



粤东莲花山成矿带锡多金属矿床的动力变质成矿作用——来自锡石元素地球化学和U-Pb年代学的约束

王军^{1,2,3*}, 汪礼明³, 严爽¹, 马勇⁴, 许典葵⁵

1. 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/广东省矿物物理与材料重点实验室, 广州 510640;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 广东省有色金属地质局, 广州 510080;

4. 广东省有色地质勘查院, 广州 510080;

5. 广东省有色金属地质局九三一队, 汕头 515041

* 通讯作者, E-mail: wangjun202@mails.ucas.ac.cn

收稿日期: 2022-06-28; 收修改稿日期: 2022-12-09; 接受日期: 2023-01-03; 网络版发表日期: 2023-06-20

中国科学院矿物学与成矿学重点实验室合作研究基金项目(编号: KLMM20200201)、国家自然科学基金青年项目(批准号: 41903016)、中国科学院广州地球化学研究所青年项目(编号: 2019SZJJ-08)、广东省基础与应用基础研究重大项目(编号: 2019B030302013)和中国地质调查局整装勘查区矿产地质调查与找矿预测项目(编号: 12120114015901)资助

摘要 粤东莲花山断裂带是广东省内最重要的锡多金属成矿带, 分布着塌山、仙水沥和江西坑等中型锡多金属矿床, 关于该类矿床的形成机制还存在不同认识. 本文在围岩为黑云母糜棱岩和石榴堇青白云母变余糜棱岩的仙水沥和江西坑锡矿床中厘定出了早晚两期锡石: 早期锡石呈自形晶粒状产出, 局部存在溶蚀结构, 与黑云母、长石和石英等矿物共生, 环带结构明显, 粒径介于0.50~1.8mm; 晚期锡石呈半自形-他形晶粒状结构, 与石榴子石等变质矿物共生, 具有明显的筛孔结构, 但无环带发育, 粒径介于0.02~0.35mm. 锡石原位化学组成分析与U-Pb定年结果显示, 早期与晚期锡石的同位素年龄分别为(149.5±1.0)Ma(MSWD=1.6, $n=45$)和(125.1±2.3)Ma(MSWD=4.5, $n=43$); 早期锡石的形成更可能与高基坪群中酸性火山岩活动有关, 而晚期锡石具有相对较高的Ta、Nb、Fe、W含量和明显的稀土四分组效应, 是早白垩世晚期的动力变质作用的产物. 基于区域地球化学、两期锡石矿物学和U-Pb同位素年代学的综合研究, 本文认为莲花山成矿带中生代火山岩明显富集Sn和F, 具有较高的锡多金属成矿潜力, 并形成了与火山岩活动有关的早期锡石; 早白垩世晚期受太平洋板块向西北俯冲的影响, 富锡中酸性火山岩发生动力变质作用, 其中的Sn等组分被活化迁移, 并在韧性剪切带聚集产生锡矿化. 通过进一步勘查工作, 有望在仙水沥和江西坑矿区探获2个中型及以上规模锡矿床. 本研究不仅深化了莲花山成矿带锡多金属成矿过程的认知, 而且对区域地质找矿也有重要启示.

关键词 莲花山成矿带, 锡多金属矿床, 锡石, U-Pb年代学, 动力变质作用

中文引用格式: 王军, 汪礼明, 严爽, 马勇, 许典葵. 2023. 粤东莲花山成矿带锡多金属矿床的动力变质成矿作用——来自锡石元素地球化学和U-Pb年代学的约束. 中国科学: 地球科学, 53(7): 1679–1693, doi: 10.1360/SSTe-2022-0205

英文引用格式: Wang J, Wang L, Yan S, Ma Y, Xu D. 2023. Mineralization of the Lianhuashan Sn-polymetallic deposits associated with dynamic metamorphism: Constraints from cassiterite geochemistry and U-Pb geochronology. Science China Earth Sciences, 66(7): 1664–1677, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1060-8>

1 引言

锡(Sn)是人类发现和使用最早的金属之一, 目前已经广泛应用于现代国防、航空航天等高科技领域。前人将中国锡矿床划分为花岗岩型、矽卡岩型、陆相火山岩型和砂锡型等成因类型(刘伟宁和梁永宁, 1988; 于际民等, 2002; 曾志方, 2013; 李益智, 2016; 邵主助, 2019)。中国的锡矿资源丰富, 截至2017年累计查明锡储量约450万吨, 远景资源潜力约为1861万吨, 主要分布在湖南、广西、云南、内蒙古和广东等省区(自然资源部, 2018)。已有的研究显示, 南岭及相邻地区的锡矿床主要与准铝质($ACNK < 1.1$)和过铝质($ACNK > 1.1$)花岗岩有关(Yuan等, 2008; 王汝成等, 2017), 其成矿可能与黑云母的分解有密切联系(Yuan等, 2019; Zhao等, 2021); 但有些矿床与花岗岩并无明显的亲缘关系, 如云南西部的云龙锡矿床, 它产于混合岩体内部的构造破碎带和变质岩的层间破碎带, 矿体明显受构造制约, 动力变质作用控制了锡的富集成矿(于际民等, 2002; 王玲和孙杭军, 2012; 朱艺婷等, 2021)。

20世纪60~80年代, 在广东东部的莲花山成矿带内相继发现了塌山(7276吨)、银瓶山(5000吨)、仙水沥(2470吨)和尖吉山(920吨)等中型和小型锡多金属矿床, 它们构成了广东省境内最重要的锡多金属成矿带。为了探究这些矿床的成因, 一些学者相继开展了莲花山成矿带有关矿床地质、矿床地球化学和同位素年代学研究, 提出了岩浆热液成因(郭锐和彭恩生, 2008; 刘鹏等, 2015a, 2015b; 丘增旺等, 2016, 2017; Qiu等, 2017a, 2017b; 闫庆贺等, 2018; Han等, 2021; 杨航等, 2021; 姚薇等, 2021)和沉积-变质层控成因(王文斌和谢华光, 1989)等不同观点。

近年来莲花山成矿带的动力变质作用引起了学者的关注, 几何学、运动学和年代学的综合研究显示, 该成矿带是一个高应变且具多变质相的板内构造变形带, 经历了晚侏罗世北东-南西向韧性剪切、早白垩世脆性变形、早白垩世晚期北西-南东向韧性剪切和晚白垩世脆性变形四阶段的构造-热变质作用(Li等, 2020a), 变质变形对成矿带中部分锡多金属矿床的形成具有明显的制约, 该类矿床中锡矿体的走向与区域构造线、片理和面理方向一致(张文高等, 2020)。动力变质作用对火山沉积岩的影响尤为显著, 火山岩发生

了强烈的片理化、面理化, 甚至糜棱岩化, 而片理化和面理化构造为含矿热液的运移与沉淀提供了良好的通道和储存空间, 并控制了典型锡矿床的分布和锡矿体的产状(王文斌和谢华光, 1989; 古润平等, 2009; 汪礼明等, 2016, 2018; 王军等, 2021, 2022)。例如, 揭西金坑锡铜多金属矿区矿体受到糜棱面理、片理和蚀变带的控制, 该矿区经评审通过的Cu、Pb+Zn、Ag和Sn资源量均达到中型矿床规模。笔者及合作者通过地质特征和变质温压条件的研究发现, 动力变质作用控制了莲花山成矿带大多数的锡多金属矿床的分布(汪礼明等, 2014, 2016, 2018; 王军等, 2016, 2021)。同时, 已有矿床地质特征和大量钻孔资料也显示, 动力变质作用对莲花山成矿带锡多金属矿床的形成具有重要影响, 但有关锡石矿物学、原位地球化学的精细研究明显不足, 尤其缺少变质成因锡石的同位素年代学和地球化学约束。

随着微区分析技术的发展, 锡石原位同位素定年技术日趋成熟(Möller等, 1988; Gulson和Jones, 1992; Yuan等, 2011; Dewaele等, 2015; Zhang等, 2017; Neymark等, 2018, 2021; Kendall-Langley等, 2020; Nambaje等, 2020, 2021; Gemmrich等, 2021; Liu等, 2021a, 2021b), 为精准厘定锡矿化的时限提供了有效手段。近年来南岭和粤东地区岩浆成因锡石U-Pb定年工作广泛开展(Yuan等, 2008, 2011; 刘鹏等, 2015a, 2015b; 闫庆贺等, 2018; Yuan等, 2019; Li等, 2020b), 但莲花山成矿带变质岩中锡矿床的形成时代仍缺乏有效限定。为了进一步限定动力变质作用对莲花山成矿带锡多金属成矿的制约, 本文对仙水沥和江西坑典型矿床中新发现的两类锡石进行了矿物学、地球化学和原位U-Pb定年研究。

2 地质概况

2.1 区域地质

莲花山成矿带位于华夏地块东南缘, 它是政和-大埔断裂在广东省境内的延伸部分(图1), 呈北东45°展布, 宽20~50km, 可分为大埔-海丰和五华-深圳东西两束(汪礼明等, 2018)。带内分布着塌山、仙水沥、江西坑等众多锡多金属矿床, 它们明显受动力变质作用影响, 矿体空间展布受断裂构造控制。该成矿带内岩浆活动强烈, 分布着大量的中生代岩浆岩(190~135Ma)

