

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

杨 航^{1, 2)}, 辛宇佳^{1)*}, 李建华¹⁾, 张培星¹⁾

1)中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2)西北大学地质学系, 陕西西安 710069

摘要: 广东莲花山岩体位于莲花山断裂带北部, 由规模巨大的侏罗—白垩纪花岗岩组成。本文对莲花山岩体中部进行了系统的岩石学、地球化学、锆石 U-Pb 同位素和 Lu-Hf 同位素研究, 获得片麻状花岗岩、细粒黑云母花岗岩和细-中粒黑云母花岗岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为(142.5 ± 1.5) Ma(MWSD=3.5, $N=30$)、(138.9 ± 0.6) Ma(MWSD=1.4, $N=30$)和(145.5 ± 0.7) Ma(MWSD=1.2, $N=28$), 表明岩体为晚侏罗至早白垩世岩浆活动的产物。地球化学特征显示岩体为偏铝质-弱过铝质($\text{A/CNK}=0.97\sim 1.1$)、富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.1\text{ wt\%}\sim 8.1\text{ wt\%}$)、富钾($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.4\sim 1.8$), 富集 Rb、Th、U、K、Pb, 亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti, 与壳源岩浆特征类似。岩体 SiO_2 含量差异较大($69.5\text{ wt\%}\sim 80.1\text{ wt\%}$), 高硅样品明显经历一定程度的结晶分异, 属于分异的 I 型花岗岩。所有样品锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均为负值($-4.5 \sim -2.0$), 在年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图中, 均落入球粒陨石演化线和华夏基底演化线之间, 暗示源岩主要为古老壳源基底物质。在此基础上, 结合区域构造-岩浆记录, 本文认为莲花山花岗岩体的形成与古太平洋板片俯冲后撤(roll back)诱发的弧后扩张作用相关。

关键词: 早白垩世; 莲花山岩体; I 型花岗岩; 地壳伸展; 锆石 U-Pb; LA-ICP-MS; Lu-Hf 同位素

中图分类号: P597.3; P588.121 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.020801

Zircon U-Pb Ages and Geochemical Constraints of the Lianhuashan Granitoids in Guangdong Province and Their Geological Implications

YANG Hang^{1, 2)}, XIN Yu-jia^{1)*}, LI Jian-hua¹⁾, ZHANG Pei-xing¹⁾

1) Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;
2) Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710069

Abstract: The Lianhuashan granitoids, located in the north of the Lianhuashan fault zone, are composed of massive Jurassic–Cretaceous granites. This paper presents a synthetical petrologic, geochemical and geochronological study and Lu-Hf isotopic analysis of the granitoids. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating yielded ages of 146~139 Ma, indicating that the granitoids were mainly generated in Late Jurassic to Early Cretaceous period. The granitoids are metaluminous to weakly peraluminous ($\text{A/CNK}=0.97\sim 1.1$), and have the data $\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.1\text{ wt\%}\sim 8.1\text{ wt\%}$ and $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.4\sim 1.8$. They are all depleted in Ba, Ta, Nb, Sr, P and Ti, and enriched in Rb, Th, U, K and Pb. All these features point to a major crustal source. The Lianhuashan granitoids show large variation in the SiO_2 content ($69.5\text{ wt\%}\sim 80.1\text{ wt\%}$), and the high SiO_2 samples underwent strong fractional crystallization, exhibiting characteristics of highly fractionated I-type granites. All zircons from these samples show negative $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values from -4.5 to -2.0 , recording a predominant contribution of partial melting of ancient crustal rocks. However, on the ages versus $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram, all the samples are plotted on the field between the evolution curve of chondrite and Cathaysia basement, indicating minor mantle contributions to the source of

本文由国家自然科学基金项目(编号: 41822205; 42072239)、中国地质科学院基本科研业务费项目(编号: DZLXJK202005)和中国地质调查局项目(编号: DD20190306)联合资助。

收稿日期: 2020-11-02; 改回日期: 2021-02-08; 网络首发日期: 2021-02-09。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 杨航, 男, 1996 年生。硕士研究生。地质工程专业。E-mail: Hyang960509@163.com。

*通讯作者: 辛宇佳, 男, 1988 年生。博士, 助理研究员。主要从事岩浆岩地球化学研究。E-mail: xyjasd123@163.com。

the Lianhuashan granitoids. Integrating regional tectono-magmatic records, the authors infer that the Lianhuashan granitoids were formed in a back-arc extension environment, which was associated with roll-back of the subducting Paleo-Pacific plate in the Late Jurassic to Early Cretaceous period.

