

· 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 ·

## 华北克拉通胶-辽-吉带生铁岭 REE-Fe 矿床的 年代学与地球化学: 约 1.85 Ga 构造- 岩浆事件对热液成矿的影响

王小慧<sup>1\*</sup>

1. 中国地质科学院, 北京 100089

华北克拉通胶-辽-吉带古元古代变质火山-沉积岩中赋存的稀土-铁矿床具有巨大的勘探潜力, 但其成因仍不明确。生铁岭稀土-铁矿床是该类型矿床中规模最大的之一, 矿石主要为富含独居石、磁铁矿、黄铁矿和重晶石的磁铁变粒岩。不含矿的变粒岩和赋矿的磁铁变粒岩的全岩地球化学数据表明, 其原岩为流纹岩和英安岩, 这些原岩提供了稀土和铁的物质来源。从磁铁变粒岩 STL24-Zr 中提取的锆石颗粒具有核-边结构。锆石核部和边部的原位 U-Pb 定年分别获得了  $2161 \pm 12$  Ma 和  $1837 \pm 9$  Ma 的加权平均  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年龄, 解释为岩浆原岩的形成时代和变质时代。从磁铁变粒岩中提取的独居石颗粒的原位 U-Pb 定年获得了  $1843 \pm 7$  Ma 的加权平均  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  年

龄, 这被认为是稀土-铁成矿时代的最佳估计。因此, 稀土-铁成矿作用可能与约 1.85 Ga 的变质-热液事件有关。与独居石和磁铁矿共生的黄铁矿的原位微量元素数据表明, 成矿热液在中高温环境 (307 °C 至 521 °C) 下, 在酸性、还原和低氧逸度 ( $f\text{O}_2$ ) 条件下从原岩中淋滤出稀土、铁和磷。考虑到生铁岭矿床中的富 Co 黄铁矿与胶-辽-吉带中许多其他矿床, 如 (吉南大横路 Co 矿) 的成矿时代几乎一致, 我们认为约 1.85 Ga 的构造-岩浆事件可能对多金属成矿起到了重要作用。

**关键词:** 磁铁矿; REE-Fe 矿化; 磁铁浅粒岩; 胶-辽-吉带

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42072112)

第一作者简介: 王小慧 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 矿床成因与成矿规律. Email: 2936404660@qq.com

\*通信作者简介: 马玉波 (1981-), 硕士研究生, 研究方向: 成矿规律与成矿预测. Email: 13911998185@139.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 鞍本地区条带状铁建造中磁铁富铁矿形成时代与成矿机制

李延河<sup>1\*</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 张增杰<sup>1</sup>, 李厚民<sup>1</sup>, 范昌福<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

辽宁鞍本地区是我国最重要的鞍山式沉积变质型铁矿 (BIF) 集中区, 在 BIF 贫铁矿中发育弓长岭式和齐大山式高品位磁铁富矿, 但关于富铁矿的形成时代和成因一直存在争论, 辽河群在富铁矿成矿中的作用长期被忽视。富铁矿与 BIF 贫铁矿关系密切, 时空分布明显受贫铁矿、断裂构造和热液蚀变围岩控制。在前人工作基础上, 研究总结了该地区弓长岭、齐大山富铁矿的形成时代, 对比研究了 BIF 贫铁矿、富铁矿和蚀变围岩的铁、硅、氧、硫、硼、碳、镁同位素组成特征和变化规律。鞍本地区富铁矿成矿作用共有二期, 第一期发生在 2.45 Ga, 第二期发生在 1.85 Ga, 二期成矿作用均与区域变质之后地壳伸展和基底隆升引发的碱性花岗质岩浆活动有关, 成矿热液主要由大气降水演化形成。富铁矿与 BIF 贫铁矿的  $\delta^{56}\text{Fe}$ 、 $\delta^{30}\text{Si}$  值基本一致, 强烈富集重铁同位素和轻硅同位素。富铁矿和蚀变围岩的  $\delta^{18}\text{O}$  值较 BIF 贫铁矿显著降低。富铁矿和蚀变围岩中黄铁矿发育, 弓长岭富铁矿中黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  较 BIF 贫铁矿显著升高, 齐大山铁矿中单颗粒黄铁矿的  $\delta^{34}\text{S}$  值从核心到边部大幅升高。弓长岭等富铁矿蚀变围岩中电气石的  $\delta^{11}\text{B}$  值异常高, 与 BIF 贫铁矿及围岩截然不同, 而与辽河群硼镁矿的值相似。不同富铁矿中石墨的  $\delta^{13}\text{C}$  值变化范围很大, 其中弓长岭富铁矿中石墨的  $\delta^{13}\text{C}$  值异常高, 而齐大山、南芬富铁矿中石墨的  $\delta^{13}\text{C}$  值与石墨矿床的值相似。2.45 Ga 第一期成矿溶液具弱酸性

特征, 成矿溶液与 BIF 和围岩反应, 围岩发生强烈蚀变, 形成多种云英岩, BIF 中铁质发生活化再沉淀, 在 BIF 边部形成富铁矿脉/团块, 硅质大部分残留原地形成失铁硅质岩。该期成矿作用以“铁质活化再富集”为主, 形成齐大山式富铁矿。1.85 Ga 第二期成矿流体流经并淋滤了辽河群蒸发盐地层中的  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、富  $^{13}\text{C}$  的  $\text{CO}_3^{2-}$ 、富  $^{34}\text{S}$  的  $\text{SO}_4^{2-}$  和富  $^{11}\text{B}$  的硼酸盐等可溶盐类物质, 使成矿溶液具偏碱性弱氧化特征。硅质在碱性条件下溶解, 在酸性环境中沉淀, 铁质刚好相反。偏碱性弱氧化的成矿溶液沿 BIF 贫铁矿中的层间构造破碎带运移, 并与围岩反应, 贫铁矿中  $\text{SiO}_2$  在偏碱性热液的作用下发生活化迁移, 溶液中  $\text{SiO}_2$  与围岩中粘土矿物等反应形成绿泥石、石榴石、透闪石等, 少量  $\text{SiO}_2$  迁移一定距离后随着温度的下降在富铁矿的边部再沉淀形成石英脉或团块; 大部分铁质在原地富集形成磁铁富铁矿, 少量铁质发生活化再沉淀, 形成富铁矿脉。同时, 溶液中  $\text{SO}_4^{2-}$  被  $\text{Fe}^{2+}$  还原形成富  $^{34}\text{S}$  黄铁矿, 热液中硼与围岩反应形成富  $^{11}\text{B}$  电气石, 溶液中  $\text{CO}_3^{2-}$  被还原形成富  $^{13}\text{C}$  的石墨。该期成矿作用以“去硅富铁”为主, 形成弓长岭式大型磁铁富矿。建立鞍本地区 BIF 中磁铁富矿铁矿成矿模型。