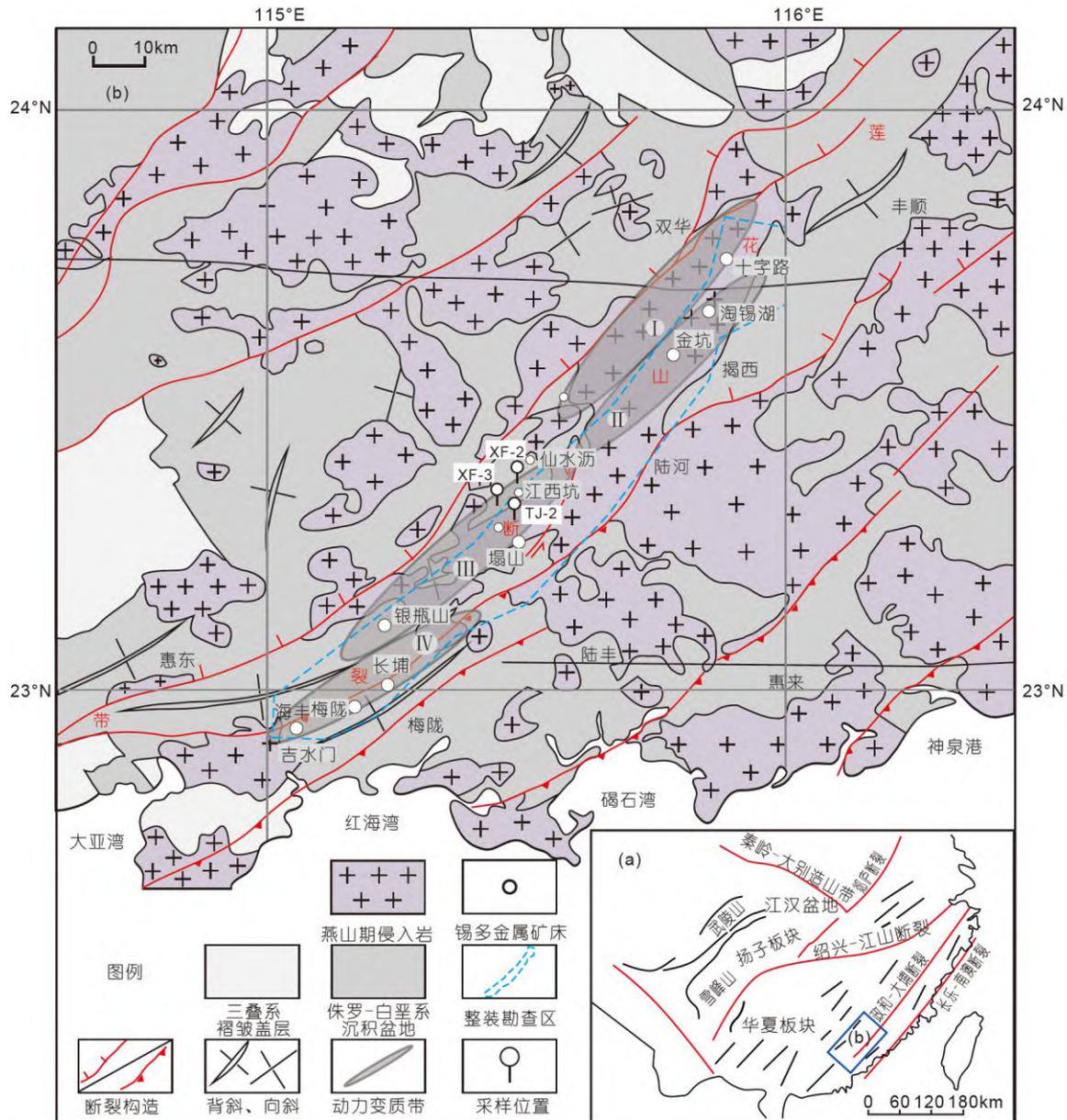


图1 粤东莲花山成矿带及锡多金属矿床分布示意图

据Li等(2020a)和王军等(2021)修改

(刘鹏等, 2015a, 2015b; 王小雨, 2015; 丘增旺等, 2016, 2017; Qiu等, 2017a, 2017b; 闫庆贺等, 2018; 范飞鹏等, 2018a, 2018b, 2020; 江丞曜等, 2021).

莲花山成矿带内出露的地层主要为下侏罗统蓝塘群陆源碎屑岩(银瓶山组TJy、上龙水组J₁sl、长埔组J₁c和吉水门组J₁js)和上侏罗统-下白垩统高基坪群流纹质、凝灰质火山碎屑岩(热水洞组J₂₋₃r、水底山组J₃sd、南山村组JKn和官草湖组K₁g), 少量第四系残坡

积物分布(广东省地质矿产局, 1988). 锡多金属矿床主要产于蓝塘群和高基坪群地层中(其中热水洞组火山岩的锆石U-Pb年龄为157.9~153.5Ma; 丘增旺, 2017). 莲花山成矿带内动力变质作用强烈, 形成了棉洋-双华(I)、北山嶂-九龙嶂(II)、五指嶂-锅子嶂(III)、梅陇-鰲门-观音山(IV)4条韧性剪切带(图1), 发育千枚岩、石英片岩、二云母片岩、石榴子石片岩和糜棱岩等动力变质岩(邱元禧等, 1991; 汪礼明等, 2018; 王军等,

2021). 野外地质调查显示, 韧性剪切带内部变形较弱的部位主要以“构造透镜体”和“石香肠构造”为特征, 而在变形较强的部位则以石英、长石和云母等矿物明显拉长为特征, 并发育糜棱面理和S-C组构等(王军等, 2021).

2.2 矿床地质

仙水沥锡矿床产于吉水门组(J_{1js})和南山村组(JKn)地层中, 严格受北东向五指嶂-锅子嶂韧性剪切带的控制(图1), 矿体走向北东, 倾向北西, 倾角60°~75°, 矿体长度140~180m, 厚度0.2~8m. 根据锡矿化特征可以划分3种类型, 中心为石英脉型, 向外依次对称分布为石榴子石糜棱岩型和白云母糜棱岩型(图2a). 该类矿床主要金属矿物为锡石、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿和黄铁矿, 发育硅化、绿泥石化和黄铁矿化等蚀变. 此外, 锡石的矿化程度与石榴子石含量呈正相关, 含矿性随石榴子石含量增加而增强(图2c). 锡矿石品位介于0.3~1.81%, 平均品位为0.51%, 已探明锡金属储量2470吨.

江西坑锡矿床出露的地层主要为上三叠-下侏罗统瓶瓶山组(TJy)与下侏罗统上龙水组(J_{1sl})及少量第四系(Q), 矿床产于侏罗统上龙水组第一岩性段(J_{1sl}¹). 在江西坑矿床已圈定了5个矿体, 矿体总体走向北东, 倾向南东, 倾角35°~55°, 矿体近似平行产出, 与片岩的片理产状基本一致(图2b). 矿体厚度为0.4~1.0m, 矿化长度50~400m, 锡矿石品位0.17~0.54%, 矿体形状较复杂, 呈断续长条带状脉体、透镜体、囊状体或不规则状扁豆体产出, 尖灭再现, 局部为富矿体(图2d). 该矿床主要金属矿物为锡石、磁黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿和黄铁矿, 发育绢云母化和绿泥石化等蚀变, 锡矿石品位介于0.33~3.38%. 近期在江西坑矿区找矿取得了新进展, ZK201(孔深200m)钻孔中发现了视厚度约4.5m的锡矿体, 快速分析仪测试显示其品位不低于1.1%, 最高达13%.

3 岩相学和矿相学特征

3.1 岩相学特征

本次研究的样品取自莲花山成矿带五指嶂-锅子嶂韧性剪切带内仙水沥和江西坑锡多金属矿床(图1). 含矿岩石均发生强烈变形, 矿物定向排列明显, 具有典

型的糜棱结构或变余糜棱结构, 属于糜棱岩或变余糜棱岩. 通过显微镜观察我们发现部分样品中的锡石颗粒小于60μm, 不能有效地开展锡石原位定年工作, 最终仅选取XF-1、XF-2和TJ-2三件样品开展原位化学分析和U-Pb定年. 样品的岩相学特征分述如下.

黑云母糜棱岩(XF-1), 赋存于仙水沥矿区南山村组(JKn)火山碎屑岩中. 岩石呈碎斑结构(图3a). 碎斑矿物以石英为主(3%), 呈透镜状和眼球状产出, 具明显的变形特征. 基质呈粒状和片状变晶结构, 具片状构造, 主要由石英(45%)和黑云母(40%)组成, 含有少量萤石(<5%); 黑云母呈片状以及鳞片状, 多具有绿色-淡褐色的多色性, 连续定向排列, 部分黑云母具有弱绿泥石化蚀变(图3d), 与锡石和闪锌矿共生(图3g). 金属矿物(7%)有锡石、闪锌矿、黄铁矿和黄铜矿.

堇青白云母变余糜棱岩(XF-2), 赋存于仙水沥矿区吉水门组(J_{1js})陆源碎屑岩中. 岩石具斑状变晶结构(图3b). 变斑晶为堇青石(8%)和石榴子石(<3%). 基质为片状粒状变晶结构, 主要由石英(49%)、白云母(30%)和黑云母(<5%)等组成; 长石和石英被拉长, 白云母连续定向排列, 石英碎斑呈眼球状(图3e), 局部可见细小锡石颗粒(图3h), 被黑云母、白云母和石英颗粒包围, 暗示岩石是强烈塑性变形作用的产物. 金属矿物(5%)有锡石、闪锌矿和黄铜矿等.

石榴白云母变余糜棱岩(TJ-2), 赋存于江西坑矿区下侏罗统上龙水组(J_{1sl})陆源碎屑岩中. 岩石具斑状变晶结构(图3c). 变斑晶矿物成分为石榴子石(5%)、堇青石(<5%)和石英(<5%). 基质矿物为石英(40%)、白云母(35%)、黑云母(5%)和少量正长石. 堇青石、石英变斑晶被石英和白云母亚颗粒包裹呈眼球状, 具有糜棱岩标志性特征(图3f); 石榴子石呈半自形粒状, 正高突起, 粒径为1.1~4mm, 具包含嵌晶变晶结构和残缕结构(图3i), 显示退变质特征. 金属矿物(<5%)主要有锡石、白钨矿、黄铜矿和黄铁矿等.

