素、物化探异常和遥感信息圈出多处找矿远景区，取得了大草坪钼矿床和西千佛寺铅锌矿床等找矿进展（沈光银，2011）。上述邻区找矿信息表明，模型得出的高潜力区并非孤立异常，而是具有一定找矿背景支撑的潜在成矿有利区。

综上，本文的成矿潜力预测并非对遥感、构造和岩体信息的简单叠加，而是在辅助数据相对有限的条件下，依据斑岩型钼矿成因认识对白云母吸收深度、构造线密度和岩体距离进行证据层优化。模型结果经权重敏感性分析、空间一致性评价和成功率曲线检验，显示主要高值区具有较好的稳定性和已知矿区捕获效率；同时，白云母吸收中心的短波偏移为南关及撒岱沟门钼矿区高值区的潜在矿化中心属性提供了独立光谱约束。由此，成因约束型证据层构建、模型稳定性检验与吸收中心地质解释相结合，可提高有限辅助数据条件下成矿远景预测的可解释性和找矿远景区优选的可靠性。需要指出的是，由于研究区已知矿点数量有限，本文尚未采用依赖大量训练样本的数据驱动预测方法。后续可在勘查数据进一步积累的基础上，引入地球化学、地球物理等信息，开展更系统的统计检验与模型验

证，以进一步提高预测结果的可靠性。

6 结论

(1) GF-5B 高光谱数据能够有效识别研究区白云母蚀变信息，并为矿化中心判别提供光谱约束。撒岱沟门钼矿区和南关地区白云母吸收深度较高，吸收中心主要集中于 2200-2210 nm，表现出与矿化有关的富铝绢云母特征；小坝子地区吸收中心相对偏长波、吸收深度较低，成矿指示意义相对较弱。

(2) 基于白云母吸收深度、构造线密度和岩体距离构建的模糊逻辑模型能够较好刻画研究区蚀变、构造与岩体的空间耦合关系。均权模型曲线下面积 (AUC) 为 0.985，前 8.49% 的高值预测区即可覆盖全部已知采矿区；权重敏感性分析显示主要高值区具有较好的空间稳定性。找矿相对优先级评分显示，南关地区最高，为 76.95，可作为研究区最优找矿远景区；撒岱沟门钼矿区次之，为 60.56，其中采矿区西侧外围发育较稳定高值中心，表明撒岱沟门钼矿外围仍具有进一步找矿勘查潜力。总体而言，GF-5B 白云母定量信息、DEM 构造信息与岩体空间约束的综合应用，能够有效识别斑岩型钼矿系统中蚀变-构造-岩体耦合增强的有利部位，进而支撑斑岩型钼矿成矿远景预测，可为华北克拉通破坏背景下同类矿床找矿勘查提供依据。

致 谢

感谢中国科学院上海技术物理研究所提供了 GF-5B 星载 AHSI 高光谱遥感数据。感谢匿名审稿人和编辑在审稿过程提供的宝贵评审意见。

表 2 OreXpress 光谱仪参数信息

Table 2 Parameter Information of the OreXpress Spectrometer

项目	参数
光谱范围	350 - 2500 nm
光谱分辨率	2.8 nm (350 - 1000 nm) ; 8 nm (1500 nm) ; 6 nm (2100 nm)
光谱采样带宽	每 1 nm 增量输出 2151 个信道
Si 探测器	512 单元 Si 阵列探测器 (350 - 1000 nm)
InGaAs 探测器	256 单元扩展型 InGaAs 阵列 (1000 - 1900 nm) ; 256 单元扩展型 InGaAs 阵列 (1900 - 2500 nm)
视场角选项	1、2、3、4、5、8、10° (光纤安装)
最小扫描速度	100 毫秒
波长重复性	0.1 nm
波长准确性	±0.5 带宽
接口	USB、蓝牙
尺寸	21.6 × 30.5 × 8.9 cm
重量	4 kg
电池	外置锂离子电池 7.4 V
电池续航	至少 3 小时

