



华南古生代汞成矿事件: 黔东尖岩汞矿方解石原位U-Pb年代学及地球化学约束

罗开^{1,2}, 周家喜^{1,2,3*}, Alexandre CUGERONE⁴, 周美夫^{3†}, 俸月星⁵, 金中国⁶, Jianxin ZHAO²

1. 云南大学地球科学学院云南省高校关键矿产成矿学重点实验室, 昆明 650500;
2. School of Earth and Environmental Sciences, The University of Queensland, Brisbane QLD 4072, Australia;
3. 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;
4. Department of Earth Sciences, University of Geneva, Geneva 1205, Switzerland;
5. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 珠海 519000;
6. 贵州省有色金属和核工业地质勘查局, 贵阳 550005

* 通讯作者, E-mail: zhoujiaxi@ynu.edu.cn

† 通讯作者, E-mail: zhoumeifu@hotmail.com

收稿日期: 2022-10-31; 收修改稿日期: 2023-03-08; 接受日期: 2023-04-17; 网络版发表日期: 2023-07-19

国家自然科学基金项目(批准号: 41872095、U1812402、42172082)、云南大学科研启动计划项目(编号: YJRC4201804)和云南省人才计划项目(编号: YNRR-QNRC-2018-104)资助

摘要 由于缺乏合适的定年矿物和方法, 热液汞矿床的年龄往往难以精确限定. 本文以华南低温成矿域内的黔东尖岩汞矿床方解石为主要研究对象, 利用激光原位U-Pb定年和元素、同位素地球化学分析, 探讨一期重要的古生代汞成矿事件. 尖岩汞矿床主要由辰砂和方解石组成. 方解石可分为两期: (1) 成矿期方解石(Cal-I); (2) 成矿后方解石(Cal-II). Cal-I主要呈细粒自形-半自形, 与辰砂紧密共生; Cal-II较纯, 呈粗粒半自形-他形, 切穿Cal-I. Cal-I具有较高的U含量(0.1~1.3ppm)和U/Pb比值(高达4.2), 是开展原位U-Pb定年的理想矿物. 利用激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICP-MS), 获得Cal-I的原位U-Pb年龄为(426.3±5.7)Ma(MSWD=1.5), 表明尖岩汞矿床形成于早古生代末期, 与区域上诸多以碳酸盐岩为容矿岩石的后生热液汞、铅锌、重晶石-萤石等矿床的年龄(440~400Ma)基本一致. 结合已有地球化学和年代学资料, 认为上述矿床可能同属古生代加里东构造作用汞多金属成矿事件的产物.

关键词 方解石原位U-Pb定年, 古生代汞成矿事件, 加里东构造作用, 尖岩汞矿床, 华南

中文引用格式: 罗开, 周家喜, Cugerone A, 周美夫, 俸月星, 金中国, Zhao J. 2023. 华南古生代汞成矿事件: 黔东尖岩汞矿方解石原位U-Pb年代学及地球化学约束. 中国科学: 地球科学, 53(8): 1898–1912, doi: [10.1360/N072022-0311](https://doi.org/10.1360/N072022-0311)

英文引用格式: Luo K, Zhou J, Cugerone A, Zhou M, Feng Y, Jin Z, Zhao J. 2023. A Paleozoic mercury mineralisation event in South China: *In situ* U-Pb dating and chemical compositions of calcite from the Jianyan Hg deposit. Science China Earth Sciences, 66(8): 1877–1891, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1106-4>

1 引言

华南大面积低温成矿域作为全球两大公认的大面积低温成矿域之一, 提供了全球>50%的Sb、10%的Au、9%的Hg、5%的Pb和Zn资源量(Peng等, 2003a; Hu等, 2017). 成矿域内发育多种成因类型的低温(<200~250°C)热液矿床(涂光炽等, 2004), 包括以碳酸盐岩为容矿岩石的热液型Hg、Pb-Zn和Ba-F矿床, 以碎屑岩为容矿岩石的卡林型Hg-Au-As-Sb矿床, 以及沉积岩中的脉状Au-Sb矿床(图1; Wang等, 2020; Zou等, 2022). 这些矿床受褶皱、断裂和/或岩性界面控制. 已有年代学资料显示, 华南低温热液矿床主要形成于印支期(230~200Ma)和燕山期(160~130Ma)(图1; Su等, 2009; Mao等, 2013; Hu等, 2017; Zhou等, 2018). 尽管一些较老的年龄相继报道(470~370Ma; Peng等, 2003a; 胡瑞忠等, 2007; 张遵遵等, 2018), 暗示可能存在一期古生代低温成矿事件, 但该事件仍存有争议.

扬子地块东南缘广泛发育以碳酸盐岩为容矿岩石的后生热液Hg、Pb-Zn、Ba-F矿床, 构成一条长150km、宽5~10km的NW-SE向汞多金属成矿带, 即湘西-黔东汞多金属成矿带, 包括72个Hg矿床、~300个Pb-Zn矿床、~300个Ba-F矿床, 著名矿床如万山汞矿、花垣铅锌矿和大竹园重晶石-萤石矿(图1; 王加昇等, 2010; Hu等, 2017; Zou等, 2022). 因矿物组合简单(辰砂+闪锌矿+方解石/白云石+重晶石+萤石+石英), 缺乏富放射性同位素的矿物, 难以精确限定成矿时代(Studemeister, 1984; Luo等, 2020). 尽管已报道年龄如凹子岗铅锌矿床的闪锌矿Rb-Sr年龄(431±24)Ma(曹亮等, 2015)、乱岩塘汞矿床的方解石Sm-Nd年龄(364±24)Ma(王加昇和温汉捷, 2015)、平秋金矿的石英流体包裹体Rb-Sr年龄(492±37)Ma(胡瑞忠等, 2007), 但其测年方法的应用往往受限, 这是因为: (1) 以往采用单矿物全溶法难以区分多期次方解石、闪锌矿, 或剔除次生成因流体包裹体(Uysal等, 2007; Su等, 2009; Zhu等, 2017); (2) 获得Sm/Nd比值变化范围较窄, 导致年龄误差较大(廖震文等, 2015; 杨红梅等, 2015; Zhu等, 2017); (3) Rb、Sr等元素的赋存状态不明(Bradley和Leach, 2003).

激光剥蚀多接收电感耦合等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)具有高空间分辨率(<100μm)和低检测限(~1ppb的Pb), 可以在微米尺度上获得较大变化范围的

U/Pb比(Nuriel等, 2017). 碳酸盐矿物LA-MC-ICP-MS原位U-Pb定年能够精确限定成矿或构造热事件发生的时间(Luo等, 2020; Jin等, 2021; Pinet等, 2022). 该方法已成功运用于热液铋矿(Luo等, 2020; Xu等, 2022)、铅锌矿(Sheng等, 2022; Xiong等, 2022; Giorno等, 2022)和金矿床定年(Jin等, 2021), 但关于汞矿床的定年鲜有报道.

尖岩汞矿位于扬子地块东南缘湘西-黔东汞多金属成矿带, 是带内典型的低温热液汞矿床. 本文通过研究尖岩汞矿方解石的矿物学、微量元素、Sr同位素组成和原位U-Pb定年, 精确限定其成矿年龄, 结合区域矿床对比, 指示一期重要的古生代汞成矿事件.

2 区域地质

扬子地块与华夏地块于~830Ma沿江南造山带拼合形成华南陆块(图1; Zhao等, 2011). 扬子地块具有“基底+盖层”双层结构. 基底地层在北部以晚太古代变质岩为代表, 在西、东部主要为古元古代末期至新元古代弱变质岩, 以及新元古代侵入岩(Chen等, 1991; Zhou等, 2002; Wang等, 2007). “盖层”为寒武-三叠系海相沉积岩和侏罗系、白垩系、第四系陆相沉积岩为主的沉积序列(Yan等, 2003).

扬子地块东南缘经历了新元古代(820~635Ma)拉张裂解和震旦纪-早寒武世(635~488Ma)被动大陆边缘演化(Li等, 2003). 以NE-SW向保靖-铜仁-玉屏断裂为界, 西部主要沉积了一套厚层白云岩, 东部为层状砂岩、泥岩、灰岩和白云岩(图1). 区内早古生代末期(488~420Ma)进入陆内造山阶段, 缺失上奥陶统-侏罗系沉积地层(Zhang等, 2019). 造山晚期的造山带坍塌伴随岩浆上涌(Chu等, 2012), 大量花岗岩侵入于江南造山带东南侧(图1). 受古太平洋板块俯冲影响, 研究区于225~215Ma(Chu等, 2012)再次经历陆内造山.

研究区NE-SW向断裂和E-W向次级褶皱反映了多期构造活动. NE-SW断层是汞矿床的主要控矿构造(图2). 矿区范围内, 汞矿体受顺层断层控制, 主要分布在褶皱核部.

