

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 人工智能驱动下成矿预测-勘查评价- 战略决策协同机制探索研究

周兆巍<sup>1\*</sup>, 王昭静<sup>1</sup>, 杜婷<sup>1</sup>

1. 包钢集团矿山研究院(有限责任公司)矿产资源战略研究所, 内蒙古包头 014030

近年来, 人工智能技术深度融入矿产资源勘查全流程, 推动地质找矿理论与资源评价方法发生了结构性变革。本研究聚焦人工智能对成矿规律解析、勘查技术升级及资源战略决策的赋能机制, 系统阐述其在多元信息融合建模、三维定量预测及动态经济评价中的创新应用, 为智能化勘查体系构建与资源安全保障提供科学依据。海量地质数据的智能化分析和处理推动成矿理论研究向数据密集型模式转变。基于人工智能的多元地学数据协同解译技术, 显著提升了地球物理场和区域成矿的特征提取、地球化学异常圈定与遥感蚀变信息识别的综合能力。例如, AI 辅助下的矿物标型学特征智能提取, 成功揭示了白云鄂博稀土-铌-铁多金属矿床关键矿物的重要标型特性, 磁铁矿等判别准确率达 92 以上%; 重磁数据三维反演耦合构造解析技术在 Olympic Dam 矿床深部实现了隐伏岩体顶界面埋深预测, 误差小于 15%; 在鄂尔多斯盆地铀矿勘查中, 通过水文地球化学指标与层序地层格架的关联建模, 铀矿化有利区预测精度较传统方法提升了 41%; 人工智能辅助下的三维地质建模技术, 突破复杂构造控矿空间表征难题, 在卡林型金矿勘探中实现断裂-岩性

-地球化学异常体的协同定位, 勘探靶区定位精度达 87%。同时, 人工智能技术正在推动矿产资源经济评价从静态储量估算向全生命周期动态模拟转型。例如, 基于矿床三维品位分布/主要矿物占比与开采工艺约束的动态储量评估模型, 在矽卡岩型铁矿开发中实现可采储量误差率降至 8% 以下; 矿产品市场-政策-环境的多维耦合分析框架, 支持战略性矿产供需风险预警, 稀土元素供应链中断概率预测准确率达 89%; 在矿业权评估领域, 通过整合资源禀赋、基础设施与生态红线数据构建的矿业用地适宜性评价体系, 为投资决策提供量化依据, 使矿权出让方案优化效率提升 60%。可以预见, 人工智能技术在典型矿床数据知识图谱编制、地质本体约束下的 AI 模型解析、资源-环境-经济协同优化算法构建以及人机协同决策系统建立等方面将持续突破, 将推动矿产资源行业向智慧勘查、绿色开发与可持续管理方向迈进, 亦可为实现资源高效开发与生态环境保护的动态平衡提供更全面、及时和系统的解决方案。

**关键词:** 人工智能; 成矿预测; 资源勘察; 战略决策

周兆巍 (1992-), 工程师, 研究方向: 采矿工程、战略分析 Email: 775798850@qq.com

王昭静 (1986-), 高级工程师, 研究方向: 矿床地质、矿物学研究、人工智能大数据 Email: wzhjing\_kevin@163.com

杜婷 (1988-), 高级工程师, 研究方向: 数智化、信息化研究、科技情报分析 Email: 361220391@qq.com

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 安徽庐枞盆地小包庄铁矿榭石矿物学特征及其成矿指示意义

张龙<sup>1</sup>, 侯通<sup>1\*</sup>, 王萌<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. 中国地质大学(北京)科学研究院, 北京 100083

庐枞盆地作为长江中下游成矿带的重要矿集区, 其内小包庄铁矿床是典型的玢岩型铁矿之一。本文以该区深部层位小包庄铁矿为研究对象, 重点研究副矿物榭石的矿物学特征及其成矿响应机制。该矿床以磁铁矿为主矿体, 共生硫铁矿与硬石膏矿化, 成矿作用与闪长玢岩及热液活动密切相关。研究表明, 磁铁矿体(-1694~-1706m)中榭石呈小颗粒定向分布于碱性长石基质, 核部 FeO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值高达 8.97% (最高 17.05%), 与磁铁矿、磷灰石共生, 反映深部高温富 Fe 流体(>600 °C)快速结晶。边部 FeO 含量(2.45%)显著高于核部(2.28%), 且核部 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量极低(0.48%), 表明高温条件下 Al 活度受抑制, Fe<sup>3+</sup>通过类质同象大量替代 Ti<sup>4+</sup>, 高氧逸度促使 Fe<sup>2+</sup>氧化为 Fe<sup>3+</sup>。榭石中极端 Fe/Al 比值(17.05%)及共生磷灰石指示深部岩浆热液快速上涌的动力学过程。硫铁矿体(-1273 m)中榭石粒径呈双峰分布, 核部 TiO<sub>2</sub> (36.01%)略高于边部(35.86%), 与绿泥石化/绿帘石化透辉石及黄铁矿共生, 指示中低温(200~350°C)热液叠加。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.56%~0.60%)与 FeO (1.80%~1.90%)呈正相关趋势, 且 FeO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 比值变化范围

不大(3.28%~3.32%), 反映 Al<sup>3+</sup>与 Fe<sup>3+</sup>在热液活动中的协同替代机制。浅部硬石膏矿体(-1018~-1056 m)中榭石以自形晶为主, 穿切早期透辉石, 核-边成分显示 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+FeO 边部富集(2.84%, 核部 2.71%), 与透辉石、金云母及硬石膏共生, 对应中温矽卡岩化阶段。核部 Fe/Al 比值升高暗示流体向富 Fe 微调。榭石切穿透辉石的结构及环带成分分异(如边部 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 为 0.90%, 核部 0.96%)揭示矽卡岩化过程中热液活性的波动。因此, 榭石的核-边成分分异、环带结构及共生序列表明庐枞盆地铁矿成矿受多期热液上涌控制——深部早阶段高温富 Fe 岩浆热液快速结晶形成磁铁矿主矿体; 随岩浆上升, 中期中低温热液叠加导致硫铁矿化; 晚期浅部中温矽卡岩化形成硬石膏矿体。通过矿物学与地球化学特征相结合, 系统阐述榭石成因和成分变化特征, 揭示其对成矿过程的指示意义, 为完善长江中下游玢岩型铁矿成矿模型提供矿物学约束。

**关键词:** 榭石; 矿物共生组合; 地球化学; 小包庄铁矿; 庐枞盆地

基金项目: 东部地区富铁矿床矿体定位技术与增储示范

第一作者简介: 张龙(2000-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. Email: 879686711@qq.com

\*通信作者简介: 侯通(1984-), 教授, 研究方向: 岩浆岩岩石学和岩浆系统实验岩石学研究. Email: thou@cugb.edu.cn

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 铁（氢）氧化物的可见-短波红外反射光谱研究及其在风化壳型稀土矿床勘查中的应用

罗莲英<sup>1</sup>, 谭伟<sup>1\*</sup>

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

铁（氢）氧化物（如赤铁矿、针铁矿和水铁矿）的形成与相互转化过程对表生环境中的气候变化和干湿条件具有重要的指示意义，同时在风化壳型稀土矿床的勘查中具有潜在应用价值。然而，铁（氢）氧化物在天然样品中的识别与定量分析面临挑战。现有实验室分析技术（如 X 射线衍射、穆斯堡尔谱等）样品前处理复杂、成本昂贵，难以满足大规模样品分析的需求。可见-短波红外反射（VSWIR）光谱是一种快速、便捷且经济的分析技术，其光谱波段（350~2500 nm）范围内包含铁（氢）氧化物相关特征吸收带，可以通过解译分析获得定性定量铁（氢）氧化物的光谱参数。但是由于铁（氢）氧化物  $\text{Fe}^{3+}$  相关的电子跃迁吸收带重叠严重，并且 Al 类质同像替代会导致吸收带位置的偏移，制约了 VSWIR 光谱识别和定量分析天然样品中铁（氢）氧化物的有效性。为解决上述问题，本研究以实验室合成的高纯度铁（氢）氧化物及不同程度 Al 类质同像替代样品为研究对象，系统开展了光谱学研究。通过构