**关键词:** 弓长岭富铁矿; 成矿时代; 同位素; “铁质活化再富集”; “去硅富铁”

· 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 ·

## 华北克拉通 BIF 型富磁铁矿矿床的成矿流体： 来自黄铁矿微量元素和硫同位素的约束

王亿<sup>1\*</sup>

1. 中国地质科学院 矿产资源研究所, 北京 100037

BIF 型富铁矿床是世界上最重要的铁资源来源。尽管不如赤铁矿矿石常见, 但富磁铁矿矿石是另一种重要的类型, 主要分布在华北克拉通北部。一般认为, 富磁铁矿矿石是由高温热液流体与约 2.55 Ga 的 BIF 原岩相互作用形成的, 但成矿流体的性质和演化仍不明确。根据矿床规模和蚀变特征, 富磁铁矿矿床可分为两种类型: 弓长岭型和齐大山型。我们对这两种类型的富磁铁矿矿床中的 BIF、富磁铁矿矿石以及矿体周围蚀变岩中的黄铁矿进行了原位微量元素和硫同位素分析。结果表明, 这两种矿床的成矿流体均表现出与深部岩浆活动相关的热液系统特征。在弓长岭矿床中, 成矿流体主要来源于约 1.85 Ga 的岩浆活动,

同时还有来自淋滤古元古代富 Co、Ni 地质体的流体贡献。相比之下, 齐大山矿床则以富含 As、Se 的流体为主, 这些流体来源于约 2.5 Ga 的岩浆-热液活动。我们认为, 深部岩浆活动是形成富铁矿床的基础, 而要形成大规模矿床 (如弓长岭矿床), 则需要多期的热液活动, 并涉及富含 Co、Ni 的成矿流体。研究结果还表明, 黄铁矿的硫同位素可能受到多种因素的影响, 因此在约束成矿流体来源方面效果有限, 而黄铁矿的微量元素则能更精确地揭示流体的性质和来源。

**关键词:** 黄铁矿; BIF; 富磁铁矿矿床; 华北克拉通

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 山东郭店矽卡岩型富铁矿成矿流体特征及铁的富集机制

康健丽<sup>1\*</sup>, 张招崇<sup>2</sup>, 王雯<sup>3</sup>

1. 中国地质调查局天津地质调查中心 矿产地质室, 天津 300170;

2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

3. 新疆大学 地质与矿业工程学院, 乌鲁木齐 830049

我国铁矿储量较大, 但经济价值较高的富铁矿(>50% Fe)却相对短缺。矽卡岩型铁矿是我国最重要的富铁矿之一, 也是最有勘查潜力的铁矿类型, 对其成矿机制的研究, 有助于提升勘查效率, 增加储量。齐河-禹城是鲁西地区的国家级整装勘查区, 近年来实现了富铁矿重大找矿突破, 矿集区内目前探明的铁矿有郭店、李屯、叠道和大张。郭店铁矿是齐河-禹城整装勘查区典型的矽卡岩型富铁矿床, 其研究程度尚处于起步阶段, 因此, 其成矿机制是否与鲁西地区的莱芜、淄博乃至全国其余地区矽卡岩型铁矿的相似, 还不确定。

郭店铁矿位于平原区, 未见基岩出露, 钻孔揭露新生代地层厚度超过 800 m。从岩心观察来看, 铁矿床主要赋存于辉长闪长岩和奥陶系大理岩接触带及其附近。矿体呈透镜状产出, 埋藏深度在-1464~-1622 m, 矿石层磁铁矿最高含量 80%~90%。矿石构造主要为块状构造、脉状构造、浸染状构造和角砾状构造。根据脉体间的穿插关系、矿物共生组合及围岩蚀变等特征, 将郭店铁矿的成矿过程划分为矽卡岩阶段、氧化物阶段、硫化物阶段和碳酸盐阶段。

本次用于流体包裹体研究的样品均取自郭店铁矿钻孔 ZK801 标高的铁矿体附近, 通过详细的岩相学研究, 选取具有代表性的流体包裹体样品进行包裹体测温。郭店铁矿矽卡岩阶段透辉石和石榴子石内主要发育含子矿物包裹体和富液相包裹体, 另含有少量

富气相包裹体。含子矿物包裹体均一温度~505.9 °C 之间, 部分包裹体在加热至 550 °C 时仍未均一, 其子晶熔化温度介于 447.1~550 °C 之间, 对应盐度  $w$  (NaCl<sub>eq</sub>) 接近 20%。富液相包裹体均一温度介于 498.6~550 °C 之间, 部分包裹体在加热至 550 °C 时仍未均一。富气相包裹体均一温度介于 470.1~531.2 °C 之间。郭店铁矿流体包裹体的均一温度和盐度指示流体在矽卡岩阶段呈现高温、中高盐度的特征。

