

北阿尔金喀腊大湾铁矿成矿时代及成因机制

陈钰瑶¹, 曹玉亭^{1*}, 刘良², 王超², 杨文强², 盖永升²,
解添合¹, 宋里豪¹, 谢斐¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院 山东省沉积成矿作用与沉积矿产重点实验室, 山东 青岛 266590

2. 西北大学 地质学系 大陆动力学国家重点实验室, 陕西 西安 710069)

喀腊大湾铁矿位于阿尔金山东段, 区内已发现的矿床有喀腊达坂铅锌矿、喀腊达坂西铅锌矿、喀腊大湾西铅锌矿、喀腊大湾铁矿、万荣铁矿、阿北银铅矿、白尖山铁矿等。矿区内广泛发育中酸性侵入岩和基性—超基性侵入岩, 成矿作用发生于早古生代火山岩-沉积岩与奥陶系花岗岩的接触带。但该铁矿床的成因类型仍具有争议(陈柏林等, 2016; Wang et al., 2022), 因此其成矿时代和成矿机制也尚不明确。

本文在前人研究的基础上, 系统的开展 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、单矿物原位微量元素分析、矿物主量分析、全岩主微量和 Fe 同位素测定, 以期查明其成矿时代及成矿物质来源和运移, 并确定其矿床类型, 主要得出以下认识。

(1) 喀腊大湾铁矿矿体赋存于奥陶系侵入岩和碳酸盐岩的接触带中, 其矿体中由热液蚀变作用形成的透闪石、绿帘石和绿泥石等含水钙镁铁锰硅酸盐矿物十分发育, 显示典型矽卡岩特征。并通过 Ti- (Ni/Cr) 和 (V/Ti)-Fe 特征分析认为铁矿石中磁铁矿形成于热液交代作用, 在 Ni/(Cr+Mn) - (Ti+V) 和 (Ca+Al+Mn) - (Ti+V) 判别图解中, 磁铁矿均投在矽卡岩型区域。因此综合野外产状、岩相学和地球化学特征认为喀腊大湾铁矿为矽卡岩成因。

(2) 稀土元素能示踪成矿物质来源, 典型矽卡岩型铁矿中铁矿石稀土元素总量低于矽卡岩, 且分布模式为强右倾型, 具有继承性。研究得出喀腊大湾铁矿中铁矿石的稀土元素总量 8.29~11.06ppm, 低于中酸性岩浆岩 158.8~476.3ppm 和变玄武岩 87.7~11.06ppm, 稀土分布模式都表现为右倾型, 且磁铁矿与变玄武岩的稀土配分模式具有继承性特征, 故推断 Fe 的富集应该主要来源于玄武岩。

在高温岩浆-热液成矿过程中, 出熔流体富集 Fe 的轻同位素, 岩浆岩则富集铁的重同位素。本文蚀变后的变玄武岩 ($\delta^{56}\text{Fe}$ 为 0.02~0.10) 比未蚀变玄武岩 ($\delta^{56}\text{Fe}$ 为 0.129~0.197) 和铁矿石 ($\delta^{56}\text{Fe}$ 为 0.14~0.17) 更富集铁的轻同位素, 且具有 Ca 高 Fe 低的特点, 这是因为在热液蚀变的过程中, 含有大量的 Fe^{3+} 磁铁矿结晶优先从成矿流体中带出重的 Fe 同位素, 并与大理岩发生物质交换, Fe 析出富集形成磁铁矿。表明喀腊大湾的铁质来自于玄武岩地层。

(3) 锆石 U-Pb 定年获得流纹质英安岩年龄为 478Ma、495±4Ma、506.2±3.7Ma、变玄武岩主要为 450Ma 和 480Ma、花岗闪长岩为 477±5Ma, 揭示了矿区经历了 506-478Ma 和 477-450Ma 两期岩浆活动。

综上, 推断喀腊大湾铁矿的形成分别受到两期岩浆活动的影响, 在 506-478Ma 期间, 玄武岩和流纹岩与大理岩互层产出, 后期在 477-450Ma 期间, 花岗闪长岩的侵入为 Fe 的运移提供了热源和动力, 促进了玄武岩与大理岩进行物质交换而富集成矿。

参考文献:

陈柏林, 李丽, 祁万修, 陈正乐, 王永, 郝瑞祥, 李松彬, 周永贵, 蒋荣宝, 韩凤彬, 崔玲玲, 和赵树铭. 2016. 阿尔金山喀腊大湾铁矿田地质特征与形成时代 矿床地质, 35, 315-334.

Wang C M, Zhou M L, Zhong, L F, and Li D F, 2022. Garnet and titanite U-Pb dating of the Kaladawan Fe-Mo orefield in the Altyn Mountains, NW China: Constrains for ore genesis. Ore Geology Reviews 140.