建二元及三元铁（氢）氧化物混合物的光谱特征模型，量化分析了 VSWIR 光谱参数（如 P900、AS500、FWHM900）与各组分含量之间的相关性，建立了相应的函数模型。研究进一步揭示了 Al 类质同像替代对铁（氢）氧化物 VSWIR 光谱特征的影响机制，发现约 500 nm 波段的吸收强度对 Al 替代量变化最为敏感，可作为评估 Al 类质同像替代程度的有效指标。此外，通过天然风化壳剖面样品的验证，提出了基于 VSWIR 光谱的稀土矿化指示指标：在贫铁风化壳中， $\text{Nd}^{3+}$  在约 800 nm 处的晶体场吸收强度可作为稀土品位评价的可靠指标；在富铁风化壳中，P900 吸收带位置的突变可有效指示矿体边界。本研究为铁（氢）氧化物的 VSWIR 光谱定量分析提供了科学依据，并为风化壳型稀土矿床的勘查工作提供了重要的技术支撑。

**关键词：**VSWIR；铁（氢）氧化物；风化壳型稀土矿床

第一作者简介：罗莲英（1998-），女，博士研究生，研究方向：风化壳型稀土矿床成矿特征. E-mail: luolianyong@gig.ac.cn

\*通信作者简介：谭伟（1987-），男，副研究员，研究方向：风化壳型稀土矿床的形成机制与可见-近红外光谱学标型. E-mail: tanwei@gig.ac.cn

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 白云鄂博矿区黑云母地球化学特征及成因研究

田胜强<sup>1,2</sup>, 覃凌峰<sup>1</sup>, 戴霜<sup>1,2\*</sup>, 王彬<sup>1</sup>, 刘雁江<sup>1,2</sup>, 郭锐<sup>1,2</sup>, 王其伟<sup>1,2</sup>

1. 兰州大学 地质科学与矿产资源学院, 兰州 730000;

2. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室, 内蒙古包头市 014030

白云鄂博超大型多金属矿床是全球规模最大的 REE-Nb-Fe 共伴生矿床, 其成因机制与多期构造-岩浆-热液耦合过程解析是揭示稀土超常富集规律和指导深部找矿的关键科学命题。白云鄂博矿床主体形成于中元古代碳酸岩岩浆侵位及后期中酸性岩浆侵位叠加成矿, 具有两期成矿特点。如何鉴别成矿过程并评估不同成矿期次成矿贡献, 是亟待解决的稀土成矿关键科学问题。赋存矿体的碳酸岩体侵位于白云鄂博群 H9 片岩中, 这套片岩含有比较多的黑云母, 它的形成既经历了地层沉积后的区域变质作用, 也经受了碳酸岩浆侵位过程的叠加变质作用, 以及海西期中酸性岩体侵位时的叠加变质作用, 因此, 开展黑云母成分研究, 有可能是甄别成矿地质作用、认识成矿机制的重要途径。本文选取交代蚀变片岩、未蚀变片岩及含矿钠闪石碳酸岩 3 类代表性样品, 系统开展了黑云母矿物特征观测和化学成分分析, 结合 Ti-Mg 温度计、 $10\text{TiO}_2\text{-FeO-MgO}$  成因分类图解及黑云母端元组分判别图解, 探讨了黑云母形成环境及成因类型, 为认识白云鄂博矿床成矿背景及成矿过程提供了基础资料。

镜下观察发现, 黑云母普遍呈半自形-他形片状,

鳞片状集合体, 粒径介于  $50\sim 200\mu\text{m}$ , 常见定向排列。主量元素分析结果显示黑云母分为镁黑云母和铁黑云母。交代蚀变片岩包括黑云母片岩、钠长变粒岩、黑云钠长片岩, 部分黑云母颗粒边缘发育港湾状溶蚀结构, 薄片可见黑云母与钠闪石、磷灰石、独居石等矿物伴生, 反映岩石经受了后期流体交代改造; 黑云母  $10\text{TiO}_2\text{-FeO-MgO}$  投点全部位于重结晶黑云母区间, 对应中高温热液交代环境 ( $500\sim 660\text{ }^\circ\text{C}$ ), Ti 亏损 ( $<0.2\text{ apfu}$ ) 与富镁特征 ( $\text{Mg}\geq 0.70$ ) 共同指示岩石处于开放体系并有交代流体参与反应。未蚀变岩石为黑云斜长微晶片岩, 13 组样品中 9 个投点位于岩浆黑云母区间 (可能反应原岩为火山岩)、温度较高 ( $650\sim 720\text{ }^\circ\text{C}$ ), 可能反映岩浆结晶分异过程; 4 个样品落入重结晶区间, 指示区域变质作用成因。含矿钠闪石碳酸岩的黑云母均落入新生黑云母区间, 低温 ( $<500\text{ }^\circ\text{C}$ ) 及极低 Ti 含量 ( $<0.06\text{ apfu}$ ) 标志该类黑云母可能形成于碳酸岩浆晚期富挥发分 (F/Cl) 的热液活动阶段, 可能与稀土成矿密切相关。

**关键词:** 黑云母地球化学; Ti-Mg 温度计; 温压序列; 多期热事件; 白云鄂博矿床

基金项目: 国家重点研发项目 (22022YFC2903305), 北方稀土重点项目 (BFXT-2021-D-0053) 及白云鄂博稀土资源研究与综合利用全国重点实验室联合项目 (2022H2272)

第一作者简介: 田胜强 (2002-), 硕士研究生, 研究方向: 矿物学, 岩石学, 矿床学. Email: tianshq2024@lzu.edu.cn

\*通信作者简介: 戴霜 (1967-), 教授, 研究方向: 中生代构造与环境、矿产与勘查. Email: daisher@lzu.edu.cn

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 基于高光谱技术对碳酸岩型稀土矿床中氟碳铈矿的识别及其地质意义

郭东旭<sup>1,2\*</sup>

1. 自然资源实物地质资料中心 中国地质调查局岩心数字化技术创新中心, 河北廊坊 065201;
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

碳酸岩型(含碳酸岩-碱性岩型)稀土矿床所含稀土氧化物占稀土储量的 51.4%, 而氟碳铈矿是其中最重要的稀土矿物之一。氟碳铈矿在碳酸岩型稀土矿床成岩成矿、流体演化过程中记录了重要的地质信息, 如何有效识别该矿物含量, 一直是地质学家关注的重点问题之一。钻孔岩心、野外近地、机载或星载高光谱对矿物信息的反映, 被广泛应用于矿产勘查, 尤其在地质露头发育区域以及人力难以接近的区域优势显著(Laukamp et al., 2021)。与 XRD (X 射线衍射分析)、QEMSCAN (扫描电镜矿物定量分析) 等实验方法对矿物的识别相比, 高光谱技术在地矿行业的基础研究和生产应用中属于新兴技术, 具有绿色、快速、无损检测, 花费低, 可以获得海量数据等优势。稀土元素 4f 电子层的 f-f 跃迁引起的 V-NIR-SWIR (可见光-近红外-短波红外) 波段波谱特征吸收, 碳酸根离子  $\text{CO}_3^{2-}$  在 SWIR 的特征吸收和在 TIR 波段的特征反射, 为氟碳铈矿稀土矿物的定量识别提供了理论基础。前人应用光谱技术对溶液中离子吸附态的稀土离子, 对稀土氧化物、稀土氟氧化物、稀土氟化物, 对碳酸盐、磷酸盐、硅酸盐稀土矿物的 V-NIR-SWIR 波段开展了光谱特征研究, 对离子吸附型 REE 矿床、沉积型 REE 矿床、REE-Nb-Zr 矿床的稀土元素开展了定量反演, 对碳酸岩型 REE 矿床仅有对 Nd 元素含量与光谱参数开展了相关性分析, 对稀土、铈、钙元素含量和矿物相影响稀土定量等方面取得了相应的研究进展 (Turner et al., 2014; Möller et al., 2018; 代晶晶等, 2018; 曹发生等, 2021; Cheng et al., 2021; Dai et al., 2021)。然而, 氟碳铈