3 矿床地质

湘西-黔东地区汞矿床主要包括单汞型与汞铅锌

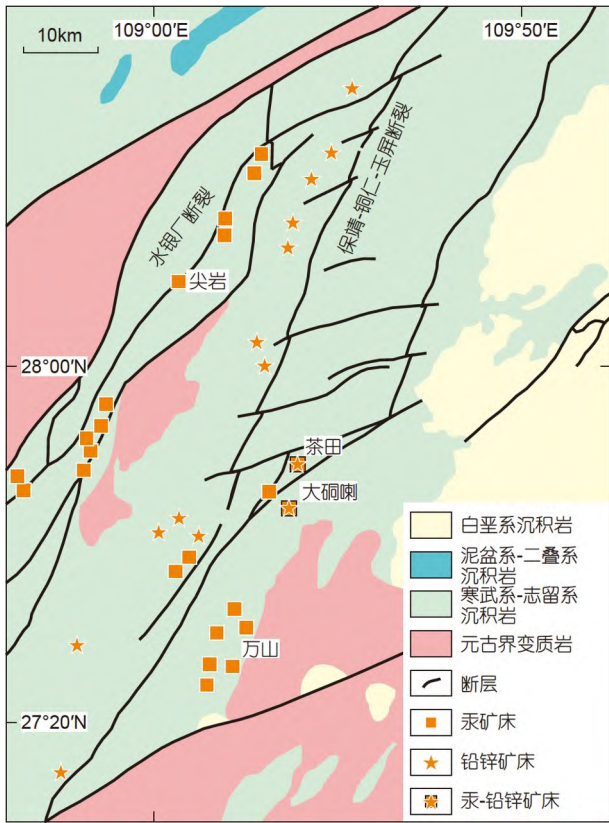


图2 保靖-铜仁-玉屏断裂带地质图
显示汞、铅锌等矿床分布

型。单汞型如万山、水银厂、尖岩等矿床，汞铅锌型如茶田、大碛喇等矿床(图1; Liu等, 2017)。这些矿床赋存于寒武系至奥陶系碳酸盐岩中，往往发育重晶石-萤石矿化。按照规模呈现出一定的分布规律，即大型矿床(>2000t的Hg)主要分布在成矿带东南部，小型矿床(<500t的Hg)主要位于成矿带北部(王加昇, 2012)。

尖岩矿床受NE-SW向水银厂断裂带控制，该断裂带由多条倾向SE的逆断层组成(图2)。矿区出露震旦系、寒武系和奥陶系。矿体主要赋存于寒武系后坝组浅灰色-紫色厚层泥晶白云岩和奥陶系桐梓组生屑灰岩、白云岩中(图3)，受NE-SW向顺层断裂控制(图4a)。

矿体长210~500m，厚10~30m，Hg品位为0.2~0.3wt.%(500~2000t的Hg)。矿石矿物组合简单，包括辰砂和少量黄铁矿、辉锑矿和褐铁矿。脉石矿物主要为方解石(50vol.%)、白云石(40vol.%)和石英(10vol.%)。辰砂呈暗红色(图4b~4d)，细至粗粒，或多晶集合体(图

4e、4f)，局部见方解石、辰砂与有机质共生(图4g)。

4 采样及分析方法

样品采自寒武系后坝组地层中的主矿体，选择代表性样品制成环氧树脂圆靶，用1000目金刚石砂纸精细抛光，然后用Milli-Q超纯水进行15min超声波清洗。电子探针(EPMA)分析在南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海)进行，仪器型号为JEOL JXA-iSP100。在加速电压15kV、电流5nA、束斑5 μm 的条件下，测试Ca、Mg、Mn、Ba、Sr、Fe、Si。

原位微量元素、Sr同位素、原位U-Pb定年分析均在澳大利亚昆士兰大学放射性同位素实验室(RIF-UQ)完成。选取代表性样品圆靶经超纯水清洗后，置于60 $^{\circ}\text{C}$ 热板干燥。LA-ICP-MS采用ASI Resolution LR 193nm Ar F准分子激光剥蚀系统，结合Laurin Technic和Thermo iCap RQ四级杆质谱。通过NIST612线扫，束斑50 μm 、速度3 $\mu\text{m s}^{-1}$ 和频率10Hz进行调谐，以优化灵敏度。分析样品时，激光剥蚀采用能量密度3J cm^{-2} ，束斑100 μm ，频率10Hz，以超纯He和Ar混合气体为载气，少量N₂用于提高传输效率和灵敏度。质控标样采用Durango和NIST-614(Kendrick等, 2020)。NIST-612用于含量校正，EPMA测得的Ca含量作内标，用Iolite 3.6软件(Paton等, 2010)进行数据处理。

原位微钻获取每个样品约50mg方解石粉末后倒入特氟龙烧杯，在弱醋酸中消解，以避免非碳酸盐成分中放射性成因Sr的混入。按照阳离子交换柱标准程序分离上清液后，在Nu Plasma I MC-ICP-MS上测量。每测定5个样品后测定一次SRM 987标样。Sr空白一般<50pg，比样品Sr含量(>1000ng)低4个数量级。SRM 987的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr重复精度为0.710250 \pm 0.000032(2 σ)。

原位U-Pb同位素分析使用Nu Plasma II MC-ICP-MS，激光剥蚀系统为193-nm UV ArF准分子激光器和Laurin Technic双室样品仓。对每个测点进行5s预剥蚀，以去除样品表面污染。尖岩汞矿床方解石U、Pb含量较低(一般<1ppm，1ppm=1 $\mu\text{g g}^{-1}$)，常规四极杆ICP-MS或MC-ICP-MS难以精确测量(Kylander-Clark, 2020)。因此，本次在Nu Plasma II MC-ICP-MS最高质量端安装电子倍增器来测量²³⁸U，该离散打拿极倍增器具有高灵敏度特点(100 μm ; 3J cm^{-2} ; 10Hz; ²³⁸U>50,000cps ppm⁻¹; ²⁰⁷Pb本底=10~30cps)，比四级杆ICP-

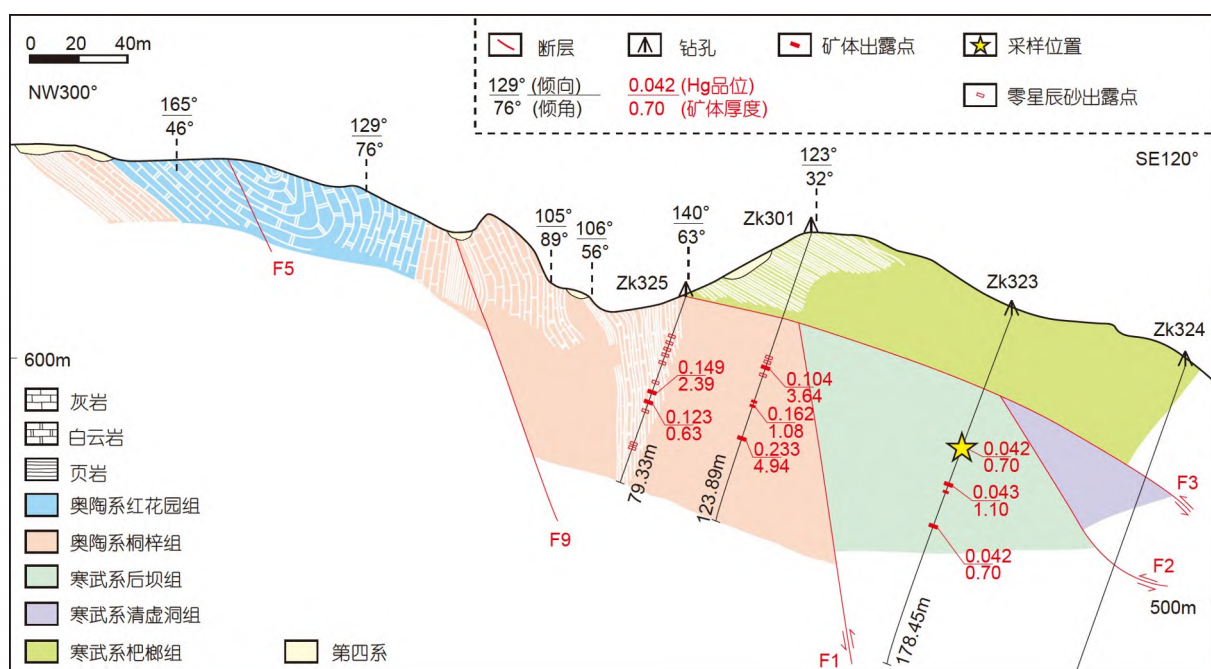


图3 尖岩汞矿床剖面图

F₃为主要控矿断层, 断裂上盘寒武系页岩可能对成矿流体运移起隔挡层作用

MS高3~10倍(Luo等, 2020). 使用NIST614玻璃和基体匹配的方解石标样进行校正. 数据处理使用Iolite 3.6软件(Paton等, 2010), 用U和Pb同位素计数来计算U和Pb的近似含量.

基体匹配方解石标样选用洞穴钙板方解石ASH-15D((3.001±0.012)Ma, TIMS结果; Mason等, 2013; Vaks等, 2013; Nuriel等, 2017)和LA-MC-ICP-MS测定的标样AHX-1a(加权平均年龄(209.8±1.3)Ma, n=21, MSWD=2.7; Cheng等, 2020), 校正²³⁸U/²⁰⁶Pb. 用标样年龄与其真实年龄之间的偏移因子来归一化样品的²³⁸U/²⁰⁶Pb比, 方法见Roberts等(2017). 然后, 使用Iso-plotR(Vermeesch, 2018)进行²³⁸U/²⁰⁶Pb-²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb的Terra-Wasserburg投图. 此外, 本文还利用LA-ICP-MS对同一脉体不同样品进行U-Pb定年, 以验证年龄的可靠性, 相关测试方法详见附录2.

5 结果

5.1 方解石矿物学

尖岩汞矿床方解石可划分为两期: 成矿期方解石(Cal- I)和成矿后方解石(Cal- II). Cal- I与辰砂、褐

铁矿共生(图4a). Cal- II主要呈白色细网脉穿切Cal- I. Cal- I呈乳白色团块状(<10cm), 与有机质、铁锰碳酸盐蚀变密切相关, 光学镜下一般为自形-半自形, 晶粒较小(<100μm), 具菱形解理(图4g). 在阴极发光(CL)下Cal- I方解石呈暗橙色; 围岩白云岩CL强度更高, 呈亮橙色(图4h). Cal- I与辰砂呈共结边, 局部形成共生结构, 暗示Cal- I与辰砂同时沉淀. 局部见黄铁矿被Cal- I包裹(图4e、4f). Cal- II较纯, 几乎不含硫化物和有机质, 通常呈半自形-它形, 比Cal- I粒度大, 一般>100μm, CL强度最低, 为深灰色(附录2).