江南造山带多期钨成矿作用：来自黑钨矿 U-Pb 年代学和微量元素约束

马正龙¹, 陆建军^{1*}, 章荣清¹, 黄旭栋²

(1. 南京大学 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 江苏 南京 210023; 2. 南京师范大学 海洋科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

黑钨矿是钨矿床中最重要的矿石矿物之一, 同时也作为伴生矿物出现在一些锡矿床中。在矿物晶体化学分类上, 黑钨矿属于单斜晶系钨的铁锰氧化物 $[(\text{Fe}, \text{Mn})\text{WO}_4]$, 是钨锰矿 (MnWO_4) 与钨铁矿 (FeWO_4) 的完全类质同象固溶体矿物。由于受到离子半径和化合价等晶体化学参数影响, 黑钨矿晶格可以容纳多种微量元素, 如 Nb、Ta、Zr、Hf、V、Sn、Mo 以及 HREE (Harlaux, et al. 2018) 等。已有研究表明, 矿石矿物的微量元素组成可以保留丰富的成矿过程线索 (Harlaux, et al. 2018, Huang, et al. 2022), 所以黑钨矿中的这些微量元素能够为破译 W-Sn 成矿流体的来源和物理化学条件提供有力的证据。尤其是原位激光烧蚀-电感耦合等离子体质谱仪(LA-ICP-MS)的快速发展为我们直接分析矿石矿物的化学成分提供了可能。此外, 黑钨矿和锡石类似, 含有一定量的 U 和较低的 Pb (Romer, et al. 2006)。Luo, et al. (2019) 通过对 LA-ICP-MS 分析谱图的排查和 U 与其他元素之间的相关性分析, 得出黑钨矿中存在的 U 主要以晶格 U 的形式存在, 而非其他矿物包裹体。Yang, et al. (2020) 则从扩散动力学的角度对黑钨矿中 U-Pb 同位素体系的封闭温度进行了报道, 结果显示对于一个粒径为 100 μm 的黑钨矿, 当冷却速率在 10~200 $^{\circ}\text{C}/\text{Ma}$ 变化时, 其 U-Pb 同位素体系的封闭温度为 900~1000 $^{\circ}\text{C}$, 远远高于一般的黑钨矿沉淀温度(100~500 $^{\circ}\text{C}$)。由此可知, 黑钨矿 U-Pb 体系能够在大多数的地质环境保持长期封闭, 是一个理想的 U-Pb 定年矿物。综上所述, 黑钨矿可用于研究 W-Sn 成矿事件的准确时间和成矿流体的原始信息, 使我们能够更好地了解 W-Sn 矿床的成矿模式。

江南造山带位于扬子地块东南缘, 是一个由扬子地块和华夏地块碰撞拼贴形成的前寒武地质单元(图 1), 以出露新元古代双桥山群, 四堡群, 冷家溪群等浅变质基底为特征 (Shu, et al. 2021)。Wang, et al. (2017) 对江南造山带的形成和演化做了系统总结, 认为其经历了洋洋俯冲(970~880 Ma), 弧陆碰撞(880~860 Ma), 弧后拉张(860~825 Ma), 碰撞后伸展(825~810 Ma), 造山后伸展(810~760 Ma)五个阶段。在过去的很长一段时间内, 南岭地区被认为是世界上最大的钨成矿带, 被誉为“世界钨都”。近年来, 随着江南造山带找矿工作的不断突破, 先后发现了大湖塘(200 万吨), 朱溪(344 万吨)和东坪(21 万吨)等一系列大型、超大型钨矿床。这一系列钨矿床的发现, 使得江南造山带整体钨资源量突破 600 万吨, 成为全球最大的钨成矿带。

本次研究中, 我们选取江南造山带五个典型钨锡矿床(花山洞钨矿、李家锡矿、高岭钨矿、大湖塘钨矿、东坪钨矿)作为研究对象, 开展了黑钨矿原位 U-Pb 定年和微量元素分析。此外, 还对上述矿脉开展了石英 H-O 同位素测试, 从而揭示江南造山带中钨锡矿床的成因。主要发现如下:

1) 来自花山洞钨矿、李家锡矿以及高岭钨矿的黑钨矿, 其 U-Pb 年龄分别为 802.6 \pm 6.7 Ma (2 σ , MSWD=0.7), 426.7 \pm 7.7 Ma (2 σ , MSWD=4.7), 215.1 \pm 13.0 Ma (2 σ , MSWD=0.7); 大湖塘钨矿平苗矿段和狮尾洞矿段的黑钨矿 U-Pb 年龄分别为 146.8 \pm 1.2 Ma(2 σ , MSWD=3.2)和 136.5 \pm 1.9 Ma (2 σ , MSWD=1.6), 东坪钨矿的黑钨矿 U-Pb 年龄则为 129.1 \pm 3.0 Ma(2 σ , MSWD=1.6)。这些年龄与各自矿区内的花岗岩锆石年龄在误差范围内一致。我们利用黑钨矿定年直接约束了江南造山带的从新元古代到早白垩世的多期 W-Sn 成矿事件的时代, 进一步证实了江南造山带钨锡成矿和花岗岩在成因上的相关性。

2) 江南造山带的黑钨矿, 在微量元素配分模式上与区域内的花岗岩有明显的相似性, 具有富 Nb、Ta、Mo, 亏损 Th、Ti、Zr、Hf 和 V 的特点, 而与矿区内的新元古代变质沉积围岩有明显的差别, 因此我们认

基金项目: 国家自然科学基金项目 (批准号: 41830428 和 42272077)

作者简介: 马正龙, 男, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事花岗岩与稀有金属成矿机制研究

* 通讯作者, E-mail: lujj@nju.edu.cn

为黑钨矿的微量元素配分模式一定程度上可以指示成矿流体的岩浆亲缘性。此外,矿脉中的石英 H-O 同位素数据全部落在岩浆水范围内,同样支持成矿流体来源于岩浆。

3) 通过统计不同温度成矿体系中产生的黑钨矿微量元素,发现黑钨矿中的 Nb、Ta、Zr 和 Hf 等高场强元素有明显的差别,从靠近岩体的斑岩和云

英岩类型,到岩体外围的石英脉类型,再到浅成低温的造山型黑钨矿,其中的 Nb、Ta、Zr、Hf 有明显的降低。江南造山带的成矿温度与典型的石英脉型黑钨矿相似,低于斑岩型和云英岩型黑钨矿,高于造山型黑钨矿。

