

广西摩天岭新村铀矿床成矿年代学及 矿床地球化学研究

高成, 陈宇翔, 凌明星*

(东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室 地球科学学院, 江西 南昌 330000)

摩天岭地区北接华北陆块和秦岭造山带, 南与华南陆块毗邻, 处于扬子陆块西南缘, 属于桂北隆起之九万大山褶断带(赵永鑫, 2012 及其所引文献)。摩天岭地区的铀矿床属于扬子陆块东南部铀成矿省雪峰山-九万大山碳硅泥岩型、花岗岩型铀成矿带中, 是热液型铀矿床(王勇剑等, 2023)。

本研究的主要对象为摩天岭地区新村铀矿床, 位于摩天岭地区片麻状粗粒黑云母花岗岩中。围岩呈灰白色、粗粒结构, 具明显的片麻状构造, 主要矿物成分为碱性长石、斜长石、石英和黑云母。锆石 U-Pb 定年显示围岩形成时代集中在 843.2 ~ 802.5 Ma 范围, 属于雪峰期产物。围岩蚀变明显, 成矿前期有面状绿泥石化、绢云母化、高岭石化、白云母化等蚀变; 成矿后期流体作用蚀变类型为黄铁矿化、萤石化, 与成矿关系密切。其地球化学特征为 Sr、Ba、Nb、Ce 元素亏损, Rb 和 Pb 元素富集, 在性质上属于过铝质特点, 属于高钾钙碱性的“S”型花岗岩。围岩的 ΣREE 含量为 38.02×10^{-6} 至 216.98×10^{-6} (平均值 137.72×10^{-6}), LREE/HREE 的比值为 0.35~2.28 (平均值为 1.42), (La/Yb) N 在 1.16 和 6.42 之间 (平均值为 3.85), 在 Y、Nb 相关性图解上, 显示为火山弧花岗岩和同碰撞花岗岩。

新村铀矿床主要为沥青铀矿化, 集中分布于黑云母花岗岩构造蚀变带内, 受断裂控制。在显微镜和扫描电镜下沥青铀矿呈圆球状、浸染状、团块状、环绕状等, 可见明显的干裂纹发育, 矿物包裹体发育较少。常与胶黄铁矿相互包裹共生, 暗示这些矿物为同期形成。从背散射图像来看, 几乎所有沥青铀矿灰度均匀, 应为同一期热液沉淀形成, 部分沥青铀矿脉边缘部位颜色变暗, 可能遭受了轻微的后期热液改造作用。此外, 还有极少量铀石发育。本研究中, 新村矿床轻重稀土比值相对稳定 (0.70~3.40), 沥青铀矿其球粒陨石标准化稀土配分模式为轻稀土微富集的平坦型, 同时也呈现强烈的负 Eu 异常。新村铀矿床花岗岩围岩与沥青铀矿球粒陨石标准化稀土配分模式分布规律一致, LREE/HREE 值和 δEu 值相近, 说明新村铀矿成矿物质主要来源于新村铀矿床围岩, 花岗岩可能是沥青铀矿成矿来源。本文通过沥青铀矿的原位微区激光测年获得了新村矿床 48.8~46.1 Ma 的原位微区 U-Pb 年龄, 显示其主成矿期为喜山期。同时, 前人也获得了新村铀矿床 92.2 Ma、64 Ma、57 Ma、47 Ma 和 15.5 Ma 不等的成矿年龄(张祖还等, 1984; 核工业地质局, 2005; 王勇剑等, 2023), 表明新村铀矿床的铀成矿时代还存在不确定性, 同时也说明其成矿时代具有多期性特点。

综上所述, 摩天岭地区沥青铀矿经历了多个成矿阶段, 成矿物质丰富, 新村矿床主要成矿期年龄值在 48.8~46.1 Ma, 属于喜山期。但是, 新村铀矿床花岗岩围岩成岩年龄为 843.2 ~ 802.5 Ma, 属于新元古代雪峰期。成岩和成矿的时间差指示了铀的成矿受控于古近纪的某次地质事件, 而与花岗岩的结晶无关。

参考文献:

核工业地质局, 2005. 中国铀矿床研究评价. 1-620

王勇剑, 庞雅庆, 范洪海, 等. 2023. 桂北摩天岭地区新村铀矿床沥青铀矿微区年代学和地球化学特征研究. 地球科学, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20230308.1046.002.html>

赵永鑫, 2012. 广西摩天岭地区花岗岩型铀矿典型矿床成矿作用对比. 成都理工大学.

张祖还, 沈渭洲, 饶冰. 1984. 376 铀矿床的同位素地质学. 南京大学学报(自然科学版), 1(4): 543-553.

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41173057; 41373007)

第一作者简介: 高成, 男, 1985 年生, 博士, 主要从事铀-多金属矿床相关的成矿规律与找矿预测研究.

* 通讯作者, E-mail: mxling@ecut.edu.cn

黔北金沙岩孔矿床形成时代研究

王兵¹, 杨应宝¹, 徐进鸿^{1,2,3*}, 王琼⁴

(1. 铜仁学院, 经济管理学院, 贵州铜仁, 554300; 2. 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; 3. 铜仁学院, 梵净山国家研究院, 贵州铜仁, 554300; 4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025)