Key words: Early Cretaceous; Lianhuashan granitoids; I-type granite; crustal extension; zircon U-Pb; LA-ICP-MS; Lu-Hf isotopes

华南由扬子和华夏地块组成(Li and Li, 2007),二者于新元古代沿江南造山带碰撞拼合形成统一的华南大陆(图1)。中生代, 华南大陆处于板块构造活动频繁的特提斯和古太平洋两大构造域的交接部位(Li et al., 2007, 2009; Li et al., 2012a)。晚中生代以来, 古特提斯洋关闭, 古太平洋板块向西俯冲开始起主导作用。受俯冲作用的影响, 华南大陆构造格局发生剧烈变动, 地壳发生大规模褶皱-逆冲变形, 并伴随强烈的岩浆活动, 形成宽度>1000 km的陆内褶皱-岩浆岩带(Li et al., 2018), 在全球中生代构造中独具特色。前人研究表明华南大陆晚中生代构造演化主要表现为幕式挤压和伸展作用的交替, 并伴随大规模的岩浆侵位、火山喷发和成矿作用(Li, 2000; Zhou and Li, 2000; Sun et al., 2012; Li et al., 2014)。华南中生代岩浆活动主要集中在长江中下游、东南沿海和南岭等地区, 岩浆岩出露面积可达139 920 km²(Zhou et al., 2006)。许多学者认为古太平洋板片俯冲诱发的壳-幔相互作用是华南晚中生代岩浆岩形成的主要机制(Lapierre et al., 1997; Zhou and Li, 2000; Li et al., 2007, 2009; Wang et al.,

2012), 并提出了多种构造演化模型, 分别强调如“古太平洋俯冲角度变陡(Zhou and Li, 2000)”、“岩石圈幕式伸展(Li, 2000)”、“古太平洋板块平俯冲(Li and Li, 2007)”、“古太平洋板片俯冲方向变化”(Sun et al., 2007)和“古太平洋板片俯冲后撤(slab rollback)”(Li et al., 2014, 2020)等。花岗岩记录有地壳深熔和壳-幔相互作用等信息, 可以为理解华南晚中生代大地构造演化提供约束和参考(Zhou and Li, 2000; Li and Li, 2007; Li et al., 2014)。

莲花山断裂带位于东南沿海地区, 隶属于政和一大埔断裂的西南段(图1)。晚中生代以来, 断裂带发生多期构造变形事件并伴随有大规模岩浆活动及成矿作用, 是研究华南大陆地壳深熔和壳-幔相互作用的绝佳场所。断裂带记录了多期构造变形事件(Li et al., 2020): (1)晚侏罗世(约153~147 Ma), 断裂带东部揭西地区NE-SW走向剪切带top-to-the-W逆冲剪切; (2)早白垩世晚期(约120~117 Ma), 断裂带西南部top-to-the-SE逆冲剪切; (3)早白垩世晚期—晚白垩世(约110~80 Ma), 断裂带西部五华拆离断层、下盘伸展剪切和上盘断陷盆地形成。两