参考文献:

- Harlaux M, Mercadier J, Marignac C, et al. 2018. Tracing metal sources in peribatholithic hydrothermal W deposits based on the chemical composition of wolframite: The example of the Variscan French Massif Central. *Chem. Geol.* 479: 58-85.
- Huang X D, Lu J J, Zhang R Q, et al. 2022. Garnet and scheelite chemistry of the Weijia tungsten deposit, South China: Implications for fluid evolution and W skarn mineralization in F-rich ore system. *Ore Geol. Rev.* 142: 104729.
- Luo T, Deng X D, Li J, et al. 2019. U-Pb geochronology of wolframite by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *J Anal At Spectrom.* 34: 1439-1446.
- Romer R L. and Lüders V. 2006. Direct dating of hydrothermal W mineralization: U-Pb age for hübnerite (MnWO₄), Sweet Home Mine, Colorado. *Geochim Cosmochim Acta*, 70: 4725-4733.
- Shu L S, Yao J L, Wang B, et al. 2021. Neoproterozoic plate tectonic process and Phanerozoic geodynamic evolution of the South China Block. *Earth Sci Rev.* 216: 103596.
- Wang X L, Zhou J C, Chen X, et al. 2017. Formation and Evolution of the Jiangnan Orogen. *Bull Mineral Petrol Geochem.*, 36: 714-735 (in Chinese with English abstract).
- Yang M, Yang Y H, Wu S T, et al. 2020. Accurate and precise in situ U-Pb isotope dating of wolframite series minerals via LA-SF-ICP-MS. *J Anal At Spectrom.* 35: 2191-2203.

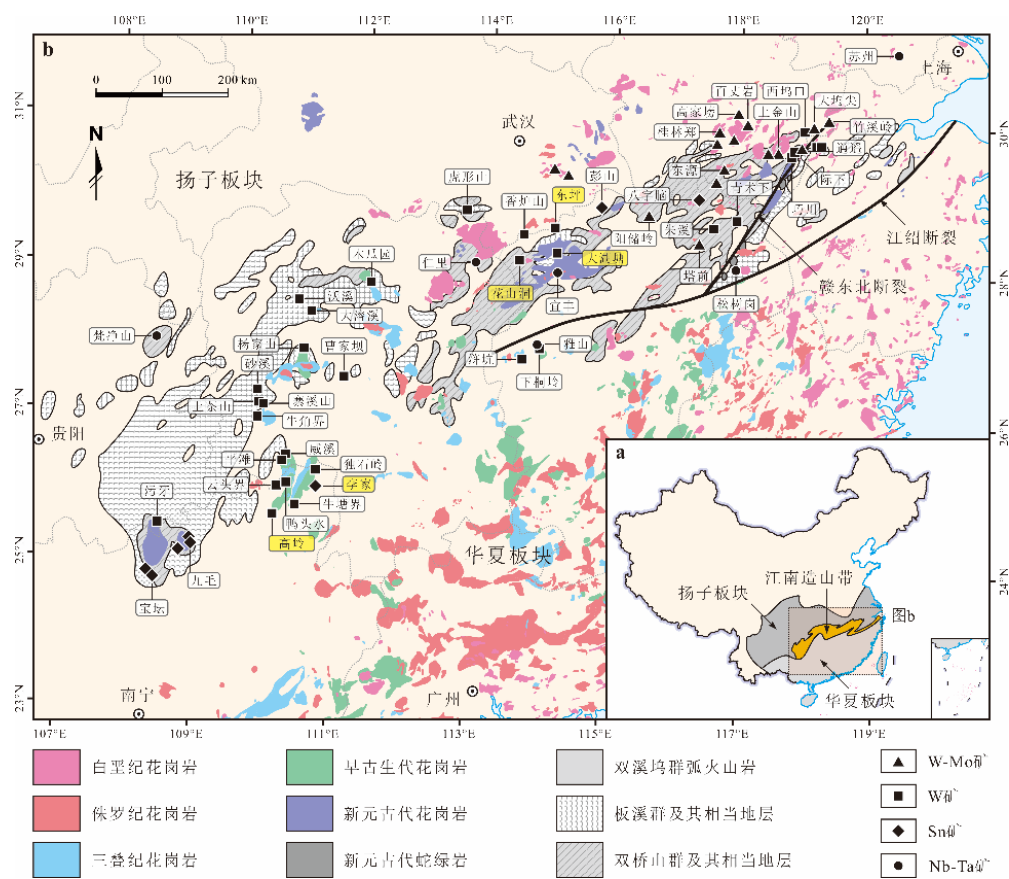


图. 1 江南造山带钨、锡矿床分布图(据 Sun, et al. 2006; Wang, et al. 2014 修改)

塔里木盆地古城地区白云石化作用 ——来自碳、氧同位素的证据

闫博*, 张斌, 何香香, 张婷婷

(大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆, 163712)

古城地区位于塔里木盆地中央隆起带, 东部与东南隆起相邻, 西南部与塔中工号断裂带、塔中隆起相邻, 北部与满西低凸起相邻。早寒武世-中奥陶世继承性发育一套海相碳酸盐岩地层, 多期台缘礁滩叠置分布 (Han et al., 2009)。白云石 (岩) 化是古城地区中下奥陶-寒武系储层形成的重要基础, 为了有助于储层形成机制与发育分布模式、发育分布规律的认识, 本次工作充分利用古城地区中下奥陶-寒武系岩芯资料, 重点阐述碳、氧同位素对于储层白云石化作用成因的指示意义。