早寒武世梅树村期是我国重要的磷矿期, 发育上下两层磷块岩, 已在云南昆阳和贵州织金地区发现一系列大型-超大型磷矿床(朱日祥等, 2009; Yang et al., 2022; 邢介奇等, 2022)。这些磷矿中富集 U、Mo、V、Ni 和 REE+Y 等多种关键金属元素, 部分已达工业品位标准, 可以作为磷块岩型铀矿(如岩孔铀矿床)和磷块岩型稀土矿(如织金磷矿)资源(漆富成等, 2018; 李治兴等, 2020; 王琼等, 2022; 邢介奇等, 2022), 综合利用潜力巨大。金沙岩孔矿床位于黔北岩孔背斜北西翼, 平均厚度为 0.92m, 铀平均品位 590ppm~1700ppm 之间, 已达工业利用开发所需品位, 是我国最具代表性的磷块岩型铀矿床(张维乾等, 2018; 李治兴等, 2020)。

前人研究表明岩孔矿床产于灯影组白云岩和牛蹄塘组碳质页岩之间, 推测其形成时代介于晚震旦世-早寒武世(张维乾等, 2018)。我们在野外考察中发现岩孔矿床磷块岩之上发育一层厚约 15cm 的凝灰岩, 与磷块岩呈假整合接触。本文对这层凝灰岩开展 La-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析, 并和前人研究结果进行对比, 进而揭示岩孔矿床的形成时代。

岩孔矿床凝灰岩中锆石多为无色或浅黄褐色, 碎斑状, 长度在 20~100 μ m 之间, 长宽 1:1 到 3:1 之间。阴极发光图像显示锆石具有明显生长环带, 属于典型岩浆锆石的特征(Hoskin and Black, 2000)。La-ICP-MS 分析表明这些锆石的微量元素变化较大, U 含量为 64.6~719 ppm, Th 含量为 7.1~77.2ppm, Th/U 比值为 0.55~0.69, 大于变质锆石的 Th/U 比值(<0.1), 也表明它们是岩浆锆石(Williams et al., 1996; Corfu et al., 2003)。谐和年龄为 538 ± 4 Ma (MSWD = 0.81, 2 σ), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 539 ± 3 Ma (MSWD = 1.02, 2 σ), 两者在误差范围内完全一致, 可以代表凝灰岩的沉积时代。凝灰岩出露于磷块岩之上, 表明岩孔矿床形成时代不早于 539 ± 3 Ma。

云南梅树村剖面自下而上包括灯影组、渔户村组(相当于灯影组)和黑林铺组(相当于牛蹄塘组), 曾作为前寒武纪-寒武纪界线的 GSSP 候选获选剖面, 常作为区域地层对比剖面(Yang et al., 2022)。其中渔户村组岩性自下而上包括: 小歪头山段白云岩、中谊村段下磷矿层、中谊村段凝灰岩层(Bed 5)、中谊村段上磷矿层和中谊村段凝灰岩层(Bed 9), 其上为黑林铺组黑色富有机质粉砂岩(朱日祥等, 2009; Yang et al., 2022)。这些岩性变化特征与岩孔矿床相似, 可以作为对比。

本次研究获得岩孔矿床凝灰岩形成时代为 539 ± 3 Ma, 与梅树村剖面 Bed 5 凝灰岩 SIMS 锆石 U-Pb 年龄在误差范围内一致(533.2 ± 3.8 Ma; Yang et al., 2022), 表明岩孔矿床磷块岩属于下磷矿层。前人 SIMS 锆石 U-Pb 定年结果显示梅树村剖面灯影组九城段凝灰岩形成于 546.3 ± 2.7 Ma (Yang et al., 2016), 暗示该剖面下磷矿层形成时代介于 546.3 ± 2.7 Ma 到 533.2 ± 3.8 Ma 之间。岩孔矿床岩性变化特征与梅树村剖面非常相似, 结合本次凝灰岩锆石定年结果, 表明岩孔矿床形成时代介于 546.3 ± 2.7 Ma 到 539 ± 3 Ma。

基金项目: 贵州省教育厅高等学校科学研究项目青年项目(黔教技(2022)349号); 贵州省地质勘查基金项目(项目编号: MCHC-ZG20212206-2); 国家自然科学基金项目(批准号: No. U1603245); 铜仁市科技计划项目(铜市科研(2022)64号); 铜仁学院博士研究生启动基金项目(批准号: trxyDH2106)

第一作者简介: 王兵, 男, 2000年生, 本科生, 主要从事地理科学研究, E-mail: 1379049225@qq.com

*通讯作者, E-mail: jgyxjh@gztrc.edu.cn

参考文献:

- Corfu, F., Hanchar, J. M., Hoskin, P. W., Kinny, P., 2003. Atlas of zircon textures. *Reviews in mineralogy and geochemistry*, 53(1): 469-500.
- Hoskin, P.W.O., Black, L.P., 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *Journal of metamorphic Geology*, 18(4): 423-439.
- Williams, I.S., Buick, I.S., Cartwright, I., 1996. An extended episode of early Mesoproterozoic metamorphic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *Journal of Metamorphic Geology*, 14(1): 29-47.
- Yang, C., Li, X. H., & Zhu, M. Y. (2022). Tectonic regime transition of the western South China Block in early Cambrian: Evidence from the Meishucun volcanic ash beds. *Palaeoworld*, 31(4): 591-599.
- Yang, C., Li, X. H., Zhu, M., & Condon, D. J. (2016). SIMS U-Pb zircon geochronological constraints on upper Ediacaran stratigraphic correlations, South China. *Geological Magazine*, 154(6): 1202-1216.
- 李治兴, 秦明宽, 漆富成, 王文全, 王健, 衣龙升, 韩慧姿. 2020. 含铀磷块岩型矿床研究现状和未来展望. *铀矿地质*, 36(06): 520-528.
- 王琼, 徐进鸿, 吴林锋, 吴承泉, 彭松, 李溪遥, 卢平. (2022). 黔东铜仁地区磷块岩型铀矿床岩石地球化学特征. *铀矿地质*, 38(6), 1137-1151.
- 邢介奇, 张泽阳, 鲜海洋, 姜玉航, 梁晓亮, 谭伟, 朱建喜. 贵州织金磷矿稀土富集机制, 赋存状态及可利用性. *矿物岩石地球化学通报*, 41(3): 505-516.
- 张维乾, 刘斌锋, 郑懋荣. 2018. 贵州岩孔含铀磷块岩矿床元素地球化学及其指示意义. *矿产勘查*, 9(02): 253-259.
- 朱日祥, 李献华, 侯先光, 潘永信, 王非, 邓成龙, 贺怀宇. 2009. 梅树村剖面离子探针锆石 U-Pb 年代学: 对前寒武纪-寒武纪界线的年代制约. *中国科学 (D 辑)*, 39(8): 1105-1111.