矿在 TIR (热红外) 波段的光谱特征并未总结报道, 基于高光谱对碳酸岩型稀土矿床中氟碳铈矿的量化识别, 有待进一步深入研究。以牦牛坪稀土矿床矿物颗粒粗大的矿石、大陆槽和白云鄂博含氟碳铈矿矿石为研究对象, 全面总结氟碳铈矿在 V-NIR-SWIR-TIR 波段光谱特征。由于大多数含水含羟基矿物、碳酸盐矿物、硫酸盐矿物在 SWIR 有较强的吸收峰, 无水硅酸盐、碳酸盐、硫酸盐、磷酸盐等矿物在 TIR 波段有显著光谱特征峰, 可能与氟碳铈矿特征峰有叠加, 而大多矿物在 400~1300 nm 波段很少有较强的吸收峰, 仅有部分铁矿石(赤铁矿、褐铁矿、针铁矿)在 900 nm 出现大而缓的吸收带, 在 500 nm 或者 700 nm 附件有很微弱的吸收带, 对稀土典型吸收位置和相对吸收深度影响不大。研究表明, 氟碳铈矿在 400~1300 nm 波段强吸收峰的吸收位置为 511、522、580、677、742、865、890、1094、1255 nm, 且不随氟碳铈矿含量 ( $\geq 10\%$ ) 的变化而变化。氟碳铈矿这些强吸收峰的相对吸收深度、吸收面积与其含量强烈正相关, 并以此建立氟碳铈矿定量反演的多类模型。其特征强吸收峰的相对吸收深度或吸收面积的线性回归模型 ( $R^2 \geq 0.98$ ) 对氟碳铈矿含量的预测效果最好。研究认为, 高光谱 (V-NIR-SWIR-TIR) 技术在氟碳铈矿准确识别和含量探测方面优势突出, 在碳酸岩型稀土矿床的野外矿产勘查、区域勘查、深边部资源预测等方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 高光谱; 碳酸岩型; 稀土矿床; 氟碳铈矿; 近红外

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 基于 X 射线单晶与中子衍射的富铍矿物成因研究 ——以绿柱石为例

石羽钧<sup>1</sup>, 房雷鸣<sup>2</sup>, 闫顺风<sup>1</sup>, 杨眉<sup>1</sup>, 李林<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083;

2. 中国工程物理研究院 物理与化学研究所中子物理学重点实验室, 四川绵阳 621999

铍矿作为多个国家的战略型关键金属矿产备受世界关注, 其在高端材料和新兴技术领域具有重要应用价值。而绿柱石 (Beryl,  $\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{Si}_6\text{O}_{18})$ ) 作为最常见的富铍矿物, 其成矿规律与晶体形态之间的关联一直是地球科学界关注的焦点[1]。本研究基于 X 射线单晶衍射与中子衍射的综合分析方法, 对不同形态的绿柱石样品进行了系统分析, 初步结果表明:

1) 结果显示, 无色绿柱石中存在广泛的  $\text{Be}^{2+} \rightarrow \text{Li}^+$  类质同象取代, 而绿色绿柱石中则主要发生了  $\text{Al}^{3+} \rightarrow \text{R}^{n+}$  (R 可能为亲 Fe 相关的变价原子) 的取代;

2) 绿柱石晶体化学特征与结晶形态存在着较强的关联, 无色绿柱石和绿色绿柱石在晶体结构上存在差异, 通过对晶胞参数的精修分析 (如图 1), 发现

无色绿柱石  $c/a=1.002$ , 反映出  $[\text{BeO}_4]$  四面体置换; 绿色绿柱石  $c/a=0.995$ , 反映出  $[\text{AlO}_6]$  位置置换, 与电子探针计算结果具有较好的一致性。

3) 板状绿柱石常出现在高碱金属富集和中高温气成环境, X 射线与中子衍射结果显示, 该类型晶体通道中 Cs、Na 等离子含量较高, 明显改变了 c 轴方向的晶面生长速率。

这些发现不仅为绿柱石的形态演化机制提供了新的佐证, 也为富铍矿物的精细成因研究提供了有效的测试手段, 对后续铍矿资源勘查与高压合成工艺具有重要参考价值。

**关键词:** 绿柱石; X 射线单晶衍射; 中子衍射; 晶体形态; 富铍矿物成因

基金项目: 国家自然科学基金项目 U2444208

第一作者简介: 石羽钧, 男, 2003 年生, 本科生, 研究方向: 主要从事高温高压晶体化学、行星地质与比较行星学有关研究。Email: 1006210131@email.cugb.edu.cn

\*通信作者简介: 李林, 男, (1984-), 副教授, 研究方向: 成因矿物物理。Email: clark.li@cugb.edu.cn

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 中国东部矽卡岩型铁矿床中的镓富集-来自磁铁矿微量元素的启示

梁贤<sup>1</sup>, 汪方跃<sup>1\*</sup>, 张龙<sup>1</sup>, 周涛发<sup>1</sup>, 范裕<sup>1</sup>, 张君伍<sup>2</sup>, 张聚全<sup>3</sup>

1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 合肥 230009;
2. 中国地质大学(北京) 科学研究院, 北京 100083;
3. 河北地质大学 地球科学学院, 石家庄 050031

矽卡岩型矿床提供了大量的 Fe、Cu、W、Sn 和其他关键金属, 如 Ga、Co、In、Te 和 Se。以往对矽卡岩型矿床关键元素的研究主要集中在 Co、Te 和 In 的富集机制上, 而 Ga 的赋存状态和富集机制尚不清楚。本次研究对比了中国东部 5 个矽卡岩型铁矿床(朱冲矿床、安庆矿床、白涧矿床、中关矿床和北洛河矿床)磁铁矿中 Ga 的含量, 重点研究了长江中下游成矿带安庆-贵池矿集区朱冲铁矿床中 Ga 的富集情况。朱冲矿床磁铁矿中的 Ga 含量最高, 为  $6.4 \times 10^{-6} \sim 134 \times 10^{-6}$ , 平均为  $69.4 \times 10^{-6}$ , 远高于安庆矿床 ( $37.3 \times 10^{-6}$ )、北洛河矿床 ( $41.1 \times 10^{-6}$ )、中关矿床 ( $19.9 \times 10^{-6}$ ) 和白涧矿床 ( $14.9 \times 10^{-6}$ )。朱冲矿床钻孔观察到大量热液蚀变矿物, 并对其进行了系统分析, 其中绿帘石中的 Ga 含量在矽卡岩矿物中最高, 平均为  $121.9 \times 10^{-6}$ ; 磁铁矿中的 Ga 含量在矿石矿物中最高, 平均为  $69.4 \times 10^{-6}$ ; 透辉石和石榴石中的 Ga 含量分别为  $8.7 \times 10^{-6}$  和  $33.2 \times 10^{-6}$ 。硫化物中的 Ga 含量最

低, 均小于  $7.0 \times 10^{-6}$ 。朱冲矿床的磁铁矿根据其结构和赋存状态可分为三类: 一是磁铁矿层内致密块状磁铁矿 MagI, 其 Ga 含量平均为  $85.1 \times 10^{-6}$ ; 二是矽卡岩层内浸染状磁铁矿 MagII, 其 Ga 含量平均为  $23.7 \times 10^{-6}$ ; 三是蚀变闪长岩中脉状磁铁矿 MagIII, 其 Ga 含量平均为  $19.7 \times 10^{-6}$ 。通过与矽卡岩型矿床的对比, 发现岩浆岩全岩 Ga 含量与矽卡岩型矿床磁铁矿中的 Ga 含量呈正相关关系, 表明岩浆岩中较高的 Ga 含量有助于这些矿床中富 Ga 磁铁矿的形成。磁铁矿中 Ga 含量在钻孔空间变化上随深度增加而减小, 与磁铁矿 Ti、V、Al、Mn 的富集趋势相同, 表明温度对磁铁矿中 Ga 的富集有控制作用。未来从磁铁矿中提取 Ga 的技术取得突破后, 矽卡岩型铁矿床可能成为有前景的 Ga 来源。

**关键词:** 矽卡岩型铁矿床; 镓富集; 磁铁矿; 朱冲矿床; 中国东部

基金项目: 国家自然科学基金项目(42430811、42273065)

第一作者简介: 梁贤(1995-), 博士研究生, 研究方向: 成因矿物学与矿床地球化学. Email: liangxian@mail.hfut.edu.cn.