表 4 验证点位经纬度信息

Table 4 Latitude and Longitude of Field Verification Points

位置	经度	纬度
点位 1	116.59873724° E	41.26606578° N
点位 2	116.59579754° E	41.26435208 ° N
点位 3	116.59885526° E	41.26313835° N

References

- Alva-Jimenez, T., Tosdal, R.M., Dilles, J.H., et al., 2020. Chemical Variations in Hydrothermal White Mica across the Highland Valley Porphyry Cu-Mo District, British Columbia, Canada. *Economic Geology*, 115(4): 903–926.
- Asadzadeh, S., Chabrillat, S., Cudahy, T., et al., 2024a. Alteration Mineral Mapping of the Shadan Porphyry Cu-Au Deposit (Iran) Using Airborne Imaging Spectroscopic Data: Implications for Exploration Drilling. *Economic Geology*, 119(1): 139–160.
- Asadzadeh, S., de Souza Filho, C.R., 2016. Iterative Curve Fitting: A Robust Technique to Estimate the Wavelength Position and Depth of Absorption Features from Spectral Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(10): 5964–5974.
- Asadzadeh, S., Zhou, X., Chabrillat, S., 2024b. Assessment of the Spaceborne EnMAP Hyperspectral Data for Alteration Mineral Mapping: A Case Study of the Reko Diq Porphyry Cu-Au Deposit, Pakistan. *Remote Sensing of Environment*, 314: 114389.
- Chen, P.W., Liu, B., Long, Z., et al., 2022. Ore Genesis of the Sadaigoumen Porphyry Mo Deposit, North China Craton: Constraints from Pyrite Trace Element and Lead Isotope Analyses. *Ore Geology Reviews*, 142: 104698.
- Chen, P.W., Zeng, Q.D., Zhou, L.L., et al., 2021. Fluid Inclusion Evidence for Hydrothermal Evolution of the Sadaigoumen Porphyry Mo Deposit on the Northern Margin of the North China Craton. *Ore Geology Reviews*, 134: 104145.
- Chen, P.W., Zeng, Q.D., Zhou, T.C., 2020. Petrogenesis and Mo Prospecting Significance of Sadaigoumen Granites on the Northern Margin of the North China Craton. *Journal of Geochemical Exploration*, 214: 106536.
- Chen, Z.X., Wang, Z.H., Bu, H.J., et al., 2026. A Geological Information and Enhanced Graph Convolutional Network Method for Extracting Information on Lithium and Beryllium-Rich Pegmatites from Hyperspectral Imagery. *Earth Science*, 51(3): 1057–1064 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q.M., Chen, Z.J., Khaled, A., 2007. Application of Fuzzy Weights of Evidence Method in Mineral Resource Assessment for Gold in Zhenyuan District, Yunnan Province, China. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 32(2): 175–184 (in Chinese with English abstract).
- Cooper, G.R.J., 2005. Sunshading Global Datasets. *Computers & Geosciences*, 31(1): 109–113.
- Dai, J.Z., Mao, J.W., Yang, F.Q., et al., 2006. Geological Characteristics and Geodynamic Background of Molybdenum (Copper) Deposits along the Yanshan-Liaoning Metallogenic Belt on the Northern Margin of the North China Block. *Mineral Deposits*, 25(5): 598–612 (in Chinese with English abstract).
- Dong, X.F., Gan, F.P., Li, N., et al., 2022. Mineral Mapping in the Duolong Porphyry and Epithermal Ore District, Tibet, Using the Gaofen-5 Satellite Hyperspectral Remote Sensing Data. *Ore Geology Reviews*, 151: 105222.
- Duke, E.F., 1994. Near Infrared Spectra of Muscovite, Tschermak Substitution, and Metamorphic Reaction Progress: Implications for Remote Sensing. *Geology*, 22(7): 621–624.
- Gao, L., Yao, D., Li, Q., et al., 2017. A New Low-Rank Representation Based Hyperspectral Image Denoising Method for Mineral Mapping. *Remote Sensing*, 9(11): 1145.
- He, D.Y., Qiu, K.F., Simon, A.C., et al., 2024. Mantle Oxidation by Sulfur Drives the Formation of Giant Gold Deposits in Subduction Zones. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 121(52): e2404731121.
- He, D.Y., Qiu, K.F., Yu, H.C., et al., 2025. Lithospheric Architecture and Evolution of the Qinling Orogen of Central China and Associated Controls on Metallogeny. *Earth-Science Reviews*, 264: 105092.
- Leng, C.B., Zhang, X.C., Huang, Z.L., et al., 2015. Geology, Re-Os Ages, Sulfur and Lead Isotopes of the

