

典型锶矿床元素地球化学异常特征与空间富集分布规律研究

王湘涵

河北省地球物理勘查院（河北省浅层地热能研究中心） 河北 廊坊 065000

摘要：锶是战略性新兴矿产，广泛应用于电子信息、制造与新能源领域，其成矿受地质构造与地球化学场控制，元素异常组合与空间分布是找矿预测的关键依据。本文以典型沉积-热液改造型锶矿床为对象，系统采集岩石、矿石及土壤样品，运用多元统计与空间插值方法，厘定锶及伴生元素异常下限与组合特征，揭示锶在垂向与水平方向的空间富集规律。研究表明，Sr 与 Ba、Ca、Mn 显著正相关，异常组合可有效指示矿化中心，空间富集受构造破碎带与岩性界面双重控制，成果可为同类矿床找矿提供依据。

关键词：锶矿床；元素地球化学；异常特征；空间富集；分布规律

引言：锶在地壳中丰度较低，其工业富集依赖特定地质过程。全球新能源与高端制造快速发展推高锶资源需求，但我国锶矿床勘查程度偏低，对元素地球化学异常与空间富集规律认知不足，制约找矿突破。元素地球化学异常是成矿物质迁移沉淀的直接记录，异常组合与空间分布可指示矿化类型、成矿温度及矿体就位机制。本文选取典型锶矿床，基于精细地球化学测量，运用数理统计与空间分析方法，系统厘定元素异常特征，查明锶空间富集规律，建立地球化学找矿标志，为区域资源评价与深部找矿提供科学依据。

1 区域地质背景与矿床地质特征

1.1 区域地质背景

研究区位于华北地台与秦岭褶皱带过渡部位，区域构造线呈北东-南西向展布，基底地层为太古界太华群片麻岩系，盖层发育齐全，自下而上依次为震旦系、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系及中生界陆相碎屑岩。区域岩浆活动频繁，以燕山期酸性-中酸性侵入岩为主，呈岩株、岩脉状产出，为锶元素的活化迁移提供了热动力条件。区域构造格局以断裂构造为主体，北东向深大断裂与近东西向断裂交汇部位控制着矿床的总体分布。研究区地处区域重力异常梯度带和航磁异常转换带，深部构造界线清晰，指示了地壳厚度突变带与成矿有利部位的空间叠合。区域地球化学背景方面，锶元素在基底地层中丰度值较高，平均含量约 320×10^{-6} ，具备良好的成矿物质基础。

1.2 矿床地质特征

矿床赋存于中寒武统张夏组白云岩与泥质条带灰

岩层位中，含矿岩系为一套浅海相碳酸盐岩建造，厚度 80~120m。矿体呈似层状、透镜状产出，总体走向北东，倾向南东，倾角 $25^{\circ} \sim 40^{\circ}$ ，沿走向延伸约 850m，沿倾向延深已控制至 320m 标高。矿体厚度变化较大，最厚处达 18.6m，最薄处仅 1.2m，平均厚度 6.8m，厚度变化系数约 65%，属较稳定型。矿石类型以天青石矿石为主，次为菱锶矿石。矿石矿物组合简单，主要矿石矿物为天青石（ SrSO_4 ），脉石矿物以白云石、方解石、石英为主，含少量重晶石、黄铁矿、方铅矿。矿石结构以粒状结构、交代残余结构为主，构造类型包括块状构造、浸染状构造和条带状构造。矿体顶底板围岩为含泥质白云岩，围岩蚀变以硅化、白云石化、重晶石化为主，其中强硅化与重晶石化叠加部位往往对应高品位矿体产出位置^[1]。

1.3 控矿因素分析

矿床控矿因素可归纳为层位、构造和岩性三重控制。层位控制方面，张夏组白云岩层段是锶富集的有利层位，该层位沉积时期处于局限台地环境，蒸发作用强烈，有利于锶在海水中的初始富集。构造控制方面，北东向断裂破碎带是主要的导矿构造，其两侧的次级裂隙带为容矿构造，矿体厚度与断裂构造密集程度呈显著正相关，靠近主断裂 200m 范围内矿化强度明显增强。岩性控制方面，白云岩与泥质条带灰岩的岩性界面附近矿化最为发育，岩性差异造成的物理化学障是锶沉淀富集的关键机制。

2 样品采集与分析方法

2.1 样品采集

在矿区系统采集岩石、土壤及矿石样品,严格遵循《地球化学普查规范》。岩石样品按矿体、围岩及背景岩性分别采集,共126件,单件重量 $\geq 1.5\text{kg}$,走向采样间距20m,垂向按5~10m层位控制。土壤采样以矿区为中心向外辐射,网格 $100\text{m}\times 100\text{m}$,面积 8km^2 ,采集B层或C层细粒物质,过-60目筛,共327件。矿石样品覆盖不同品位与空间部位,按1~2m连续刻槽采样,共84件。采样全程使用GPS精确定位,记录坐标、岩性及矿化信息,同步采集重复样与质量监控样,确保采样质量可靠。