\*通信作者简介: 汪方跃(1982-), 副研究员, 研究方向: 现代分析测试技术和地球化学. Email: fywang@hfut.edu.cn.

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 太平洋深海沉积物中一种与钙十字沸石共生的 自生磷灰石的成因机制研究

樊文泉<sup>1</sup>, 周军明<sup>2</sup>, 蒋晓东<sup>1</sup>, 张欢<sup>3</sup>, 糜梅<sup>3</sup>, 袁鹏<sup>1\*</sup>, 董彦辉<sup>4</sup>, 刘冬<sup>3</sup>, 魏燕富<sup>5</sup>,  
Jörn Peckmann<sup>6</sup>

1. 广东工业大学 环境科学与工程学院, 广州 510006;
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458;
3. 中国科学院广州地球化学研究所 矿物学与成矿学重点实验室, 广州 510640;
4. 自然资源部第二海洋研究所 海底科学重点实验室, 杭州 310012;
5. 澳门科技大学 澳门环境研究院海岸带生态环境国家野外科学观测研究站, 澳门 999078;
6. 汉堡大学 地球系统科学系地球系统研究和可持续性中心, 德国汉堡 020146

磷在全球海洋物质循环中具有重要作用, 直接影响全球氧含量和碳循环。磷的埋藏是其在海洋中的长期保留形式, 并与大陆风化作用共同调节海洋磷储层的输入与输出。自生磷灰石是主要的磷埋藏形式, 占海洋磷埋藏的 50% 以上。早期研究认为, 自生磷灰石主要形成于生产力较高的特定沉积环境, 如大陆边缘和海山等。然而, 深海环境由于低有机质含量和较弱的初级生产力, 一直被认为不适合自生磷灰石的形成, 因此, 深海磷埋藏机制及其全球尺度影响未受到足够关注。然而, 本研究基于对多个西太平洋深海(>5000 m)沉积物样品的分析, 发现钙十字沸石与自生磷灰石共生现象在深海环境中广泛存在。结合微区矿物学分析和矿物合成模拟实验, 本研究提出了深海钙十字沸石-自生磷灰石的成因机制: 钙十字沸石能释放钙离子并吸附水体中的游离磷酸根, 形成理想的微环境来促进自生磷灰石的形成。钙十字沸石表面首先生成无定形磷酸钙,

随后快速成核结晶, 最终形成六方柱状自生磷灰石颗粒。由于钙十字沸石在深海沉积物中广泛分布(含量可高达 20%), 因此这类与钙十字沸石共生的自生磷灰石可能在低生产力的深海环境中广泛存在。根据钙十字沸石的沉积速率估算, 此类磷的累积速率达  $1.30\sim 2.56 \mu\text{mol}/\text{cm}^2\cdot\text{kyr}$ , 占深海磷总积累速率的  $1/8$  至  $1/3$ 。因此, 钙十字沸石诱导自生磷灰石可能是深海环境中普遍存在的一种矿物界面反应, 其在磷循环中的作用应被重视。此外, 尽管已有研究认为钙十字沸石本身并不具有富集稀土元素的能力, 而本研究发现该类自生磷灰石颗粒中稀土元素含量超过  $1000\times 10^{-6}$ , 说明该钙十字沸石-自生磷灰石共生现象对于深海稀土富集和循环可能扮演了不可忽视的角色。

**关键词:** 碳氟磷灰石; 微区矿物学; 深海盆地; 磷汇; 矿物成因机制

基金项目: 国家自然科学基金项目(42272043), 国家高层次人才特殊支持计划

第一作者简介: 樊文泉(1995-), 博士研究生, 研究方向: 资源矿物学、环境矿物学. Email: fanwenxiao@gdut.edu.cn

\*通信作者简介: 袁鹏(1975-), 教授, 研究方向: 矿物矿产资源及其地球化学和环境生态效应. Email: yuanpeng@gdut.edu.cn

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 基于黄铁矿和黄铜矿的矿床成因机器学习判别： 以中国内蒙古东升庙矿床为例

高展<sup>1</sup>, 张振杰<sup>1\*</sup>

1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083

沉积喷流型 (SEDEX) 和火山岩型块状硫化物 (VMS) 矿床是两种具有相似地质背景和成矿特征的重要金属矿床类型。准确区分这两种矿床类型对于深入理解矿床形成过程以及有效指导矿产勘查具有极为重要的意义。黄铁矿和黄铜矿的地球化学成分是区分矿床成因类型的关键指示矿物。然而, 传统的二维判别图解难以处理高维数据, 在面对复杂矿床成因类型的精确分类时存在明显不足。近年来, 随着黄铁矿和黄铜矿地球化学大数据的快速积累以及高精度机器学习 (ML) 算法的广泛应用, 为克服这一挑战提供了全新的途径。本研究广泛汇编了来自全球不同地质背景的黄铁矿和黄铜矿地球化学数据。基于这些丰富的数据, 构建了包括随机森林 (RF)、极端梯度提升 (XGBoost) 和多层感知器神经网络 (MLP) 在内的多种机器学习分类器, 用于矿床成因类型的预测以及相互验证。结果显示, 所有三种模型均展现出了极为优异的预测性能。尤为值得一提的是, 随机森林模型在解释黄铜矿和黄铁矿数据集中的特征重要性

方面表现最为出色, 明确揭示了镍 (Ni) 和硒 (Se) 是黄铜矿和黄铁矿中用于区分 SEDEX 和 VMS 矿床的关键微量元素。此外, 本研究还针对中国内蒙古东升庙锌铅铜矿床早期的黄铜矿和黄铁矿样品, 运用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱 (LA-ICP-MS) 技术进行了深入分析。经过训练的机器学习分类器被成功应用于对这些样品的成因类型进行判别。判别结果显示, 早期细粒黄铁矿和黄铜矿呈现出典型的 VMS 矿床特征。结合这些结果以及以往对该矿床岩石学、地球化学和同位素数据的综合研究, 我们提出东升庙矿床的早期成矿过程主要受控于海底火山活动。这一结论不仅有力验证了基于黄铁矿和黄铜矿地球化学的机器学习分类器在矿床成因判别中的可靠性和适用性, 而且为东升庙矿床的成矿过程研究提供了新的、极具价值的证据。

**关键词:** 黄铁矿; 黄铜矿; 微量元素; 机器学习; 矿床类型分类

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 豆荚状铬铁矿中不同类型矿物包裹体成因及指示意义

熊发挥<sup>1\*</sup>, 徐向珍<sup>1</sup>, 邱添<sup>1</sup>, 桂维彬<sup>1</sup>, 谢慧丹<sup>1</sup>, 杨经绥<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院地质研究所 火成岩与矿物学研究室, 北京 100037

豆荚状铬铁矿是十分重要的战略资源, 目前学者对它们的成因尚未形成统一的认识。先前的研究主要从岩石学、地球化学和地质年代学等方面对铬铁矿的成因进行了约束, 但对铬铁矿包裹体类型及其反映的地质过程还缺乏系统的总结和研究。通过对不同岩体的铬铁矿中矿物包裹体进行详细的研究, 发现铬铁矿中含有丰富的矿物包裹体, 分为 5 大类: (1) 无水硅酸盐类矿物包裹体, 包括橄榄石、斜方辉石、单斜辉石等; (2) 含水矿物, 包括角闪石、绿泥石、蛇纹石等; (3) 含铂族元素矿物和硫化物, 包括 Os-Ir 合金、Pt-Fe 合金、自然 Os 和自然 Ir, 以及黄铁矿、黄铜矿、磁黄铁矿等; (4) 壳源矿物, 包括锆石、金红石、石英、钙铬榴石等;