3.2 两期锡石的矿相学特征

通过详细显微岩相学研究, 本文发现在莲花山锡多金属成矿带的矿床中存在着两期不同成因锡石(Cst1和Cst2). 一类锡石(XF-1)为浅黄色, 一般呈自形粒状晶产出, 粒径介于0.50~1.8mm, 正极高突起, 与黑云母、长石和石英等矿物呈镶嵌结构产出, 发育韵律环带且环带清晰干净(图3g、3j、3m), 局部可见锡石

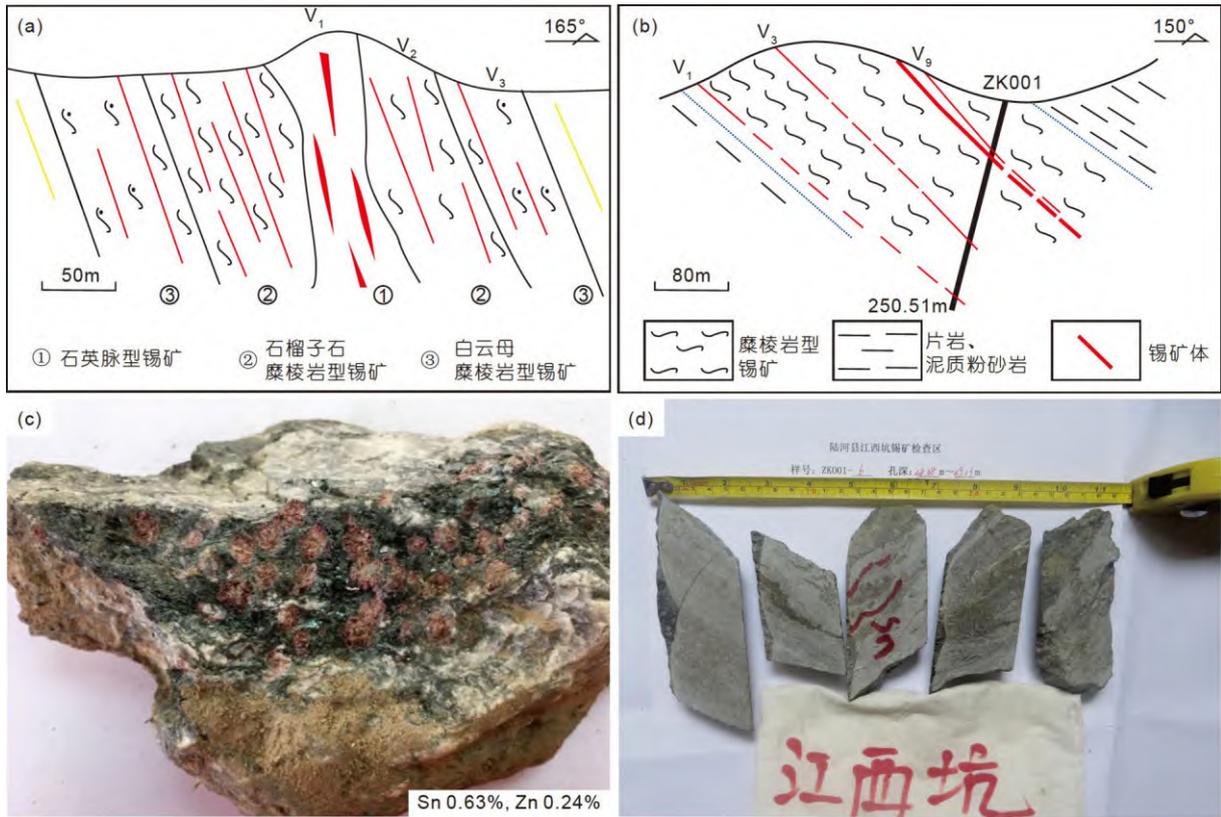


图2 莲花山成矿带仙水沥、江西坑地区锡矿床及矿体特征

具有溶蚀结构且被晚期锡石环绕或穿插(图3d)。该类锡石仅在仙水沥矿床南山村组(JKn)火山岩地层中见到。另一类锡石(XF-2、TJ-2)呈褐色半自形粒状或筛状产出, 粒径介于0.02~0.35mm, 正高突起, 与闪锌矿和黄铜矿等金属矿物构成条带状集合体分布在石英、白云母、黑云母等拉伸矿物中(图3h、3k), 或与石榴子石共生(图3i、3l)。该类锡石无环带结构(图3n、3p), 筛孔被铁锰等暗色矿物充填, 它可能是动力变质作用的产物。锡石矿物学特征表明, 两类锡石的颜色、晶形大小和形态以及矿物组合具有明显区别, 晚期暗色锡石穿插了早期形成的锡石, 表明区内存在早、晚两期锡成矿作用(图3d)。

4 分析方法

扫描电镜矿物相鉴定、电子探针主量元素分析、fsLA-ICP-MS微量元素分析和fsLA-ICP-MS U-Pb同位素定年均在中国科学院矿物学与成矿学重点实验室

完成。

矿物相鉴定仪器为Phenom TM扫描电子显微镜, 矿物相背散射图像观察与分析的电压为15kV; 能谱点分析模式的电压和束斑分别为15kV和3 μ m。锡石主量元素分析在JEOL 256 EPMA JXA-8230电子探针上完成, 加速电压和电流分别为15kV和20nA, 分析束斑为1 μ m。Sn的峰位和背景计数时间分别为20和10s, Ti和Fe的峰位和背景计数时间为40和20s, 检出限分别为381、154和166ppm(1ppm=1 μ g g⁻¹)。所测数据经ZAF程序校正(Z, 原子序数校正; A, X射线吸收校正; F, X射线荧光校正)。SPI公司锡石标样: SnO₂=100wt.%作为监控标样同步分析。锡石fsLA-ICP-MS微量元素分析和U-Pb定年采用的平台为美国应用光谱公司Tandem J200型343nm波长飞秒激光加载赛默飞世尔公司iCAP RQ型号电感耦合质谱仪联机。微量元素分析条件为束斑直径60 μ m、激光剥蚀能量为90 μ J、剥蚀频率5Hz、单点剥蚀时间为35s; 分析过程中采用NIST610玻璃标准物质作为标样监控仪器型号漂移, 采用Sn118作为内

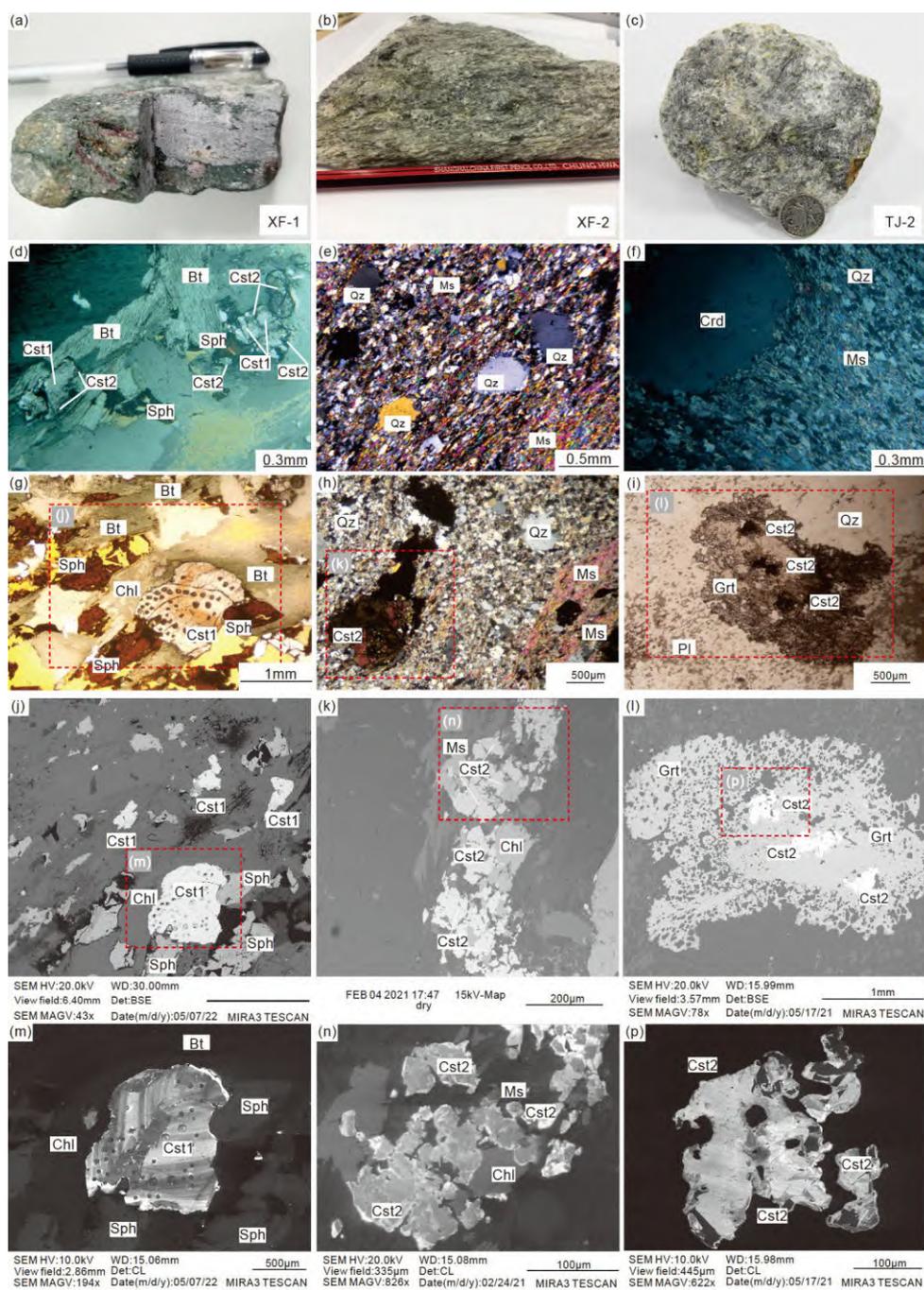


图3 粤东莲花山成矿带含锡石样品手标本及显微特征

XF-1, 黑云母糜棱岩(a)、(d)、(g)、(j)、(m); XF-2, 董青白云母变余糜棱岩(b)、(e)、(h)、(k)、(n)); TJ-2, 石榴白云母变余糜棱岩(c)、(f)、(i)、(l)、(p)). (d) 锡石与黑云母、闪锌矿等共生, 黑云母显示定向排列, 部分发生绿泥石化; 可见早期亮色锡石Cst1被晚期暗色锡石Cst2穿插。(e) 石英旋转碎斑呈眼球状被长条状石英、长石和白云母包裹。(f) 变斑晶董青石被石英和白云母颗粒包裹, 显示强烈塑性变形作用。(g) 锡石呈浅黄色, 具有环带结构, 与闪锌矿、黑云母共生。(h) 石英长石和白云母呈条带状包裹锡石和暗色矿物, 锡石晶形不完整, 具多色性。(i) 褐色锡石颗粒与筛状石榴子石共生, 石榴子石具有明显残缕结构, 指示其退变质作用。(j) 锡石颗粒呈自形, 与黑云母、闪锌矿等共生。(k) 锡石矿物呈半自形细小颗粒围绕先存绿泥石、闪锌矿等矿物, 显示该类锡石为晚期生成。(l) 背散射下锡石呈白色, 筛孔状, 显示其不完全溶解状态。(m) 锡石呈自形粒状, 环带和韵律清晰。(n) 锡石细小颗粒围绕先存矿物生长, 没有环带结构。(p) 锡石呈筛孔状, 孔隙被暗色物质充填, 无环带结构。Qz, 石英; Ms, 白云母; Pl, 斜长石; Chl, 绿泥石; Bt, 黑云母; Crd, 董青石; Grt, 石榴子石; Cst, 锡石; Sph, 闪锌矿

标元素对微量元素进行校正; Sn的具体含量参考对应分析点的电子探针分析结果. 原位微区U-Pb同位素激光分析条件为束斑直径60 μm 、激光剥蚀能量90 μJ 、剥蚀频率5Hz、单点剥蚀时间25s, 分析过程中除了采用NIST 610玻璃标准物质监控仪器型号漂移, 还采用AY-4锡石标样作为基体匹配外标物质校正未知锡石样品的U-Pb同位素年龄(Yuan等, 2011). 锡石微量元素和U-Pb同位素数据结果使用*iolite v4*软件进行处理(Paton等, 2011), 锡石U-Pb Tera-Wasserburg年龄图利用*IsoplotR*在线软件绘制完成(Vermeesch, 2018).