桂北摩天岭地区达亮和新村富铀矿床铀赋存状态及蚀变矿物学特征研究

王勇剑*, 庞雅庆, 范洪海, 吴玉

(核工业北京地质研究院, 北京 100029)

位于广西北部的新元古代摩天岭花岗岩体中发现了多个铀矿床、矿点。该岩体内现已探明两个中型规模的铀矿床, 即新村矿床和达亮矿床。由于该区的研究和勘查工作程度相较南方其他铀矿集区显著偏低, 已有研究尚难以明确这类古老花岗岩型铀矿成矿规律。此外, 达亮矿床和新村矿床明显为不同时代、不同构造背景下的矿化产物, 但前人对这两个矿床的矿物学特征、成矿过程等方面却缺乏精细的对比研究, 这显然不利于深入理解摩天岭古老花岗岩型铀矿的成因和成矿演化过程。本文在多次野外地质工作的基础上, 在达亮和新村矿床坑道、钻孔及废石堆中采集了不同类型的典型富铀矿石和蚀变围岩, 对其中的铀矿物、绿泥石和黄铁矿开展了系统的岩相学、扫描电镜-能谱分析和电子探针分析工作, 结合前人研究, 示踪铀赋存状态、成矿条件, 以期深入理解摩天岭铀矿成矿作用提供微观尺度的矿物学证据。

达亮矿床铀矿物组合主要为沥青铀矿-绿泥石(黄铁矿)型, 与铀矿化有关的蚀变为绿泥石化、胶状黄铁矿化、赤铁矿化、绢云母化及硅化等。新村矿床铀矿化类型则主要为铀-硅化型和铀-萤石型。铀-硅化型矿化中的铀矿物均以细脉状、网脉状沥青铀矿为主, 其中与铀矿化有关的蚀变主要为暗灰色、红色微晶石英-玉髓型硅化、伊利水云母化、胶状黄铁矿化、赤铁矿化。铀-萤石型矿化略晚于铀-硅化型矿化, 主要由沥青铀矿与萤石组成, 多叠加在上述铀-硅化型矿化之上。根据产出状态、矿物共生组合及结构构造等, 可将摩天岭花岗岩型铀矿的成矿作用分为两个主要成矿期: 加里东-海西期铀成矿期(以达亮矿床为代表)和喜山期铀成矿期(以新村矿床为代表)。其中, 每个成矿阶段又可细划分早、中、晚三个期次。

达亮矿床铀-绿泥石(黄铁矿)型矿石中的铀主要为沥青铀矿、钍铀矿以及少量磷铀矿形式存在, 其中原生沥青铀矿是最主要的铀赋存矿物, 呈细脉状、球粒状、胶状与绿泥石、胶状黄铁矿共生或与黄铁矿、绿泥石相互交代残留。此外, 本次研究首次在达亮矿床发现了钍铀矿, 也是该矿床较为重要的一种铀矿物类型。另有少量铀以类质同象或吸附形式存在于赤铁矿、绿泥石、磷灰石、磷钇矿等含铀矿物中。新村矿床的铀赋存状态较为简单, 两种铀矿化类型富铀矿石中的铀均主要以沥青铀矿形式存在, 呈球粒状、肾状、葡萄状等胶状结构, 以脉状、细脉状、网脉状产出于玉髓和其他矿物的间隙及缺陷部位。另见有少量铀石, 少见其他富铀副矿物。

根据野外地质调查和详细的显微观察发现, 达亮矿床主要发育三种形态的绿泥石, 分别是黑云母假象绿泥石(Chl-D1)、蠕虫状绿泥石(Chl-D2)和叶片/鳞片状绿泥石(Chl-D3)。蠕虫状绿泥石(Chl-D2)和叶片/鳞片状绿泥石(Chl-D3)与沥青铀矿、微晶石英、赤铁矿关系密切, 呈交代蚀变结构或者裂隙充填形态, 可能为成矿期含铀热液流体交代长石或者充填矿物裂隙形成。新村矿床在矿前期也发育绿泥石, 多为热液流体交代黑云母蚀变而成的黑云母假象绿泥石(Chl-X1), 但在两个主成矿阶段却鲜有绿泥石化发育。在 Fe-Si 图解中, 大部分测试点位于蠕绿泥石和铁镁绿泥石区域, 而达亮矿床成矿期绿泥石更偏向于蠕绿泥石。在 $Mg/(Fe+Mg)-Al/(Al+Mg+Fe)$ 的关系图中, Chl-D1、Chl-X1 与达亮矿床成矿期的绿泥石投影点相对较分散, 说明绿泥石是由多次热液活动形成的产物。FeO 和 MgO、Fe 和 Al 原子数以及 Mg 和 $Al^{VI}+Fe$ 原子数之间呈现一定的线性负相关, 暗示这三种元素均占据了八面体位置, 说明 Al^{VI} 和 Fe 均可替代 Mg, 其主要的替换形式可能为 $(Fe^{2+})^{VI}=(Mg^{2+})^{VI}$, $(Al^{3+})^{IV}+(Al^{3+})^{VI}=(Si^{4+})^{IV}+(Mg, Fe^{2+})^{VI}$, $3(Mg, Fe^{2+})^{VI}=\square+2(Al^{3+})^{VI}$, “ \square ”代表八面体空位(Bourdelle et al., 2013)。此外, 所有绿泥石测点的 Al^{IV}/Al^{VI} 值变化于 0.70~1.13, 均值为 0.91,