氢、氧同位素组成研究表明, 郭店铁矿矽卡岩阶段成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  fluid 为 5.6~8.1,  $\delta\text{D}$  fluid 为 -82.2~-140, 氧化物阶段成矿流体的  $\delta^{18}\text{O}$  fluid 为 0.1~0.5,  $\delta\text{D}$  fluid 为 -45.3~-55.3, 在 H-O 同位素图解中, 氧同位素非常接近岩浆水, 而氢同位素落于岩浆水下方, 表明成矿流体早期发生沸腾作用, 导致氢氧同位素的分馏。而且早期的氧同位素显著高于晚期, 这表明在早期成矿流体可能与碳酸盐地层发生反应, 引起氧同位素的升高。

综上所述, 郭店铁矿成矿流体在早期呈现高温中高盐度的特征, 晚期温度和盐度都有显著的降低, 揭示早期成矿流体主要来自岩浆热液, 并与碳酸盐地层反应, 晚期逐渐有大气水的加入, 而二者的混合作用加之温度的降低可能是铁元素沉淀富集的主要机制。

**关键词:** 流体包裹体; H-O 同位素; 铁的富集机制; 郭店铁矿; 中国东部

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 冀东沉积变质型富铁矿成矿特征及远景分析

崔伟<sup>1</sup>, 张招崇<sup>2\*</sup>

1. 河北省地矿局第二地质大队, 河北 唐山 063000;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100083

富铁矿是我国最紧缺的大宗金属矿产资源之一。冀东地区是我国沉积变质型铁矿的第二大产区, 目前累计查明了约 0.38 亿吨的富铁矿, 主要赋存于滦县司家营、迁安杏山和滦南马城等铁矿床中。冀东地区富铁矿成因, 以往主要有两种认识: 一种是原始沉积型和后期热液改造型均有, 且以原始沉积型为主(魏菊英等, 1979), 另一种原始沉积相对较富, 后期经热液或构造改造而成(钱祥麟等, 1985; 许英霞等, 2014; 周永贵等, 2012; 张龙飞等, 2015; 沈其韩等, 2015)。本文通过对冀东 5 个主要成矿区带典型矿床铁物相特征和富铁矿床地质特征研究, 发现: (1)富铁矿表现为受原始沉积控制, 贫铁矿床规模大或品位高, 有利于形成富铁矿, 但后期必须经过流体改造。杏山和马城铁矿分别分布有占比达 19.0%、23.43% 的准富铁矿 (TFe 40%~45%), 但后期热液蚀变相对较弱, 富铁矿集中分布在某一区段, 规模较小; 司家营铁矿准富铁矿较少, 但富铁矿体分布受后期断裂、热液叠加控制明显, 富铁矿规模较大。(2)富铁矿或受断层控制, 在断块间分布, 如司家营 S22 线区段; 或现阶段未发现受构造控制, 但顶板岩心相对前排孔热液蚀变现象明显增多, 局部岩心褪色、绿泥石化、碳酸盐细脉发育, 局部钾化发育、黄铁方解石脉发育, 在

司家营大 38 线还见到矿层中破碎带顶板贫铁矿主要由蓝闪霓石磁铁矿石英岩组成, 富矿体顶板绢云绿泥石英片岩, 呈片状揉皱构造。说明构造提供了热液通道, 热液以碱性热液为主。酸性热液形成的铁质活化再富集, 司家营也有分布, 但厚度一般为厘米级, 硅和铁分别富集。(3)磁铁富矿较磁铁贫矿具磁性铁占有率高(高 6%左右)、硅酸铁占有率低的规律, 暗示了富矿受到更多后期热液叠加作用。(4)冀东富铁矿石可明显分为 2 组, 一组为角闪石(辉石)型富矿 SiO<sub>2</sub> 平均含量 17.04%~34.46%, 与准富铁矿类似; 另一组为碳酸盐型富矿 SiO<sub>2</sub> 平均含量 5.64%~7.09%, TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO+CaO 及 LOI 较第一组明显高, 富集碳酸盐矿物。且碳酸盐型富矿分布在角闪石(辉石)型富矿中, 以角闪石(辉石)型富矿为主, 推断碳酸盐型富矿是热液通道中心。结合前人研究成果, 提出冀东富铁矿的形成是因为原生沉积时相对较富, 并进一步通过变质期后碱性热液叠加导致去硅富铁形成富铁矿。分析了富铁矿进一步找矿方向, 依据地质物探资料认为滦县司家营铁矿南区仍有较大富铁矿找矿潜力。

**关键词:** 条带状铁建造; 富铁矿; 成因类型; 找矿进展; 冀东

基金项目: 河北省地矿局地质科技项目“冀东铁矿找矿潜力预测及典型矿床成矿机制研究”(编号: 13000023P0069B410214D)

第一作者简介: 崔伟(1978年-), 男, 正高级工程师, 主要从事固体矿产勘查工作。E-mail: cuiwei781015@163.com

通讯作者简介: 张招崇(1965年-), 男, 教授, 主要从事矿床学、岩石学研究工作。E-mail: zczhang@cugb.edu.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 中国长江中下游成矿带航磁资料的地质解释 ——对玢岩与矽卡岩型铁矿床勘探的启示

葛藤菲<sup>1</sup>, 杨雪<sup>1\*</sup>, 范振宇<sup>1</sup>, 何敬梓<sup>1</sup>, 高秀鹤<sup>1</sup>, 范正国<sup>1</sup>, 黄旭钊<sup>1</sup>

1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

长江中下游成矿带以中生代玢岩铁矿、矽卡岩铁矿的形式蕴藏着大量的铁矿石, 显示出巨大的找矿潜力。前人研究表明, 长江中下游成矿带在中生代产生了爆发式成矿作用, 从而产生了诸多大中型陆相火山岩型铁矿床、矽卡岩铁矿床和热液型-斑岩型铜多金属矿床。