5 分析结果

5.1 锡石U-Pb定年

针对本文发现的两期锡石开展了fsLA-ICP-MS锡石U-Pb原位定年(网络版附表S1, <http://earthcn.scichina.com>). 对XF-1早期锡石样品测定了45个点, U含量变化范围为2.38~11.9 ppm, Th含量变化范围为0.76~28.3 ppm, 在Tera-Wasserburg图解中的下交点年龄为(149.5 \pm 1.0)Ma(MSWD=1.6, $n=45$)(图4a、4b、4e); 对XF-2和TJ-2晚期锡石样品分别测定了14和29个点, U含量变化范围分别为10.9~183和6.9~65.7ppm; Th含量变化范围分别为1.46~1674和0.45~25.0ppm; 在Tera-Wasserburg图解中的下交点年龄分别为Age₁=(127.8 \pm 3.3)Ma(MSWD=11, $n=14$)和Age₂=(126.2 \pm 4.0)Ma(MSWD=4.5, $n=29$), 由于这两件样品中的锡石产状和岩石矿物学特征具有明显的相似性, 且两者的U-Pb年龄在误差范围内一致, 因此我们考虑将两件样品所有分析数据点放在一起作图, 获得的Tera-Wasserburg下交点年龄Age=(125.1 \pm 2.3)Ma(MSWD=4.5, $n=43$), 所获得的上述3个年龄在误差范围内一致, (125.1 \pm 2.3)Ma可以作为晚期锡石成矿年龄(图4c、4d、4f).

5.2 锡石主量与微量元素地球化学特征

本文还对上述3件含锡石样品XF-1、XF-2和TJ-2进行了锡石主量与微量元素含量分析, 旨在限定两期锡石的地球化学特征、探究二者的成因联系. 电子探针分析结果显示(网络版附表S2), 两期锡石的SnO₂含量大于97.56%, 早期锡石中SnO₂平均含量为99.95%, 晚期锡石中SnO₂平均含量为99.10%. 早期锡石TiO₂含量为0.05~0.79%, 平均为0.35%; FeO含量为0.01~0.18%,

平均为0.05%. 晚期锡石TiO₂含量为0~1.09%, 平均为0.35%; FeO含量为0.03~0.58%, 平均为0.15%. 与晚期锡石相比, 早期锡石具有更高的SnO₂含量和相对较低的FeO含量, 其TiO₂含量相对稳定(图5).

锡石原位fsLA-ICP-MS微量元素分析结果显示, 两期锡石的微量元素含量也有明显差别. 早期锡石Nb、Ta、Zr、Hf平均含量分别为225、4.29、233、23.9ppm, Nb/Ta的平均值为208, Zr/Hf平均值为10.1; 晚期锡石的Nb、Ta、Zr、Hf平均含量为637、77.6、170、18.9ppm, Nb/Ta的平均值11.5, Zr/Hf的平均值为13.0(网络版附表S3, 图6a~6d). 早期锡石的Fe和W平均含量为416和412ppm; 而晚期锡石的Fe和W平均含量分别为1894和1518ppm(图6e和6f). 此外, 尽管两类锡石的稀土元素含量均较低, 但也显示出明显差别: 早期锡石相对富集轻稀土, Nd和Gd含量略高, 重稀土含量低, 部分未检出, 稀土总量介于0.04~2.65ppm, 平均值为0.64ppm, LREE/HREE的平均值为0.67; 晚期锡石稀土含量增加明显, 稀土总量介于1.16~60.15ppm, 平均值为7.19ppm, 其LREE/HREE的平均值为5.06, 在球粒陨石标准化图解中略呈右倾型(网络版附表S3, 图7), 存在明显的Ce正异常和Eu负异常, 其 δCe 和 δEu 平均值分别为1.78和0.22; 此外, 大多数分析点的TE_{1,3}大于1.1, 其余分析点的TE_{1,3}小于0.9, 稀土元素四分组效应明显, 表明流体对其形成具有明显的制约(Irber, 1999; 赵振华等, 2010).

6 讨论

6.1 两期锡石的成因

已有的研究显示, 中国南岭及邻区锡成矿作用具有明显的幕式特征, 成矿时代主要集中在晚三叠世(230~210Ma)、晚侏罗世(160~150Ma)和白垩纪(134~80Ma)三个阶段, 与中生代岩浆活动具有明显的时空耦合关系(毛景文等, 2004; 华仁民, 2005; 华仁民等, 2005; 陈骏等, 2014; Hu等, 2017; Yan等, 2020). 闫庆贺等(2018)通过统计年龄数据显示, 粤东地区与岩浆活动有关的锡成矿作用主要集中在晚侏罗世-早白垩世(150~135Ma). 本次研究锡石原位定年结果显示, 莲花山成矿带早期锡石的形成年龄为(149.5 \pm 1.0)Ma, 与晚侏罗世-早白垩世锡成矿作用相吻合. 本文研究的样品取自粤东地区的中、上侏罗统地层, 丘增旺

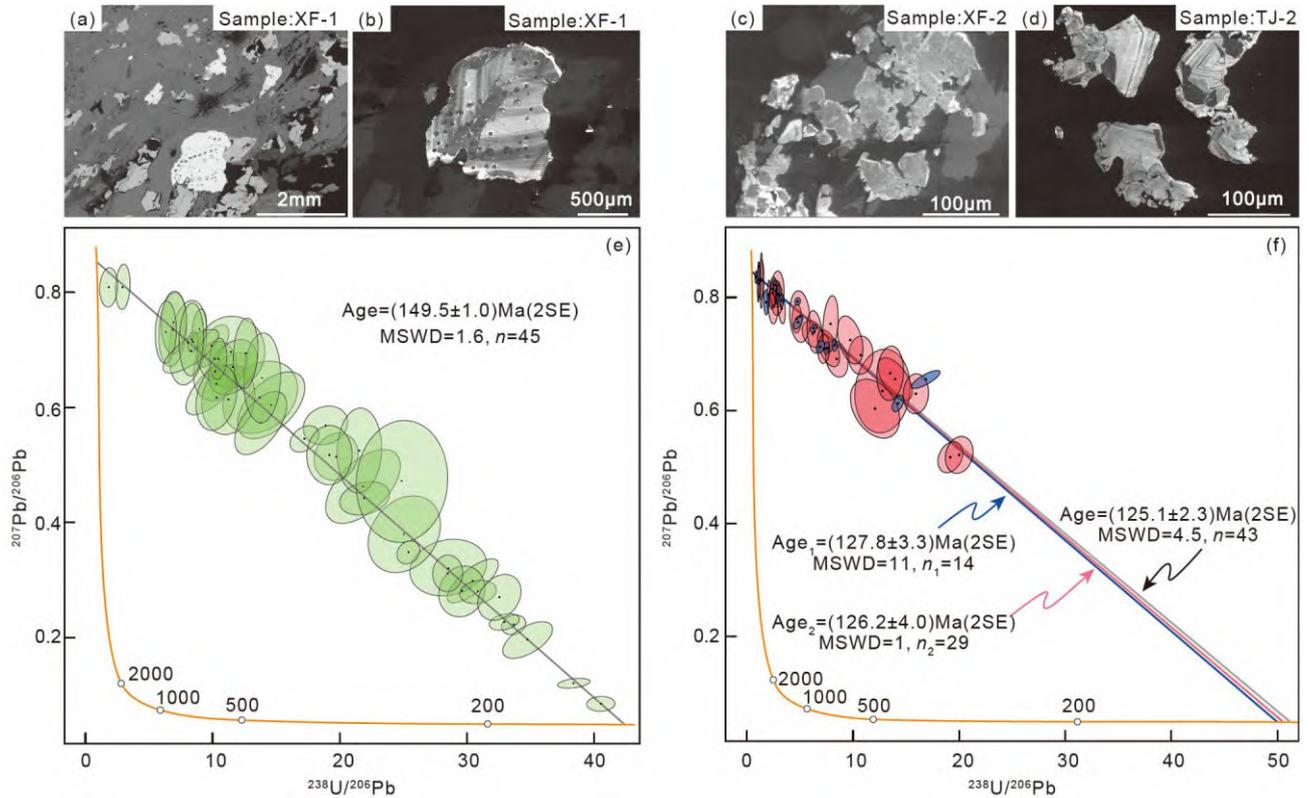


图4 莲花山成矿带锡石CL图像和Tera-Wasserburg年龄谱

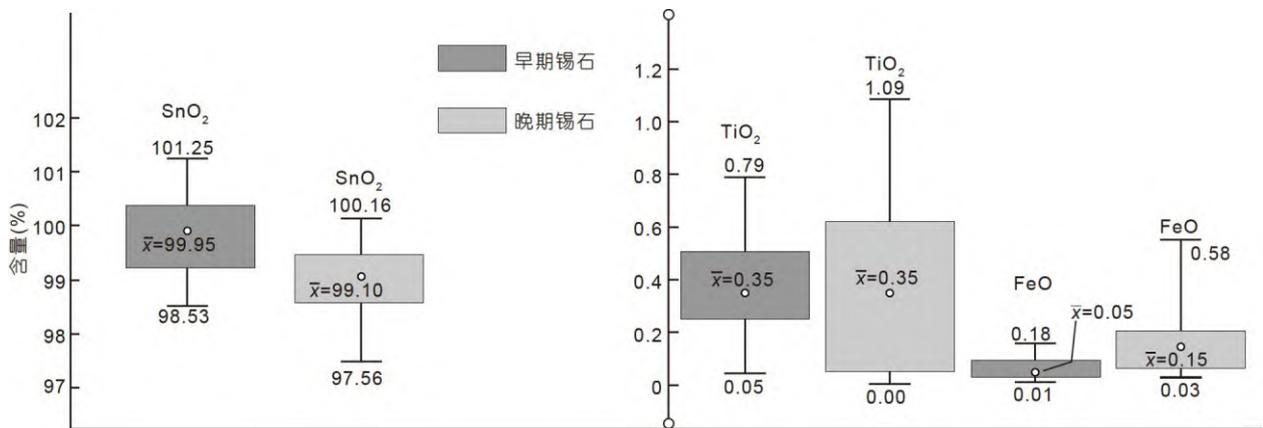


图5 莲花山两期锡石主量元素含量变化特征

(2017)对莲花山成矿带高基坪群的流纹质晶屑凝灰岩和流纹岩进行锆石U-Pb定年,晶屑凝灰岩同位素年龄介于(157.9±1.1)~(155.2±1.4)Ma,而流纹岩的同位素年龄则为(153.5±1.6)Ma,后者形成年龄与早期锡石的形成年龄十分接近。实际上,在莲花山成矿带除了产在动力变质火山岩的锡多金属矿床外,确实还存在着