(5) 异常矿物, 包括金刚石、碳硅石、柯石英等超高压矿物, 以及自然镍、自然铬、自然铁和自然钛等。通过对比研究, 确定它们形成于不同期次, 进而初步拟定豆荚状铬铁矿形成过程存在四个阶段, 分别为地幔深部的地幔柱/地幔对流、大洋岩石圈中地幔橄榄岩的部分熔融/岩浆结晶分异、俯冲带环境中的岩石-熔体反应、后期的热液蚀变/流体改造。认为铬铁矿中矿物包裹体记录了铬铁矿成矿各个时期的环境条件, 针对铬铁矿中包裹体的详细研究可以更加准确地揭示铬铁矿的形成过程。

**关键词:** 豆荚状铬铁矿; 蛇绿岩; 矿物包裹体; 多阶段; 成因

国家自然科学基金项目 (U2344202, 42172069, 92062215, 42272048), 国家重点研发计划项目 (2023YFF0804401), 西藏自治区科技计划项目 (XZ202401YD0006) 和中国地质调查局工作项目 (编号 DD20240075, DD20240118, DD20221630) 联合资助。

第一作者: 熊发挥 (1985-), 博士, 研究员, 主要从事蛇绿岩和铬铁矿及地幔矿物学研究。Email: xiongfahui@126.com。

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 岩浆岩区矿物学参数填图及成矿预测：以北太行地区为例

张聚全<sup>1,2,3\*</sup>, 张乐民<sup>1</sup>, 吴晓贺<sup>1</sup>, 郭子恺<sup>1</sup>, 温雨菁<sup>1</sup>, 卢静<sup>1,2,3</sup>

1. 河北地质大学 地球科学学院, 石家庄 050031;
2. 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 石家庄 050031;
3. 河北省战略性关键矿产资源协同创新中心, 石家庄 050031

成矿岩体的识别标志一直是矿床学界研究的热点问题。众多学者对比分析成矿岩体与不成矿岩体的地球化学和矿物学特征, 获得了一系列有意义的认识, 如 Sr/Y 比值>35、V/Sc 比值>10 可作为板块会聚边缘铜矿床的成矿潜力指标, 高的氧逸度 (大的锆石 Ce 异常值) 有利于斑岩型铜金矿的成矿。然而, 实际找矿实践中很难通过单一指标来判断岩体是否成矿。那么我们是否可以用一系列矿物参数的组合来进行成矿预测呢? 很多矿物学参数具有成矿的指示意义, 如果我们利用指示有利成矿的矿物学参数进行填图, 是否可以有效圈定找矿靶区, 更快圈定成矿岩体呢? 基于上述思考, 我们对北太行地区的中生代侵入体进行了较为系统的取样, 通过电子探针和 LA-ICP-MS 分析测试, 获得锆石、黑云母

的相关参数, 并利用相关参数进行了填图。填图参数包括: 黑云母的 Mg/Fe、Cl 含量、卤素逸度、温度、TiO<sub>2</sub>、CaO 含量、锆石 Hf 同位素、Ce 异常、氧逸度、Eu 异常等参数。根据锆石和黑云母相关参数的矿物学填图结果, 选择了 10 种参数圈定了成矿有利地区。根据有利成矿因素叠加特征, 选择有利因素 6 条以上划分为 A 级预测区, 5 条为 B 级预测区。研究区共圈定 A 级区 3 个, B 级区 5 个。结果显示区域内的大、中型矿床和多数小型矿床都位于预测区内, 表明该方法在岩浆岩区进行成矿预测是有效的。

**关键词:** 矿物学填图; 成因矿物学; 岩浆岩; 矿物学参数; 成矿预测

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 矿物学研究揭示地球深部挥发分（氢、氮、氟） 循环之间的联系

杨燕<sup>1\*</sup>

1. 浙江大学 地球科学学院, 杭州 310058

挥发分（例如水、碳、氮、卤素等）在地球内外之间的循环过程是认识其来源、分布、资源环境效应以及宜居行星演化的关键。作为固体地球的基本组成单元，矿物是挥发分在地球内部传递和赋存的主要载体。水在地幔如何存在？地表的氮和氟有多少能够被传递至深部地幔？地球内部氮、氟与水的循环是否存在联系？围绕这些科学问题，我们利用微区分析技术，研究了俯冲带含水矿物和地幔名义上无水矿物中水、氮和氟的赋存机制、稳定性和分配等化学行为及其相互作用机制。为了正确解读天然地幔矿物所呈现的复杂的氢组分（Grant et al. 2007），我们利用原位高温、高压红外光谱观察了橄榄石、辉石、瓦兹利石和林伍德石等地幔重要组成矿物中的水在地幔温压下的行为，发现不同赋存机制的水具有不同的稳定性，并且在矿物晶格中发生迁移。为了探讨板片深俯冲过程中氮和氟的传递效率，我们研究了沉积物中的氮在 10~12 GPa, 800~1100 °C 温压条件下的分配行为，以及蛇纹石中的氟在 2.5~8 GPa, 850~1150 °C 条件下的分配行为。发现板片深俯冲过程中，K-hollandite 是氮的主要载体，氮在 K-hollandite 与流体之间的分配系数为 0.008~0.064，据此估计沉积物板片对深部地幔氮的贡献不超过 15%；蛇纹石分解之

后的硅镁石族矿物是深部地幔重要的储氟载体，氟在硅镁石族矿物和流体之间的分配系数为 3~25，蛇纹石中高达 93% 的氟能够被硅镁石族矿物继承，高效地传递至深部地幔。氮主要以铵（NH<sub>4</sub>）的形式存在云母和长石等矿物晶格中（Busigny and Bebout 2013），而氟和 OH 具有相似的尺寸和电价，在矿物晶格中取代氧或者 OH（Crépisson et al. 2014; Huges and Pawley 2019），矿物晶格中氮和水、氟和水在赋存方式上的关联表明氮循环和水循环、氟循环和水循环之间存在联系。为了厘清这种联系，我们利用原位高温高压谱学研究了多硅白云母和长石的脱氮和脱水过程，金云母、磷灰石和橄榄石的脱氟和脱水过程。发现在高温高压下，氮提高多硅白云母和长石的晶格稳定性，氟不仅提高金云母的晶格稳定性，还提高磷灰石和橄榄石中水的稳定性，这些发现表明氮和氟的存在，促进水向地球内部更深处传递。以上工作从矿物学的角度揭示了地幔水的赋存状态，板片深俯冲过程中氮和氟的传递效率，以及氮、氟循环与水循环的联系。

**关键词：**矿物谱学；挥发分；稳定性；分配行为；地幔

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 海林陨石坑撞击起源的矿物学证据

尹锋<sup>1\*</sup>

1. 北京高压科学研究中心, 北京 100193

天体之间的碰撞作用形成的撞击坑是类地行星表面常见的地质构造。目前地球上仅发现了 200 余个陨石撞击坑, 远少于相邻的月球 (超过 130 万个直径大于 1 km 的撞击坑)。通过遥感手段识别环状凹坑地貌是寻找地外星球表面撞击坑的主要方法, 但由于地球活跃的内外动力地质作用, 类似地貌特征仅能作为寻找地球陨石撞击坑的线索。判别地球陨石撞击坑的“指纹”证据主要是矿物中的超高温和超高压变质特征, 其中最常见的是石英面状变形特征 (PDFs, planar deformation features)。海林陨石坑是我国新近证实的一个简单撞击坑, 位于黑龙江省海林市柴河镇的红光林场, 中心坐标为 129°25'51"E 和 45°18'08"N。海林坑形态较为完整, 仅东部和东北部缺失约三分之一的坑缘; 剖面上呈碗状, 坑缘和坑底高差约 50~180 m; 平面上呈椭圆形, 南北直径约 1360 m, 东西直径约 1200 m。坑区基岩主要为新元古代花岗闪长岩