2.2 样品加工与测试分析

岩石和矿石经颚式破碎至 $< 2\text{mm}$,再用行星式球磨机研磨至200目以下,全程采用玛瑙质无污染介质,每加工一件以石英砂清洗设备防交叉污染。土壤自然风干后剔除根系与砾石,研磨过200目筛。样品由国家级资质实验室完成测试: Sr、Ba、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Pb、Zn等元素采用ICP-OES测定,检出限 $0.01\times 10^{-6}\sim 0.1\times 10^{-6}$;稀土元素采用ICP-MS测定;S、C采用高频红外碳硫仪测定。分析中插入GSS、GSR系列国家一级标准物质,按10%比例插入重复样与空白样,精密度 $\text{RSD}\leq 5\%$,准确度 $\text{RE}\leq 8\%$,数据质量满足要求。

2.3 数据处理方法

原始数据经异常值剔除与正态性检验后,进行对数变换改善分布形态。采用迭代法结合箱线图与累积频率曲线综合确定异常下限。多元统计方面,运用Pearson相关分析探究元素亲和关系,R型因子分析提取元素组合主因子,揭示共生组合与成矿指示意义。空间分析基于ArcGIS构建采样点数据库,采用普通克里金法进行空间插值,生成锶及指示元素平面异常分布图;垂向变化通过勘探线剖面含量曲线与元素比值垂向梯度图分析^[2]。插值过程中依据数据特征选取合适变异函数模型,经交叉验证确定参数,保障插值结果准确。

3 元素地球化学异常特征

3.1 元素含量统计特征

研究区各类样品中锶元素含量变化范围宽泛,变化区间为 $62\times 10^{-6}\sim 42800\times 10^{-6}$,平均含量 3860×10^{-6} ,远高于大陆地壳锶丰度值(约 350×10^{-6}),显示出显著的地球化学富集特征。矿体范围内锶含量多数集中在 8000×10^{-6} 以上,最高值出现在矿体厚大部位中心带;顶底板围岩锶含量为 $320\sim 860\times 10^{-6}$,与区域背景值基本持平;外围土壤中锶含量普遍在 $200\sim 600\times 10^{-6}$ 之间,仅

在矿体延伸方向和断裂带附近出现高值异常。从数据分布特征分析,原始数据呈正偏态分布,经对数转换后基本符合正态分布,表明锶元素在矿区范围内的分布受多个地质过程的叠加影响。含量变异系数达2.8,显示强烈的空间变异性,指示元素分布受局部构造-岩性因素控制显著,非均匀性突出。

3.2 元素相关性与组合特征

相关分析表明,锶与钡、钙、锰呈显著正相关,相关系数分别为0.78、0.72、0.65($n=210$, $p<0.01$)。Sr-Ba正相关反映天青石与重晶石类质同象替代,两者地球化学行为相近;Sr-Ca正相关与含矿岩系碳酸盐岩属性相关,锶通过类质同象替换钙进入矿物晶格;Sr-Mn关联指示成矿流体中锰氧化物对锶的吸附共沉淀作用。因子分析提取4个主因子,累计方差贡献率79.6%。F1因子以Sr、Ba、Ca、Mn高载荷为特征,代表主成矿期流体作用组合,方差贡献率38.2%,是控制元素分布的主导因素。F2因子为Fe、Cu、Pb、Zn组合,反映后期热液叠加矿化;F3因子以 ΣREE 及LREE/HREE为主要载荷,研究区样品 ΣREE 较低(平均 78×10^{-6}),LREE/HREE为3.2~5.6, δEu 呈弱负异常(0.62~0.85), δCe 无明显异常(0.91~1.08),符合海相碳酸盐岩沉积成因的稀土配分特征,且与热液叠加形成的Eu正异常明显不同,据此归为沉积成岩阶段的地球化学记录;F4因子为Na、K等碱金属,反映表生风化改造。Sr/Ca与Sr/Ba比值是识别矿化强度的有效指标,矿体中心区Sr/Ca多大于0.5,向外围降至0.1以下,可清晰勾勒矿体空间轮廓。

3.3 地球化学异常空间形态

锶异常在平面上呈“椭圆形—不规则带状”展布,长轴与北东向断裂走向吻合,异常面积约 3.6km^2 。浓集中心位于矿区中部偏北,对应矿体厚度最大部位,异常强度由中心向外同心圆状递减,无次级异常中心,指示矿化集中度高、成矿流体供应中心单一^[3]。元素组合异常分带明显:内带($\text{Sr}>10000\times 10^{-6}$)以Sr-Ba-Ca-Mn组合为主,面积约 0.8km^2 ,与高品位矿体出露范围高度吻合;中带($\text{Sr}5000\sim 10000\times 10^{-6}$)为Sr-Ba叠加Fe-Mn组合;外带($\text{Sr}2000\sim 5000\times 10^{-6}$)以Sr-Ca组合为主,异常边界与矿体界线基本一致。该套合关系表明,锶异常可作为直接找矿指标,Ba、Mn异常为辅助指示,多元素组合异常交叠区域是找矿优先靶区。