碳、氧稳定同位素在研究白云石的成因类型、白云石成岩流体性质中具有重要作用 (Yu et al., 2011)。研究区寒武系白云岩时代老, 经历了一个长期缓慢的成岩改造过程, 因此, 在解释研究区寒武系白云岩的碳、氧稳定同位素资料之前, 有必要建立一个寒武系古海水的碳氧稳定同位素背景值。根据前人的研究, 寒武纪低镁方解石生物壳的碳、氧稳定同位素分布范围如下: $\delta^{13}\text{C}$ 值分布于 $-2\sim 1\text{‰}$ (PDB) 之间, $\delta^{18}\text{O}$ 值分布于 $-10\sim -7\text{‰}$ (PDB) 之间 (据 Veizer 等, 1999), 若假定寒武纪海水温度为 20°C , 则根据 Friedman 和 O'Neil (1977) 的方解石-水氧同位素分馏方程, 计算可得寒武纪海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大致应为 $-9\text{‰}\sim -6\text{‰}$ (SMOW), 若假定温度为 15°C , 则计算所得海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值大致应为 $-10\text{‰}\sim -7\text{‰}$ (SMOW)。

自然界中的碳源库包括: ①有机碳库: 包括整个生物界中的碳以及石油、天然气、煤和地层中分散的有机物中的碳等; ②无机碳库: 海相碳酸盐中的碳; ③大气二氧化碳中的碳: 实际上是有机碳库中的碳和无机碳库中的碳的交换媒介。白云石的氧同位素值主要受控于成岩流体的氧同位素组成和成岩温度, 其中以温度分馏效应控制为主, 当白云石的碳同位素组成较高时, 白云化流体可能主要来自于海水或者与海水有关的海源流体。随着温度的升高, ^{16}O 会优先于 ^{18}O 进入矿物中, 导致 ^{16}O 的相对富集, 从而使 $\delta^{18}\text{O}$ 值减小, 在埋藏成岩环境中, 白云石在发生重结晶过程中伴随白云岩的溶解及沉淀作用的发生, 可以使 ^{18}O 减少, 在白云石晶体逐步增大的过程, $\delta^{18}\text{O}$ 值呈下降趋势, 在受到热液改造的情况下, 则需要注重热液流体来源分析。

本次研究对研究区内 39 个白云岩岩石或矿物样品进行了碳、氧同位素分析, 通过对比分析 (图 1), 发现研究区内中下奥陶统白云石/岩具有以下特征:

1) 灰岩 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值在 $-6.48\text{‰}\sim -7.92\text{‰}$ (PDB, 未特别注明皆为 PDB), 平均值为 -6.894‰ , $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 值 $-0.34\text{‰}\sim -2.1\text{‰}$ 平均值为 -1.622‰ , 均在塔里木盆地奥陶世海相碳酸盐岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($0\pm 2\text{‰}$) 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值 ($-9.461\text{‰}\sim -5.423\text{‰}$) 的范围之内;

2) 粉-微晶白云石在本次研究中仅有一个样品, 其 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 为 -5.99‰ , $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 为 0.58‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值及 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 均高于未经改造的灰岩, 而其投点分布于热液改造成因的中粗晶白云石范围内, 因此推测这个样品后期经过了热液改造;

3) 粉-中晶它形白云石 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于 $-2.15\text{‰}\sim -0.33\text{‰}$ 之间, 平均值为 -1.143‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于 $-8.54\text{‰}\sim -6.36\text{‰}$ 之间, 平均值为 -7.133‰ ; 粉-中晶自形白云石 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于 $-0.83\text{‰}\sim -0.54\text{‰}$ 之间, 平均值为 -0.685‰ , $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于 $-8.93\text{‰}\sim -8.06\text{‰}$ 之间, 平均值为 -8.495‰ , 这两类白云石 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值和 $\delta^{13}\text{C}\text{‰}$ 值在投点分布图中具有相互交叉的特征, 它们的成因分别为同生期渗透回流成因及浅埋藏成因, 它们相互交叉的部分的白云石为这两种成岩环境的过渡阶段形成的白云石。

作者简介: 闫博, 男, 1982 年生, 硕士, 主要从事碳酸盐岩储层及油气成藏研究。

* 通讯作者, E-mail: yanbo@petrochina.com.cn

4) 中-粗晶脏白云石 (II₁ 型) $\delta^{18}\text{C}\text{‰}$ 值介于-1.57‰~-0.42‰之间, 平均值为-0.9975‰, $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于-8.21‰~-6.25‰之间, 平均值为-7.052‰; 中-粗晶较干净白云石 (II₂ 型) $\delta^{18}\text{C}\text{‰}$ 值介于-1.63‰~-0.62‰之间, 平均值为-0.413‰, $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值介于-7.96‰~-4.69‰之间, 平均值为-5.97‰。同为热液改造成因的中粗晶脏白云石在 $\delta^{18}\text{C}\text{‰}$ 及 $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 投点分布图中具有明显区别, 揭示了改造该类白云石的热液流体可能为具有两种不同的氧同位素组分的流体。

5) 热液成因的鞍状白云石出现很少, 仅有 1 件样品, 其 $\delta^{18}\text{C}\text{‰}$ 值为-0.61‰, $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ 值为-5.61‰, 与中-粗晶脏白云石 (II₂ 型) 具有相似的 C、O 同位素特征, 揭示了形成该鞍状白云石的热液流体可能与形成中-粗晶脏白云石 (II₂ 型) 的热液流体为同一种。