5.2 方解石原位微量元素含量

尖岩汞矿床方解石的LA-ICP-MS微量元素含量结果见附录1. Cal- I和Cal- II的Fe含量接近, 分别为 $95.4 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$ (平均 98.2×10^{-6} ; n=46)和 $95.0 \times 10^{-6} \sim 103 \times 10^{-6}$ (平均 97.5×10^{-6} ; n=20). 但二者Mn含量明显不同, 分别为 $16.9 \times 10^{-6} \sim 32.9 \times 10^{-6}$ (平均 27.4×10^{-6} ; n=46)和 $37.4 \times 10^{-6} \sim 64.2 \times 10^{-6}$ (平均 52.0×10^{-6} ; n=20). 围岩白云岩Fe($155 \times 10^{-6} \sim 6989 \times 10^{-6}$; 平均 1125×10^{-6} ; n=19)和Mn($45.1 \times 10^{-6} \sim 64.8 \times 10^{-6}$; 平均 53.3×10^{-6} ; n=19)含量高于方解石(图5a). Cal- I和

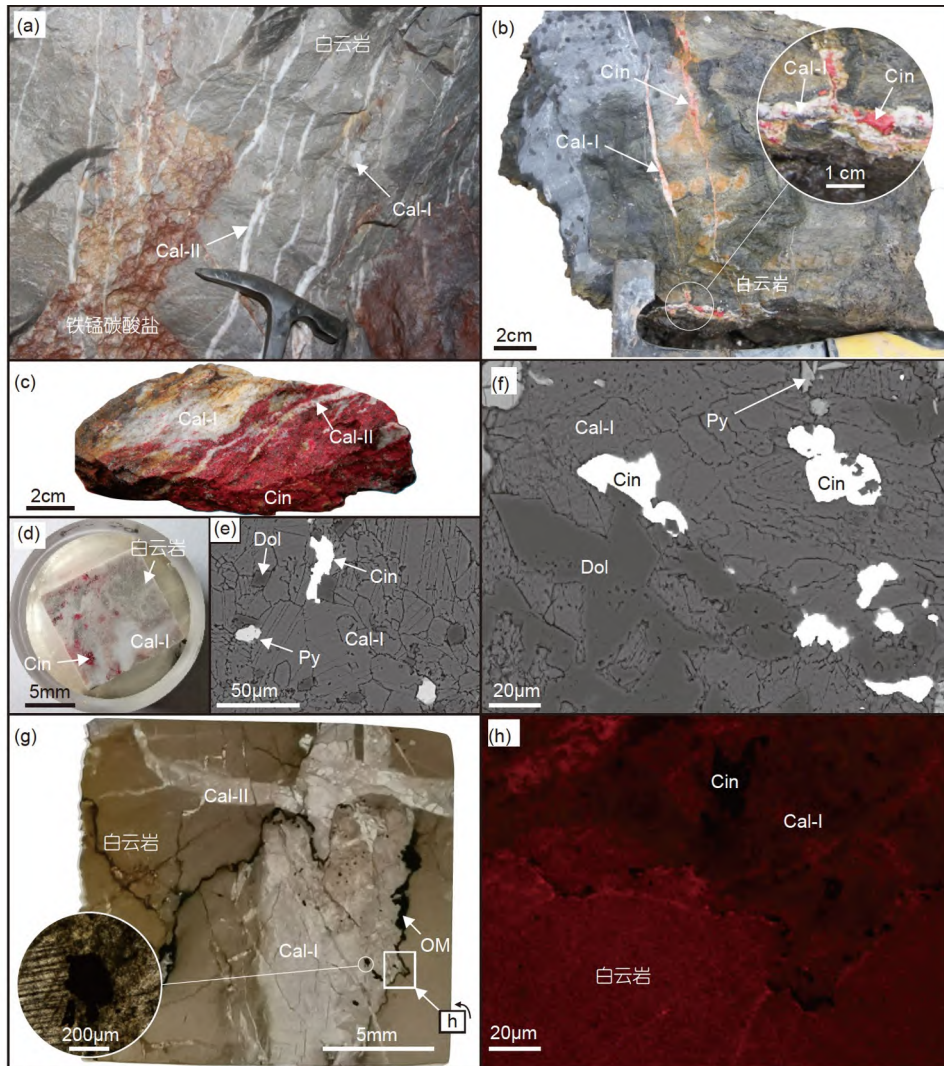


图4 尖岩汞矿床坑道、手标本和显微镜下照片

(a) 方解石脉切穿铁锰碳酸盐矿物和围岩白云岩; (b)~(d) 方解石与辰砂紧密共(伴)生; (e), (f) 背散射(BSE)图像显示方解石、白云石(Dol)、辰砂(Cin)与黄铁矿(Py)之间的生成顺序关系; (g) Cal- I 与Cal- II 的透射光照片, OM代表有机质, 白色方框代表CL成像位置; (h) 围岩白云岩与Cal- I 的CL图像

Cal- II 稀土元素总含量($\sum\text{REE}=2.48\times 10^{-6}\sim 55.8\times 10^{-6}$; 均值 17.5×10^{-6})和Eu异常值($\delta\text{Eu}=0.6\sim 1.0$; 平均0.7)与围岩白云岩相似。围岩白云岩和Cal- I 具有相似的La/Y 比值(0.8~4.4; 均值1.9; $n=65$), 而不同于Cal- II (0.3~1.7; 均值0.7; $n=20$)(图5b)。围岩白云岩、Cal- I 与Cal- II 具有不同的球粒陨石标准化稀土配分模式(图6a~6c), 轻重稀土比值(LREE/HREE)分别为12.7~15.7(平均14.2)、11.4~47.8(平均22.5)和5.9~16.1(平均8.7)。Cal- I 和Cal- II 方解石的U/Pb比值分别为1.1~17.8(平均3.9; $n=40$)和0.1~1.2(平均0.6; $n=84$)。

Cal- I 较Cal- II 的U/Pb比值略高, 且变化范围更宽。

5.3 锶同位素

尖岩矿床方解石 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.710227~0.710907(2σ ; 附录1)。Cal- I 与Cal- II 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 相似, 分别为0.710381~0.710907($n=3$)和0.710227~0.710440($n=4$)(图7)。

5.4 方解石原位U-Pb年龄

Cal- I 的U含量为 $0.101\times 10^{-6}\sim 1.348\times 10^{-6}$ (平均

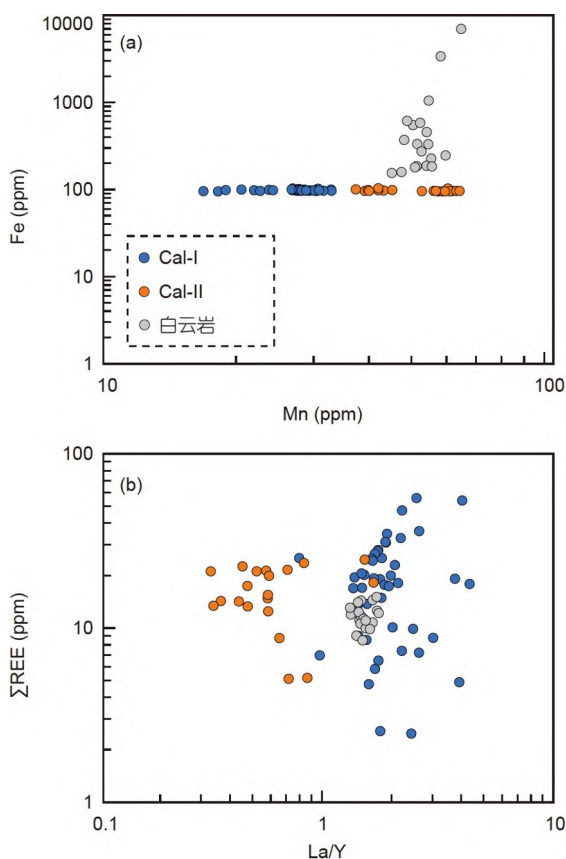


图5 尖岩汞矿碳酸盐矿物微量元素组成(LA-ICP-MS)
(a) Fe-Mn相关关系; (b) REE与La/Y比值关系图

0.420×10^{-6}), Pb含量为 $0.024 \times 10^{-6} \sim 0.783 \times 10^{-6}$ (平均 0.276×10^{-6}), $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 值为1.7~4.2(图8a, 8b; 附录1). 28个分析数据拟合等时线年龄(426.3 ± 5.7)Ma (MSWD=1.5). 标样ASH-15D(3.001 ± 0.012)Ma; Mason等, 2013; Vaks等, 2013; Nuriel等, 2017)测得的年龄与已知年龄(3.10 ± 0.18)Ma; MSWD=2.0; 附录2)吻合, 保证了年龄的准确性.

同一脉体不同样品的LA-ICP-MS U-Pb年龄为(416.9 ± 39.7)Ma(MSWD=2.1; 图8c、8d). 因U/Pb比值较低, 该年龄具有较大的误差, 但与LA-MC-ICP-MS获得的年龄在误差范围内一致. 因此, 尖岩汞矿床成矿期方解石(426.3 ± 5.7)Ma的年龄具有地质意义.