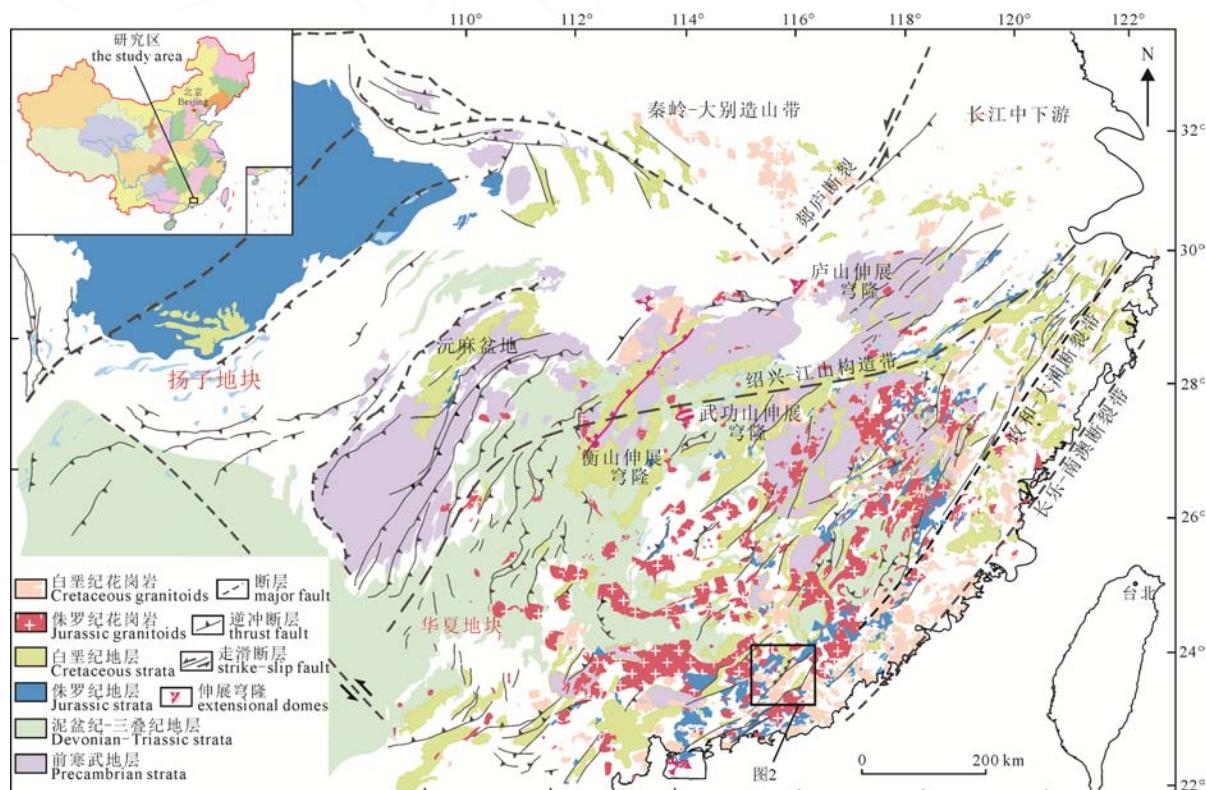


图1 华南大陆及邻区大地构造简图(据 Li et al., 2020 改编)

Fig. 1 Simplified geological map of South China and its adjacent blocks (after Li et al., 2020)

期挤压事件之间对应区域性的地壳伸展阶段(约 147~120 Ma)。除多期构造变形外, 研究区及邻区发育大规模晚中生代中酸性火山-侵入岩, 这些岩浆岩明显具有幕式多期次演化的特点(162~155 Ma、144~132 Ma)(Li, 2000; Li et al., 2007; Guo et al., 2012; 刘鹏等, 2015)。本文对莲花山断裂带北段莲花山岩体进行详细的野外地质调查和采样, 并进行了系统的岩石学、全岩地球化学、锆石 U-Pb 及 Lu-Hf 同位素等研究, 确定了岩体的结晶时代, 并探讨了岩石成因和其形成的大地构造背景, 为理解华南大陆晚中生代构造演化及动力学过程提供新约束。