制约长江中下游成矿认识的主要问题包括矿床类型、控制不同类型矿床分布的因素以及新矿床的找矿远景, 由于河流冲积物的广泛分布, 制约了这些问题的研究。

由于大面积河流沉积物的覆盖, 地球物理勘探在长江中下游矿产勘探中可以发挥重要的作用。

研究使用长江中下游地区最新的航磁数据分析控制铁铜矿床的构造信息, 并使用弱信息提取新方法识别铁矿床位置。长江中下游成矿带铁矿位于区域重力异常的边缘及高磁异常, 为了剥离区域异常我们 IALM-RPCA 快速数据降维技术方法对该区进行低缓磁异常识别与提取, 基于 IALM 算法求解 RPCA 模型的方法分离出的矿致弱信息幅值较强、准确, 不易产生虚假异常, 克服了时间域计算耗时的缺点, 计算效率远高于前人所提出的 EALM 算法。该方法在区内三个玢岩型和矽卡岩型矿集区内提取出与赋矿岩浆系统相关的成矿弱信息, 发现铁矿位置与所提取信息密切相关。

居里面作为岩石圈的温度界面, 展示了大陆地壳磁性层以及热流的分布状态, 在大地构造、地震、地

热、矿产资源、油气资源以及火山活动等研究中都有非常重要的作用, 间接反映出地壳一定深度等温面的起伏特征。利用磁测数据反演居里面深度的方法有单磁异常法和组合磁异常法, 这两种方法都是通过把空间域数据转换到频率域来建立磁异常与磁性体深度之间的关系。

本文使用东经 110°~115°、北纬 27°~34°范围的 1:5 万航磁数据进行居里面计算, 计算结果显示, 较为明显的居里面隆起分别位于宁芜矿集区东南和鄂东南矿集区黄石一带 (居里面深 21 km), 其中宁芜居里面最浅 19 km, 在 50 km 范围内隆起 5.5 km; 黄石居里面最浅 21 km, 在 90 km 范围内隆起 7.5 km, 这样的居里面的隆起往往反映了深部激烈的岩浆活动和热流的聚集与传导, 可以帮助判断深部岩浆活动强烈的位置, 同时两个居里面隆起中心均有明显的线性重磁场错断特征, 应为深断裂。长江中下游地区的两个居里面隆起与早白垩世成矿密切相关, 反映了该时期陆内俯冲造成地幔物质上涌的主要位置; 在宁芜东南主要俯冲发生的同时, 受到早起形成的大别超高压变质带的阻挡, 在鄂东南黄石一带发生了另一次大型俯冲。宁芜一带的玢岩型成矿来源于其东南部, 经历了约 80 km 的水平运移, 而鄂东南的矽卡岩型铁矿则未经历长距离水平运移。

**关键词:** 航磁; 弱信息提取; 居里等温面; 矽卡岩型铁矿; 玢岩型铁矿

基金项目: 国家重点研发项目 (2022YFC2903704)

第一作者简介: 葛藤菲 (1987-), 高级工程师, 研究方向: 地球物理学、矿床学. Email: 564465031@qq.com

\*通信作者简介: 杨雪, 高级工程师, 研究方向: 地球物理学. Email: 344189755@qq.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 宁芜矿集区向山南-大甸塘 IOA 型铁矿床闪长玢岩年代学和地球化学研究: 对岩石成因与铁成矿的启示

杨超<sup>1</sup>, 张舒<sup>1\*</sup>, 钱祥<sup>3</sup>, 侯通<sup>2</sup>, 张嵩松<sup>1</sup>, 吴明安<sup>1</sup>, 魏国辉<sup>1</sup>

1. 安徽省地质调查院(安徽省地质科学研究所), 合肥 230000;

2. 中国地质大学(北京), 北京 100000;

3. 安徽省地矿局 322 地质队, 安徽 马鞍山 243000

铁氧化物-磷灰石型(IOA)或基鲁那型(Kiruna)矿床以磁铁矿-磷灰石-阳起石组合为特征(Frietsch, 1978), 是全球重要铁矿类型。我国 IOA 矿床集中于长江中下游成矿带宁芜和庐枞矿集区, 成矿峰期约 130 Ma。其成因存在两大争议模型:(1) 铁氧化物熔体不混溶(宁芜研究项目编写小组, 1978; Hou 等, 2010); (2) 高盐度流体出溶成矿(Xu 等, 2024; Zhao 等, 2024)。两类模型均强调三叠纪蒸发岩的关键作用, 但对其加入时机(岩浆同化 vs. 热液交代)及控矿机制仍存争议。

向山南-大甸塘矿床位于宁芜凹山矿田, 为新发现的高品位 IOA 型铁矿床, 赋存于大王山组火山岩与辉石闪长玢岩接触带。矿体呈层状、透镜状, 垂向上分带明显: 浅部为黄铁矿-赤铁矿组合, 深部为磁铁矿主矿体, 受闪长玢岩穹隆控制。矿石具典型浸染状-网脉状构造, 矿物组合为磁铁矿+磷灰石+阳起石+硬石膏, 与全球 IOA 矿床一致。

本次研究对新发现的向山南-大甸塘铁矿中与成矿相关的火山-侵入岩进行高精度的锆石 U-Pb 定年、岩石主微量元素地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 为岩浆演化与磁铁矿-磷灰石成矿的空间、时间及成因联系提供了重要见解。高精度锆石 U-Pb 年代学将赋矿闪长玢岩侵位时间限定为  $129.76 \pm 0.98$  Ma 和  $129.49 \pm 0.87$  Ma, 与大王山组粗面安山岩 ( $129.78$