6 讨论

6.1 区分成矿期与非成矿期方解石

成矿期与非成矿期方解石从矿物结构和颜色上往

往难以区分, 但方解石地球化学组成记录了成矿流体的相关信息, 可用于判别其成因(Fusswinkel等, 2013; Smith-Schmitz和Appold, 2018). 尖岩汞矿两期热液方解石Fe含量相似, Mn含量不同(图5a). Mn是阴极发光激发剂(Peyrotty等, 2020), 围岩白云岩的Mn含量较热液方解石高, 所以具有更高的CL强度. Fe是阴极发光淬灭剂, 但尖岩矿床碳酸盐矿物Fe含量普遍较低, 对CL强度的影响可能不大(例如, Marshall, 1988). Cal-II具有较低的Fe/Mn比值(1.5~2.7), 可能导致其CL强度较围岩白云岩和Cal-I低.

与围岩白云岩不同, 成矿期方解石Cal-I具有较高的La/Y比值和变化范围较宽的 ΣREE 含量(图5a、5b), 暗示成矿期方解石成矿物质可能来自深部, 而非完全来自围岩白云岩溶解. Cal-I比Cal-II具有更高的La/Y比和LREE/HREE比, 表明成矿期与非成矿期热液流体来源不同(Luo等, 2020). U/Pb比值则进一步区分Cal-I与Cal-II, 其中成矿期方解石Cal-I具有较高的U/Pb比.

6.2 华南低温热液矿床方解石地球化学特征

尖岩矿床不同期次方解石的LREE/HREE比值变化反映出成矿流体中稀土元素组成的差异(Michard和Albarède, 1986). 在热液Hg-Pb-Zn成矿体系中, 稀土Cl络合物较稳定, 由盆地卤水中的Cl活化成矿元素和稀土沉淀形成的方解石往往显示轻稀土富集特征(Bau和Dulski, 1995; Salvi和Williams-Jones, 1996; Barnes, 1997), 而中生代Au-Sb成矿体系以碳酸根络合物为主, 在近中性至弱碱性流体中碳酸根会优先活化迁移重稀土元素, 导致成矿流体中的重稀土相对富集(王加昇等, 2010; Tan等, 2017). 尖岩矿床方解石的稀土元素配分模式与大碛喇、茶田、万山汞矿田, 以及古生代花垣铅锌矿田相似(王加昇等, 2010; 隗含涛等, 2017), 与中生代交犁汞矿、排庭金矿方解石则显著不同(图6d; 韩振春等, 2017; Xie等, 2017).

华南中生代低温热液汞矿床方解石通常具有Eu正异常($\delta\text{Eu} > 1.0$), 且 δEu 变化范围较宽, 但湘西-黔东地区以碳酸盐岩为容矿岩石的热液型Hg-Pb-Zn-Ba-F矿床的方解石普遍具有Eu负异常和较窄的 δEu 变化范围($\delta\text{Eu} = 0.5 \sim 1.0$; 图6d; 王加昇等, 2010). 前人热力学计算和理论研究表明, 温度是 $\text{Eu}^{3+}/\text{Eu}^{2+}$ 比值的主要影响因素(Bau和Moller, 1992). 当温度 $> 200^\circ\text{C}$ 时, Eu^{2+} 占主导,

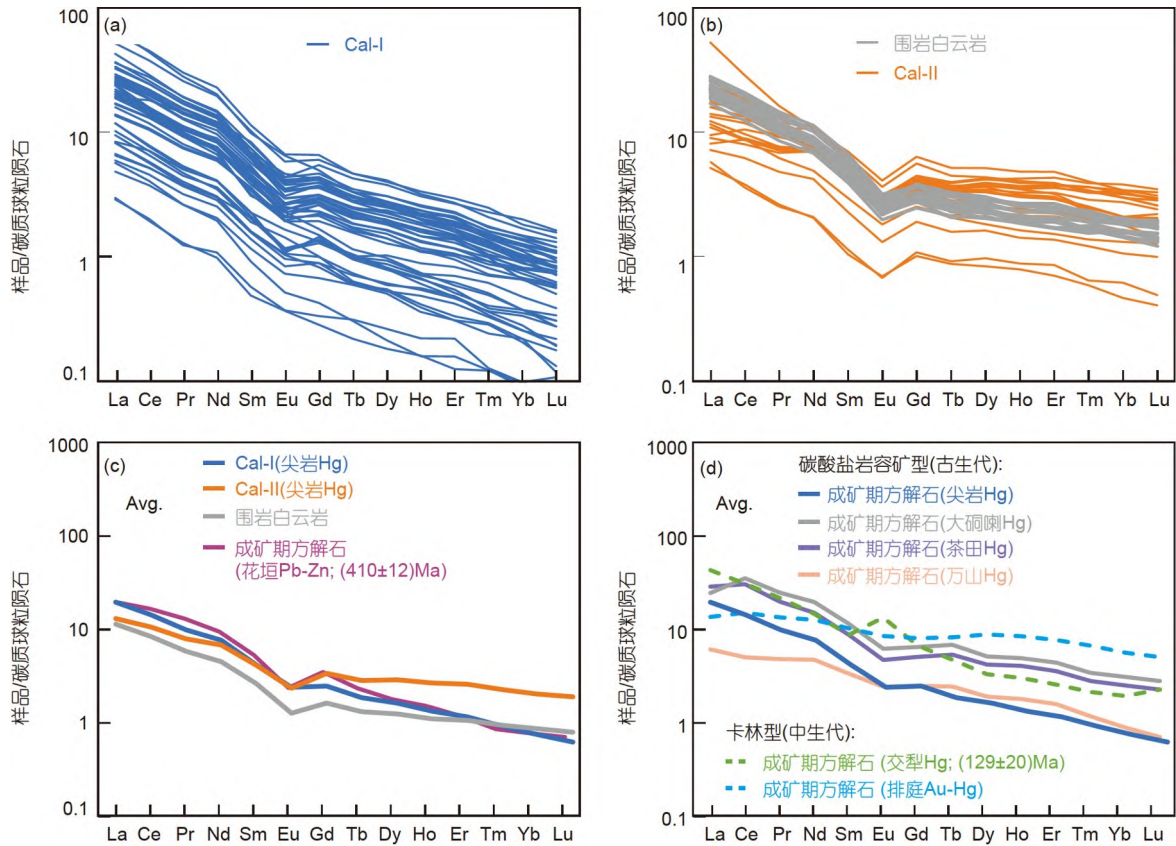


图6 尖岩矿床碳酸盐矿物稀土元素组成与华南低温矿床对比

(a) Cal-I和(b) Cal-II与围岩白云岩的稀土元素球粒陨石归一化模式; (c) 尖岩汞矿床碳酸盐矿物与邻近花垣铅锌矿成矿期方解石的稀土配分模式(隗含涛等, 2017); (d) 华南不同时代汞矿床成矿期方解石的稀土配分模式(王加昇等, 2010; 韩振春等, 2017; Li等, 2020). 球粒陨石数据引自Sun和McDonough(1989). Avg.代表稀土元素含量均值. 矿床年龄引自段其发等(2014)、王加昇和温汉捷(2015)

会优先进入方解石. 此条件下形成的方解石往往具有正Eu异常. 因此, 湘西-黔东南地区Hg-Pb-Zn-Ba-F矿床可能形成于相对较低的温度(<200℃), 这与前人报道的流体包裹体均一温度(90~170℃)一致(王加昇等, 2010), 说明成矿流体可能与低温盆地卤水有关.

尖岩汞矿成矿期方解石Sr同位素比值较为均一($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}=0.710381\sim 0.710907$), 与中元古界基底岩石(0.712700~0.726100)、Au-Sb矿床形成鲜明对比(图7; Peng和Hu, 2001; 肖宪国, 2014; 孙国涛等, 2016; Li H等, 2018). 锑矿床Sr同位素组成与基底岩石相似(Chen等, 2020), 但与Hg、Pb-Zn矿床有明显差异, 暗示Hg、Pb-Zn矿床的成矿物质来源与Sb的基底来源可能不同.

综上, 尖岩汞矿方解石具有较高的La/Y比值(>~1.0)、Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.5\sim 1.0$)和较均一的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.710381~0.710907), 与区域上其他以碳酸盐岩

为容矿围岩的热液型Hg-Pb-Zn-Ba-F矿床相似, 不同于华南中生代低温矿床.

6.3 年龄数据的解释及其意义

按金属组合和空间分布, 华南低温汞矿床可划分为两个成矿带: (1) 湘西-黔东南Hg-Pb-Zn-Ba-F成矿带; (2) 右江盆地Hg-Au-As-Sb成矿带(Su等, 2009; 周云等, 2015). 目前尚不清楚上述两类汞矿床是否属于同一期成矿事件. 早期研究采用定年方法如方解石/萤石Sm-Nd法、石英流体包裹体Rb-Sr法和闪锌矿Rb-Sr法, 获得的年龄变化范围较大(470~377Ma; 图9; Hu等, 2002, 2017; Mao等, 2013; 段其发等, 2014; 王加昇和温汉捷, 2015).