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42302094)、中国核工业地质局地勘费科研项目(编号: 202238-10)和核工业北京地质研究院院长青年基金项目(编号: 地 QJ2101)联合资助

第一作者简介: 王勇剑, 男, 1990 年生, 硕士, 工程师, 主要从事铀-多金属成矿作用和成矿预测工作。

* 通讯作者, E-mail: wangyongjian9818@foxmail.com

说明不同类型绿泥石的 Al^{IV} 值基本大于 Al^{VI} 值, 暗示其 Fe^{3+} 含量较低, 可能是由于 Al^{VI} 在八面体上对 Fe 或 Mg 置换所导致

本文采用由 Raused Colom 等 (1991) 首先提出, 后经提出 Battaglia (1999) 改进并给出的方程式来计算绿泥石的形成温度。计算结果表明, 达亮矿床 Chl-D1、Chl-D2 和 Chl-D3 形成的温度范围分别为 237~254 °C (平均 245 °C)、218~243 °C (平均 232 °C) 和 235~241 °C (平均 236 °C)。由于它们为矿前期和成矿期两个成矿阶段的产物, 所以其形成温度可近似代表相应阶段成矿流体的温度。可以看出, 从成矿前到成矿期, 成矿流体的温度有一定的降低趋势。成矿期绿泥石 (Chl-D2 和 Chl-D3) 的形成温度 (大约 235 °C) 与前人通过测定成矿期流体包裹体得到的均一温度 (175 °C~250 °C, 平均 222 °C) 基本一致 (Qiu et al., 2018)。新村矿床成矿前绿泥石 Chl-X1 形成的温度范围为 219~243 °C (平均 231 °C), 这一温度要明显高于该矿床成矿期流体的流体包裹体均一温度 (176 °C~268 °C, 平均 205 °C) (Qiu et al., 2018), 因而推测造成围岩广泛蚀变 (包括绿泥石化在内) 的矿前期流体可能与含铀成矿流体来源有所不同。目前不少学者提出, 华南地区热液型铀矿床 (如相山铀矿田和棉花坑铀矿床) 中矿前期和成矿期流体来自两个不同的源区 (如 Zhong et al., 2023)。由于新村矿床两个成矿阶段均不发育绿泥石化, 目前尚无法运用绿泥石温度计来估算该矿床主成矿期的成矿温度。结合绿泥石的产出状态, 推测摩天岭地区的绿泥石 (特别是达亮矿床) 形成机制主要有两种, 溶蚀-结晶型和溶蚀-迁移-结晶型。溶蚀-结晶型主要由黑云母、长石等富铝硅酸盐矿物通过热液交代蚀变形成, 经常部分或完全以交代伪晶结构形态呈现, 这两个矿床的蚀变围岩中广泛存在, 如矿前期的 Chl-D1 和 Chl-X1。另一种形成机制是含矿热液在经过一段距离的迁移, 然后直接沉淀结晶形成绿泥石 (Chl-D2 和 Chl-D3), 这种绿泥石与达亮矿床铀成矿过程有着紧密的联系。这个过程形成的绿泥石中的 Fe 和 Mg 成分很可能大部分是由热液带入的。

通过研究不同成因类型沥青铀矿 (晶质铀矿) 的晶体形态、微量元素、稀土元素组成变化可以用来有效地指示铀矿成矿环境、矿床成因及演化 (Mercadier et al., 2011; Frimmel et al., 2014)。电子探针结果显示, 两个矿床中的沥青铀矿均具有较低的 Th 含量, 指示铀矿化形成于中低温环境中, 这与华南低温成因的沥青铀矿贫钍特征的认识是一致的 (陈佑纬等, 2019)。不同于达亮矿床沥青铀矿, 新村矿床中沥青铀矿含有较高的钨。胶状沥青铀矿中含量相对稳定的不相容元素 W 表明, 钨是存在于沥青铀矿的晶格中或均匀地分布在纳米尺度的富 W 区域中 (Deditius et al., 2007)。这也说明喜山期铀成矿热液中本身便富含钨元素, 钨并非后期流体交代原生沥青铀矿而带入。这种富钨沥青铀矿在近同时期形成的全州广子田矿床和下庄铀矿田也较为常见, 推测岩体或邻近地层中的钨矿源层可能为含钨沥青铀矿形成提供了成矿物质。达亮沥青铀矿中的 La 、 Ce 和 Y 明显要略高于新村沥青铀矿, 说明达亮矿床中的沥青铀矿应该具有较高的 $REEs+Y$ 。沥青铀矿中的稀土元素含量往往受控于其形成时的温度和源区 (陈佑纬等, 2019), 而较高温度下形成的铀矿物常具有较高的稀土元素含量 (Mercadier et al., 2011), 进一步指示达亮矿床有着相对更高的成矿温度。

参考文献:

- 陈佑纬, 胡瑞忠, 骆金诚, 等. 2019. 桂北沙子江铀矿床沥青铀矿原位微区年代学和元素分析: 对铀成矿作用的启示. 岩石学报, 35(9): 2679-2694.
- Battaglia S. 1999. Applying X-ray geothermometer diffraction to a chlorite. *Clays and Clay Minerals*, 47: 54-63.
- Bourdelle F, Parra T, Chopin C, et al. 2013. A new chlorite geothermometer for diagenetic to low-grade metamorphic conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 165: 723-735.
- Deditius A P, Utsunomiya S, Ewing R C. 2007. Fate of trace elements during alteration of uraninite in a hydrothermal vein-type U-deposit from Marshall Pass, Colorado, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71(20): 4954-4973.
- Frimmel H E, Schedel S, Brätz H. 2014. Uraninite chemistry as forensic tool for provenance analysis. *Applied Geochemistry*, 48: 104-121.
- Mercadier J, Cuney M, Lach P, et al. 2011. Origin of uranium deposits revealed by their rare earth element signature. *Terra Nova*, 23(4): 264-269.
- Qiu L, Yan D P, Tang S L, et al. 2015. Cooling and exhumation of the oldest Sanqiliu uranium ore system in Motianling district, South China Block. *Terra Nova*, 27(6): 449-457.
- Qiu L, Yan D P, Ren M, et al. 2018. The source of uranium within hydrothermal uranium deposits of the Motianling Mining District, Guangxi, South China. *Ore Geology Reviews*, 96: 201-217.
- Raused-Colom J A, Wiewiora A, Matesanz E. 1991. Relationship between composition and d001 for chlorite. *American Mineralogist*, 76(7-8): 1373-1379.
- Zhong F J, Wang L, Wang K X, et al. 2023. Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alteration of the Mianhuakeng uranium deposit in South China: Implications for mineralization and exploration. *Ore Geology Reviews*, 105606.

贵州金沙岩孔矿床成矿物质来源与沉积环境研究

徐进鸿^{1,2,3}, 王兵¹, 杨应宝¹, 王琼⁴

(1. 铜仁学院, 经济管理学院, 贵州铜仁, 554300; 2. 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; 3. 铜仁学院, 梵净山国家研究院, 贵州铜仁, 554300; 4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025)

铀在核电和国防军工等新兴产业有着不可替代的用途, 美国、欧盟、英国等均将其列为战略性关键金属矿产而引起高度重视(US Department of Defense, 2013; European Commission, 2017)。核电具有碳排放量低、能量密度高、单机容量大以及能够提供持续稳定服务的特点, 是我国实现“双碳”目标的理想选择(王明弹, 2021)。但是我国铀矿资源储量和产量均严重不足, 长期大量依赖进口。研究显示我国 2020 年 80% 的铀矿资源依靠进口, 预测到 2030 年进口将达到 90%, 对外依存度居高不下, 存在被人“卡脖子”的风险, 寻找更多铀矿资源已是一项国家战略性任务(李晓翠等, 2020; 王成等, 2021; World nuclear association, 2022)。磷块岩型铀矿床中的铀资源量为 1467 万 t, 占世界铀资源量的 22.6%, 是极具工业价值和研究意义的铀矿类型(IAEA, 2018)。贵州金沙岩孔矿床产于上震旦统-早寒武世灯影组白云岩上部, 是我国最具有代表性的磷块岩型铀矿床之一(张维乾等, 2018; 李治兴等, 2020), 其成岩成矿物质来源和沉积环境受到广泛关注。

$\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值可以用于识别海相沉积岩的物质来源和成岩作用中是否有生物热水作用的参与, 当比值小于 0.9, 认为成岩物质主要是碎屑物且与物源区较为接近; 当比值在 0.9-1 之间, 认为是与生物热水作用关系密切(Rangin et al., 1981)。磷块岩中 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Fe_2O_3 的含量分别为 6.87-16.11%、0.54-3.88% 和 0.27-8.63%, $\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$ 比值介于 0.45-0.93 之间, 表明岩孔矿床形成于正常的海相沉积环境。

Y 与 Ho 具有相似的地球化学性质, 它们在风化淋滤等地质作用过程中同步迁移、沉淀; 而以离子形式存在时, Y^{3+} 又与 Ho^{3+} 具有不同的表层络合能力, 致使 Ho 元素在海洋中的沉积速率约为 Y 元素的 2 倍, 根据这种特性, Y/Ho 比值具有识别海相沉积环境和非海相沉积环境的作用(Bau and Dulski, 1995), 具有相似地球化学特征的元素还有 Zr 和 Hf(Godfrey et al., 1996)。研究表明上地壳的 Y/Ho 和 Zr/Hf 比值分别为 25 和 36(Rudnick and Gao, 2003), 而海水的分别为 44-74 和 85-130(Bau and Dulski, 1995; Godfrey et al., 1996)。岩孔矿床磷块岩中 Y 和 Ho 的含量分别为 170-1366ppm 和 3.07-23.3ppm, Y/Ho 为 55.37-66.16。Zr 和 Hf 的含量分别为 6.04-18.2ppm 和 0.358-2.75ppm, Zr/Hf 比值为 6.55-20.07。这些地球化学比值说明陆源风化碎屑物质和海水自生来源的物质共同沉淀形成了金沙岩孔磷块岩型铀矿。

海洋中稀土元素来源主要受到地表河流控制, 其含量和配分模式图可以有效识别海相沉积物的物质来源(Murray et al., 1990)。岩孔矿床磷块岩中稀土元素在澳大利亚后太古代页岩(PAAS)标准化配分模式图上具有相对平坦的配分模式图, 与形成于大陆边缘环境的沉积岩非常相似(Murray et al., 1990), 说明成岩成矿物质可能主要来源于陆源碎屑物质。