$\pm 0.98$  Ma) 在时间上重叠, 并早于成矿后正长斑岩 ( $128.49 \pm 0.57$  Ma), 与区域成矿高峰期约 130 Ma 一致。类似弧岩浆的微量元素特征和富集的 Sr-Nd-Hf 同位素组成 ( $\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -13.82$  至  $-3.01$ , 平均值  $-9.35$ ;  $-15.76$  至  $-5.28$ , 平均值  $-9.27$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = -7.24$  至  $-7.31$ ;  $-4.70$  至  $-4.93$ ), 表明粗面安山岩和闪长玢岩起源于交代的富集岩石圈地幔, 并显示出地壳混染特征。闪长玢岩初始岩浆在中等压力条件下 (1.0~1.3 GPa) 经历橄榄石、单斜辉石的分离结晶, 保持了较高的 MgO 含量 ( $>4$  wt.%), 抑制了磁铁矿的过早饱和。岩浆在上升过程中, 同化了三叠纪蒸发岩, 蒸发岩中硫酸盐的还原过程, 提高了熔体的氧逸度, 使磁铁矿达到超饱和状态, 并伴随超高盐度卤水析出形成富铁盐熔。本次工作于粗面安山岩和闪长玢岩中发现了继承的三叠纪锆石 (225~250 Ma), 直接证实了至少在岩浆过程中, 三叠纪蒸发岩就已经加入到岩浆系统中, 并为后续的 Fe 成矿提供了氧化剂与卤族元素。本研究建立了 IOA 型铁矿三步成因框架: (1) 中压结晶分异保留富 Fe 熔体, (2) 蒸发岩驱动的氧化作用优化磁铁矿稳定性, (3) 早期高盐卤水析出促进铁的迁移; 进而丰富完善了宁芜矿集区大王山火山旋回独特的铁成矿机制。

**关键词:** 锆石 U-Pb 定年; 闪长玢岩; 岩浆演化; 铁氧化物-磷灰石矿床; 宁芜矿集区

项目资助: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2903703), 安徽省自然科学基金面上项目 (2208085MD94)

第一作者简介: 杨超 (1993-), 助理研究员, 研究方向: 岩浆作用与区域金属成矿规律研究, Email: cyang2019@163.com

通讯作者简介: 张舒 (1986-), 正高级工程师, 研究方向: 岩浆作用与金属矿床成矿机制研究。Email: zs-1638610@163.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 中国鞍山本地区弓长岭富铁矿床 Fe-Si-C 同位素特征及其成矿指示意义

栾金鹏<sup>1\*</sup>, 付建飞<sup>1</sup>, 贾三石<sup>1</sup>

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110000

辽宁鞍山-本溪地区是我国最大的 BIF 型铁矿资源基地, 其中弓长岭铁矿床是该区最具代表性的富铁矿床。针对弓长岭铁矿床中磁铁富矿的成矿物质来源和矿化过程等方面的争议, 本文进行了系统的矿物学、全岩地球化学和 Fe-Si-C 同位素研究。矿区代表性磁铁富矿石主要由磁铁矿和石英组成, 含有少量的绿泥石、阳起石、石榴子石、方解石和石墨, 且电子探针微区 C 元素面扫描结果显示, 磁铁矿中含 C 矿物的分布具有普遍性。富铁矿石的化学成分以高  $\text{Fe}_2\text{O}_3^T$  和  $\text{SiO}_2$ , 低  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{TiO}_2$  为特征, 表明磁铁富矿形成过程中未受到陆源碎屑沉积物的显著影响。磁铁富矿中石英表现出高的  $\delta^{30}\text{Si}_{\text{NBS-28}}$  特征 ( $-0.64\text{‰}$ ~ $-0.24\text{‰}$ ), 与现代现代海底黑烟囱环境中石英和热液喷发活动中硅质岩的 Si 同位素特征相似。结合磁铁富矿石正的 Eu 和 Y 异常以及高的

Y/Ho 比值, 表明高温热液与海水的混合作用在成矿过程中发挥了重要作用。磁铁富矿石未出现负 Ce 异常, 且其中磁铁矿的  $\delta^{57}\text{Fe}_{\text{IRMM-014}}$  ( $1.043\text{‰}$ ~ $1.683\text{‰}$ ) 呈现分馏现象, 表明古海水处于还原状态, 海水中的  $\text{Fe}^{2+}$  未被完全氧化。此外, 磁铁富矿石中石墨具有低的  $\delta^{13}\text{C}_{\text{V-PDB}}$  ( $-19.5$ ~ $-14.5$ ), 与氧化有机碳经过微生物异化铁还原 (DIR) 作用形成的碳酸盐的  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $-25$  至  $-15$ ) 一致, 结合磁铁矿中含 C 矿物 (包括石墨和方解石) 分布的普遍性, 表明原始沉积的富铁矿物包含菱铁矿, 且微生物 DIR 和后期的变质作用都在磁铁富矿的形成过程中发挥了重要作用。

**关键词:** 弓长岭铁矿; BIF 型铁矿; 同位素; 成矿过程

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 华北克拉通新发现太古宙铌钽矿化花岗岩: 齐大山铌钽矿化花岗岩岩石成因与稀有金属潜力

戴阳<sup>1,2</sup>, 李立兴<sup>2\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;

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

太古宙铌钽矿化花岗岩作为地壳生长事件的产物, 在全球克拉通中广泛发育。然而在经历大规模地壳生长事件的华北克拉通内, 具有经济价值的铌钽矿化花岗岩却鲜有报道。本研究在华北克拉通北缘齐大山铁矿区内新识别出一套铌钽矿化花岗岩, 为揭示华北克拉通内稀有金属成矿过程提供了珍贵实例。通过对铌钽矿化花岗岩中铌铁矿族矿物和锡石开展 U-Pb 年代学研究, 分别获得  $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$  加权平均年龄  $2527\pm 5.8\text{ Ma}$  和  $2535\pm 5\text{ Ma}$ , 二者在误差范围内年龄一致。该结果表明齐大山铌钽矿化花岗岩形成于新太古代晚期。岩石学与地球化学研究表明, 该岩体属于