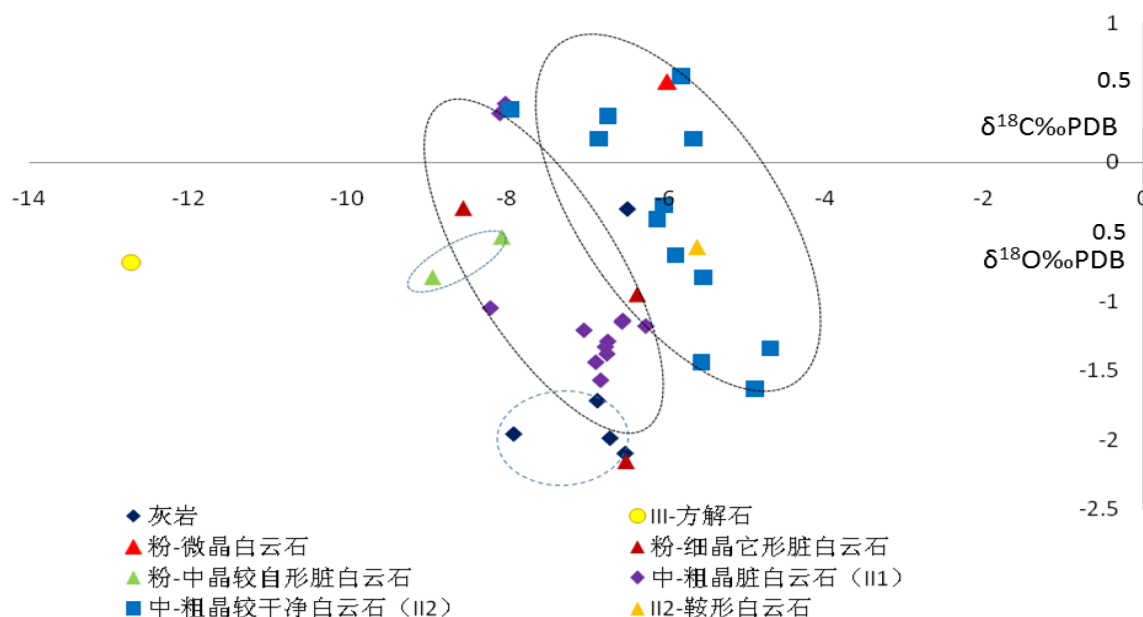


图 1 古城地区白云石碳、氧稳定同位素分布特征

综上, 粉-中晶它形脏白云石到粉-中晶较自形白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低, 但差距较小, 而且有相互交叉的部分, 分析认为这反映了粉-中晶它形脏白云石和粉-中晶较自形白云石的形成是在盐度正常或略高的环境中, 粉-中晶较自形白云石可能形成于埋藏环境, 但是埋藏深度非常浅; 由粉-中晶它形脏白云石到粉-中晶较自形白云石应该是一个沉积埋藏过程中连续白云石化作用的产物。中粗晶白云石及鞍状白云石均是热液成因, 但是同期热液作用可能有两种不同的热液来源, 导致形成两种 $\delta^{18}\text{O}$ 值区别明显的中粗晶白云石。

参考文献:

- Veizer J., Ala D., Azmy K. et al. 1999. $87\text{Sr}/86\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater. *Chem. Geol.*, 161:59-88.
 韩长伟, 马培领. 塔里木盆地东部地区构造特征及其演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2009(1):131-135.
 余宽宏, 金振奎等. 塔里木盆地东部地区寒武纪海盆局限期深水准同生白云岩化作用研究[J]. *沉积学报*, 2011(6):1041-1047.

广西北山铅锌矿床成矿物质来源： 原位 S-Pb 同位素证据

余何^{1,2*}, 罗文江², 苟晓利¹, 韩尚嵩¹, 高友君¹, 周勇¹

(1.贺州学院广西碳酸盐资源综合利用重点实验室, 广西贺州 542899; 2.桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541006)

北山铅锌矿床地处扬子板块与华南板块的过渡部位, 是广西重要的有色金属矿产原料供应地。矿体赋存在特定的细-粗晶白云岩内, 呈似层状、透镜状, 连续性较好, 受地层和构造制约, 矿区范围内及外围无岩浆活动。目前已探明锌金属储量 103 万吨, 铅 7.2 万吨, 硫铁矿矿石储量 2065 万吨, 其中锌和黄铁矿的储量均超过大型矿床规模。前人基于传统的 S-Pb 同位素分析方法, 认为铅主要来自上地壳, 硫主要来自海水硫酸盐的细菌还原作用(陈好寿等, 1987); 发现矿石矿物中硫同位素分布范围宽, 显示出轻硫与重硫同时富集的特征, 指示矿床硫源除主要来自海相硫酸盐的还原外, 可能还有地层硫的加入(李永玲, 2014)。

近年来, 随着原位(in situ)微区分析技术开发应用, 尤其具有高空间分辨率高、分析速度快、宏观无损、检出限低等优点的 LA-MC-ICP-MS 方法, 能提供更为精准正确的数据, 已成功地应用于示踪成矿物质的来源和揭示成矿作用的机理(Bao et al., 2017; Tan et al., 2019; 蒋少涌等, 2021; Hu et al., 2022)。本研究对象是采集北山铅锌矿床 II 号、III 号、IV 号矿体的高品位、易分选的 9 件块状铅锌矿新鲜样品, 开展原位 S-Pb 同位素元素分析。其中, 原位硫、铅同位素的测试分别在西北大学大陆动力学国家重点、武汉上谱分析科技有限责任公司实验室完成, 均利用 LA-MC-ICP-MS 方法对光片中不同的金属硫化物(闪锌矿、黄铁矿、方铅矿)进行微区原位同位素测定。

