

基于遥感蚀变异常分形特征的冀北金矿—铁矿共生矿床成矿潜力评价

李智斌 邢莞东 杨俊峰 周海涛

河北省地质矿产勘查开发局第八地质大队（河北省海洋地质资源调查中心） 河北 秦皇岛 066000

摘 要：本文以冀北金-铁成矿带为研究区，基于 Landsat-8 与高分遥感影像，采用主成分分析与盒维数法提取铁染、羟基蚀变异常并量化其分形特征。研究表明，蚀变异常具显著分形自相似性，金、铁矿床对应不同分形指纹。构建了融合地质、遥感及分形参数的成矿潜力评价模型，圈定高潜力靶区。结果揭示了构造-岩浆叠加成矿规律，为覆盖区找矿提供了定量依据。

关键词：冀北地区；遥感蚀变异常；分形特征；金矿—铁矿共生矿床

引言：冀北地区作为华北北缘重要的金铁多金属成矿带，地质构造复杂，成矿潜力巨大。传统找矿方法在覆盖区受限，而遥感技术能有效识别地表蚀变信息。引入分形理论可定量刻画蚀变异常的空间分布复杂性，突破定性描述局限。本文旨在通过提取冀北地区遥感蚀变异常，分析其分形特征与成矿响应关系，构建定量评价模型，为深部及覆盖区金铁共生矿床的找矿预测提供科学依据。

1 区域地质背景与遥感蚀变异常提取

1.1 冀北研究区地质概况

冀北地区地处华北地台北缘燕山造山带核心地段，是京津冀地区重要的金、铁多金属成矿集中区，区域构造演化复杂、成矿条件优越。研究区地层出露齐全，以太古宇、元古宇变质基底与中生代碎屑岩、火山岩盖层为主，基底变质岩系为金、铁成矿提供了丰富的物质来源。区域构造以 NE-NNE 向断裂、褶皱构造为主体，辅以 NW 向次级断裂，多期构造活动叠加改造，形成了复杂的构造网络，为热液流体运移、矿质沉淀及蚀变发育创造了良好空间条件。区内岩浆活动频繁，中生代中酸性、基性岩浆侵入与喷发活动强烈，岩浆热液作用驱动了大范围围岩蚀变与成矿作用^[1]。目前区内已探明多处大中型金矿床、铁矿床及矿化点，矿体多受控于断裂构造与岩浆接触带，蚀变类型以铁染蚀变、羟基蚀变为主，是开展遥感蚀变异常与成矿规律研究的典型区域。

1.2 遥感数据与预处理

本次研究选取 Landsat-8OLI 与高分系列遥感影像为核心数据源，影像云量低、成像质量良好，可精准覆盖冀北金-铁重点成矿区，能够满足大范围蚀变信息提取

的精度需求。为消除地形起伏、大气散射、辐射误差及地表噪声对影像质量的干扰，统一开展系统预处理工作。首先完成辐射定标与大气校正，消除传感器本身误差和大气介质对光谱信息的影响，还原地表真实反射率数据；其次实施地形校正，削弱山区地形阴影、坡度坡向带来的光谱畸变；最后通过影像裁剪、拼接与掩膜处理，剔除水体、植被、人工建筑等干扰地物，保留裸岩、矿化蚀变等有效地表信息。预处理后的影像光谱保真度高、噪声干扰少，有效突出了蚀变矿物的光谱特征差异，为后续铁染、羟基蚀变异常的精准提取奠定了可靠的数据基础。

1.3 冀北金-铁矿区蚀变异常信息提取与分布特征

基于预处理后的遥感影像，依托蚀变矿物典型光谱响应特征，采用波段比值法、主成分分析法开展冀北金-铁矿区蚀变异常信息提取，重点识别与成矿密切相关的铁染蚀变和羟基蚀变两类异常。铁染蚀变主要对应褐铁矿、赤铁矿等氧化铁矿物，多形成于热液氧化环境，是铁矿化、金矿化的重要伴生标志；羟基蚀变以高岭石、绿泥石等含水蚀变矿物为主，记录了热液流体活动轨迹，是构造热液成矿的关键指示信息。提取结果显示，研究区蚀变异常分布具有显著的构造控矿特征，异常条带整体沿 NE-NNE 向主干断裂展布，次级异常沿 NW 向断裂配套发育。铁染蚀变异常多集中在岩浆岩与地层接触带，呈团块状、条带状密集分布；羟基蚀变异常覆盖范围更广，与区域构造破碎带高度重合。两类蚀变异常叠加区域，与已知金、铁矿床空间位置高度匹配，有效揭示了研究区蚀变分布规律与成矿的关联性。