( $\gamma\delta\text{Pt}_3$ ), 但仅在坑缘顶部有基岩出露, 坑底被第四纪湖泊沉积物覆盖。在坑缘顶部、坑缘内侧山坡以及坑底, 可见较多花岗闪长岩角砾散落分布, 粒径数十厘米到数米不等。在采自坑内河沟的岩石碎屑沉积物中, 发现有少量石英颗粒发育 PDFs 冲击变质特征。对 400 余个薄片的观察结果表明, 其中有 40 余颗石英颗粒发育 PDFs, 占石英颗粒总数的比例低于 1%。石英中的 PDFs 呈页理状, 单个宽度低于 2  $\mu\text{m}$ , 互相间距 2~5  $\mu\text{m}$ ; 以一组为主, 少量含有两组, 多数平行石英晶体的 {10-13} 方向。石英 PDFs 的方向分布与冲击压力有关, 以 {10-13} 为优势方向说明冲击压力在 10~20 GPa 之间。石英 PDFs 的发现为海林坑的撞击起源提供了坚实证据。

**关键词:** 海林陨石坑; 简单撞击坑; 石英面状变形特征

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 川西龙门山中段清平磷矿床中锶赋存状态及富集机制： 矿物化学制约

姚毅<sup>1,2\*</sup>, 王浩<sup>1,2</sup>, 石亮<sup>1,2</sup>, 刘军省<sup>3,4</sup>, 贺天全<sup>5,6</sup>

1. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清平磷矿有限公司, 四川德阳 618299;

2. 四川蜀道矿业集团德阳吴华清平磷矿有限公司技术中心, 四川德阳 618202;

3. 中化地质矿山总局地质研究院, 北京 100101;

4. 自然资源部矿区生态修复工程技术创新中心, 北京 100083;

5. 四川省第二地质大队非金属资源勘查研究中心, 成都 611930;

6. 四川省化工地质勘查院, 成都 611930

磷矿作为战略性非金属矿产资源, 对保障国家粮食安全、促进农业可持续发展以及推动磷化工产业高质量发展具有至关重要的作用。川西龙门山中段清平磷矿床是我国磷矿资源的重要分布区, 其研究对于地方经济发展和国家战略资源的安全具有重要意义。本课题聚焦于清平磷矿床中锶元素的赋存状态和富集机制, 尤其是矿物化学特性对锶元素分布和富集过程的制约作用。锶作为一种重要的微量元素, 在地球化学循环中扮演着关键角色, 并在磷矿资源的开发利用中具有潜在的经济价值。通过对清平磷矿床进行详细的地质调查和样品采集, 结合先进的矿物学分析技术和地球化学模拟方法, 本课题揭示了锶元素在磷矿床中的赋存特征、富集规律及其与矿物化学特性之间的内在联系。研究结果表明, 锶元素在磷灰石和方解石矿物中的赋存状态受到晶体结构的严格控制, 而其富集过程则与成矿流体的化学性质、温度、压力等地质环境因素紧密相连。本课题采用电子探针微区分析技术, 对矿物中的锶元素进行了精确的定量分析, 确定了锶在矿物中的取代机制和分布规律。研究发现, 锶元素在磷灰石中的取代主要遵循钙离子的晶格位置, 而在方解石中则表现为锶与钙的有序分布。此外, 通过同

位素地质学的研究, 本课题进一步探讨了锶元素的来源和迁移路径, 为理解磷矿床的成矿作用提供了新的线索。地球化学模拟结果表明, 锶的富集受到矿物溶解度、饱和度和流体-岩石相互作用等多重因素的制约。在矿床形成过程中, 热液流体的流动和矿物的早期结晶对锶的富集起到了关键作用。同时, 矿床的地质构造和围岩性质也对锶的最终富集状态产生了重要影响。这些发现为磷矿床的成矿理论和找矿实践提供了新的视角, 有助于推动磷化工产业的技术创新和产业升级。本课题的研究成果不仅丰富了磷矿床成矿理论, 而且对于指导川西地区乃至全国磷矿资源的勘探和开发具有重要的指导意义。通过深入分析矿物化学对锶赋存状态及富集机制的制约关系, 本研究为矿产资源的可持续开发和利用提供了宝贵的经验和启示。同时, 本课题的研究成果也为磷矿资源的综合利用和深加工提供了科学依据, 有助于推动磷化工产业的技术创新和产业升级。在全球磷资源日益紧张背景下, 本课题的研究对于保障国家粮食安全和促进农业可持续发展具有战略意义。

**关键词:** 川西龙门山中段; 清平磷矿床; 锶赋存状态; 富集机制; 矿物化学制约

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 基于机器学习和磷灰石成分识别东昆仑祁漫塔格地区志留纪-泥盆纪花岗岩成因类型和成矿潜力

钟世华<sup>1\*</sup>, 刘嘉情<sup>1</sup>

1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院, 山东青岛 266100

祁漫塔格地区位于东昆仑造山带的西段,是我国西北地区重要的斑岩-矽卡岩 Cu-Fe-Pb-Zn 多金属成矿带。大量研究显示,祁漫塔格地区花岗岩类主要集中出现于两个时期,即 435~370 Ma 和 245~196 Ma,分别形成于原特提斯洋和古特提斯洋闭合后的碰撞阶段。长期以来,祁漫塔格地区被作为三叠纪成矿大爆发的典型案例,因此三叠纪花岗岩类(即 245~196 Ma)一直是工业界和学术界关注的焦点。不过,近些年来来的地质调查显示,该地区成矿历史十分复杂。与许多典型斑岩成矿系统类似,祁漫塔格地区斑岩-矽卡岩矿床常见多期次、多类型花岗岩体在矿区范围内共存。并且,越来越多的研究指出在原特提斯洋闭合后的碰撞阶段,即志留-泥盆纪,也可以形成斑岩-矽卡岩矿床,但是这一观点远未形成共识。为了进一步揭示东昆仑祁漫塔格地区志留-泥盆纪岩浆活动规律和成矿规律,本文在汇编全球磷灰石数据基础之

上,训练得到了能够识别花岗岩成因类型的支持向量机模型以及能够识别斑岩-矽卡岩 Cu-Fe 多金属矿床成矿岩体和非成矿岩体的极致梯度提升模型。在此基础上,对祁漫塔格地区典型志留-泥盆纪花岗岩类样品进行了系统采集,然后利用训练得到的机器学习模型,判别它们的成因和成矿潜力。研究结果表明,87%的磷灰石被判定来自 I 型花岗岩,并且 34%的磷灰石颗粒被判定来自成矿岩体。这证明祁漫塔格地区志留-泥盆纪花岗岩大都属于 I 型花岗岩,且部分岩体具有形成斑岩-矽卡岩 Cu-Fe 多金属矿床的潜力。结合区域上最新研究成果,可以看出祁漫塔格地区志留-泥盆纪斑岩-矽卡岩矿床找矿潜力巨大,应该是接下来实现西北地区 Cu-Fe 多金属资源找矿勘查的重要突破口。

**关键词:** 机器学习; 磷灰石; 祁漫塔格; 东昆仑

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 乙醇酸盐类有机矿物的成因机制探究

胡明阳<sup>1</sup>, 连宾<sup>2\*</sup>

1. 南京师范大学 生命科学学院, 南京 210023;