分析结果显示, 黄铁矿、方铅矿、闪锌矿的硫同位素组成变化范围较大, 其硫化物的 $\delta^{34}\text{S}$ 值分布于 -10.87‰~12.44‰ 之间, 峰值为 -2.95‰~-2.54‰。矿床除了富集轻的硫同位素外, 部分闪锌矿 $\delta^{34}\text{S}$ 值明显大于 10‰, 因此, 单一的 BSR 作用无法对这一现象做出解释。黄铁矿生成稍早于闪锌矿, 且一般黄铁矿成矿温度较低, $\delta^{34}\text{S}$ 值从黄铁矿到闪锌矿呈上升趋势, 暗示由细菌还原作用(BSR)产生的 H_2S 在早期形成过程中的加入, 随着温度上升, BSR 被抑制, 热化学硫酸盐还原(TSR)占据主要作用。 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 、 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 同位素组成变化相对较小, 在三种金属硫化物中的组成分别为: 黄铁矿 17.949~18.114、15.624~15.672、38.143~38.364; 闪锌矿 17.968~18.045、15.628~15.656、38.178~38.299; 方铅矿 18.026~18.055、15.629~15.654、38.200~38.318。铅构造模式图解、特征参数法和 $\Delta\gamma$ - $\Delta\beta$ 成因分类图解分析, 认为北山铅锌成矿作用受岩浆作用和变质作用的影响可能性甚小, 盆地卤水对沉积岩中的铅进行的淋滤作用为成矿作出了积极贡献。

原位硫同位素分析表明, 北山矿床的硫主要来自地壳硫、生物成因硫及沉积地层, 盆地沉积阶段 BSR 作用在硫酸盐还原过程中起主导作用, 后期挤压阶段, 温度升高, 硫酸盐还原则以 TSR 作用为主, 二者共同促进了硫酸盐的还原。原位铅同位素分析表明, 北山铅锌矿床的铅是一部分来自上地壳, 一部分来自地幔, 属于壳幔混合来源。

参考文献:

- Bao Z, Chen L, Zong C L, et al. 2017. Development of pressed sulfide powder tablets for in situ sulfur and lead isotope measurement using LA-MC-ICP-MS. *International Journal of Mass Spectrometry*, 421:255-262.
- 蒋少涌, 陈唯, 赵葵东, 等. 2021. 基于 LA-(MC)-ICP-MS 的矿物原位微区同位素分析技术及其应用. *质谱学报*, 42(5):623-640.
- Hu Y S, Ye L, Huang Z L, et al. 2022. Genetic model for early Cambrian reef limestone-hosted Pb-Zn deposits in the world-class Huayuan orefield, South China: New insights from mineralogy, fluorite geochemistry and sulfides in situ S-Pb isotopes. *Ore Geology Reviews*, 141:104682.

基金项目: 广西自然科学基金面上项目(批准号: 2020GXNSFAA297088)、贺州学院博士启动基金项目(批准号: HZUBS201807)

作者简介: 余何, 男, 1983 年生, 博士, 副研究员, 主要从事矿床学及成矿构造研究. E-mail: yuhe@hzxy.edu.cn

江南造山带东坪钨矿微区地球化学研究进展

喻斌¹, 杨世文^{1*}, 徐畅², 谭婕²

(1. 东华理工大学地球科学学院, 江西南昌 330013; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

赣北东坪钨矿床位于江西省武宁县北西向 50 km 处, 为赣北地区近年来新发现的超大型石英脉型黑钨矿床, 大地构造位置处于江南造山带东段。区内地层从新元古界青白口系至中-新生界均有出露, 以新元古代双桥山群浅变质岩系出露最为广泛。岩体中发育有含绢云母、白云母石英脉, 还有稀疏浸染状、脉状黑钨矿及少量星点状黄铜矿、辉钼矿化、黄铁矿等产出。前人对东坪矿区岩浆岩成岩成矿(李吉明等, 2016; 胡正华等, 2018; 李永明等, 2018; 杨细浩等, 2019)和成矿年代学(Yang et al., 2022)开展了研究, 得出东坪黑钨矿与隐伏花岗岩体具有成因联系(胡正华等, 2018; 李永明等, 2018), 暗示巨量钨成矿与花岗岩岩浆作用具有密切成因联系(Yang et al., 2022)。然而, 新元古代双桥山群地层对巨量钨成矿是否有贡献? 巨量金属成矿物质来源等问题还不明确? 本文以黑钨矿为研究对象, 运用 LA-ICP-MS 微区技术, 通过对黑钨矿的微量元素分析, 探讨其金属成矿物质来源。

本文在详细的野外地质调查、成矿岩浆岩岩石学研究工作的基础上, 开展了精细的矿相学观察, 将黑钨矿划分为 Wol-1 和 Wol-2 两个阶段, 对区内成矿的微量元素数据进行分析研究。(图 1) 研究表明 Wol-1 的稀土元素总量($\sum\text{REE}$)介于 $8.986 \times 10^{-6} \sim 30.799 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 为 0.005~0.014, δEu 值介于 0.922~2.795, Eu 总体显示正异常, 个别见 Eu 负异常, 表明轻重稀土元素间发生了极强的分异; 而 Wol-2 的稀土元素总量($\sum\text{REE}$)介于 $4.359 \times 10^{-6} \sim 28.337 \times 10^{-6}$ 之间, LREE/HREE 为 0.004~0.187, δEu 值介于 0.927~2.149, Eu 总体显示正异常, 个别见 Eu 负异常, 表明轻重稀土元素间分异严重。