高分异花岗岩, 主要来源于成熟古老陆壳物质的再循环。花岗质岩浆的高程度分离结晶和熔体-流体相互作用是形成齐大山高分异花岗岩并导致铌钽稀有金属富集成矿的重要控制因素。齐大山太古宙铌钽矿化花岗岩的发现表明, 华北克拉通新太古代晚期构造-岩浆活动具有孕育铌钽稀有金属资源的潜力, 这为重新评估该区前寒武纪地体的成矿远景提供了新视角。

**关键词:** 太古宙铌钽成矿作用; 稀有金属花岗岩; 分离结晶作用; 条带状铁建造; 华北克拉通

国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC2905400)

第一作者简介: 戴阳(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学专业. Email: 1742001378@qq.com

\*通信作者简介: 李立兴(1984-), 研究员, 研究方向: 金属矿床成矿作用研究. Email: llixing@cags.ac.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 磁异常模量三维反演在湖北金牛火山岩盆地矿产 勘查中的应用

肖明顺<sup>1\*</sup>

1. 中国冶金地质总局中南地质调查院, 武汉 430081

在磁异常数据解释中, 一般假设地下磁性体的磁化方向和地磁场的方向一致, 忽略了剩磁或退磁作用的影响。实际上, 很多地区的地下磁性体均具有较强的剩余磁化强度(比如火山岩地区), 致使磁性体的实际磁化方向偏离主磁场方向, 若再按照主磁场方向进行相关的处理和解释, 则可能导致错误的解释与推断。 $\Delta T$  磁异常依赖于磁化方向, 因而磁化方向的不确定性给磁异常的解释工作带来困难。以往研究成果发现磁异常模量具有弱敏感于磁化方向以及与场源平面位置对应关系更好的特点, 可以减少磁测数据解释中的剩磁影响。我们利用 1:25000 地面磁测数据, 在湖北金牛火山岩盆地开展了  $\Delta T$  磁异常总场模量三维反演。金牛火山岩盆地位于长江中下游铁铜成矿带西段, 下扬子台褶带中东部的鄂东矿集区, 具有宁芜、庐枞火山岩盆地相似的成矿条件。印支-燕山期褶皱基底岩系主要为侏罗系碎屑岩及三叠系碳酸盐岩, 出露于火山岩盆地的东、南、西边缘。主要为中生代中基性-中酸性陆相火山岩建造, 其中东部广泛出露地表, 西部因燕山晚期大寺旋回大规模

火山爆发而开始的沉陷被白垩-第三系及第四系碎屑沉积物掩盖, 仅有少量区域出露。 $\Delta T$  磁异常普遍在  $-400\sim 500$  nT 之间, 局部存在大于 1000 nT 异常, 零等值线大致呈向西弯曲的“弓箭”型, 西部窄细, 东部宽阔, 局部曲线为“S 型”转折和扭曲, 北部和西南部为负磁异常区, 中东部主要为正磁异常区, 等值线在北部梯度带较南部梯度略陡。将  $\Delta T$  磁异常转换为  $\Delta T$  磁异常总场模量, 开展三维反演, 反演网格  $200\text{ m}\times 200\text{ m}\times 200\text{ m}$ 、反演深度 5 km。磁异常模量三维反演的磁化率水平切片成果表明, 自  $-500\text{ m}$  标高  $\sim -2500\text{ m}$  标高, 在莲花吴一排口柯、晏公庙两个位置圈定存在明显的磁化率环状异常, 至  $-3000\text{ m}$  标高, 环状异常消失, 推断为火山口的反映, 反应了岩浆活动强烈, 火山多期次喷发, 火山机构或者火山通道产出的地质环境, 其火山机构周边重磁体向上隆起的基底构造格局, 对本区寻找火山岩或次火山岩形成的铁多金属矿, 具有指示作用。

**关键词:** 金牛火山岩盆地; 三维反演; 磁异常模量

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFC2903705-02)

第一作者简介: 肖明顺 (1982-), 高级工程师, 研究方向: 矿产勘查。Email: shunfly@qq.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 华北克拉通北部勿兰乌苏磷铁矿床年代学与地球化学特征: 与古元古代斜长岩-纹长二长岩-紫苏花岗岩- 花岗岩 (AMCG) 岩浆作用的成因联系证据

吴玄<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

华北克拉通北部太古宙变质岩系中赋存的磷铁矿床是我国重要的磷、铁资源来源, 然而其成因机制与矿床类型仍存在争议。位于辽西建平地区的勿兰乌苏磷铁矿床为该类型矿床的典型代表之一, 其矿石主要由斜长石、角闪石、黑云母、磷灰石及铁钛氧化物组成。为揭示磷铁矿化的地质控制因素, 本研究对其磷铁矿石开展了岩相学、年代学及地球化学分析。锆石 U-Pb 定年获得其加权平均结晶年龄为  $1730 \pm 6$  Ma, 精确的将矿化作用限定于古元古代晚期。结合岩相学观察和磷灰石地球化学分析, 表明矿石为镁铁质岩浆成因。全岩地球化学分析显示, 其微量及稀土元素地球化学特征与同时代的大庙辉长岩-苏长岩具有相似性, 并呈现典型的岩浆结晶分异特征。综合研

究表明, 该矿床的形成与镁铁质岩浆活动密切相关, 应归属于古元古代晚期岩浆型磷铁矿床。这一认识否定了前人提出的磷铁矿化与新太古代变质火山-沉积岩存在成因联系的观点。锆石  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  值为  $-4.9 \sim -7.7$ 、全岩  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$  为  $0.702647 \sim 0.703696$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $-5.72 \sim -6.41$  表明, 成矿母岩浆来源于混染了地壳物质的富集地幔。结合区域地质年代学与地球化学资料, 本研究认为勿兰乌苏磷铁矿床的形成与华北克拉通北部古元古代晚期 AMCG 岩套密切相关, 其可能形成于碰撞后伸展环境。