2. 南京师范大学 海洋科学与工程学院, 南京 210023

有机矿物是在地质作用下形成的有机晶体, 与生命活动有密切联系。自 2018 年发现第一种乙醇酸盐类矿物 *lazaraskeite*, 目前已发现 7 种乙醇酸盐类矿物, 使其成为仅次于草酸盐类矿物的第二大有机矿物。乙醇酸是植物光呼吸的重要中间物, 也可由微生物代谢产生, 在自然界长期且广泛存在。然而, 相较于草酸盐类矿物, 乙醇酸盐类矿物发现晚、产地少, 这与乙醇酸在自然界的广泛分布相悖。因此, 探究乙醇酸盐类矿物的成矿过程、机理和保存条件, 有助于理解乙醇酸盐类矿物的成因机制及生命活动参与有机矿物形成的基本过程。本研究合成了所有 7 种乙醇酸盐晶体, 测试了其合成温度、溶解度、热稳定性等物理化学性质, 同时分析了采集自美国亚利桑那州图森市圣卡塔琳娜山脉的 *lazaraskeite* 和 *lianbinite* 的稳定同位素数据。结果显示, 这 7 种乙醇酸盐多具有较高的溶解度, 范围从 5.4 mg/mL 至 2438.3 mg/mL, 由此推断已发现的乙醇酸盐类矿物从水溶液中结晶成矿, 且可能经历了复杂的结晶-溶解-再结晶过程; 研究发现, 乙醇酸盐类矿物的合成温度有明显区别, 如 *lazaraskeite*-M<sub>2</sub> 亚型为乙醇酸铜于低于 220 K 时转化形成的低温亚型, *glecklerite* [Na(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>)] 仅在高于 35 °C 可以合成, 低于 35 °C 时会形成 Na(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>) · 0.5H<sub>2</sub>O,

*jimkrieghite* [Ca(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub>] 不论何种温度均由 *rasmussenite* [Ca(C<sub>2</sub>H<sub>3</sub>O<sub>3</sub>)<sub>2</sub> · 3H<sub>2</sub>O] 脱水转化而来; 热重分析结果显示含结晶水的乙醇酸盐晶体大多于 60~80 °C 开始失水, 而乙醇酸晶体于约 80 °C 开始分解, 表明乙醇酸盐类矿物仅能在接近地表的低温环境下存在。对 *lazaraskeite* 和 *lianbinite* 的 <sup>13</sup>C 测试结果表明, 其乙醇酸根的 δ<sup>13</sup>C‰ 与高扩散速率、优先羧化速率的 C3 植物产生有机物的 δ<sup>13</sup>C‰ 一致, 表明图森市产地矿样的乙醇酸根可能来源于当地 C3 植物的代谢物; 其常在岩石孔洞内形成晶洞的特性则表明其成矿时间应当较晚。综上, 乙醇酸盐类矿物的形成应遵循以下成因模式: 来自高等植物、藻类和微生物等生命活动产生的乙醇酸通过降水溶解, 形成含乙醇酸的酸性流体; 土壤矿物在与含乙醇酸的流体作用后释放出阳离子; 流体中的各种乙醇酸盐可通过蒸发结晶、冷却结晶或冻结结晶等方式结晶; 结晶成矿的乙醇酸盐还可因降水而经历多次溶解-再成矿过程, 甚至可能被微生物分解利用。因此, 干旱地区或封闭环境的乙醇酸盐类矿物更可能被长期保存。(感谢杨和雄和谷湘平提供指导及矿物样品)

关键词: 乙醇酸盐类矿物; 有机矿物; 矿物成因

第一作者简介: 胡明阳 (1998-), 硕士研究生, 研究方向: 有机矿物与生物矿物, Email: humingyangk@gmail.com

\*通信作者简介: 连宾 (1964-), 教授, 研究方向: 地质微生物学, Email: bin2368@vip.163.com

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 湘南地区通天庙花岗岩云母的矿物学研究：岩浆-热液演化过程与稀有金属的富集成矿

周睿<sup>1</sup>, 郭春丽<sup>2,3\*</sup>, 李小伟<sup>1</sup>, 陈振宇<sup>2</sup>, 郝昭歌<sup>1</sup>, 马星华<sup>2</sup>

1. 成因矿物学研究中心 中国地质大学(北京)地质资源勘查实验教学中心, 北京 100083;

2. 成矿作用与资源评价自然资源部重点实验室 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

3. 深地探测与矿产勘查全国重点实验室 中国地质科学院, 北京 100094

高分异花岗岩在岩浆-热液演化过程中通常伴有稀有金属(Li、Rb、Cs、Nb、Ta等)矿化。然而,稀有金属在花岗岩中的富集机制仍存在较大争议。湖南通天庙含钨铷钽稀有金属花岗岩位于南岭成矿带中段,已有锆石 U-Pb 定年数据指示岩体形成于 132.9~118.6 Ma,大地构造位于北东向郴州-临武和北西向耒阳-临武断裂带的交汇处。花岗岩体具有明显的垂直分带结构,由底部到顶部依次为肉红色铁锂云母碱长花岗岩带(I带)、灰白色铁锂云母碱长花岗岩带(II带)、灰白色锂云母碱长花岗岩带(III带)。本次研究采用背散射(BSE)成像、电子探针(EMPA)和矿物原位微量(LA-ICP-MS)的手段对这三类花岗岩的云母类矿物展开了精细的结构和成分分析。结果表明:不同分带云母可划分为两大类。具体来说,第一类云母成分较为均一,无环带,自形程度较好。从I带到II带再到III带,云母类型由铁锂云母向锂云母转变,伴随有 SiO<sub>2</sub>、F 和 MnO 含量的逐渐升高,以及 FeO 含量的下降。同时,随着 K/Rb 值降低,Rb、

Li 含量逐渐上升。云母成分的变化指示岩体垂直分带结构的形成以及 Li 和 Rb 的逐渐富集主要受岩浆结晶分异的控制。第二类云母具有明显的核-边环带结构,在 BSE 图像中,核部云母颜色较亮,而边部云母颜色较暗。对于第二类云母的核部,其 Li、Rb 和 Cs 含量明显高于边部,而 F 含量低于边部,指示了岩浆演化后期强烈的流体出溶作用。云母的结构和化学特征表明,通天庙高分异花岗岩型稀有金属矿床经历了早期岩浆分异和晚期流体出溶两个阶段。演化早期随着岩浆分异作用的进行,使锂、铷等稀有金属元素在残余熔体中不断富集,这有利于稀有金属成矿;在演化晚期,强烈的流体出溶作用使锂、铷等稀有金属从通天庙的高分异花岗岩体系中丢失,因此不利于稀有金属成矿。精细矿物学工作对于查明高分异花岗岩系统内稀有金属富集机制具有重要的指示意义。

**关键词:** 稀有金属; 结晶分异; 流体出溶; 高分异花岗岩; 云母

基金项目: 国家自然科学基金项目(92162210)

第一作者简介: 周睿,男,1998年生,博士生,地质学专业,研究方向:成因矿物, E-mail: 1023895690@qq.com。

通讯作者:

郭春丽,女,1978年生,研究员,从事花岗岩及其相关稀有稀散金属成矿作用研究, E-mail: gchunli@126.com。

李小伟,男,1985年生,教授,博士生导师,从事成因矿物学与岩石学研究工作。E-mail: xwli@cugb.edu.cn。

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 斜长石中铜纳米粒子包裹体特征与光学性质相关性的建立

王成思<sup>1\*</sup>, 沈锡田<sup>1</sup>

1. 中国地质大学(武汉)珠宝学院, 武汉 430074

随着纳米技术在地学领域的深入应用,金属矿产常以纳米粒子形式赋存于寄主矿物/岩石中的现象被不断揭示。然而,纳米尺度金属元素的赋存状态难以观测和示踪,已成为制约其形成机制研究的关键科学问题。本研究以美国俄勒冈州哥伦比亚玄武岩省溢流玄武岩中富铜斜长石巨晶捕虏体为研究对象,首次建立了天然铜纳米粒子宏观光学响应特征与微观赋存状态的定量关联,为“不可见”金属元素的探测提供了创新性解决方案。

本研究通过高分辨率透射电镜表征,我们观察到铜元素以纳米粒子(10~20 nm)的形式赋存于拉长石单晶中。结合晶体颜色特征和偏振吸收光谱特征,我们发现:这些铜纳米粒子的几何特征与拉长石的光学特征具有直接相关性。当 Cu-NPs 以球体存在于晶体中时,会使长石呈现各向同性的红色,并在 563 nm 处产生 1 个吸收峰;当以椭球体定向排列于晶体中时,会使其呈现绿色-红色随方向变化的强二色性,并在 563 nm 和 610 nm 处分别产生 2 个吸收峰。基于纳米材料学理论分析,上述现象可