一些受中酸性侵入岩控制的锡多金属矿床,如大道山锡多金属矿床的形成受同期花岗质岩浆活动控制。基于早期锡石与寄主岩石的同位素年龄接近,有理由推测早期锡石的形成与晚侏罗世的岩浆活动有成因联系。

锡石原位定年结果显示,莲花山成矿带晚期锡石

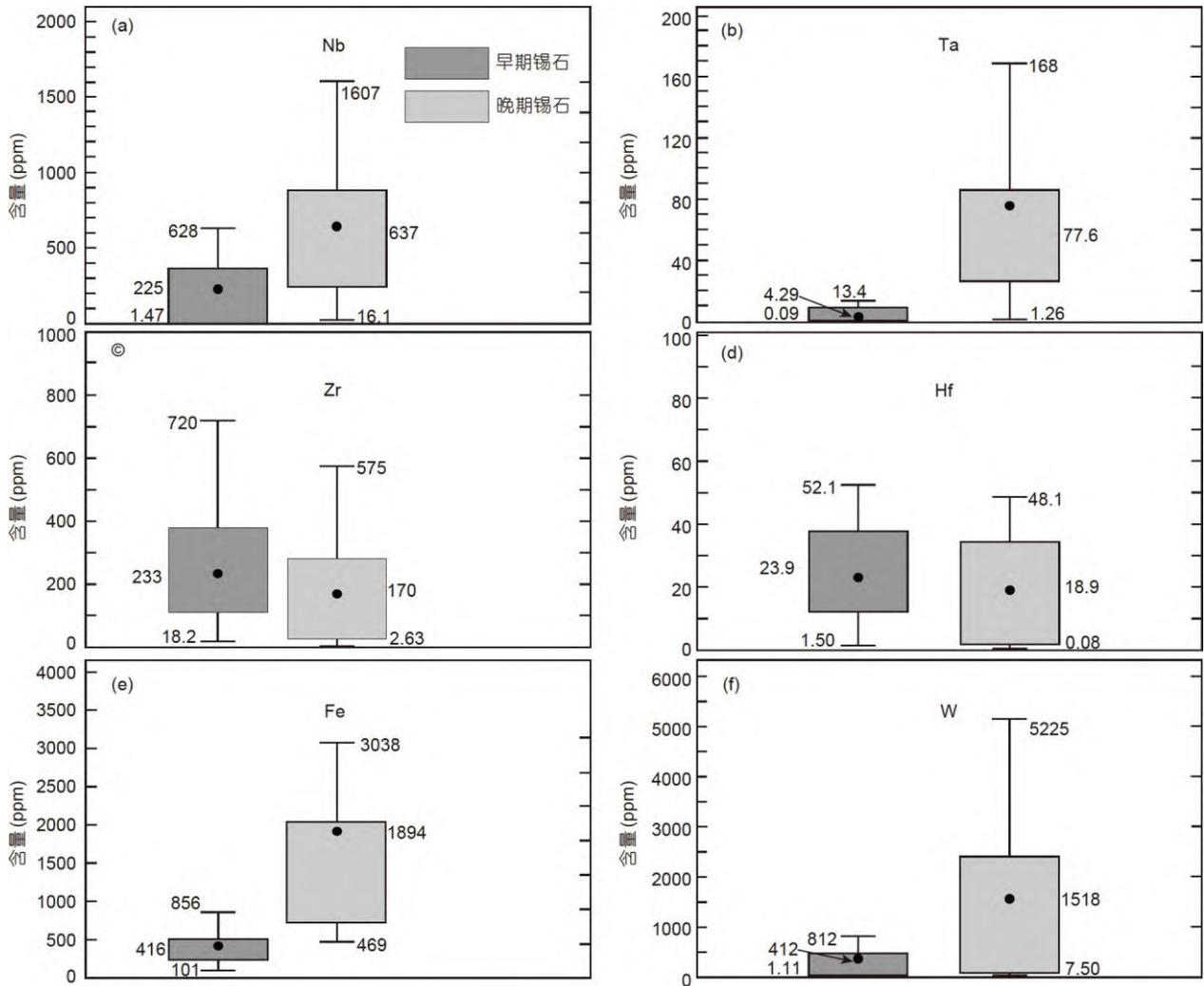


图 6 莲花山成矿带两期锡石微量元素含量变化特征

的形成年龄为(125.1±2.3)Ma. 岩相学研究证实, 莲花山成矿带内岩石广泛受到了动力变质作用的影响, 它主要受晚侏罗世-早白垩世由挤压向伸展构造体制转变的控制. 古地磁研究表明, 在晚侏罗世-早白垩世太平洋板块向西北俯冲的过程中, 其纬度跨越了近40°, 而中国大陆向北仅漂移了8°~10°(邱元禧等, 1991), 在构造格局上形成了大陆板块相对向南, 大洋板块相对向北的左行韧性剪切运动. 这种左行剪切运动波及东南沿海, 导致包括高基坪群在内的地层与岩体发生了强烈的动力变质作用.

两期锡石不但同位素年龄不同, 而且矿物学和地球化学特征也有明显的差异. 早期锡石颗粒较大, 颜色较浅, 晶形完整且环带发育(图3m), 仅在仙水沥矿

区的火山岩地层中可见; 而晚期锡石颗粒较小, 颜色较深. 通过显微镜观察发现, 晚期锡石晶形不完整且均无环带结构(图3n、3p), 在矿区内变质火山岩和变质陆源碎屑岩中均可以见到. 其中条带状锡石主要产于白云母、绿泥石等变质矿物的边缘(图3k), 锡石粒径约0.02~0.05mm, 应是变质富锡流体直接沉淀的产物; 或与石榴子石共生(图3l), 这类锡石颗粒略大, 粒径约0.05~0.35mm, 它可能富锡变质热液与石榴子石发生强烈相互作用的产物(Möller等, 1988). 早期锡石的共生矿物主要为黑云母、长石、石英等, 而晚期锡石的共生矿物主要为变形的石英、长石、白云母、绿泥石和变质成因的堇青石及石榴子石等. 在动力变质过程中, 早期锡石和含Sn黑云母均发生了明显的变化,

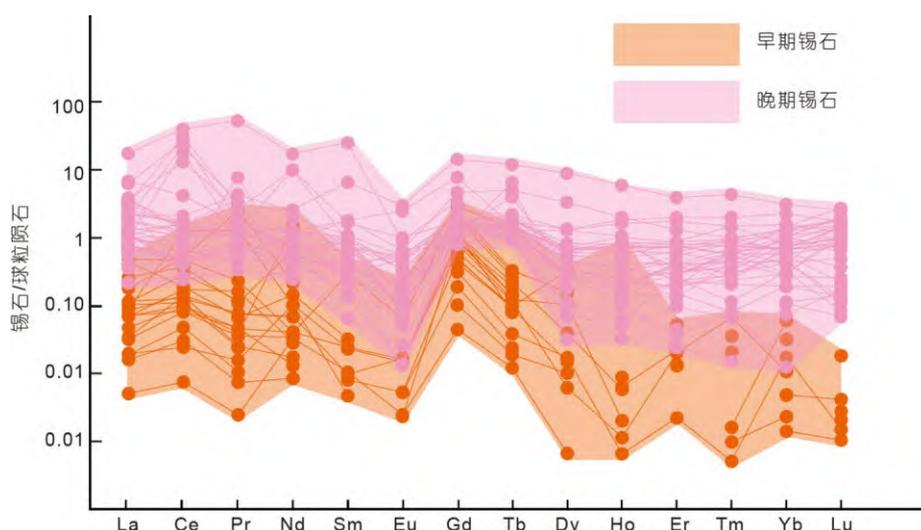


图7 莲花山成矿带两期锡石的球粒陨石标准化稀土元素分布模式图

其中早期锡石主要发生溶解再平衡, 被晚期锡石围绕或穿插(图3d); 而黑云母一部分蚀变为绿泥石, 一部分则发生相变转变为白云母, XF-2样品中存在着大量定向排列的鳞片状白云母(或绢云母)(图3e、3f), 它们是变质过程黑云母相变的产物. 此外, 与晚期锡石共生的石榴子石含有较多石英包裹体, 形成包含嵌晶变晶结构和残缕结构(图3i), 说明石榴子石发生了明显的退变质作用. 莲花山成矿带沿线分布包括仙水沥、江西坑等锡多金属矿床空间分布均受控于棉洋-双华、北山嶂-九龙嶂、五指嶂-锅子嶂和梅陇-鲛门-观音山4条韧性剪切带(图1), 锡矿体空间展布也明显受到糜棱片理和面理的控制, 我们有理由认为晚期锡石的形成与区域动力变质作用有关.