- Diyanqinamu Porphyry Mo Deposit, Inner Mongolia, NE China. *Economic Geology*, 110(2): 557–574.
- Li, N., Derrey, I.T., Holtz, F., et al., 2021. Molybdenum Solubility and Partitioning in H₂O-CO₂-NaCl Fluids at 600 °C and 200 MPa. *Chemical Geology*, 583: 120438.
- Qiu, K.F., Deng, J., Yu, H.C., et al., 2021. Identifying Hydrothermal Quartz Vein Generations in the Taiyangshan Porphyry Cu-Mo Deposit (West Qinling, China) Using Cathodoluminescence, Trace Element Geochemistry, and Fluid Inclusions. *Ore Geology Reviews*, 128: 103882.
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024a. The Role of an Oxidized Lithospheric Mantle in Gold Mobilization. *Science Advances*, 10(41): eado6262.
- Qiu, K.F., Romer, R.L., Long, Z.Y., et al., 2024b. Potassium Isotopes as a Tracer of Hydrothermal Alteration in Ore Systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 368: 185–196.
- Ren, H., Zheng, Y., Wu, S., et al., 2024. Short-Wavelength Infrared Characteristics and Composition of White Mica in the Demingding Porphyry Cu-Mo Deposit, Gangdese Belt, Tibet: Implications for Mineral Exploration. *Ore Geology Reviews*, 164: 105833.
- Shen, G.Y., 2011. Geological Features and Prospect of Exploration in Sadaigoumen Molybdenum Deposit, Hebei. *Mineral Exploration*, 2(5): 494–500 (in Chinese with English abstract).
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry Copper Systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41.
- Song, M.H., Ho, J.G., Kim, C., et al., 2024. A Method to Extract Image Features and Lineaments Based on a Multi-Hillshade Continuous Wavelet Transform. *Mathematical Geosciences*, 56(8): 1697–1720.
- Tan, H.J., Qiu, K.F., Liu, H.C., et al., 2024. Alteration Characteristics of Wall Rocks in the Liba Orogenic Gold Deposit, West Qinling: Based on Information Extraction from GF-5B Spaceborne Hyperspectral Data. *Acta Petrologica Sinica*, 40(6): 1784–1800 (in Chinese with English abstract).
- van Ruitenbeek, F.J.A., Cudahy, T.J., van der Meer, F.D., et al., 2012. Characterization of the Hydrothermal Systems Associated with Archean VMS-Mineralization at Panorama, Western Australia, Using Hyperspectral, Geochemical and Geothermometric Data. *Ore Geology Reviews*, 45: 33–46.
- van Ruitenbeek, F.J.A., Debba, P., van der Meer, F.D., et al., 2006. Mapping White Micas and Their Absorption Wavelengths Using Hyperspectral Band Ratios. *Remote Sensing of Environment*, 102(3–4): 211–222.
- Wang, D.M., Li, X.S., Wei, J.L., et al., 2024. Identification of Rare Metal Dikes by Multi-Platform Synchronous Thermal Infrared Remote Sensing in Hutoushan Area. *Earth Science*, 49(6): 2242–2252 (in Chinese with English abstract).
- Wen, G., Bi, S.J., Li, J.W., 2017. Role of Evaporitic Sulfates in Iron Skarn Mineralization: A Fluid Inclusion and Sulfur Isotope Study from the Xishimen Deposit, Handan-Xingtai District, North China Craton. *Mineralium Deposita*, 52(4): 495–514.
- Wu, C.Y., Lang, X.H., Deng, Y.L., et al., 2025. Diagenetic-Metallogenic Age and Mineralization Potential of Longsang Porphyry Cu-Mo Deposit, Gongbu Jiangda County, Xizang. *Earth Science*, 50(11): 4337–4354 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Wen, X., Zhang, H., et al., 2020. Automatic Extraction of Lineaments Based on Wavelet Edge Detection and Aided Tracking by Hillshade. *Advances in Space Research*, 65(1): 506–517.
- Yang, J.H., Xu, L., Sun, J.F., et al., 2021. Geodynamics of Decratonization and Related Magmatism and Mineralization in the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 64(9): 1409–1427 (in Chinese).
- Zhai, D.G., Wu, J.C., Zhao, Q.Q., et al., 2025. Alteration and Metallogenic Zonation in Magmatic-Hydrothermal Ore Systems: Scientific Understandings and Exploration Implications. *Journal of Earth Science*, 36(3): 1303–1308.
- Zhai, M.G., 2019. Tectonic Evolution of the North China Craton. *Journal of Geomechanics*, 25(5): 722–745 (in Chinese with English abstract).