2 冀北遥感蚀变异常的分形特征分析

2.1 分形分析方法

分形理论可有效刻画自然地质现象的非线性、自相似性与空间不均匀性,能够突破传统统计方法无法量化蚀变异常空间分布复杂程度的局限,是地质异常定量研究的核心手段。本次研究采用盒维数法与多重分形分析法开展蚀变异常分形特征研究,通过网格覆盖法对蚀变异常栅格数据进行分割统计,计算不同尺度下异常网格的数量与密度,拟合得到分形维数与多重分形谱参数。单一分形维数用于表征蚀变异常整体分布的复杂程度与聚集程度,维数越高代表蚀变异常空间分布越复杂、构造活动越强烈;多重分形理论则通过多参数组合,精细刻画蚀变异常局部空间差异与非均匀分布特征。同时引入局部奇异性指数,精准识别蚀变异常的局部富集、突变区域,为区分矿致异常与非矿致异常、挖掘弱成矿信息提供定量方法支撑。

2.2 铁染与羟基蚀变异常的分形维数

通过对冀北研究区铁染、羟基两类蚀变异常数据进行分形计算,获取了研究区蚀变异常的单一分形维数,两类蚀变异常均表现出显著的分形自相似特征,拟合精度满足地质研究要求。统计结果表明,研究区羟基蚀变异常分形维数整体高于铁染蚀变,均值处于1.45~1.82区间,反映羟基蚀变受区域构造、热液活动多重控制,空间分布更复杂、连续性更强,与区域大范围构造破碎带的发育特征高度契合^[2]。铁染蚀变异常分形维数相对偏低,集中在1.32~1.68区间,空间聚集性更强,多呈局部集中分布,对应局部岩浆热液富集的成矿环境。不同构造单元分形维数差异显著,断裂交汇带、岩浆接触带分形维数明显偏高,蚀变异常发育更充分,印证了构造-岩浆活动对蚀变分布的主控作用,为蚀变强度定量分级提供了核心依据。

2.3 多重分形谱参数与局部奇异性指数

多重分形谱参数可精细量化蚀变异常的局部空间分异特征,核心参数包括谱宽、对称度等,谱宽越大代表蚀变异常空间分布不均匀性越强,成矿热液活动差异越显著。研究区蚀变异常多重分形谱整体呈右偏形态,高值异常占比突出,表明区内强蚀变异常多为局部热液富集形成,具备良好的成矿潜力。局部奇异性指数用于表征蚀变异常的突变程度与富集强度,高值区域对应蚀变强烈、热液活动活跃的有利成矿部位。数据显示,研究区奇异性指数高值区呈条带状、团块状离散分布,与主干断裂、岩浆岩接触带高度耦合,低值区多为均匀弱蚀

变的背景区域。两类参数相互补充,既揭示区域蚀变整体分布规律,又精准识别局部强矿化蚀变单元,实现了蚀变异常从定性描述到定量表征的转变。

2.4 冀北典型金矿床与铁矿床蚀变异常的分形指纹

选取冀北区内典型大中型金矿床、铁矿床开展重点剖析,构建矿床尺度蚀变异常分形指纹特征。典型金矿床周边以高强度羟基蚀变为核心,分形维数偏高、多重分形谱宽较大、局部奇异性指数极值突出,蚀变异常空间分异显著,反映金矿成矿受构造热液脉动活动控制,蚀变类型复杂、局部富集特征明显。典型铁矿床则以铁染蚀变异常为主导,分形维数相对稳定,多重分形谱对称性更好,奇异性指数高值区集中且连续,体现铁矿成矿蚀变范围集中、矿质沉淀均匀的特征。不同矿床类型的分形参数组合形成了专属分形指纹,金矿蚀变表现为“高维数、高奇异、强分异”特征,铁矿蚀变为“中维数、稳分布、强聚集”特征,可作为区分金、铁成矿异常与普通蚀变异常的重要识别标志。

3 冀北金-铁共生区蚀变异常分形特征的成矿学响应

3.1 冀北分形参数的地质含义——构造蚀变强度的定量表达

分形维数、多重分形谱、局部奇异性指数等参数可精准定量表征研究区构造蚀变强度,弥补了传统地质研究仅能定性描述蚀变强弱的不足。分形维数直接反映区域构造破碎程度与蚀变发育复杂度,维数越高,断裂构造越发育、热液渗透范围越广、蚀变改造越强烈,对应构造活动活跃的成矿有利环境。多重分形谱宽量化了蚀变强度的空间差异,谱宽越大代表区域内热液活动强弱差异越明显,多期次成矿叠加改造特征越显著^[3]。局部奇异性指数是局部蚀变富集强度的直接指标,高值对应热液汇聚、矿质富集的核心部位。结合冀北地质特征可知,分形参数梯度变化与构造蚀变分带高度对应,可实现对弱蚀变、中等蚀变、强矿化蚀变的精准分级,为定量评价构造控矿强度、分析成矿热液活动规律提供了全新的量化指标。

3.2 冀北局部奇异性指数高值区与金-铁已知矿床的空间对应关系

通过叠加研究区已知金、铁矿床点位与局部奇异性指数等值线,系统分析二者空间匹配规律。结果显示,区内90%以上的大中型金、铁矿床均分布于奇异性指数高值核心区或高值边缘过渡带,空间耦合关系极为密切。金矿床多集中在奇异性指数峰值区,对应构造破碎强烈、热液活动复杂的高差异蚀变环境,契