湘西-黔东南汞矿床在空间上与铅锌、重晶石、萤石等矿床密切相关. 这些矿床具有垂直分带现象, 即重

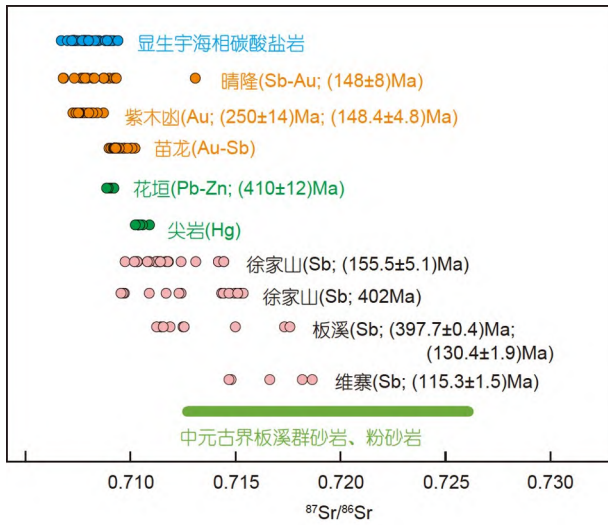


图7 华南低温热液矿床Sr同位素组成

中元古界板溪群基底岩石和显生宇海相碳酸盐岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值引自Peng等(2003b)、Veizer和Compston(1974)。矿床和参考资料的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值见附录1。矿床年龄引自Peng等(2003b)、王加昇(2012)、王泽鹏(2013)、段其发等(2014)、Li H等(2018)和Luo等(2020)

晶石、萤石矿床主要赋存于下奥陶统碳酸盐岩中, 汞和铅锌矿赋存于中-上寒武统碳酸盐岩中(张遵遵等, 2018; Fu等, 2019)。此外, 重晶石、萤石也常与铅锌硫化物共生, 如铅厂盖铅锌矿床和魏家庄、桂花萤石矿床(Zou等, 2022)。闪锌矿在各矿段汞矿体内通常作为次要有用组分, 仅有汞矿而全无闪锌矿伴生的汞矿体是极为罕见的。汞矿体与铅锌矿体呈透镜状, 走向相似, 往往受同一构造控制。一些铅锌矿床, 如茶田和大洞喇矿田内的矿床, 表现出从中心到外围, 或者远离断层出现汞锌空间分带现象。平面上通常是汞带居中, 锌带在汞带边缘的两侧, 二者之间有一个过渡带, 即汞锌混合带(杨霆等, 2014; 付胜云等, 2017)。

鉴于Cl络合物如 BaCl_2 、 $(\text{HgCl}_2)^0$ 、 $(\text{HgCl})^+$ 、 $(\text{HgCl}_3)^-$ 、 $(\text{HgCl}_4)^{2-}$ 、 $(\text{PbCl}_4)^{2-}$ 和 $(\text{ZnCl}_4)^{2-}$ 的高溶解度, 盆地卤水可能在Hg、Pb-Zn和Ba等元素迁移过程中扮演重要作用(Barnes, 1997; Banks等, 2002; Smith-

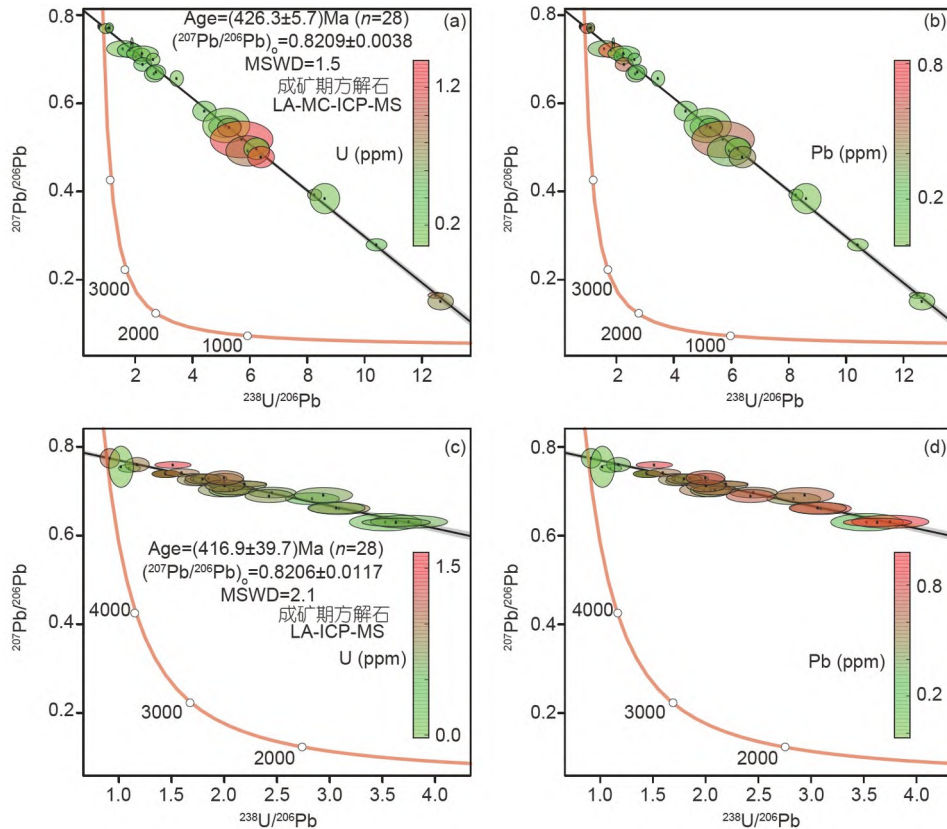


图8 尖岩汞矿成矿期方解石原位U-Pb定年结果

(a), (b) LA-MC-ICP-MS和(c), (d) LA-ICP-MS定年结果的Terra-Wasserburg谐和图。U和Pb含量用红色-绿色椭圆表示, 单位为 10^{-6} 。误差椭圆为 2σ

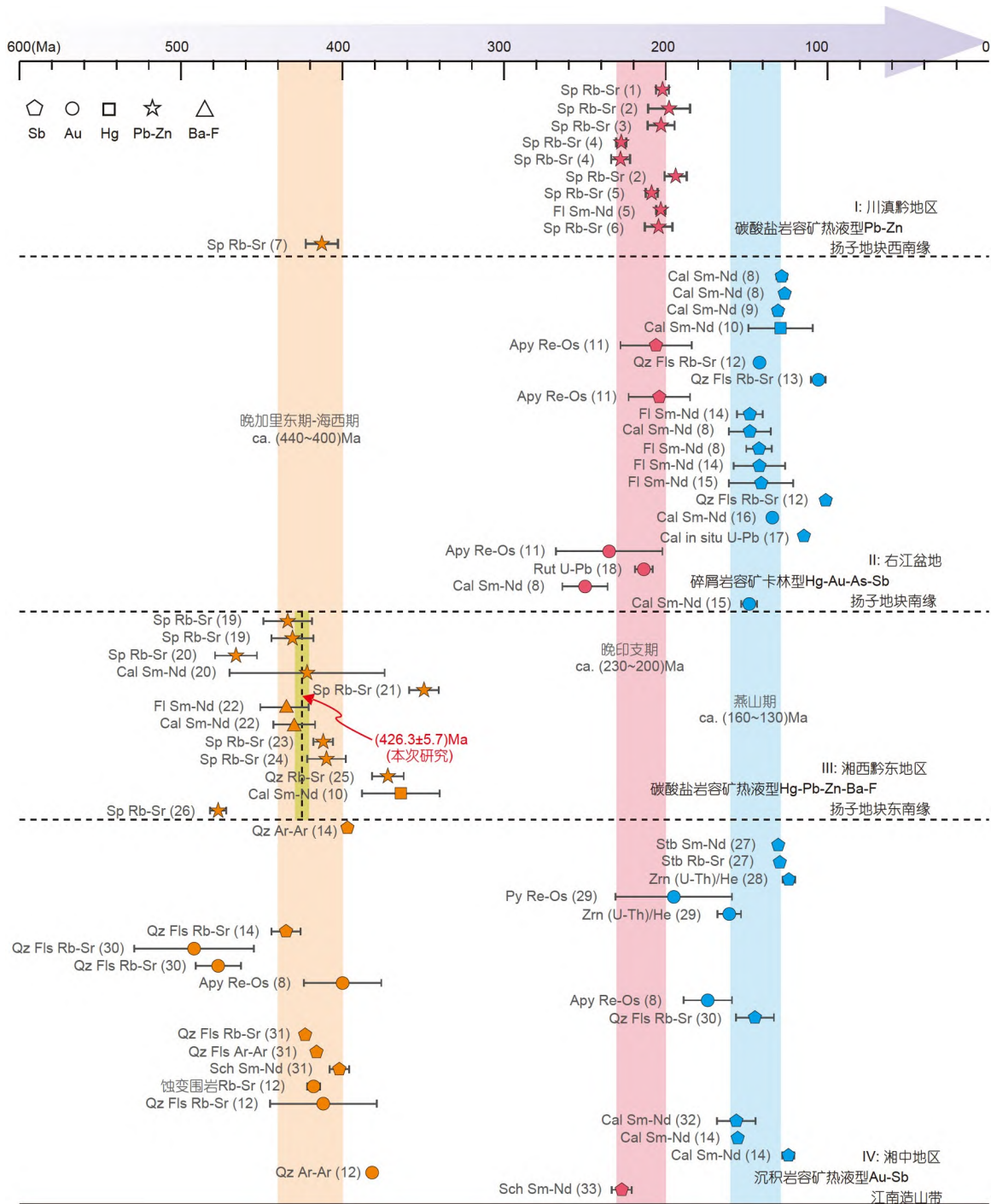


图9 华南低温热液矿床年龄统计

数据来源: 1, 蔺志永等(2010); 2, Zhou等(2013); 3, 张云新等(2014); 4, Han等(2007); 5, Zhou J X等(2015); 6, Yang等(2019); 7, Xiong等(2018); 8, Wang等(2012); 9, 肖宪国(2014); 10, 王加昇和温汉捷(2015); 11, Chen等(2015); 12, 胡瑞忠等(2007); 13, 苏文超等(1998); 14, Peng等(2003b); 15, 王泽鹏(2013); 16, Su等(2009); 17, Luo等(2020); 18, Pi等(2017); 19, 曹亮等(2015); 20, 杨红梅等(2015); 21, 廖震文等(2015); 22, 张遵遵等(2018); 23, Tan等(2018); 24, 段其发等(2014); 25, 周云等(2015); 26, 于玉帅等(2017); 27, Li H等(2018); 28, Li等(2020); 29, 付胜云(2019); 30, 张天羽等(2020); 31, Peng等(2003a); 32, Hu等(1996); 33, 王加昇(2012). Sp, 闪锌矿; Fl, 萤石; Cal, 方解石; Apy, 毒砂; Qz, 石英; Py, 黄铁矿; Stb, 辉锑矿; Zrn, 锆石; Rut, 金红石; Sch, 白钨矿; Fls, 流体包裹体