由于锡石具有四方晶系的晶体结构, Sn能与Fe、Mn、Nb和Ta等发生类质同象替代赋存在黑云母等矿物中, 其离子置换形式主要是 $2(\text{Nb}, \text{Ta})^{5+} + (\text{Fe}, \text{Mn})^{2+} \rightleftharpoons 3\text{Sn}^{4+}$. 早期锡石的Nb+Ta和Fe+Mn平均含量分别为241和417ppm, 而晚期锡石Nb+Ta和Fe+Mn平均含量则分别为714和1925ppm, 明显高于前者. 一些学者研究发现, 锡石的(Nb+Ta)/(Fe+Mn)是其成因的有效甄别标志, 典型岩浆成因锡石的(Nb+Ta)/(Fe+Mn)比值为1左右(胡泽宁, 1988; 王志强等, 2014; 闫庆贺等, 2018; Gemmrich等, 2021). 分析结果显示, 莲花山锡多金属成矿带早晚两期锡石的(Nb+Ta)/(Fe+Mn)的平均值分别为0.79和0.67, 这暗示二者与典型岩浆成因锡石有一

定差别, 且以后者差别更为显著. 早期锡石的稀土总量相对较低, 介于0.04~2.66ppm, 其LREE/HREE比值在0.67左右变化, 与云英岩型锡矿床锡石的稀土元素地球化学特征相近(Gemmrich等, 2021); 其Nb和Ta含量变化范围分别为1.47~628和0.09~13.4ppm, 与花岗岩有成因联系的锡石有明显差别(Gemmrich等, 2021), 暗示它形成于富Nb和Ta矿物结晶之后(如铌钽矿、榍石和黑云母等), 更可能是岩浆热液成因. 晚期锡石稀土总量介于1.16~60.2ppm, 其LREE/HREE在5左右变化, 其分析点的 $\text{TE}_{1,3}$ 或大于1.1, 或小于0.9, 显示出明显的四分组效应, 暗示其形成受热液流体的影响(Irber, 1999; 赵振华等, 2010). 作者对莲花山成矿带典型矿床石英中流体包裹体进行了研究, 流体包裹体主要为气液包裹体和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 三相流体包裹体, 其均一温度介于135~353℃, 盐度介于0~6.2wt.% NaCl equiv., 表明成矿热液为富 CO_2 的中低温低盐度流体, 具有变质流体的特征(杨巍然和张文淮, 1996; Mao等, 2008; 肖晓牛等, 2009; 丁志磊等, 2019; Zoheir等, 2020; 李孝文等, 2021). 前人通过莲花山成矿带产于变质火山岩的锡多金属矿床氧同位素研究认为, 其成矿流体确实是以变质水为主, 有少量的大气降水混入(余纪能, 1985; 刘英俊等, 1988; 王文斌和谢华光, 1989; 丁志磊等, 2019). 通常人们认为Nb和Ta的地球化学性质相对稳定(华仁民, 2005; 华仁民等, 2005; Han等, 2021), 但Yan等(2022)在南秦岭成矿带的天宝矿床的萤石和碳

酸盐蚀变产物中发现了沿微裂隙分布的细粒次生的铌钛矿和铈铌钙钛矿等富铌矿物, 这表明富挥发的流体会导致Nb和Ta等元素的活化再富集. 锡石原位微量元素分析结果显示, 从早期到晚期锡石的Nb和Ta含量明显增加(图6), 暗示在晚期锡石形成时流体富含Nb和Ta等高场强元素, 它可能是早期结晶的铌钽矿、榍石和黑云母等富Nb和Ta矿物溶解所致.

此外, W和Fe等氧逸度指标元素含量分析结果显示, 早期锡石W和Fe含量平均值分别为412和416ppm; 晚期锡石W和Fe含量平均值分别为1530和1909ppm, 这表明早期锡石形成的氧逸度远低于晚期锡石. 基于锡石矿物学、年代学和地球化学的综合研究, 本文认为, 早期锡石的形成与晚侏罗世的岩浆活动有成因联系, 而晚期锡石的形成则与早白垩世晚期的动力变质作用有关.

6.2 动力变质作用对锡富集成矿的制约

在莲花山成矿带除了塌山、仙水沱和江西坑等受动力变质作用控制的锡多金属矿床外, 近年还发现了与燕山期中酸性岩浆活动有关的锡多金属矿床. 如呈浸染状产于火山-次火山岩中的桃子窝锡矿床(171Ma; 刘鹏等, 2015b), 与火山沉积岩有关的大道山锡矿床(152Ma; Qiu等, 2017b), 与花岗岩斑岩有关的淘锡湖锡矿床(139Ma; Yan等, 2020). 这充分显示该地区燕山期岩浆活动形成的地层和岩体具有较好的锡多金属成矿潜力. 莲花山成矿带内出露的高基坪群主要由热水洞组、水底山组和南山村组等组成, 是一套流纹质-英安流纹质凝灰岩和熔岩, 其Sn的背景值分别为19.4、19.0和22.2ppm, 明显高于地壳丰度, 具有较高锡多金属成矿潜力, 在局部形成了与中酸性火山岩活动有关的锡矿化, 形成了早期锡石. 原岩火山岩中的锡元素主要赋存于锡石和黑云母中. Zhao等(2021)认为, 黑云母的脱水与锡成矿具有密切关系; Kunz等(2022)最新研究显示, 黑云母的分解可以释放出大量的锡; 更重要的是热水洞组、水底山组和南山村组等火山岩明显富集F等挥发分, 其平均含量分别为352、464和449ppm(王军等, 2022), 而F是锡的活化剂(Jackson和Helgeson, 1985; Möller等, 1988). 因此, 在动力变质过程中本区火山岩地层的锡可以发生活化和迁移, 并在有利空间和合适的物理化学条件下形成晚期锡石.

在国内外其他地区也有一些锡多金属矿床产于变

质岩或韧性剪切带中(刘伟宁和梁永宁, 1988; Fu等, 1993; 王玲和孙杭军, 2012; Deng等, 2018; Cheng等, 2019; Li等, 2020a; Nambaje等, 2020, 2021; Han等, 2021; Liu等, 2021b; 朱艺婷等, 2021), 表明变质作用确实可以使锡再活化并富集成矿. 已有实验表明, 在350°C和0.70GPa的温度、压力条件下, 不仅地层中的锡等成矿元素活化率高达30%(刘英俊等, 1988), 而且F也能被活化, 形成富F的变质流体. 显然, 锡的活化受动力变质作用的制约, 而迁移和沉淀则受富F变质流体的控制. 已有的研究显示, 锡元素主要以 Sn^{4+} 形式与溶液中的 F^- 和 H_2O 形成羟基络合物 $\text{Sn}(\text{OH})_4\text{F}_2^-$ (Jackson和Helgeson, 1985; 刘玉山和陈淑卿, 1986; 刘英俊等, 1988; Möller等, 1988; 王文斌和谢华光, 1989; 彭省临和曾骥良, 1990; 曾志方, 2013), 主要形式为 $\text{SnO}_2 + 2\text{F}^- + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Sn}(\text{OH})_4\text{F}_2^-$. 在该过程中影响锡的溶解与沉淀的主要因素除含氟溶液浓度外, 还有温度和压力等.

前人根据变质带的矿物组合和变质相, 推测莲花山成矿带变质的温度和压力变化范围分别为300~600°C和0.26~0.70GPa(李建超和丘元禧, 1990); 石榴子石-黑云母温压计估算显示, 莲花山成矿带变质的温度和压力变化范围分别为458~560°C和0.13~0.77GPa(王军等, 2021); 在这种物理化学条件下地层中的锡极易发生活化和迁移(刘英俊等, 1988). 实际上, 莲花山成矿带的韧性剪切作用确实促进了锡的活化与富集, 莲花山成矿带动力变质形成的火山质糜棱岩Sn含量可高达300~1500ppm(余纪能, 1985; 王文斌和谢华光, 1989; 汪礼明等, 2018). 锡元素的活化与富集主要表现在以下两个方面: 一方面是地层中赋存在黑云母等其他矿物内的锡发生活化、迁移并沉淀的产物; 另一方面则是早期结晶锡石溶解再平衡, 从而为动力变质锡矿床的形成提供了充裕的成矿物质. 受动力变质作用形成的变质热液不但有利于锡元素的活化, 而且有利于早期结晶的铌钽矿、榍石和黑云母等富Nb和Ta矿物溶解, 使这种变质热液富含Nb、Ta、Fe等组分. 同时, 榍石和黑云母等矿物又是稀土元素的主要载体, 它们的溶解会释放出相当数量的稀土元素, 因此晚期动力变质成因的锡石明显富集Nb、Ta、Fe和稀土元素(图6).

野外地质调查和钻探工程显示, 莲花山成矿带所揭露的锡多金属矿(化)体主要赋存在高基坪群中酸性

火山岩和火山碎屑岩建造。受区域构造运动影响, 早期碎屑沉积岩和火山岩发生强烈形变, 含矿变质热液沿着片理、面理运移、充填和沉淀, 锡多金属矿体呈似层状、透镜状平行于片理、面理方向(汪礼明等, 2018; 王军等, 2021), 仅有少数锡矿与石英脉共生。据此, 本文认为在仙水沥和江西坑矿区新发现的晚期锡石((125.1±2.3)Ma)应与区域动力变质作用密切相关。基于已有的地质、地球化学数据和钻孔资料, 本文对受变质改造的火山岩和能够活化迁移的锡进行了初步估算, 认为在仙水沥和江西坑矿区有探获2个中型规模及以上锡矿床的潜力。粤东莲花山成矿带的构造变形可以划分为中侏罗世断裂动热变质作用、晚侏罗世-早白垩世韧性剪切变形和晚白垩世以来的韧性-脆性变形作用(李建超和丘元禧, 1990; 汪礼明等, 2018); 其⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年龄数分别为151~162、117.5~129.7和66~97Ma(邹和平等, 2000)。其中早白垩世晚期(117.5~129.7Ma)受太平洋板块向西北俯冲的影响, 伴随产生的左行韧性剪切动力变质作用最强烈(邱元禧等, 1991; 汪礼明等, 2018; Li等, 2020a); 而晚白垩世(66~97Ma)以脆性变形为主的变质作用导致地表形成一系列脆性断层和陆块隆升(广东省地质矿产局, 1988)。显然, 莲花山成矿带与动力变质作用有关的锡矿化受控于早白垩世晚期韧性剪切变形作用; 陆块隆升则形成了陆丰新田、海丰黄羌和红源等砂锡型矿床(点)(广东省地质矿产局, 1988), 其物理化学条件不利于动力变质锡矿床的形成。

锡石矿物学、元素地球化学特征和同位素年代学分析结果显示, 粤东地区广泛分布的高基坪群流纹质-英安流纹质凝灰岩和熔岩明显富集Sn和F, 具有较高的锡多金属成矿潜力, 在局部发生了锡矿化, 形成了与火山岩活动有关的早期锡石。在早白垩世晚期受太平洋板块向西北俯冲的影响, 包括高基坪群在内的粤东地区地层和岩体发生动力变质作用。由于动力变质作用形成了富F的变质流体, 使高基坪群中的Sn等组分活化迁移, 并在韧性剪切带聚集形成了与动力变质作用有关的仙水沥、江西坑等锡多金属矿床。