**关键词:** 磷灰石; 磷铁矿; 岩浆型磷矿床; AMCG 岩套; 华北克拉通

· 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 ·

## 山东省黄河北煤田煤下富铁矿深部找矿进展

沈立军<sup>1</sup>, 王怀洪<sup>1,2\*</sup>, 朱裕振<sup>1,2</sup>, 周明磊<sup>1,2</sup>, 张心彬<sup>1,2</sup>

1. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 济南 250104;

2. 中国地球物理协会煤田地球物理重点实验室, 济南 250104

黄河北煤田位于华北板块鲁西隆起区的西北部, 区内富铁矿勘查工作始于 2013 年, 依托山东省省级地质勘查项目对区内潘店磁异常进行了调查评价, 实现了煤下富铁矿重大找矿新发现, 拉开了该区煤与富铁矿协同勘查研究的序幕, 历经十余年勘查, 区内富铁矿找矿工作不断取得新突破。区内地层由老至新为新太古界泰山岩群、寒武系、奥陶系、石炭系、二叠系、三叠系、古近系、新近系及第四系, 缺失晚奥陶世~早石炭世、侏罗纪、白垩纪地层。区内断裂构造发育, 切割形成断块式构造格局。岩浆岩广泛分布, 以中生代侵入岩为主。含煤地层主要为石炭及二叠纪马家沟群太原组和山西组, 累计含煤 14 层, 共获得煤炭资源量 2.45 亿吨。探获富铁矿为矽卡岩型, 发现李屯、郭店、大张等富铁矿床 3 处, 探获富铁矿资源量 1.04 亿吨, 全铁平均品位 55.27%、磁性铁平均品位 50.67%。李屯矿床为区内规模较大的矿床, 划分为小刘庄矿段和叠道矿段, 共圈定磁铁矿体

11 个, 矿体形态以似层状为主, 总体呈东缓西陡、东浅西深的延伸趋势, 赋存深度 1050~1550 m, 矿体厚度约 1.54~59.22 m。矿体主要赋存于闪长岩体与石炭系-二叠系接触带附近的地层中, 围岩发生大规模角岩化, 矽卡岩化强度低。矿体外围尚未封闭, 仍有较大找矿潜力。依托找矿思路的转变和理论技术的创新, 黄河北煤田内富铁矿找矿实现了重要突破, 主要认识如下: 一是在含煤地层内发现了厚层、高品位的富磁铁矿体, 探索建立了“禹城式”富铁矿成矿模式, 打破了矽卡岩型铁矿主要赋存于岩体与碳酸盐岩接触带的传统认识。二是受盆地内不同构造体系和地质活动控制, 形成了煤、铁等不同矿产共存的资源赋存状态, 提出了“煤铁同益共存”成矿理论, 开辟了赋煤覆盖区找铁新方向。

**关键词:** 富铁矿; 矽卡岩型; 禹城式; 黄河北煤田

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2903705)、山东省省级地质勘查项目 (鲁勘字 (2023) 13 号) 和山东省煤田地质局科研专项 (MTDZKY-2024-02)

第一作者简介: 沈立军 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 地质矿产勘查及矿床学, Email: sdmtslj@163.com

\*通讯作者: 王怀洪 (1963-), 研究员, 研究方向: 资源勘查与地球物理探测, Email: tawhh@126.com

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 华北克拉通矽卡岩铁矿大规模成矿作用的 深部地球动力学过程

张招崇<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京), 北京 100083

富铁矿石作为重要的工业原料, 其形成机制一直是地质学研究的热点。全球范围内, 约 85% 以上的富铁矿石源自条带状铁建造 (BIF) 通过表生风化淋滤或者深部流体的去硅富铁作用形成的赤铁矿矿石。在中国, 尽管铁矿石同样主要来自 BIF, 但约 58% 的富铁矿石却来自矽卡岩型磁铁富矿。华北克拉通是中国矽卡岩富铁矿的主要产地, 拥有邯郸-邢台、莱芜、金岭、安阳、齐河-禹城等矿集区, 这些矿集区分布在华北克拉通内部东、西两个带。对含矿岩体以及矽卡岩的大量同位素测年结果表明, 这些矽卡岩型铁矿几乎均在约 130 Ma 前后形成, 其形成被归因于华北克拉通快速减薄。然而, 这种机制尚无法解释为什么东、西两个带的矽卡岩型铁矿均集中于~130 Ma, 而岩石圈减薄的高峰期~120 Ma 则没有形成? 空间上, 为什么克拉通破坏更强烈的东部地区为什么没有形成? 为了揭示华北克拉通矽卡岩铁矿这种独特的时空分布特征, 本文系统总结了与矽卡岩铁矿有关的成矿闪长质岩体的岩石学和地球化学特征, 认为其起源于被俯冲板片释放出的流体交代的岩石圈地幔, 是壳幔相互作用的结果。由于矽卡岩铁矿的形成需要关键

的矿化剂氯 (Cl), 而 Cl 主要与蛇纹石的脱水有关, 并且考虑到蛇纹石脱水作用发生于 <300 km, 所以矽卡岩铁矿的形成与~660 km 的大地幔楔无关。结合区域岩浆岩时空分布特征, 本研究提出华北克拉通矽卡岩铁矿的大规模矿化可能与 137 Ma 平板俯冲的板片回卷有关: 板片回卷导致俯冲板片和其上的岩石圈地幔之间形成“三角形”空间, 促使热的软流圈地幔在该“三角形的空间”上涌并激发已经强烈交代的富集岩石圈地幔发生部分熔融, 形成富水富 Cl 的氧化性基性岩浆。这种基性岩浆沿深大断裂上升, 并与~2.5 Ga 的下地壳 (可能含有 BIF) 发生不同程度的相互作用形成相对富铁的岩浆, 最终导致矽卡岩铁矿的大规模成矿。本研究提出的模式成功解释了华北克拉通矽卡岩铁矿的时空分布特征, 包括为何矽卡岩铁矿集中形成于~130 Ma 前后, 以及太行山西侧和东带东侧都未形成矽卡岩铁矿的原因。这一发现对于理解矽卡岩铁矿的形成机制及指导矿产勘查具有重要意义。