合金矿多期次热液成矿的特征;铁矿床多分布于高值连片区域,蚀变富集范围广、强度均匀,利于铁质大规模沉淀富集。奇异性指数中低值区域仅发育少量矿化点,无成型矿床分布,多为区域背景蚀变或弱构造蚀变带,成矿条件较差。该空间对应关系证实,局部奇异性高值是冀北金-铁成矿的核心指示标志,可作为成矿有利区筛选的关键依据。

3.3 冀北金-铁共生区多重分形谱的特殊模式及其成矿学解释

冀北金-铁共生区蚀变异常呈现独特的多重分形谱模式,整体表现为谱宽大、右偏特征显著、高值异常占比高的特点,区别于单一成矿类型区域的分形谱特征。这种特殊模式的形成与研究区多期构造-岩浆叠加成矿作用密切相关,早期基性岩浆活动主导铁质富集,形成大范围铁染蚀变基底,后期中酸性岩浆热液叠加改造,诱发强烈羟基蚀变与金质活化迁移,多期成矿作用叠加造成蚀变强度空间分异剧烈,形成宽谱、强偏态的分形特征。分形谱高值端对应金-铁共生富集的核心区域,两种蚀变异常叠加富集,成矿元素组合丰富;低值端为单一弱蚀变背景区,成矿潜力有限。该多重分形谱特殊模式,精准揭示了冀北金-铁共生、叠加成矿的地质本质,为解析区域成矿叠加规律、区分共生成矿与单一成矿区提供了重要理论支撑。

4 冀北覆盖区成矿潜力评价模型构建与靶区预测

4.1 评价指标体系与权重

针对冀北覆盖区地质构造复杂及隐伏矿体识别难的现状,本研究深入剖析区域成矿控制要素,创新构建了集地质构造、遥感蚀变、分形特征于一体的多维成矿潜力评价指标体系。该体系筛选出断裂密度、岩浆岩接触带距离、地层成矿有利性等基础地质因子,铁染与羟基蚀变强度及其叠加程度等遥感因子,以及分形维数、多重分形谱宽、局部奇异性指数等非线性分形因子。在赋权方法上,采用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权策略,既保留地质专家的经验认知,又充分利用数据的客观离散特征,实现主客观信息的优势互补^[4]。计算结果显示,局部奇异性指数、蚀变叠加强度及断裂密度权重占比最高,精准反映了构造热液活动对成矿的主导控制作用;地层岩性与分形维数等基础指标权重次之,起

到辅助约束作用。该指标体系实现了定性地质规律与定量数学参数的深度融合,科学适配冀北地区隐伏矿床的深部预测需求,显著提升了找矿靶区圈定的准确性。

4.2 成矿潜力综合评级与分区

基于构建的评价指标体系与权重系数,采用加权综合指数法开展冀北覆盖区成矿潜力定量计算,对研究区栅格单元进行综合评分,结合自然断点法完成成矿潜力分级与分区,划分为高、中、低三级成矿潜力区。高潜力区集中分布于主干断裂交汇带、岩浆岩接触带及蚀变异常与高分形参数叠加区域,区内构造活动强烈、蚀变富集程度高、成矿指示信息完善,与已知矿床高度重合,是隐伏金-铁矿床找矿核心靶区。中潜力区呈条带状环绕高潜力区分布,蚀变与构造条件中等,具备一定成矿潜力,可作为后续勘查后备区域。低潜力区多为构造稳定、蚀变微弱的背景区域,成矿条件较差。最终结合野外地质验证与已有勘查资料,圈定多处优选找矿靶区,为冀北覆盖区后续金-铁矿产勘查工作提供精准的理论依据与勘查方向。

结束语

本文系统分析了冀北地区遥感蚀变异常的分形特征及其成矿指示意义,证实了分形参数能有效量化构造蚀变强度。构建的评价模型精准圈定了找矿靶区,揭示了金-铁共生叠加成矿机制。研究实现了从定性解译到定量评价的跨越,证实了局部奇异性指数是指示隐伏矿体的关键。该方法为深部找矿提供了新思路,具有重要的推广价值。

参考文献

- [1] 祝一丹,吴志春,马粉玲,等.基于分形理论的蚀变异常遥感解译——以广东阳山县为例[J].华南地质,2024,40(2):380-392.
- [2] 赵忠海,陈俊,乔锴,等.基于分形理论的遥感蚀变信息和构造分析研究:以黑龙江多宝山地区为例[J].现代地质,2023,37(1):153-163.
- [3] 徐光春,孙岳,伍敏婷,等.植被覆盖区遥感矿化蚀变异常信息提取与找矿预测——以诸广山地区铀矿为例[J].铀矿地质,2024,40(5):951-963.
- [4] 黄炜华.浅析遥感蚀变信息提取中羟基异常与钨矿的关系[J].中国金属通报,2021(11):184-185.