沉积物中微量元素的富集程度受到水体氧化还原环境的控制, 通过 U、V、Ni 和 REE 等氧化还原敏感元素的比值可以判断古沉积环境。U 本身是一种氧化还原敏感的变价元素, 其富集程度受到沉积环境氧化还原程度的影响, 可以根据 U 和 Th 两种元素来判断氧化还原环境(Wignall, 1994)。以 $\text{U}+\text{Th}/3$ 来代表自生铀含量, 通过计算 $\delta\text{U}(\delta\text{U}=\text{U}/(1/2*(\text{U}+\text{Th}/3)))$ 来判断沉积环境, 当 $\delta\text{U}>1$ 代表缺氧环境; 当 $\delta\text{U}<1$ 代表正常的海水环境(Wignall, 1994)。此外, Th/U 比值也可以指示成矿发生的氧化还原环境(Jones and Manning, 1994; Kimura and Watanabe, 2001)。当 Th/U 比值介于 0-2 之间指示缺氧环境, 而 $\text{Th}/\text{U}>3.8$ 指示氧化环境。V/Cr、Ni/Co 和 $\text{V}/(\text{V}+\text{Ni})$ 比值与海洋的氧化还原环境有关。V/Cr > 4.25 指示缺氧环境, $2<\text{V}/\text{Cr}<4.25$ 代表贫氧环境, 而

基金项目: 贵州省教育厅高等学校科学研究项目青年项目(黔教技(2022)349号); 贵州省地质勘查基金项目(项目编号: MCHC-ZG20212206-2); 国家自然科学基金项目(批准号: No. U1603245); 铜仁市科技计划项目(铜市科研(2022)64号); 铜仁学院博士科研启动基金项目(批准号: trxyDH2106)

第一作者简介: 徐进鸿, 男, 1989年生, 副教授, 主要从事矿床地球化学专业研究, E-mail: jgyxjh@gztrc.edu.cn

V/Cr<2 指示富氧环境(Jones and Manning, 1994)。0.84<V/(V+Ni)<0.89 指示缺氧环境, 0.54<V/(V+Ni)<0.82 代表贫氧环境, 0.46<V/(V+Ni)<0.60 表示氧化环境(Hatch and Leventhal, 1992; Authur and Sageman, 1994)

岩孔矿床磷块岩中 Th 和 U 含量分别为 0.17-0.233ppm 和 321-707ppm; δU 值最低 9 为 1.99, 全部大于 1; Th/U 比值最高为 0.01 和 0.48, 全部小于 2。V、Cr 和 Ni 含量分别为 817-11517ppm、133-1959ppm 和 57.7-81.5ppm, V/Cr 比值最低为 5.19, V/(V+Ni)比值最低为 0.92。这些地球化学参数表明岩孔矿床形成于缺氧沉积环境中。

研究表明海洋沉积物的 Ce 异常受古海水的氧化还原状态控制(Shields and Stille, 2001), 但只有当沉积样品具有平坦稀土元素配分模式和(La/Sm)_N 大于 0.35 时, Ce 异常才可作为海洋环境的指示剂(Morad and Felitsyn, 2001)。岩孔矿床磷块岩在 PAAS 标准化的稀土配分曲线具有近水平的特征, (La/Sm)_N 比值最低为 0.77, 表明该矿床形成后没有遭受明显的后期成岩作用和风化作用影响, Ce 异常可以代表沉积时的原始信息。磷块岩的 Ce 值为 0.41-0.46, 在稀土元素配分模式图上显示明显的 Ce 负异常, 说明岩孔矿床形成于缺氧还原环境。

参考文献:

- Authur M, Sageman B B. 1994. Marine Shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 22(1): 499-551.
- Bau M, Dulski P. 1995. Distribution of yttrium and rare-earth elements in the Penge and Kuruman iron-formations, Transvaal Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 79(1-2): 37-55.
- European Commission. 2017. Study on the review of the list of Critical Raw Materials.
- Godfrey L V, White W M, Salters V J M. 1996. Dissolved zirconium and hafnium distributions across a shelf break in the northeastern Atlantic Ocean. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 3995-4006.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, USA. *Chemical Geology*, 99(1-3): 65-82.
- IAEA. 2020. Uranium 2020: Resource, Production and Demand.
- Jones B, Manning D A. 1994. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chemical geology*, 111(1-4): 111-129.
- Kimura H, Watanabe Y. 2001. Oceanic anoxia at the Precambrian-Cambrian boundary. *Geology*, 29(11): 995-998.
- Morad S, Felitsyn S. 2001. Identification of primary Ce-anomaly signatures in fossil biogenic apatite: implication for the Cambrian oceanic anoxia and phosphogenesis. *Sedimentary Geology*, 143(3-4): 259-264.
- Murray R W, Buchholtz ten Brink M R, Jones D L, et al. 1990. Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale. *Geology*, 18(3): 268-271.
- Rangin C, Steinberg M, Bonnot-Courtois C. 1981. Geochemistry of the Mesozoic bedded cherts of Central Baja California (Vizcaino-Cedros-San Benito): implications for paleogeographic reconstruction of an old oceanic basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 54(2): 313-322.
- Rudnick R L, Gao S. 2003. The composition of the continental crust, in: Rudnick, R.L. (Eds.), *The Crust*: Elsevier-Pergamon, Oxford: 1-64.
- Shields G, Stille P. 2001. Diagenetic constraints on the use of cerium anomalies as palaeoseawater redox proxies: an isotopic and REE study of Cambrian phosphorites. *Chemical Geology*, 175(1-2): 29-48.
- US Department of Defense. 2013. Strategic non-proprietary materials.
- Wignall Paul B. 1994. *Black shales*. Clarendon Press Oxford.
- World Nuclear Association. 2022. *The Nuclear Fuel Report: Expanded Summary-Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2021-2040*.
- 李晓翠, 李林强, 蔡煜琦. 2020. 中国天然铀资源保障策略研究. *铀矿地质*, 36(03), 183-189.
- 李治兴, 秦明宽, 漆富成, 等. 2020. 含铀磷块岩型矿床研究现状和未来展望. *铀矿地质*, 36(06): 520-528.
- 王成, 宋继叶, 张晓, 蔡煜琦. 2021. “两碳目标”下铀资源的保障能力及应对策略. *铀矿地质*, 37(05), 765-779.
- 王明弹. 2021. 构建核能与新能源协同的电源结构. *中国电力报*.
- 张维乾, 刘斌锋, 郑懋荣. 2018. 贵州岩孔含铀磷块岩矿床元素地球化学及其指示意义. *矿产勘查*, 9(02): 253-259.