归因于金属纳米粒子的局域表面等离子体共振(LSPR)效应。

为验证该理论在天然矿物中的适用性,本研究整合多尺度验证方法:(1)将偏振紫外可见吸收光谱强度在偏振角度上的分布与纳米粒子排布方向相对比,建立了二者之间的空间相关性;(2)通过热处理进行纳米粒子与颜色的吸收-再析出实验,建立了铜纳米包裹体与颜色的动态相关性;(3)根据 LSPR 理论中关于粒子消光系数计算公式,结合 HRTEM 实测参数进行数值模拟,获得与实验数据吻合的理论计算结果;(4)采用有限时域差分法光学模拟纳米粒子-光波相互作用过程,模拟光谱特征与实测光谱呈现高度一致性。

本研究成功构建了基于 LSPR 理论的创新研究方法,探索了通过宏观光学性质反演非金属矿物中金属纳米粒子赋存状态与几何特征新路径。

**关键词:** 金属纳米粒子; 拉长石; 局域表面等离子体共振效应

• 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 •

## 最新矿物命名规则及对易解石矿物族的命名修正

诸泽颖<sup>1</sup>, 陈振宇<sup>1\*</sup>, 于洪<sup>1</sup>

1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037

矿物种类是通过判断端元组分来实现, 矿物命名规则在一定程度上决定了未知矿物是否为新的矿物端元。长期以来矿物端元确定标准基于“主要成分原则”, 即元素在特定晶体结构位置上是否占大多数。然而在一些复杂的矿物族中端元的确立更为复杂。由此国际矿物协会-新矿物命名及分类委员会 (IMA-CNMNC) 近期对矿物的命名规则进行了拓展和修正, 提出了不同位置上耦合多价替代 (heterovalent substitutions at two sites)、优势价规则 (dominant-valency rule) 以及位点-总电荷法 (Site-total-charge approach) 对新矿物端元的精确界定。新的矿物命名规则与方法将“主要成分原则”拓展为将相同价态的一组原子列为单个成分。不同位置上的耦合多价替代指的是在完全固溶体且无结构变化的条件下, 元素在两个晶体结构位置上发生异价取代以达到电价平衡的目的。优势价规则是根据同一价态的一组原子数数量多少来判断端元元素价态。该方法又基于电价平衡原则进一步延伸出了位点-总电荷法, 通过实验式中找出优势端元电荷排列, 继而从端元电荷排列中推导出优势端元。新的矿物命名规则可应用于结构复杂矿物端元。易解石族矿物一

般化学式为  $AB_2O_6$ , 其中 A 位置主要由稀土元素, Ca 等占据, 而 B 位置常由 Ti、Nb、Ta 占据。根据不同位置上的耦合多价替代原则, 易解石族 A 和 B 位置可发生异价替代以保证电价平衡  $^A(REEs)^{3+} + ^B Ti^{4+} \leftrightarrow ^A Ca^{2+} + ^B(Nb, Ta)^{5+}$ , 由此易解石族矿物可简单分为维铌钙矿 ( $CaNb_2O_6$ )、钽钙矿 ( $CaTa_2O_6$ ) 以及易解石族  $[REE(TiNb)O_6]$  和钽易解石族  $[REE(TiTa)O_6]$ 。其中易解石族  $[REE(TiNb)O_6]$  的一般分子式表明易解石与铌易解石公用一个分子式, 因此本研究提出铌易解石族与易解石族矿物在元素和晶体结构均存在重复的现象, 建议废除铌易解石族的命名。由此本研究通过应用最新的矿物命名规则重新修正了易解石族矿物为铈易解石  $[Ce(TiNb)O_6]$ , 钷易解石  $[Nd(TiNb)O_6]$ , 钷易解石  $[Y(TiNb)O_6]$ , 钷钽易解石  $[Y(TiTa)O_6]$  以及铈钽易解石  $[Ce(TiTa)O_6]$ , 废除了铌易解石族矿物, 得到了国际矿物协会-新矿物命名及分类委员会 (IMA-CNMNC) 的认可。

**关键词:** 矿物命名规则; 易解石族矿物; 矿物族修正

本文受国家重点研发计划项目 (编号: 2024YFC2909300)、国家自然科学基金项目 (编号: 41902037; 42272087)、中国地质调查局地质调查项目 (项目编号: DD20221684, DD20221695, DD20190379, DD20160346) 联合资助

第一作者简介: 诸泽颖, 女, 1990 年生, 副研究员, 主要从事稀有金属成矿研究; E-mail: zhuzeying\_nju@163.com

通讯作者简介: 陈振宇, 男, 1978 年生, 研究员, 主要从事矿床矿物学与微束分析研究; E-mail: czy7803@163.com

· 专题 30: 成岩成矿作用的矿物标识、新矿物研究及人工智能在矿物学研究中的创新应用 ·

## 集宁碱性玄武岩中橄榄石的成分特征及其深部过程记录

唐宗源<sup>1,2</sup>, 赵国春<sup>3,2\*</sup>, 孙德有<sup>4</sup>, 邓昌州<sup>5</sup>, 李杰<sup>1</sup>

1. 河北地质大学 河北省战略性关键矿产资源重点实验室, 石家庄 050031;

2. 西北大学 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710029;

3. 香港大学 地球科学系, 香港 999077;

4. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061;

5. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

碱性玄武岩能够记录地幔物质组成和深部动力学过程的信息, 是研究深部物质循环的重要对象之一。位于华北克拉通西缘的集宁新生代碱性玄武岩 ( $7.60 \pm 0.04$  Ma), 以其保存完整的橄榄石-单斜辉石结晶序列, 为揭示岩石圈地幔演化提供了关键样本。电子探针分析显示, 橄榄石具有较低的镁橄榄石分子 (Fo 为 77~83) 和镍含量 ( $487 \times 10^{-6} \sim 2239 \times 10^{-6}$ ), Fe/Mn 比值 (60~85) 较高, 表明其形成于富石榴石源区。单斜辉石为透辉石-普通辉石系列 (Wo 41.29~46.36, En 39.84~45.83, Fs 9.74~12.78), 具有较高的  $\text{TiO}_2$  (0.78%~2.28%) 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.78%~6.34%) 含量, 进一步佐证岩浆源自深部石榴石稳定域。另外, Sr-Nd-Mg 同位素组成显示, 集宁碱性玄武岩具有较轻的镁同位素组成 ( $\delta^{26}\text{Mg} = -0.56\text{‰}$  至  $-0.42\text{‰}$ ) 和 EMI 型地幔端元特征 ( $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.70487 \sim 0.70524$ ;  $\epsilon_{\text{Nd}}$

( $t$ ) =  $-4.95 \sim +0.82$ ), 揭示源区经历了前寒武纪俯冲带碳酸盐交代作用的改造。基于矿物相平衡与温压计反演, 该岩浆系统演化可划分为两阶段: (1) 在岩石圈-软流圈边界 (约 70~100 km) 附近的深部岩浆房中, 单斜辉石和石榴石发生早期结晶分异, 形成高 Ti 碱性岩浆; (2) 岩浆上升至浅部岩石圈地幔 (<0.4 GPa) 时, 碱性岩浆与斜方辉石岩发生相互作用, 促进了橄榄石和单斜辉石的结晶。这种多阶段的分异结晶过程最终控制了观察到的矿物组合特征。矿物化学成分变化揭示了从深部地幔源区到地表的完整岩浆演化历史, 为理解华北克拉通西部深部地质过程提供了重要约束。

**关键词:** 新生代; 橄榄石; Sr-Nd-Mg 同位素; 碱性玄武岩; 华北克拉通

基金项目: 河北省教育厅科学研究项目 (批准号: QN2022158)

第一作者简介: 唐宗源, 讲师, 研究方向: 岩石地球化学. E-mail: tangzy19@hgu.edu.cn

\*通信作者简介: 赵国春, 教授, 研究方向: 前寒武纪地质研究. E-mail: gzhao@hku.hk