两阶段的黑钨矿均呈现出 LREE 明显亏损, HREE 相对富集, 且有弱正铈异常, Sr 正异常的特征, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上总体表现均为“左倾”型配分模式; 而 Wol-2 比 Wol-1 的 Sr, Nd 含量明显升高, 暗示了围岩为巨量钨成矿提供了来源。相比于黑钨矿, 黑云母花岗岩和二云母花岗岩则呈现 LREE 相对富集, HREE 相对亏损, 强负铈异常及强 Sr 负异常的特征, 在球粒陨石标准化稀土元素配分模式图上总体表现为“W”型配分模式; 在静态上与黑钨矿有明显的对立统一规律, 验证了巨量钨成矿与花岗岩岩浆作用具有密切成因联系。

综上所述, 新元古代双桥山群地层对巨量钨成矿有贡献, 围岩为巨量钨成矿提供了来源, 且黑钨矿与隐伏花岗岩有密切联系。

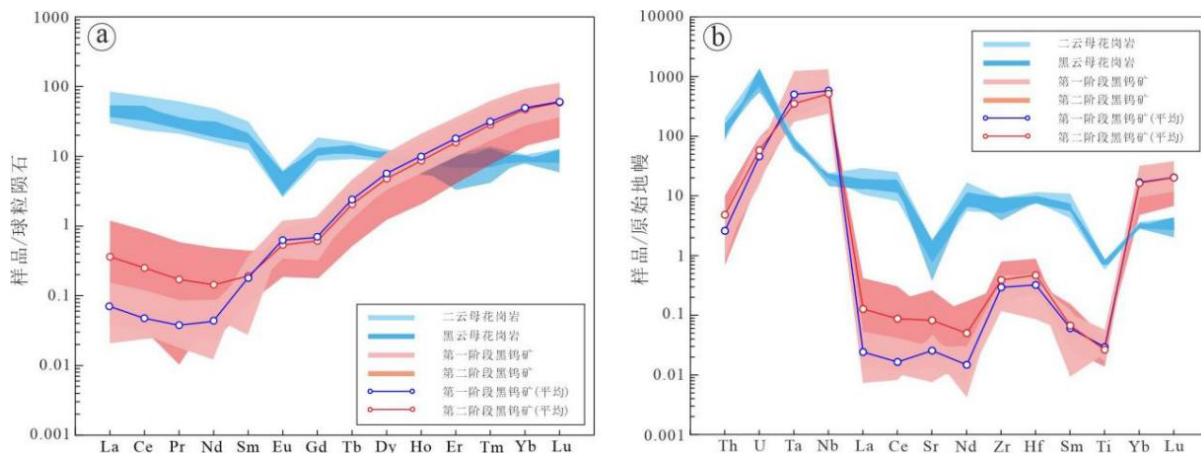


图 1 东坪矿区黑钨矿稀土元素配分曲线图(a)、微量元素(b)

基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 42262012)

作者简介: 喻斌, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 主要从事成矿年代年代学研究。

*通信作者, E-mail: yangsw@ecut.edu.cn

参考文献:

- Yang, S.W., Lou, F.S., Xu, C., Feng, C.Y., Cao, S.H., Xu, D.R., Tang, Y.W., 2022. Two significant quartz-wolframite-veining mineralization events in the Jiangnan Orogen, South China: Constraints from in-situ U-Pb dating of wolframite in the Dongping and Dahutang W-(Cu-Mo) deposits. *Ore Geology Reviews*, 141, 104598.
- 胡正华,楼法生,李永明等.2018. 江西武宁县东坪钨矿床中与成矿有关的岩浆岩年代学、地球化学及岩石成因.地球科学,43(S1):243-263.
- 李吉明,李永明,楼法生等.2016. 赣北发现“五层楼”式石英脉型黑钨矿矿床—东坪黑钨矿矿床的发现及其地质意义.地球学报,37(03):379-384.
- 李永明,李吉明.2018. 赣北东坪钨矿区二云母花岗岩地球化学特征及其构造动力学意义.中国钨业,33(02):1-9.
- 杨细浩,胡文洁,钟起泓等.2019. 江西东坪石英脉型黑钨矿矿床地质特征、控矿因素及找矿标志.吉林大学学报(地球科学版),49(05):1301-1316.

滇西南澜沧老厂斑岩型钼矿的 初始岩浆-流体演化过程： 来自云母和榍石原位分析的制约

张迎迎^{1,2}, 罗泰义^{1*}, 范云飞³, 龙汉生⁴, 杨勇⁵, 杨金彪⁶, 蒙福清⁶

(1. 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, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局 核资源地质调查院, 贵州 贵阳 550005; 4. 贵州理工学院 资源与环境工程学院, 贵州 贵阳 550003;
5. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 6. 云南澜沧铅矿有限公司, 云南 澜沧 665601)

滇西南澜沧老厂 Pb-Zn-(Ag)-Mo-(Cu) 多金属矿床是东南亚古特提斯昌宁-孟连缝合带内唯一的大型火山岩块状硫化物-岩浆热液复合型矿床(杨帆等, 2019; 邓军等, 2020), 位于缝合带南部的澜沧裂谷北段。该矿床具有完整的垂向岩浆-热液成矿体系, 主要包括深部斑岩型 Mo-(Cu) 矿化和浅部的层状和脉状 Pb-Zn-(Ag) 矿化。矿区深部的隐伏斑岩型钼矿化带厚达 850 m, 工业矿体厚约 450 m, 预测钼资源储量 150 万吨(李宏坤等, 2014)。老厂斑岩型钼矿的成矿过程研究已经积累了丰富的资料, 如已确定了花岗斑岩的成岩年龄(44.4-44.6 Ma; 李峰等, 2009; Deng et al., 2015; 黄钰涵 2018; Sun et al., 2021) 和辉钼矿的矿化年龄(43.4-47.3 Ma; 李峰等, 2009; Deng et al., 2016; Meng et al., 2018), 但是从斑岩岩浆向初始成矿流体演化的精细过程和时间线依然比较模糊。