7 结论

(1) 莲花山成矿带含矿的动力变质岩中厘定两期锡石。早期锡石颗粒较大, 颜色较浅, 晶形完整且环带

发育, 与黑云母、长石和石英等矿物共生; 而晚期锡石颗粒较小, 颜色较深, 晶形不完整且无环带结构, 与变形的石英、长石、白云母、绿泥石和石榴子石等共生。

(2) 莲花山成矿带产于变质火山岩锡多金属矿床的早期锡石形成于(149.5±1.0)Ma, 晚期锡石形成于(125.1±2.3)Ma; 与早期锡石相比, 晚期锡石具有较高的Ta、Nb、Fe、W含量和明显的稀土四分组效应。

(3) 莲花山成矿带高基坪群中酸性火山岩明显富集Sn和F, 具有较高的锡多金属成矿潜力, 并形成了与火山岩活动有关的早期锡石, 在局部形成与岩浆活动有关的锡多金属矿床。早白垩世晚期受太平洋板块向西北俯冲的影响, 富锡中酸性火山岩发生动力变质作用, 其中的Sn元素发生活化迁移, 并在韧性剪切带聚集形成了与动力变质作用有关的锡矿床。

致谢 在论文撰写、分析测试过程中得到了中国科学院广州地球化学研究所牛贺才和陈华勇研究员、赵旭博士、杨亚楠博士、吴丹工程师和高振丽的指导和帮助; 在野外地质工作中得到了王艳、卜安、颜伦明和钱龙兵4位同行的支持和帮助; 责任编辑和匿名评审人提出了宝贵意见和建议, 使修改稿件的质量有了极大的提升。在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- 陈骏, 王汝成, 朱金初, 陆建军, 马东升. 2014. 南岭多时代花岗岩的钨锡成矿作用. 中国科学: 地球科学, 44: 111-121
- 丁志磊, 陈正乐, 王晓虎, 潘家永, 张文高, 周荣德. 2019. 粤东莲花山断裂带高山寨钨多金属矿床流体包裹体研究. 矿物岩石, 39: 7-14
- 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 李海立, 蔡逸涛, 康丛轩, 朱意萍, 刘建雄, 邓中林, 李少斌, 林耿伟, 周霞, 肖凡. 2018a. 粤东鸿沟山金矿区流纹斑岩锆石SHRIMP U-Pb定年、Lu-Hf同位素组成及其地质意义. 地质论评, 64: 213-226
- 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 李海立, 康丛轩, 刘建雄, 邓中林, 李少斌, 林耿伟, 周霞. 2018b. 粤东新寮岩区成矿闪长岩类Shrimp锆石U-Pb年龄、地球化学特征及地质意义. 华东地质, 39: 279-289
- 范飞鹏, 肖惠良, 陈乐柱, 李海立, 刘建雄, 邓中林, 康丛轩, 林耿伟, 陈凯. 2020. 粤东莲花山地区多期岩浆锆石年代学、Hf同位素组成及其成矿作用. 吉林大学学报(地球科学版), 50: 1462-1490
- 广东省地质矿产局. 1988. 广东省区域地质志. 北京: 地质出版社
- 古润平, 卜安, 陈少青. 2009. 广东省揭西金坑铜钨铅锌矿区矿床地质特征与远景预测. 资源调查与环境, 30: 109-114

- 郭锐, 彭恩生. 2008. 粤东丰顺县尖笔寨铅锌矿床矿化特征及形成机理. 矿产与地质, 22: 506–509
- 胡泽宁. 1988. 云龙锡矿锡石的标型特征. 矿物学报, 4: 381–384
- 华仁民. 2005. 南岭中生代陆壳重熔型花岗岩类成岩-成矿的时间差及其地质意义. 地质论评, 51: 633–639
- 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 2005. 论华南地区中生代3次大规模成矿作用. 矿床地质, 24: 99–107
- 江丞曜, 刘鹏, 钱龙兵, 毛景文. 2021. 粤东金坑Sn-Cu矿成岩成矿年代学格架与Sn-Cu共生成矿作用. 岩石学报, 37: 747–768
- 李建超, 丘元禧. 1990. 广东莲花山燕山早期断裂动热变质带的基本特征及形成机制的探讨. 长春地质学院学报, 1: 11–20
- 李孝文, 曹淑云, 刘建华, 周丁奎, 李文轩, 蒋少涌, 曹汉琛, 吴玉. 2021. 北阿尔金余石山含金石英脉地质构造特征与流体作用. 大地构造与成矿学, 45: 1061–1093
- 李益智. 2016. 广西大厂铜坑锡多金属矿床成矿流体特征研究. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学
- 刘鹏, 程彦博, 毛景文, 王小雨, 姚薇, 陈叙涛, 曾晓剑. 2015a. 粤东田东钨锡多金属矿床花岗岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其意义. 地质学报, 89: 1244–1257
- 刘鹏, 程彦博, 王小雨, 张翔, 高凤颖, 廖正国. 2015b. 粤东桃子窝锡矿区火山-次火山岩和花岗岩锆石U-Pb年龄、Hf同位素特征及其意义. 岩石矿物学杂志, 34: 620–636
- 刘伟宁, 梁永宁. 1988. 云龙锡矿床的构造-地球化学特征. 地球化学, 1: 62–68
- 刘英俊, 李兆麟, 董国仪, 汪东波, 吴启志. 1988. 广东潮安厚婆坳锡矿床成矿物质来源及物理化学条件研究. 矿产与地质, 2: 40–47
- 刘玉山, 陈淑卿. 1986. 锡石溶解度和锡迁移形式的实验研究. 地质学报, 1: 78–88
- 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 2004. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展. 地学前缘, 11: 45–55
- 彭省临, 曾骥良. 1990. 铅锌在花岗质硅酸盐熔体和共存含水流体间分配机理的实验研究. 岩石学报, 2: 12–19
- 邱元禧, 郑津松, 李建超, 钟宏平. 1991. 广东莲花山断裂带中新世代多期、复合变形变质带的基本特征及其形成机制的探讨. 中国地质科学院地质力学所所刊, 14: 93–106
- 丘增旺. 2017. 粤东金坑锡多金属矿床成岩成矿作用研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院大学. 1–160
- 丘增旺, 王核, 闫庆贺, 李莎莎, 汪礼明, 卜安, 慕生禄, 李沛, 魏小鹏. 2016. 广东长埔锡多金属矿床石英斑岩锆石U-Pb年代学、Hf同位素组成及其地质意义. 地球化学, 45: 374–386
- 丘增旺, 王核, 闫庆贺, 李莎莎, 汪礼明, 卜安, 魏小鹏, 李沛, 慕生禄. 2017. 广东陶锡湖锡多金属矿床花岗岩斑岩锆石U-Pb年代学、地球化学、Hf同位素组成及其地质意义. 大地构造与成矿学, 41: 516–532
- 邵主助. 2019. 广西大厂铜坑锡多金属矿床成矿流体特征及矿床成因探讨. 硕士学位论文. 南宁: 广西大学
- 王军, 黄嘉坚, 鄢圣武, 汪礼明, 熊子良, 钱龙兵, 徐日邓, 卜安, 朱沛云. 2022. 粤东莲花山断裂带水系沉积物地球化学特征及锡多金属找矿预测. 地球化学, doi: 10.19700/j.0379-1726.2022.04.014
- 王军, 廖明英, 卜安, 朱沛云. 2016. 广东省揭西县金坑锡铜多金属矿床“三位一体”找矿预测地质模型的构建. 地质论评, 62(增刊): 51–52
- 王军, 汪礼明, 公凡影, 王艳, 王成明, 卜安, 朱沛云. 2021. 粤东莲花山断裂带韧性剪切的温压条件及其对钨锡铜多金属成矿作用的约束. 岩石学报, 37: 1921–1932
- 王玲, 孙杭军. 2012. 滇西云龙混合岩化高温热液锡矿床. 云南地质, 31: 32–35
- 汪礼明, 卜安, 王核, 李莎莎, 陈少青, 郭丽荣. 2014. 广东莲花山断裂带南西段整装勘查区勘查找矿新进展. 矿床地质, 33(增刊): 965–966
- 汪礼明, 王军, 王核, 卜安, 郭锐, 王涌泉, 朱沛云. 2016. 广东莲花山断裂带动力变质成矿作用新认识. 地质论评, 62(增刊): 90–92
- 汪礼明, 王军, 王核, 卜安, 李莎莎, 钱龙兵, 王玮. 2018. 粤东莲花山断裂带动力变质作用与动力变质热液成矿. 大地构造与成矿学, 42: 908–917
- 王汝成, 谢磊, 陆建军, 朱金初, 陈骏. 2017. 南岭及邻区中生代含锡花岗岩的多样性: 显著的矿物特征差异. 中国科学: 地球科学, 47: 1257–1268
- 王文斌, 谢华光. 1989. 广东长埔-吉水门锡矿带某些成矿规律和矿床成因. 矿床地质, 4: 11–19
- 王小雨. 2015. 粤东新寮崇铜多金属矿床地质特征及成因初步研究. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学
- 王志强, 陈斌, 马星华. 2014. 南岭芙蓉锡矿田锡石原位LA-ICP-MS U-Pb年代学及地球化学研究: 对成矿流体来源和演化的意义. 科学通报, 59: 2505–2519
- 肖晓牛, 喻学惠, 莫宣学, 杨贵来, 李勇, 黄行凯. 2009. 滇西北衙金多金属矿床流体包裹体研究. 地学前缘, 16: 250–261
- 闫庆贺, 王核, 丘增旺, 王敏, 慕生禄, 汪礼明, 卜安, 王赛蒙, 李莎莎, 魏小鹏, 李沛. 2018. 粤东塌山斑岩型锡多金属矿床锆石及锡石U-Pb年代学、Hf同位素组成及其地质意义. 大地构造与成矿学, 42: 718–731
- 杨航, 辛宇佳, 李建华, 张培星. 2021. 广东莲花山花岗岩体锆石U-Pb年龄、地球化学特征及地质意义. 地球学报, 43: 211–223
- 杨巍然, 张文淮. 1996. 断裂性质与流体包裹体组合特征. 地球科学, 5: 53–58
- 姚薇, 钱龙兵, 杨瀚文, 甘黎明, 冯博鑫. 2021. 粤东仙水沱Sn-W矿床地质特征及成岩成矿年代学研究. 岩石学报, 37: 733–746
- 于际民, 蒋少涌, 潘家永, 倪培, 凌洪飞. 2002. 滇西云龙锡矿成矿流体演化的氢、氧同位素证据. 地质论评, 48: 250–255
- 余纪能. 1985. 广东莲花山断裂带中段锡矿床成矿地质特征. 矿产地质研究院学报, 3: 13–21
- 曾志方. 2013. 湖南大义山锡矿田构造控矿作用与成矿机理研究. 博