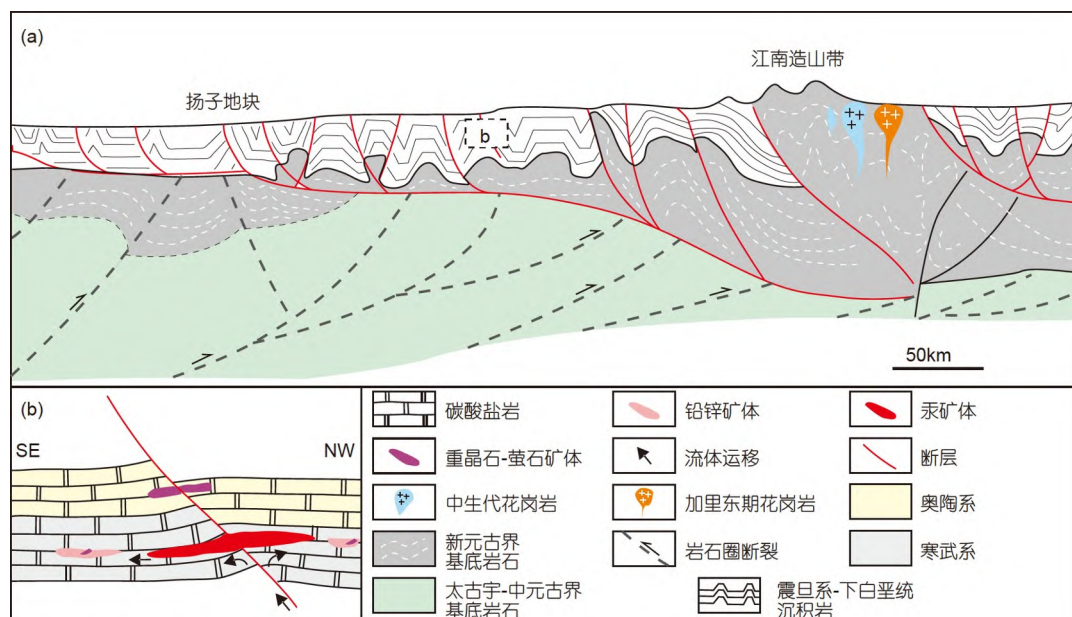


图 10 湘西-黔东Hg-Pb-Zn-Ba-F成矿模式图

(a) 早古生代陆内造山的动力学背景, 据Li等(2019)修改; (b) 汞、铅锌、重晶石-萤石成矿示意图, 显示富金属盆地卤水运移和成矿元素分带

Schmitz和Appold, 2021). 相反, Au-Cl络合物(主要为 $AuCl_2^-$)可溶于pH值较低、盐度较高的高温流体 ($>300^\circ C$)中, 而Au的硫络合物主要存在于弱酸性、富硫的中低温流体 ($<300^\circ C$). 因此, 以碳酸盐岩为容矿围岩的热液型Hg-Pb-Zn-Ba-F矿床在成矿流体性质上可能与中生代低温矿床不同.

本次获得尖岩矿床方解石U-Pb年龄为(426.3±5.7) Ma, 与花垣铅锌矿床(410±12)Ma(段其发等, 2014)、大竹园重晶石-萤石矿床(430±13)Ma(张遵遵等, 2018)、江家垭铅锌矿床(372.0±9.8)Ma(周云等, 2015)、塘边铅锌矿床(477±5)Ma(于玉帅等, 2017)年龄基本一致. 微量元素地球化学特征进一步说明, 尖岩汞矿和花垣铅锌矿的成因可能相似(图6和7). 已有研究表明, 早古生代变质和岩浆作用在江南造山带形成了一系列片麻岩和块状花岗岩侵入体(舒良树, 2006), 其中, 花岗岩的锆石U-Pb年龄为480~398Ma, 峰值为456~419Ma, 指示陆内挤压至伸展的转换时间(图10a; Faure等, 2009; Charvet等, 2010). 本次获得汞成矿发生于约426Ma, 可能与晚加里东期造山事件有关(Chu等, 2012). 造山结束后的局部伸展有利于盆地卤水沿江南造山带一侧迁移, 形成Hg、Pb-Zn、Ba-F矿体(图10b). 综合研究认为, 上述以碳酸盐岩为容矿岩石的热液型Hg、Pb-

Zn、Ba-F矿床属华南古生代低温成矿事件, 与华南中生代多金属成矿事件显著不同.

7 结论

(1) 尖岩汞矿床成矿期方解石具有较高的La/Y比值、Eu负异常以及均一的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 比值, 与华南中生代低温热液汞矿床显著不同.

(2) 成矿期方解石U-Pb年龄约426Ma, 该年龄代表尖岩矿床的形成时间, 暗示其形成与早古生代加里东构造作用有关.

(3) 方解石矿物化学和微区U-Pb年代学研究能够区分大面积低温成矿域内不同低温成矿事件.

致谢 感谢贵州省有色金属和核工业地质勘查局在野外考察过程中给予的支持, 感谢昆士兰大学Ai Duc NGUYEN和Gang XIA在实验过程中的帮助, 感谢云南大学王永彬和中国科学院地球化学研究所黄智龙、向震中、谢卓君对初稿提出的建设性意见.

参考文献

曹亮, 段其发, 周云. 2015. 湖北凹子岗铅锌矿床Rb-Sr同位素测年及其

- 地质意义. 中国地质, 42: 235–247
- 段其发, 曹亮, 曾健康, 周云, 汤朝阳, 李堃. 2014. 湘西花垣矿集区狮子山铅锌矿床闪锌矿Rb-Sr定年及地质意义. 地球科学——中国地质大学学报, 8: 977–986
- 付胜云, 李泽泓, 贺春平, 郑正福, 唐分配, 邓蕾, 张惠, 李宏俭. 2017. 湖南凤凰地区地质构造与汞铅锌矿成矿关系研究. 中国地质调查, 4: 15–23
- 付胜云. 2019. 湖南凤凰地区寒武系敖溪组汞及汞锌矿床控矿因素研究. 中国地质调查, 6: 42–47
- 韩振春, 王加昇, 高振华. 2017. 贵州拉峨汞矿床方解石REE, C, O同位素地球化学特征及意义. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 42: 28–37
- 胡瑞忠, 彭建堂, 马东升, 苏文超, 施春华, 毕献武, 涂光炽. 2007. 扬子地块西南缘大面积低温成矿时代. 矿床地质, 26: 583–596
- 魏含涛, 邵拥军, 叶周, 熊伊曲, 周皓迪, 谢友良. 2017. 湘西花垣铅锌矿田方解石REE元素和Sr同位素地球化学. 中国有色金属学报, 27: 2329–2339
- 廖震文, 王生伟, 孙晓明, 蒋小芳, 周清, 许新英, 郭阳. 2015. 黔东北地区MVT型铅锌矿床闪锌矿Rb-Sr定年及其地质意义. 矿床地质, 34: 769–785
- 蔺志永, 王登红, 张长青. 2010. 四川宁南跑马铅锌矿床的成矿时代及其地质意义. 中国地质, 37: 488–494
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12: 418–431
- 苏文超, 杨科佑, 胡瑞忠, 陈丰. 1998. 中国西南部卡林型金矿床流体包裹体年代学研究——以贵州烂泥沟大型卡林型金矿床为例. 矿物学报, 18: 359–362
- 孙国涛, 沈能平, 苏文超, 俸月星, 赵建新, 彭建堂, 董文斗, 赵海. 2016. 贵州苗龙金锑矿床方解石微量元素、Sr-Nd同位素地球化学特征及其意义. 矿物学报, 36: 404–412
- 涂光炽, 高振敏, 胡瑞忠, 张乾, 李朝阳, 赵振华, 张宝贵. 2004. 分散元素地球化学及成矿机制. 北京: 地质出版社. 1–153
- 王加昇, 温汉捷, 石少华. 2010. 湘黔汞矿带脉石矿物方解石稀土元素、碳氧同位素特征及其指示意义. 矿物学报, 2: 185–193
- 王加昇, 温汉捷. 2015. 贵州交犁—拉峨汞矿床方解石Sm-Nd同位素年代学. 吉林大学学报(地球科学版), 45: 1384–1393
- 王加昇. 2012. 西南低温成矿域成矿作用, 时代与动力学研究. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1–116
- 王泽鹏. 2013. 贵州省西南部低温矿床成因及动力学机制研究——以金、锑矿床为例. 博士学位论文. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 1–150
- 魏含涛, 邵拥军, 叶周, 熊伊曲, 周皓迪, 谢友良. 2017. 湘西花垣铅锌矿田方解石REE元素和Sr同位素地球化学. 中国有色金属学报, 27: 2329–2339
- 肖宪国. 2014. 贵州半坡锑矿床年代学, 地球化学及成因. 博士学位论文. 昆明: 昆明理工大学, 1–124
- 杨红梅, 刘重芄, 段瑞春, 顾晓敏, 卢山松, 谭娟娟, 蔡应雄, 张利国, 邱啸飞. 2015. 贵州铜仁卜口场铅锌矿床Rb-Sr与Sm-Nd同位素年龄及其地质意义. 大地构造与成矿学, 39: 855–865
- 杨霆, 段其发, 田文. 2014. 湘西茶田铅锌汞矿床地质特征及找矿前景. 华南地质与矿产, 30: 109–117
- 于玉帅, 刘阿睢, 戴平云, 赵武强, 陶明, 刘重芄. 2017. 贵州铜仁塘边铅锌矿床成矿时代和成矿物质来源. 地质通报, 36: 885–892
- 张天羽, 李聪颖, 孙赛军, 郝锡萃. 2020. 锑的地球化学性质与华南锑矿带成因初探. 岩石学报, 36: 44–54
- 张云新, 吴越, 田广, 申亮, 周云满, 董文伟, 曾荣, 杨兴潮, 张长青. 2014. 云南乐红铅锌矿床成矿时代与成矿物质来源: Rb-Sr 和 S 同位素制约. 矿物学报, 3: 305–311
- 张遵遵, 龚银杰, 金世超, 漆双林, 甘金木, 张利国. 2018. 黔东北大竹园萤石矿床Sm-Nd等时线年龄及其地质意义. 岩石矿物学杂志, 37: 949–958
- 周云, 段其发, 陈毓川, 唐菊兴, 曹亮, 甘金木. 2015. 湘西龙江山家垅铅锌矿床石英Rb-Sr同位素测年与示踪研究. 中国地质, 42: 597–606
- Banks D A, Boyce A J, Samson I M. 2002. Constraints on the origins of fluids forming Irish Zn-Pb-Ba deposits: Evidence from the composition of fluid inclusions. *Econ Geol*, 97: 471–480
- Barnes H L. ed. 1997. *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Hoboken: John Wiley & Sons
- Bau M, Dulski P. 1995. Comparative study of yttrium and rare-earth element behaviours in fluorine-rich hydrothermal fluids. *Contrib Mineral Petrol*, 119: 213–223
- Bau M, Moller P. 1992. Rare earth element fractionation in metamorphogenic hydrothermal calcite, magnesite and siderite. *Mineral Petrol*, 45: 231–246
- Bradley D C, Leach D L. 2003. Tectonic controls of Mississippi Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands. *Miner Depos*, 38: 652–667
- Charvet J, Shu L, Faure M, Choulet F, Wang B, Lu H, Breton N L. 2010. Structural development of the Lower Paleozoic belt of South China: Genesis of an intracontinental orogen. *J Asian Earth Sci*, 39: 309–330
- Chen J F, Foland K A, Xing F M, Xu X, Zhou T X. 1991. Magmatism along the southeast margin of the Yangtze block: Precambrian collision of the Yangtze and Cathaysia blocks of China. *Geology*, 19: 815
- Chen J, Yang R D, Du L J, Gao J B, Zheng L L, Huang Z L. 2020. Multistage fluid sources and evolution of Qinglong Sb-(Au) deposit in northern margin of Youjiang basin, SW China: REE geochemistry and Sr-H-O isotopes of ore-related jasperoid, quartz and fluorite. *Ore Geol Rev*, 127: 103851
- Chen M H, Mao J W, Li C, Zhang Z Q, Dang Y. 2015. Re-Os isochron