1 区域地质概况

莲花山断裂带贯穿华南东南部(图 1), 走向~NE—SW, 延伸超过 200 km。断裂带属于政和一大埔断裂的西南段(舒良树和周新民, 2002), 主要由狭窄的高应变剪切带、正断层(五华断裂)和逆冲断层(揭西、淡水断裂)组成(图 2)。晚中生代以来, 断裂带发生多期构造事件(邱元禧等, 1991; Li et al., 2020), 并伴随大规模火山-侵入岩浆活动, 这些岩浆岩通常与 Sn 金属成矿密切相关(Qiu et al., 2017a, b; 钱龙兵等, 2018)。除第四系沉积物外, 区内大面积出露中生代地层(图 2a), 主要包括晚三叠世小坪组、早侏罗世金鸡组、晚侏罗世高基坪组和早白垩世官草湖组等。晚三叠世小坪组和早侏罗世金鸡组为一套滨浅海相碎屑沉积岩, 主要岩性为砂岩、泥质页岩及粉砂质泥岩等。晚侏罗至早白垩世高基坪组和官草湖组主要由流纹质凝灰角砾岩、碎斑熔岩及凝灰岩等组成, 为一套火山碎屑堆积岩系(徐晓春等, 2000; 刘鹏等, 2015)。

断裂带内岩浆活动较为强烈, 出露大量中、酸性花岗质侵入体, 如 164~133 Ma 莲花山岩基、169~165 Ma 龙窝岩体及 146~141 Ma 淘锡湖、金坑等岩体(邱检生等, 2004; Zhang et al., 2015; Li et al., 2020), 火成岩总出露面积占莲花山断裂带区域的一半以上(图 2a)。晚中生代, 断裂带内岩石发生强烈的韧性剪切和糜棱岩化作用(邱元禧等, 1991; Li et al., 2020), 导致靠近五华剪切带部分花岗岩卷入变形并发育糜棱面理和矿物拉伸线理, 形成 S-C 组构、 σ 型旋斑等运动学指向标志(图 2b, 图 3c, d)。断裂带西北侧(佛冈岩体、白石冈岩体等)及以南 100 km 的香港地区也出露 165~140 Ma 岩体(Davis et al., 1997; Li et al., 2007)。这些岩体大都为高钾钙碱性、偏铝质-弱过铝质花岗岩, 其 SiO_2 含量变化较大, 富集 Rb、Th、U、K、Pb, 亏损 Ba、Sr、Ti, 显示出 I型或高分异 I型花岗岩地球化学特征(Li et al., 2007; Cui et al., 2013)。部分早白垩世高分异花岗岩

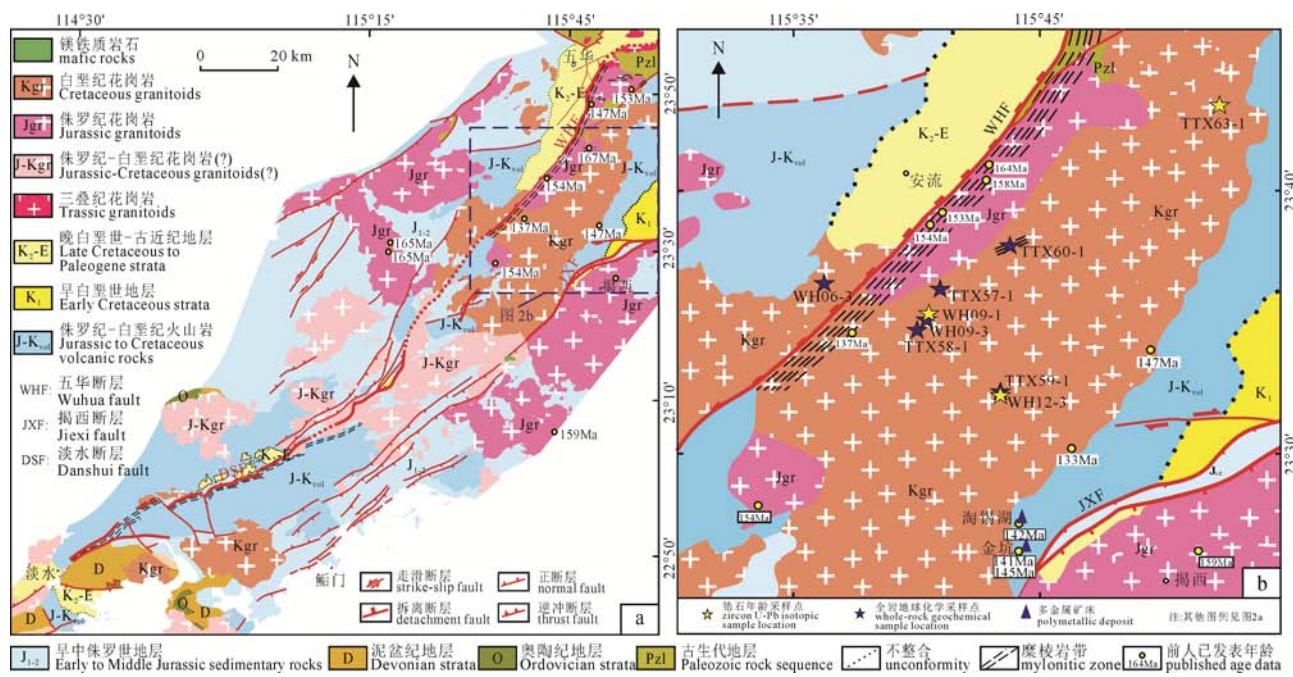
通常与 Sn、Cu、W 等金属成矿密切相关, 形成了多个金属矿床, 如莲花山钨矿、金坑锡矿、淘锡湖锡矿、塌山锡矿及三角窝锡矿等矿床(丘增旺等, 2017; Qiu et al., 2017a; Yan et al., 2017; Liu et al., 2018b; 钱龙兵等, 2018; 闫庆贺等, 2018; Yan et al., 2018)。