**关键词:** 矽卡岩铁矿; 大规模成矿; 板片回卷; 岩石圈地幔; 华北克拉通

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 冀北斜长岩型富铁矿成矿机制探讨

李立兴<sup>1\*</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

我国华北克拉通大庙斜长岩体中的富铁矿脉群形成于岩浆演化最晚期阶段, 在世界上独具特色, 其成矿机制长期以来备受关注。本研究提出: 赋矿斜长岩体的形成与高铝玄武质岩浆短期内多次注入有关, 而非单次岩浆持续演化的结果; 大庙斜长岩型富铁矿

为岩浆—热液过渡成因, 铁钛氧化物形成于岩浆阶段, 而磷灰石的形成贯穿整个岩浆-热液成矿过程。

关键词: 富铁矿; 斜长岩; 成矿机制; 华北克拉通

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41402067)

第一作者简介: 李立兴 (1984-), 研究员, 研究方向: 前寒武纪成矿作用。Email: llixing@cags.ac.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 小包庄铁矿磷灰石特征及其矿床成因

杨博为<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

IOA 矿床作为全球范围内典型的铁磷矿床类型, 提供了非常重要的铁磷来源。中国东部庐枞盆地小包庄矿床, 位于长江中下游的玢岩铁矿带, 该矿床矿体呈特殊的“双层”结构, 然而其矿床成因尚不清楚。针对此问题, 本文选取了不同层位、不同岩性中的磷灰石以及磁铁矿开展了岩相学、矿物学和地球化学特征研究。矿床由上部脉状-网脉状磁铁矿矿层与下部块状-稠密浸染状磁铁矿层组成; 与周围次火山岩地层成似层状产出且地层产出大量膏辉岩与矿层共生, 主要矿石矿物为磁铁矿、赤铁矿和黄铁矿。磷灰石中存在由碳酸盐包裹的磁铁矿和钛尖晶石的包裹体, 磷灰石的电子探针分析 (EMPA) 数据表明: -1750 m 以下矿体中磷灰石 F/Cl

值较低 (avg. 8.8), 显著低于上部矿体中的 F/Cl 值 (avg. 45.4)。下部较低的 F/Cl 值以及包裹体的矿物组合指示了膏岩层中大量的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  进入到了岩浆中并与其发生了大规模的混染, 进而产生了一种不同于硅酸盐熔体和氧化物熔体的富硫酸盐、碳酸盐的熔盐; 上部磷灰石 F/Cl 值较高表明其主要为岩浆成因。综上所述, 本研究为 IOA 矿床隐伏矿体磁铁矿磷灰石的成因提供了证据, 约束了岩浆-膏岩层相互作用的成矿机制, 对区域资源评价及全球同类矿床找矿预测具有启示意义。

**关键词:** IOA 型铁矿; 小包庄矿床; 磷灰石; 膏岩层

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFC2903703)

第一作者简介: 杨博为 (1999-), 博士研究生, 研究方向: 矿床学. Email: 1220464674@qq.com

\*通讯作者简介: 侯通 (1984-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学和成岩成矿实验模拟. Email: thou@cugb.edu.cn

• 专题 21: 富铁矿成矿作用与找矿方法 •

## 地球平静期宣龙式铁矿成矿环境研究

杨秀清<sup>1\*</sup>

1. 长安大学 地球科学与资源学院, 西安 710054

元古宙中期(18-8 亿年)大气氧化缓慢, 生命演化迟缓, 通常被认为是地球平静期(Boring Billion)。尽管诸多研究表明该时期海洋深部持续出现缺氧、铁化海洋, 但是元古宙中期铁建造却大规模缺失, 这与早前寒武纪缺氧、铁化海洋沉积巨量铁建造形成鲜明对比。近年来, 少量元古宙中期铁建造被相继报道, 但是其成因机制及其对海洋环境指示意义研究薄弱。我国宣龙式铁矿赋存于华北克拉通串岭沟组下部, 是继 18.8 亿年铁建造大规模消亡之后最早出现的铁建造。我们对宣龙式铁矿赋矿岩系 16.4 亿年串岭沟组开展了系统的主微量元素、铁组分、有机碳和铁同位素分析。结果表明, 宣龙式铁矿显示低 Y/Ho 比值、轻微 Eu 正异常、无 Ce 异常、富集重铁同位素, 相对深海沉积物( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  可达 $-33.4\%$ )浅海沉积物具有较高有机碳同位素值( $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$  为 $-29\%$ ), 这表明当时海洋氧化还原分层, 海水表层氧

化, 深部缺氧、铁化。同时生态系统也出现分层, 浅海相以自养生物为主(例如微需氧铁氧化菌和/或缺氧光合生物), 深水相以异养生物为主(如异化铁还原菌)。研究推测哥伦比亚超大陆裂解伴随的热液活动导致深部铁化海洋发育, 由于间歇性铁浓度升高, 微需氧铁氧化菌和/或缺氧光合生物引起铁氧化沉淀于浅海氧化还原界面附近, 形成串岭沟组底部宣龙式铁矿。此外, 研究还发现串岭沟组上部页岩记录了间歇性深海氧化现象, 这与最新报道的元古宙中期出现脉动氧化事件一致, 这暗示元古宙中期短周期和长周期内海洋波动氧化比较常见, 同时海水铁循环也出现动态变化, 二者共同限制了元古宙中期真核生物演化以及铁建造沉积, 该研究有效推动了成矿与环境生命协同演化研究。

**关键词:** 宣龙式铁矿; 地球平静期; 串岭沟组

国家自然科学基金项目(42472103)

第一作者简介: 杨秀清(1987-), 教授, 研究方向: 沉积矿床成矿作用与找矿勘查. Email: yangxiuqing@chd.edu.cn