基于岩相学工作, 我们在老厂矿区深部的蚀变凝灰岩中识别出两期 A 脉(与早期钾硅酸盐化蚀变有关的岩浆热液脉), 其中的 A1 型钾长石脉中产出较多的粗晶半自形-自形热液榍石和金云母。本次研究聚焦于花岗斑岩中的新鲜黑云母、A 脉中的金云母和榍石的原位 U-Pb 同位素定年和地球化学研究, 精细厘定了岩浆到初始成矿流体出溶的时限, 解译了斑岩岩浆-热液演化过程的物理化学条件变化。

获得的主要认识如下:(1) 澜沧老厂花岗斑岩属于造山带钙碱性 I 型花岗岩, 花岗斑岩中的黑云母被划分为镁黑云母。黑云母地质温压计计算结果表明, 斑岩就位于中深成相(2.57-4.27 km) 环境, 压力平均值为 93 MPa, 温度平均值为 697 °C, 氧逸度 $\log f_{O_2}$ 平均值为 -16.78。(2) 基于矿物学观察, 澜沧老厂斑岩型钼矿化的热液过程可以划分为早期岩浆未完全固结阶段的 A 脉、主成矿期的 B 脉和晚期含粘土矿物的 D 脉三阶段。A 脉主要保留于斑岩顶部的蚀变凝灰岩中, 可进一步划分为两种类型: A1 脉为弯曲不规则状毫米级钾长石细脉, 矿物共生序列组合主要为金云母+钾长石-榍石+硬石膏+辉钼矿-石英+方解石; A2 脉为较为平直的黄铁矿化含钾长石毫米级石英脉。A1 脉中金云母的压力平均值为 98 MPa, 温度平均值为 681 °C, $\log f_{O_2}$ 平均值为 -17.29, 表征了岩浆未完全固结到出初始成矿流体出溶过程中, 由于流体的加入, A1 脉的压力略大于围岩静压力, 温度和氧逸度则因为凝灰岩围岩的缓冲而略为降低。晚于金云母的榍石的 Zr 温度计平均值为 680 °C, 但榍石具有明显的两阶段生长特征, 第一阶段平均温度为 701 °C, 第二阶段平均温度为 653 °C。(3) 对 A1 脉中榍石开展原位 LA-ICP-MS U-Pb 测年获得的年龄为 44.4 ± 1.5 Ma(MSWD=1.8, n=48), 与花岗斑岩就位年龄(44.4-44.6 Ma) 相当, 略大于主成矿期辉钼矿的等时线年龄(43.78 Ma), 进一步厘定了澜沧老厂花岗斑岩成矿体系岩浆-成矿流体的演化时序。我们的研究表明, 榍石的原位分析是精细剖析岩浆后期熔(流)体演化过程的重要手段, 记录了相应的时间和温度信息, 特别是 I 型花岗质岩浆侵入于富钛围岩的情况下, 榍石可成为较为丰富的副矿物。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41873058)

作者简介: 张迎迎, 女, 1996 年生, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: zhangyingying@mail.gyig.ac.cn

* 通信作者, E-mail: luotaiyi@mail.gyig.ac.cn

参考文献:

- Deng X D, Li J W, Zhao X F, et al. 2016. Re-Os and U-Pb geochronology of the Laochang Pb-Zn-Ag and concealed porphyry Mo mineralization along the Changning-Menglian suture, SW China: implications for ore genesis and porphyry Cu-Mo exploration. *Mineralium Deposita*, 51(2): 237-248.
- Deng X D, Li J W, Zhou M F, et al. 2015. In-situ LA-ICPMS trace elements and U-Pb analysis of titanite from the Mesozoic Ruanjiawan W-Cu-Mo skarn deposit, Daye district, China. *Ore Geology Reviews*, 65(SI): 990-1004.
- Meng Y M, Hu R Z, Huang X W, et al. 2018. The relationship between stratabound Pb-Zn-Ag and porphyry-skarn Mo mineralization in the Laochang deposit, southwestern China: Constraints from pyrite Re-Os isotope, sulfur isotope, and trace element data. *Journal of Geochemical Exploration*, 194: 218-238.
- Sun G T, Zhou J X, Long H S, et al. 2021. Vertical evolution of Ag-Pb-Zn-(Cu)-Mo in porphyry system: A case study from the Laochang deposit, SW China. *Ore Geology Reviews*, 139: 1-14.
- 邓军, 王庆飞, 陈福川, 等. 2020. 再论三江特提斯复合成矿系统. *地学前缘*, 27(02): 106-136.
- 黄钰涵. 2018. 昌宁—孟连构造带西南部始新世斑岩成矿作用. 博士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京), 1-158.
- 李峰, 鲁文举, 杨映忠, 等. 2009. 云南澜沧老厂斑岩钼成岩成矿时代研究. *现代地质*, 23(06): 1049-1055.
- 李宏坤, 蒙光志, 肖述刚. 2014. 云南省澜沧老厂钼矿特征及资源前景. *矿物学报*, 34(02): 217-222.
- 杨帆, 李峰, 姚志华, 等. 2019. 云南澜沧老厂多金属矿床隐伏斑岩流体包裹体研究. *矿物岩石地球化学通报*, 38(01): 137-149.