贵州金沙岩孔矿床铀的赋存状态研究

杨应宝¹, 王兵¹, 徐进鸿^{1,2,3*}, 王琼⁴

(1. 铜仁学院, 经济管理学院, 贵州铜仁, 554300; 2. 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; 3. 铜仁学院, 梵净山国家研究院, 贵州铜仁, 554300; 4. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025)

铀属于不可再生的战略性关键矿产资源, 在核电和国防军工等产业中具有不可替代的用途。研究表明我国铀矿资源对外依存度超过 80%, 存在被“卡脖子”的风险 (World nuclear association, 2022)。磷块岩型铀矿是世界上最重要的铀矿类型之一, 而贵州是我国最重要的磷块岩型铀矿资源产地, 已发现金沙岩孔、铜仁坝黄、遵义松林等一系列矿床, 有望成为我国重要的磷块岩型铀矿资源产地 (李治兴等, 2020)。

金沙岩孔作为贵州最早发现的磷块岩型铀矿床, 前人对该矿床的赋存状态进行研究 (张维乾和左华平, 2018)。但此前的研究受到研究方法的限制, 岩孔矿床中铀的赋存状态还不清楚, 制约了该矿床的开发利用。本次研究在详细的野外地质考察基础上, 采用电子探针能谱面扫描分析、波谱点分析和激光剥蚀等离子体质谱技术(LA-ICP-MS)等技术手段对岩孔矿床开展系统的矿物学和微区微束原位观测工作, 以期深入查明铀的赋存状态。

金沙岩孔矿床位于扬子陆块西南缘、遵义断块内、毕节北东向构造带变形区, 近东西向岩孔背斜北翼; 背斜长 25km, 北翼地层倾角缓 5°~7°, 南翼地层倾角 35°~46°; 核部出露地层主要为埃迪卡拉系-寒武系灯影组, 两翼出露地层以寒武系为主; 富铀磷块岩出露于灯影组白云岩和牛蹄塘组碳质页岩之间, 平均厚度 0.92m, 平均品位 0.059% (张维乾等, 2018)。

能谱显示岩孔矿床铀矿物主要为沥青铀矿和硅钙铀矿, 它们以微米级矿物包体包裹于沥青之中。电子探针分析显示沥青铀矿和硅钙铀矿的 UO_2 含量分别为 69.61%~70.46%和 43.27%。磷灰石是岩孔矿床主要矿石矿物, 电子探针分析发现其 CaO 、 P_2O_5 和 F 含量分别为 48.51%~55.29%、36.77%~43.71%和 3.7%~4.56%; Y_2O_3 和 UO_2 的最高含量分别为 0.05%和 0.35%。

能谱面扫描分析发现磷块岩中有机质中碳含量最高, 同时伴随有铀的明显富集但分布不均一, 表明部分铀被有机质吸附。 P 、 Ca 和 F 在磷灰石含量最高且均匀分布, 铀在磷灰石中含量较低, 但分布均匀, 和 P 、 Ca 和 F 分布特征相似, 表明铀可能以类质同像替代方式赋存在磷灰石中。此外能谱面扫描分析发现磷块岩中存在铀的显著小亮斑, 暗示存在铀的独立矿物。

LA-ICP-MS 分析发现磷灰石中 U 主要呈平滑均分布, 含量为 90.70~402.25ppm, 表明 U 以类质同像替代存在于磷灰石晶格中; 少量 U 的剥蚀曲线凹凸不平, 表明激光剥蚀过程中遇到铀的独立矿物。

综合电子探针、能谱面扫描和 LA-ICP-MS 分析结果显示金沙岩孔矿床铀的赋存状态有三种: 类质同像存在于磷灰石中、钙铀云母等铀的独立矿物和吸附存在于有机质中。

参考文献:

- World Nuclear Association. 2022. The Nuclear Fuel Report: Expanded Summary-Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2021-2040.
李治兴, 秦明宽, 漆富成, 等. 2020. 含铀磷块岩型矿床研究现状和未来展望. 铀矿地质, 36(06): 520-528.
张维乾, 刘斌锋, 郑懋荣. 2018. 贵州岩孔含铀磷块岩矿床元素地球化学及其指示意义. 矿产勘查, 9(02): 253-259.
张维乾, 左华平. 2018. 贵州省金沙县岩孔含铀磷块岩矿床地质特征及成因探讨. 矿产与地质, 2018, 32(01): 86-89+96.