- ages for arsenopyrite from Carlin-like gold deposits in the Yunnan-Guizhou-Guangxi “golden triangle”, southwestern China. *Ore Geol Rev*, 64: 316–327
- Cheng T, Zhao J X, Feng Y X, Pan W Q, Liu D Y. 2020. *In-situ* LA-MC-ICPMS U-Pb dating method for low-uranium carbonate minerals. *Chin Sci Bull*, 65: 150–154
- Chu Y, Lin W, Faure M, Wang Q C, Ji W B. 2012. Phanerozoic tectonothermal events of the Xuefengshan Belt, central South China: Implications from UPb age and LuHf determinations of granites. *Lithos*, 150: 243–255
- Faure M, Shu L S, Wang B, Charvet J, Choulet F, Monie P. 2009. Intracontinental subduction: A possible mechanism for the Early Palaeozoic Orogen of SE China. *Terra Nova*, 21: 360–368
- Fu S L, Hu R Z, Yan J, Lan Q, Gao W. 2019. The mineralization age of the Banxi Sb deposit in Xiangzhong metallogenic province in southern China. *Ore Geol Rev*, 112: 103033
- Fusswinkel T, Wagner T, Wenzel T, Wälle M, Lorenz J. 2013. Evolution of unconformity-related MnFeAs vein mineralization, Sailauf (Germany): Insight from major and trace elements in oxide and carbonate minerals. *Ore Geol Rev*, 50: 28–51
- Giorno M, Barale L, Bertok C, Frenzel M, Looser N, Guillong M, Bernasconi S M, Martire L. 2022. Sulfide-associated hydrothermal dolomite and calcite reveal a shallow burial depth for Alpine-type Zn-(Pb) deposits. *Geology*, 50: 853–858
- Han R S, Liu C Q, Huang Z L, Chen J, Ma D Y, Lei L, Ma G S. 2007. Geological features and origin of the Huize carbonate-hosted Zn-Pb-(Ag) District, Yunnan, South China. *Ore Geol Rev*, 31: 360–383
- Hu R Z, Fu S L, Huang Y, Zhou M F, Fu S H, Zhao C H, Wang Y J, Bi X W, Xiao J F. 2017. The giant South China Mesozoic low-temperature metallogenic domain: Reviews and a new geodynamic model. *J Asian Earth Sci*, 137: 9–34
- Hu R Z, Su W C, Bi X W, Tu G Z, Hofstra A H. 2002. Geology and geochemistry of Carlin-type gold deposits in China. *Miner Depos*, 37: 378–392
- Hu X W, Pei R F, Su Z. 1996. Sm-Nd dating for antimony mineralization in the Xikuangshan deposit, Hunan, China. *Res Geology*, 46: 227–231
- Jin X Y, Zhao J X, Feng Y X, Hofstra A H, Deng X D, Zhao X F, Li J W. 2021. Calcite U-Pb dating unravels the age and hydrothermal history of the giant Shuiyindong Carlin-type gold deposit in the golden triangle, South China. *Econ Geol*, 116: 1253–1265
- Kendrick M A, Caulfield J T, Nguyen A D, Zhao J X, Blakey I. 2020. Halogen and trace element analysis of carbonate-veins and Fe-oxyhydroxide by LA-ICPMS: Implications for seafloor alteration, Atlantis Bank, SW Indian Ridge. *Chem Geol*, 547: 119668
- Kylander-Clark A R C. 2020. Expanding limits of laser-ablation U-Pb calcite geochronology. *Geochronology*, 2: 343–354
- Li H, Danišik M, Zhou Z K, Jiang W C, Wu J H. 2020. Integrated U-Pb, Lu-Hf and (U-Th)/He analysis of zircon from the Banxi Sb deposit and its implications for the low-temperature mineralization in South China. *Geosci Front*, 11: 1323–1335
- Li H, Wu Q H, Evans N J, Zhou Z K, Kong H, Xi X S, Lin Z W. 2018. Geochemistry and geochronology of the Banxi Sb deposit: Implications for fluid origin and the evolution of Sb mineralization in central-western Hunan, South China. *Gondwana Res*, 55: 112–134
- Li S Z, Suo Y H, Li X Y, Zhou J, Santosh M, Wang P C, Wang G Z, Guo L L, Yu S Y, Lan H Y, Dai L M, Zhou Z Z, Cao X Z, Zhu J J, Liu B, Jiang S H, Wang G, Zhang G. 2019. Mesozoic tectonomagmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone to subduction of the Paleo-Pacific Plate. *Earth-Sci Rev*, 192: 91–137
- Li Y Q, He D F, Li D, Lu R Q, Fan C, Sun Y P, Huang H Y. 2018. Sedimentary provenance constraints on the Jurassic to Cretaceous paleogeography of Sichuan Basin, SW China. *Gondwana Res*, 60: 15–33
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, Wang J, Zhang S, Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Res*, 122: 85–109
- Liu J P, Rong Y N, Zhang S G. 2017. Mineralogy of Zn-Hg-S and Hg-Se-S series minerals in carbonate-hosted mercury deposits in western Hunan, South China. *Minerals*, 7: 101
- Luo K, Zhou J X, Feng Y X, Uysal I T, Nguyen A, Zhao J X, Zhang J. 2020. *In situ* U-Pb dating of calcite from the South China antimony metallogenic belt. *iScience*, 23: 101575
- Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Franco P. 2013. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings. *Miner Depos*, 48: 267–294
- Marshall D J. 1988. Cathodoluminescence of Geological Materials. Boston. Unwin-Hyman. 1–146
- Mason A J, Henderson G M, Vaks A. 2013. An acetic acid-based extraction protocol for the recovery of U, Th and Pb from calcium carbonates for U-(Th)-Pb geochronology. *Geostand Geoanal Res*, 37: 261–275
- Michard A, Albarède F. 1986. The REE content of some hydrothermal fluids. *Chem Geol*, 55: 51–60
- Nuriel P, Weinberger R, Kylander-Clark A R C, Hacker B R, Craddock J P. 2017. The onset of the Dead Sea transform based on calcite age-strain analyses. *Geology*, 45: 587–590