4 锶空间富集分布规律

4.1 水平方向富集规律

锶含量从矿区中心向外规律性递减。以矿体中心投

影点为基准,沿北东和南西方向各设3条衰减剖面,结果显示铈含量随距离增加呈指数衰减,拟合度0.89,半衰期距离约240m,即每增加240m含量降低约一半。沿北东向断裂带,铈含量呈“串珠状”分布,在断裂转折端和分支交汇部位显著增高,指示成矿流体沿断裂运移时,在构造扩容带和应力集中区发生减压沸腾,促成铈快速沉淀^[4]。断裂破碎带宽度与铈富集程度正相关,宽度>5m部位铈平均含量较<2m部位高出约2.3倍。

4.2 垂向富集规律

钻孔揭示的垂向变化规律表明,铈含量随深度增加呈现先升后降的总体趋势。在浅表氧化带(0~30m),受风化淋滤作用影响,铈发生一定程度的次生富集,含量略高于原生矿石;在30~120m深度区间,铈含量稳定在高值范围,是该矿床的富集主带;120~200m区间含量逐渐降低;200m以下含量降至工业品位临界值以下,指示矿化向深部逐渐尖灭。更为精细的垂向分析显示,在矿体厚大部位,铈富集存在“多层楼”式结构——在总体单峰富集背景下,出现3~5个次级富集高峰,间距15~25m不等,对应于岩性变化界面和裂隙发育层段。这种结构暗示成矿过程具有多阶段脉动式充填的特征,每一次构造脉动都伴随新一轮的铈沉淀叠加。Sr/Ba比值在垂向上呈现出系统性的规律变化:从深部到浅部,该比值先升后降,在矿化主带达到最大值。这可能反映了成矿流体温度在垂向上的梯度变化,Sr/Ba>3可作为矿化主带的有效判别标志。

4.3 构造-岩性界面控矿规律

空间富集受构造破碎带与岩性界面联合控制。岩性界面附近(白云岩与泥质条带灰岩接触带)铈含量明显增高,富集系数达5~8倍(以矿区外围同类非矿化白云岩铈平均含量约 320×10^{-6} 为背景基准值计算),界面上下20m范围集中了矿区约70%的铈资源量。岩性界面的控矿作用体现在:两侧岩石物理力学性质差异大,构造应力作用下易产生层间滑脱和裂隙系统,为含矿流体运

移沉淀提供通道与空间;泥质层位相对不透水,形成垂向地球化学障,阻挡流体向上运移,促使铈在障下集中沉淀^[5]。构造应力场定量分析表明,北东向主断裂与近东西向次级断裂交汇部位是铈富集“甜点”区,平均品位较全区高出40%以上。交汇部位形成的扩容空间与流体混合带,使含矿流体物理化学条件急剧变化(温度降低、压力释放、pH升高),是天青石大规模沉淀的最有利场所。

结束语

本文通过对典型铈矿床系统开展元素地球化学研究,厘定了Sr-Ba-Ca-Mn的元素异常组合,明确了该组合是铈成矿作用最直接的地球化学标志,并据此建立了一套以Sr为主指标、Ba和Mn为辅助指标的找矿异常评价体系。铈的空间分布呈现“中心浓集、指数衰减、断裂控带、界面控层”的规律模式,构造破碎带与岩性界面的空间叠合部位是铈最有利的富集空间。未来应加强铈矿床成矿流体示踪研究,深化不同构造背景下铈成矿地球化学响应的对比认识,进一步探索元素异常组合与矿床成因类型之间的定量对应关系,推动铈矿找矿地球化学理论体系的完善。

参考文献

- [1] 齐啸威,陈健,李洋,等.石煤中稀土元素地球化学研究[J].中国煤炭地质,2024,36(3):13-20.
- [2] 陈炳翰,孙艳,吴胜华.中国铈矿成矿规律概要[J].地球学报,2025,46(5):934-944.
- [3] 陈航华.构造地球化学找矿方法及其应用[J].世界有色金属,2021(4):70-71.
- [4] 宋威方,刘建中,吴攀,等.构造地球化学弱信息提取方法在黔西南卡林型金矿找矿中的应用[J].物探与化探,2022,46(6):1338-1348.
- [5] 马文君,谢海林,李少南,等.地球化学测量方法在东昆仑茫崖河东金矿中的应用及找矿效果[J].黄金科学技术,2025,33(4):717-734.