基金项目: 贵州省教育厅高等学校科学研究项目青年项目(黔教技(2022)349号); 贵州省地质勘查基金项目(项目编号: MCHC-ZG20212206-2); 国家自然科学基金项目(批准号: No. U1603245); 铜仁市科技计划项目(铜市科研(2022)64号); 铜仁学院博士科研启动基金项目(批准号: trxyDH2106)

第一作者简介: 杨应宝, 男, 1999年生, 本科生, 主要从事地理科学研究, E-mail: 2936637198@qq.com

*通信作者, E-mail: jgyxjh@gztrc.edu.cn

下庄花岗岩中绿泥石矿物化学特征及其铀成矿指示意义

杨跃贵, 陶继华*

(东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013)

华南广泛分布了大量的花岗岩型铀矿床, 这些铀矿床常常与中生代(印支-燕山期)富 U 花岗岩在空间上紧密共生。下庄花岗岩体位于南岭东段, 其 U 平均含量高达 20.39ppm (Chen et al., 2012), 岩体中产出了大量的铀矿床, 比如希望、石土岭、白水寨、竹山下等铀矿床(陈佑纬等, 2010; Chen et al., 2012; Bonnetti et al., 2023), 并形成我国最大的花岗岩型铀矿田, 铀成矿作用主要发生在燕山期(Chen et al., 2012; 骆金诚等, 2019; Bonnetti et al., 2023)。前人研究认为下庄花岗岩属于印支期 S 型花岗岩, 具有比鲁溪花岗岩更高的岩浆分异演化特征(Chen et al., 2012)。

本研究主要对下庄花岗岩中绿泥石开展系统的矿物学研究工作。岩相学观察结果显示绿泥石主要由黑云母蚀变而来, 保留了黑云母的晶体形态, 呈黑云母假象, 可见包裹有锆石、磷灰石、钼石、独居石、晶质铀矿、磷钇矿、钛铁矿、黄铁矿等细颗粒矿物包裹体。电子探针化学成分分析结果显示, 下庄花岗岩中绿泥石的 SiO_2 含量为 23.23%~27.09%, Al_2O_3 含量为 16.63%~20.08%, FeO^T 含量为 23.23%~27.09%, MgO 含量为 23.23%~27.09%, 化学成分特征显示其主要属于糯绿泥石和铁镁绿泥石, 属于相对富镁的绿泥石, 与诸广山南部长江产铀花岗岩中的绿泥石特征类似, 为相对酸性和低度氧化性热液作用下的蚀变产物(张丽等, 2018)。温度计算结果显示, 下庄花岗岩中绿泥石的形成温度为 214°C~267°C, 平均值为~238°C, 属于低温热液蚀变产物。相对较低的 $\text{Al}/(\text{Al}+\text{Mg}+\text{Fe})$ 值(0.31~0.38, 平均值为 0.35)暗示下庄花岗岩中的绿泥石化热液蚀变作用可能与中基性岩浆作用有关。结合下庄岩体广泛发育的燕山期中基性岩脉, 其形成时代与同时期华南广泛的岩石圈伸展作用相对应, 于是在岩石圈伸展背景下大量基性岩浆作用带来大量富含矿化剂($\sum\text{CO}_2$)的氧化性流体(Hu et al., 2008; 骆金诚等, 2019)。因此, 下庄花岗岩绿泥石化很可能与燕山期基性岩浆作用形成的相对酸性和低度氧化性热液流体有关, 热液流体可以大量萃取富 U 花岗岩中的 U 元素而富集成矿(Hu et al., 2008; Zhang et al., 2023)。微量元素特征显示, 下庄花岗岩中绿泥石(U 含量最高达到 18.2ppm)具有明显比黑云母($\text{U}=0.557\sim 1.4\text{ppm}$, 陈佑纬等, 2010)更高的 U 含量, 表明热液蚀变流体相对富 U。

综合上述分析, 我们认为燕山期基性岩浆作用形成的偏酸性的、低度氧化性热液流体不仅使黑云母发生绿泥石化, 同时黑云母所包裹的晶质铀矿和独居石、磷钇矿、钼石等富 U 副矿物中的铀被活化进入流体, 形成富 U 的热液流体, 当富 U 流体中的 CO_2 等挥发份大量溢出, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 、 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$ 等离子解体同时发生还原作用, U 便以四价(UO_2)形式沉淀成矿。

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41963002; 42063001)

第一作者简介: 杨跃贵, 男, 2000 年生, 硕士, 主要从事岩浆岩与铀-多金属成矿作用研究。

* 通讯作者, E-mail: taojihua123@163.com

参考文献:

- Bonnetti, C., Riegler, T., Liu, X. et al. 2023. Granite-related high-temperature hydrothermal uranium mineralisation: evidence from the alteration fingerprint associated with an early Yanshanian magmatic event in the Nanling belt, SE China. *Mineralium Deposita*. 58(3): 427-460.
- Chen, Y. W., Bi, X. W., Hu, R. Z. et al. 2012. Element geochemistry, mineralogy, geochronology and zircon Hf isotope of the Luxi and Xiazhuang granites in Guangdong province, China: Implications for U mineralization. *Lithos*. 150(0): 119-134.
- Hu, R. Z., Bi, X. W., Zhou, M. F et al. 2008. Uranium Metallogenesis in South China and Its Relationship to Crustal Extension during the Cretaceous to Tertiary. *Economic Geology*. 103(3): 583-598.
- Zhang, L., Wang, F., Zhou, T et al. 2023. Contrasting alteration textures and geochemistry of allanite from uranium-fertile and barren granites: Insights into granite-related U and ion-adsorption REE mineralization. *American Mineralogist*. 108(7): 1298-1314.
- 陈佑纬, 毕献武, 胡瑞忠等. 2010. 贵东岩体黑云母成分特征及其对铀成矿的制约. *矿物岩石地球化学通报*. 29(4): 355-363.
- 骆金诚, 齐有强, 王连训等. 2019. 粤北下庄铀矿田基性岩脉 Ar-Ar 定年及其与铀成矿关系新认识. *岩石学报*. 35(9): 2660-2678.