- Paton C, Woodhead J D, Hellstrom J C, Hergt J M, Greig A, Maas R. 2010. Improved laser ablation U-Pb zircon geochronology through robust downhole fractionation correction. *Geochem Geophys Geosyst*, 11: Q0AA06
- Peng J T, Hu R H, Zhao J H, Fu Y Z, Lin Y X. 2003a. Scheelite Sm-Nd dating and quartz Ar-Ar dating for Woxi Au-Sb-W deposit, western Hunan. *Chin Sci Bull*, 48: 2640–2646
- Peng J T, Hu R Z, Burnard P G. 2003b. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikouangshan antimony deposit (Hunan, China): The potential of calcite as a geochronometer. *Chem Geol*, 200: 129–136
- Peng J T, Hu R Z. 2001. Carbon and oxygen isotope systematics in the Xikouangshan giant antimony deposit, central Hunan. *Geol Rev*, 47: 34–41
- Peyrotty G, Brigaud B, Martini R. 2020. $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{13}\text{C}$, trace elements and REE *in situ* measurements coupled with U-Pb ages to reconstruct the diagenesis of upper triassic atoll-type carbonates from the Panthalassa Ocean. *Mar Pet Geol*, 120: 104520
- Pi Q H, Hu R Z, Xiong B, Li Q L, Zhong R C. 2017. *In situ* SIMS U-Pb dating of hydrothermal rutile: Reliable age for the Zhesang Carlin-type gold deposit in the golden triangle region, SW China. *Miner Depos*, 52: 1179–1190
- Pinet N, Davis W J, Petts D C, Sack P, Mercier-Langevin P, Lavoie D, Jackson S E. 2022. U-Pb vein calcite dating reveals the age of Carlin-type gold deposits of central Yukon and a contemporaneity with a regional intrusion-related metallogenic event. *Econ Geol*, 117: 905–922
- Roberts N M W, Rasbury E T, Parrish R R, Smith C J, Horstwood M S A, Condon D J. 2017. A calcite reference material for LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Geochem Geophys Geosyst*, 18: 2807–2814
- Salvi S, Williams-Jones A E. 1996. The role of hydrothermal processes in concentrating high-field strength elements in the Strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochim Cosmochim Acta*, 60: 1917–1932
- Sheng X, Tang Y Y, Bi X W, Hu R Z, Xu L L, Li J, Tang Y W. 2022. *In situ* U-Pb dating of calcite indicates a Miocene Sb-Pb mineralization event in the Sanjiang base metal metallogenic belt, SW China. *J Geochem Explor*, 238: 107004
- Smith-Schmitz S E, Appold M S. 2018. Prediction of ore fluid metal concentrations from solid solution concentrations in ore-stage calcite: Application to the Illinois-Kentucky and Central Tennessee Mississippi Valley-type districts. *Geochim Cosmochim Acta*, 225: 210–227
- Smith-Schmitz S E, Appold M S. 2021. Determination of fluorine concentrations in mineralizing fluids of the Hansonburg, New Mexico Ba-F-Pb district via SEM-EDS analysis of fluid inclusion decrepitates. *J Geochem Explor*, 230: 106861
- Studemeister P A. 1984. Mercury deposits of western California: An overview. *Mineral Depos*, 19: 202–207
- Su W C, Hu R Z, Xia B, Xia Y, Liu Y. 2009. Calcite Sm-Nd isochron age of the Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou, China. *Chem Geol*, 258: 269–274
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 42: 313–345
- Tan J J, Liu C P, Yang H M, Cai Y X, Lu S S. 2018. Geochronology and Ore-Forming Material Source Constraints for Rouxiangshan Pb-Zn Deposit in Huayuan Ore Concentration Area, Western Hunan. *Earth Science*, 43: 2438–2448
- Tan Q P, Xia Y, Wang X, Xie Z J, Wei D T. 2017. Carbon-oxygen isotopes and rare earth elements as an exploration vector for Carlin-type gold deposits: A case study of the Shuiyindong gold deposit, Guizhou Province, SW China. *J Asian Earth Sci*, 148: 1–12
- Uysal I T, Zhao J X, Golding S D, Lawrence M G, Glikson M, Collerson K D. 2007. Sm-Nd dating and rare-earth element tracing of calcite: Implications for fluid-flow events in the Bowen Basin, Australia. *Chem Geol*, 238: 63–71
- Vaks A, Woodhead J, Bar-Matthews M, Ayalon A, Cliff R A, Zilberman T, Matthews A, Frumkin A. 2013. Pliocene-Pleistocene climate of the northern margin of Saharan-Arabian Desert recorded in speleothems from the Negev Desert, Israel. *Earth Planet Sci Lett*, 368: 88–100
- Veizer J, Compston W. 1974. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ composition of seawater during the Phanerozoic. *Geochim Cosmochim Acta*, 38: 1461–1484
- Vermeesch P. 2018. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci Front*, 9: 1479–1493
- Wang Q F, Yang L, Xu X J, Santosh M, Wang Y N, Wang T Y, Chen F G, Wang R X, Gao L, Liu X F, Yang S J, Zeng Y S, Chen J H, Zhang Q Z, Deng J. 2020. Multi-stage tectonics and metallogeny associated with Phanerozoic evolution of the South China Block: A holistic perspective from the Youjiang Basin. *Earth-Sci Rev*, 211: 103405
- Wang X L, Zhou J C, Griffin W A, Wang R C, Qiu J S, O'reilly S Y, Xu X S, Liu X M, Zhang G L. 2007. Detrital zircon geochronology of Precambrian basement sequences in the Jiangnan orogen: Dating the assembly of the Yangtze and Cathaysia Blocks. *Precambrian Res*, 159: 117–131
- Wang Y L, Chen Y C, Wang D H, Xu J, Chen Z H. 2012. Scheelite Sm-Nd dating of the Zhazixi W-Sb deposit in Hunan and its geological significance. *Geol China*, 39: 1339–1344
- Xie Z J, Xia Y, Cline J S, Yan B W, Wang Z P, Tan Q P, Wei D T. 2017. Comparison of the native antimony-bearing Paiting gold deposit,

- Guizhou Province, China, with Carlin-type gold deposits, Nevada, USA. *Miner Depos*, 52: 69–84
- Xiong S F, Gong Y J, Jiang S Y, Zhang X J, Li Q, Zeng G P. 2018. Ore genesis of the Wusihe carbonate-hosted Zn-Pb deposit in the Dadu River Valley district, Yangtze Block, SW China: Evidence from ore geology, S-Pb isotopes, and sphalerite Rb-Sr dating. *Miner Depos*, 53: 967–979
- Xiong S F, Jiang S Y, Chen Z H, Zhao J X, Ma Y, Zhang D, Duan Z P, Niu P P, Xu Y M. 2022. A Mississippi Valley-type Zn-Pb mineralizing system in South China constrained by *in situ* U-Pb dating of carbonates and barite and *in situ* S-Sr-Pb isotopes. *GSA Bull*, 134: 2880–2890
- Xu J W, Liu X H, Lai J Q, He H S, Song X F, Zhai D G, Lin B, Wang Y H, Shi J, Zhou X. 2022. *In situ* U-Pb geochronology of calcite from the world's largest antimony deposit at Xikuangshan, Southern China. *Minerals*, 12: 899
- Yan D P, Zhou M F, Song H L, Wang X W, Malpas J. 2003. Origin and tectonic significance of a Mesozoic multi-layer over-thrust system within the Yangtze Block (South China). *Tectonophysics*, 361: 239–254
- Yang Q, Liu W H, Zhang J, Wang J, Zhang X J. 2019. Formation of Pb-Zn deposits in the Sichuan-Yunnan-Guizhou triangle linked to the Youjiang foreland basin: Evidence from Rb-Sr age and *in situ* sulfur isotope analysis of the Maoping Pb-Zn deposit in north-eastern Yunnan Province, southeast China. *Ore Geol Rev*, 107: 780–800
- Zhang J W, Ye T P, Dai Y R, Chen J S, Zhang H, Dai C G, Yuan G H, Jiang K Y. 2019. Provenance and tectonic setting transition as recorded in the Neoproterozoic strata, western Jiangnan Orogen: Implications for South China within Rodinia. *Geosci Front*, 10: 1823–1839
- Zhao J H, Zhou M F, Yan D P, Zheng J P, Li J W. 2011. Reappraisal of the ages of Neoproterozoic strata in South China: No connection with the Grenvillian orogeny. *Geology*, 39: 299–302
- Zhou J X, Bai J H, Huang Z L, Zhu D, Yan Z F, Lv Z C. 2015. Geology, isotope geochemistry and geochronology of the Jinshachang carbonate-hosted Pb-Zn deposit, southwest China. *J Asian Earth Sci*, 98: 272–284
- Zhou J X, Huang Z L, Zhou M F, Li X B, Jin Z G. 2013. Constraints of C-O-S-Pb isotope compositions and Rb-Sr isotopic age on the origin of the Tianqiao carbonate-hosted Pb-Zn deposit, SW China. *Ore Geol Rev*, 53: 77–92
- Zhou J X, Xiang Z Z, Zhou M F, Feng Y X, Luo K, Huang Z L, Wu T. 2018. The giant Upper Yangtze Pb-Zn province in SW China: Reviews, new advances and a new genetic model. *J Asian Earth Sci*, 154: 280–315
- Zhou M F, Yan D P, Kennedy A K, Li Y Q, Ding J. 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China. *Earth Planet Sci Lett*, 196: 51–67
- Zhu J J, Hu R Z, Richards J P, Bi X W, Stern R, Lu G. 2017. No genetic link between Late Cretaceous felsic dikes and Carlin-type Au deposits in the Youjiang basin, Southwest China. *Ore Geol Rev*, 84: 328–337
- Zou H, Li M, Santosh M, Zheng D, Cao H W, Jiang X W, Chen H F, Li Z Q. 2022. Fault-controlled carbonate-hosted barite-fluorite mineral systems: The Shuanghe deposit, Yangtze Block, South China. *Gondwana Res*, 101: 26–43

(责任编辑: 李建威)