士学位论文. 武汉: 中国地质大学

张文高, 王晓虎, 陈正乐, 丁志磊, 周荣德, 胡文杰. 2020. 广东莲花山断裂带韧性剪切带变形特征及其与成矿的关系. *中国地质*, 47: 932–943

赵振华, 包志伟, 乔玉楼. 2010. 一种特殊的“M”与“W”复合型稀土元素四分组效应: 以水泉沟碱性正长岩为例. *科学通报*, 55: 1474–1488

朱艺婷, 李晓峰, 余勇, 李祖福, 吴永. 2021. 滇西松山锡矿锡石LA-SE-ICP-MS U-Pb年代学及其对区域锡成矿作用的指示. *岩石学报*, 37: 2179–2188

自然资源部. 2018. 中国矿产资源报告. 北京: 地质出版社

邹和平, 王建华, 丘元禧. 2000. 广东南澳和莲花山韧性剪切带⁴⁰Ar/³⁹Ar年龄及其地质意义. *地球学报*, 21: 356–364

Cheng Y B, Spandler C, Kemp A, Mao J W, Rusk B, Hu Y, Blake K. 2019. Controls on cassiterite (SnO₂) crystallization: Evidence from cathodoluminescence, trace-element chemistry, and geochronology at the Gejiu Tin District. *Am Miner*, 104: 118–129

Deng X H, Chen Y J, Bagas L, Zhou H Y, Zheng Z, Yue S W, Chen H J, Li H M, Tu J R, Cui Y R. 2018. Cassiterite U-Pb geochronology of the Kekekaerde W-Sn deposit in the Baiganhu ore field, East Kunlun Orogen, NW China: Timing and tectonic setting of mineralization. *Ore Geol Rev*, 100: 534–544

Dewaele S, Muchez P, Burgess R, Boyce A. 2015. Geological setting and timing of the cassiterite vein type mineralization of the Kalima area (Maniema, Democratic Republic of Congo). *J African Earth Sci*, 112: 199–212

Fu M, Kwak T A P, Mernagh T P. 1993. Fluid inclusion studies of zoning in the Dachang tin-polymetallic ore field, People's Republic of China. *Econ Geol*, 88: 283–300

Gemmrich L, Torró L, Melgarejo J C, Laurent O, Vallance J, Chelle-Michou C, Sempere T P A. 2021. Trace element composition and U-Pb ages of cassiterite from the Bolivian Tin Belt. *Miner Depos*, 56: 1491–1520

Gulson B L, Jones M T. 1992. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites. *Geology*, 20: 355–358

Han J S, Chen H Y, Hollings P, Wang J, Zhang D X, Zhang L, Zeng T, Ma J L, Ai Y M. 2021. Efficient enrichment of Rb during the magmatic-hydrothermal transition in a highly evolved granitic system: Implications from mica chemistry of the Tiantangshan Rb-Sn-W deposit. *Chem Geol*, 560: 120020

Hu R Z, Chen W T, Xu D R, Zhou M F. 2017. Reviews and new metallogenic models of mineral deposits in South China: An introduction. *J Asian Earth Sci*, 137: 1–8

Irber W. 1999. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous

granite suites. *Geochim Cosmochim Acta*, 63: 489–508

Jackson K J, Helgeson H C. 1985. Chemical and thermodynamic constraints on the hydrothermal transport and deposition of tin: I. Calculation of the solubility of cassiterite at high pressures and temperatures. *Geochim Cosmochim Acta*, 49: 1–22

Kendall-Langley L A, Kemp A I S, Grigson J L, Hammerli J. 2020. U-Pb and reconnaissance Lu-Hf isotope analysis of cassiterite and columbite group minerals from Archean Li-Cs-Ta type pegmatites of Western Australia. *Lithos*, 352-353: 105231

Kunz B E, Warren C J, Jenner F E, Harris N B W, Argles T W. 2022. Critical metal enrichment in crustal melts: The role of metamorphic mica. *Geology*, 50: 1219–1223

Li J H, Cawood P A, Ratschbacher L, Zhang Y Q, Dong S W, Xin Y J, Yang H, Zhang P X. 2020a. Building southeast China in the Late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan Fault Zone. *Earth-Sci Rev*, 201: 103056

Li S S, Feng Z H, Qin Y, Pang C J, Dai Y, Li S H, Cao J, Bai Y M, Wang C Z. 2020b. The relationship between ductile shear zone and mineralization in the Jiufeng Sn Deposit, Northern Guangxi, South China: Evidence from structural analysis and cassiterite U-Pb dating. *Ore Geol Rev*, 124: 103655

Liu P, Mao J W, Lehmann B, Peng L L, Zhang R Q, Wang F Y, Lu G A, Jiang C Y. 2021a. Cassiterite U-Pb dating of the lower Cretaceous Yanbei tin porphyry district in the Mikengshan volcanic basin, SE China. *Ore Geol Rev*, 134: 104151

Liu P, Mao J W, Lehmann B, Weyer S, Horn I, Mathur R, Wang F Y, Zhou Z H. 2021b. Tin isotopes via fs-LA-MC-ICP-MS analysis record complex fluid evolution in single cassiterite crystals. *Am Miner*, 106: 1980–1986

Mao J W, Wang Y T, Li H M, Pirajno F, Zhang C Q, Wang R T. 2008. The relationship of mantle-derived fluids to gold metallogenesis in the Jiaodong Peninsula: Evidence from D-O-C-S isotope systematics. *Ore Geol Rev*, 33: 361–381

Möller P, Dulski P, Szacki W, Malow G, Riedel E. 1988. Substitution of tin in cassiterite by tantalum, niobium, tungsten, iron and manganese. *Geochim Cosmochim Acta*, 52: 1497–1503

Nambaje C, Eggins S M, Yaxley G M, Sajeev K. 2020. Micro-characterisation of cassiterite by geology, texture and zonation: A case study of the Karagwe Ankole Belt, Rwanda. *Ore Geol Rev*, 124: 103609

Nambaje C, Williams I S, Sajeev K. 2021. Shrimp U-Pb dating of cassiterite: Insights into the timing of Rwandan tin mineralisation and associated tectonic processes. *Ore Geol Rev*, 135: 104185

Neymark L A, Holm-Denoma C S, Larin A M, Moscati R J, Plotkina Y V. 2021. LA-ICPMS U-Pb dating reveals cassiterite inheritance in

- the Yazov granite, Eastern Siberia: Implications for tin mineralization. *Miner Depos*, 56: 1177–1194
- Neymark L A, Holm-Denoma C S, Moscati R J. 2018. *In situ* LA-ICPMS U-Pb dating of cassiterite without a known-age matrix-matched reference material: Examples from worldwide tin deposits spanning the Proterozoic to the Tertiary. *Chem Geol*, 483: 410–425
- Paton C, Hellstrom J, Paul B, Woodhead J, Hergt J. 2011. Iolite: Freeware for the visualisation and processing of mass spectrometric data. *J Anal At Spectrom*, 26: 2508
- Qiu Z W, Li S S, Yan Q H, Wang H, Wei X P, Li P, Wang L M, Bu A. 2017a. Late Jurassic Sn metallogeny in eastern Guangdong, SE China coast: Evidence from geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-S isotopes of the Dadaoshan Sn deposit. *Ore Geol Rev*, 83: 63–83
- Qiu Z W, Yan Q H, Li S S, Wang H, Tong L X, Zhang R Q, Wei X P, Li P, Wang L M, Bu A, Yan L M. 2017b. Highly fractionated Early Cretaceous I-type granites and related Sn polymetallic mineralization in the Jinkeng deposit, eastern Guangdong, SE China: Constraints from geochronology, geochemistry, and Hf isotopes. *Ore Geol Rev*, 88: 718–738
- Vermeesch P. 2018. Isoplotr: A free and open toolbox for geochronology. *Geosci Front*, 9: 1479–1493
- Yan Q H, Wang H, Chi G X. 2020. Pulsed magmatic fluid releasing in the formation of the Taoxihu Sn polymetallic deposit, eastern Guangdong, SE China: Evidence from fluid inclusions, cassiterite U-Pb geochronology, and stable isotopes. *Ore Geol Rev*, 126: 103724
- Yan S, Niu H C, Zhao X, Zhang Q B, Zhang H J, Zhao X C. 2022. Rare metal enrichment of the Tianbao trachytic complex, North Daba Mountains (South Qinling): Insights from textures and geochemistry of trachytes and Nb-REE minerals. *Ore Geol Rev*, 146: 104948
- Yuan S D, Peng J T, Hao S, Li H M, Geng J Z, Zhang D L. 2011. *In situ* LA-MC-ICP-MS and ID-TIMS U-Pb geochronology of cassiterite in the giant Furong tin deposit, Hunan Province, South China: New constraints on the timing of tin-polymetallic mineralization. *Ore Geol Rev*, 43: 235–242
- Yuan S D, Peng J T, Hu R Z, Li H M, Shen N P, Zhang D L. 2008. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). *Miner Depos*, 43: 375–382
- Yuan S D, Williams-Jones A E, Romer R L, Zhao P L, Mao J W. 2019. Protolith-related thermal controls on the decoupling of Sn and W in Sn-W metallogenic provinces: Insights from the Nanling Region, China. *Econ Geol*, 114: 1005–1012
- Zhang R L, Lehmann B, Seltmann R, Sun W D, Li C Y. 2017. Cassiterite U-Pb geochronology constrains magmatic-hydrothermal evolution in complex evolved granite systems: The classic Erzgebirge tin province (Saxony and Bohemia). *Geology*, 45: 1095–1098
- Zhao P L, Chu X, Williams-Jones A E, Mao J W, Yuan S D. 2021. The role of phyllosilicate partial melting in segregating tungsten and tin deposits in W-Sn metallogenic provinces. *Geology*, 50: 121–125
- Zoheir B, Lehmann B, Emam A, Radwan A, Zhang R, Bain W M, Steele-MacInnis M, Nolte N. 2020. Extreme fractionation and magmatic-hydrothermal transition in the formation of the Abu Dabbab rare-metal granite, Eastern Desert, Egypt. *Lithos*, 352–353: 105329

(责任编辑: 李建威)