- Zhang, L., Qiu, K.F., Hou, Z.L., et al., 2021. Fluid-Rock Reactions of the Triassic Taiyangshan Porphyry Cu-Mo Deposit (West Qinling, China) Constrained by QEMSCAN and Iron Isotope. *Ore Geology Reviews*, 132: 104068.
- Zhang, L., Zhao, M.Y., Hu, L.B., et al., 2019. Geological Characteristics and Prospecting Potential of the Sandaogou Molybdenum Deposit in Fengning, Hebei Province. *Sichuan Nonferrous Metals*, (4): 31–35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, N., Zhou, K., 2015. Mineral Prospectivity Mapping with Weights of Evidence and Fuzzy Logic Methods. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 29(6): 2639–2651.
- Zhao, G.C., Sun, M., Wilde, S.A., et al., 2005. Late Archean to Paleoproterozoic Evolution of the North China Craton: Key Issues Revisited. *Precambrian Research*, 136: 177–202.
- Zhu, R.X., Xu, Y.G., Zhu, G., et al., 2012. Destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 55(10): 1565–1587 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈志行, 王正海, 卜浩坚, 等, 2026. 基于地质信息的改进 GCN 高光谱富锂铍伟晶岩信息提取方法. *地球科学*, 51(3): 1057–1064.
- 成秋明, 陈志军, Ali Khaled, 2007. 模糊证据权方法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用. *地球科学—中国地质大学学报*, 32(2): 175–184.
- 代军治, 毛景文, 杨富全, 等, 2006. 华北地台北缘燕辽钼(铜)成矿带矿床地质特征及动力学背景. *矿床地质*, 25(5): 598–612.
- 翟明国, 2019. 华北克拉通构造演化. *地质力学学报*, 25(5): 722–745.
- 沈光银, 2011. 河北撒岱沟门钼矿床地质特征及找矿远景. *矿产勘查*, 2(5): 494–500.
- 谭宏婕, 邱昆峰, 刘洪成, 等, 2024. 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. *岩石学报*, 40(6): 1784–1800.
- 汪大明, 栗旭升, 魏佳林, 等, 2024. 虎头山地区多平台同步热红外遥感稀有金属岩脉识别. *地球科学*, 49(6): 2242–2252.
- 吴昌益, 郎兴海, 邓煜霖, 等, 2025. 西藏工布江达县隆桑斑岩型铜钼矿床成岩-成矿时代及成矿潜力. *地球科学*, 50(11): 4337–4354.
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 等, 2021. 华北克拉通破坏与岩浆-成矿的深部动力学过程. *中国科学: 地球科学*, 51(9): 1401–1419.
- 张磊, 赵萌阳, 胡龙兵, 等, 2019. 河北省丰宁三道沟钼矿床地质特征及找矿远景分析. *四川有色金属*, (4): 31–35.
- 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等, 2012. 华北克拉通破坏. *中国科学: 地球科学*, 42(8): 1135–1159.