2 岩石特征及样品

莲花山岩体位于莲花山断裂带北部, 为一个 NE-SW 向椭圆状花岗岩基, 出露面积广泛(图 2b)。岩基(J-Kgr)侵入晚侏罗—早白垩世高基坪群火山-沉积岩系中, 并被白垩系和第三系(K₁-E)所覆盖(图 2a)。岩体相带特征明显, 内部相为花岗闪长岩, 过渡相为细-粗粒黑云母花岗岩, 边缘相为二云母花岗岩和细-中粒黑云母花岗岩。本次采样主要集中在岩体过渡相, 岩性以细-粗粒黑云母花岗岩为主, 主要矿物组合包括石英(25 vol%~30 vol%)、钾长石(35 vol%~40 vol%)、斜长石(20 vol%~25 vol%)和黑云母(5 vol%~10 vol%)(图 3a, b), 副矿物为磷灰石、锆石、榍石和磁铁矿等。钾长石主要为条纹长石和微斜长石, 多为半自形板状, 局部以斑晶形式出现(图 3b)。斜长石呈半自形板状并发育聚片双晶, 主要为钠-更长石, 部分发生绢云母化。黑云母呈半自形-自形片状, 分布在斜长石和钾长石之间, 部分发生绿泥石化。本次研究共采集了 9 件花岗岩样品, 其中锆石同位素样品 3 件(WH09-1、WH12-3 及 TTX63-1), 全岩地球化学样品 6 件(TTX57-1、WH09-3、TTX58-1、TTX59-1、WH06-3 及 TTX60-1), 详细采样位置见图 2b。

3 测试方法

将选取的新鲜原岩样品粉碎, 使粉末全部通过 80 目筛网(0.177 mm)。淘洗粉末, 得到重砂。用磁选技术从重砂中分选出含有少量杂质的锆石样品, 在双目镜下, 再从中挑出晶形和透明度较好的锆石颗粒, 制作成样品靶, 待环氧树脂固结变硬后, 打磨和抛光, 使锆石中心部位暴露, 然后拍摄锆石的阴极发光(CL)图像, 以用于测定时斑点位置的选取。制靶和阴极发光(CL)照相均在北京锆年领航科技有限公司完成。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定在中国地质调查局天津地质矿产研究所同位素实验室完成。所用仪器为激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(NEPTUNE), 所用激光剥蚀系统和等离子体型号分别为 Newwave UP213 和 Bruker M90。激光剥蚀过程中采用氦气和氩气分别作为载气和补偿气, 用以调节灵敏度。激光束斑直径 30 μm , 剥蚀频率 10 Hz, 每个时间分辨分析数据包括

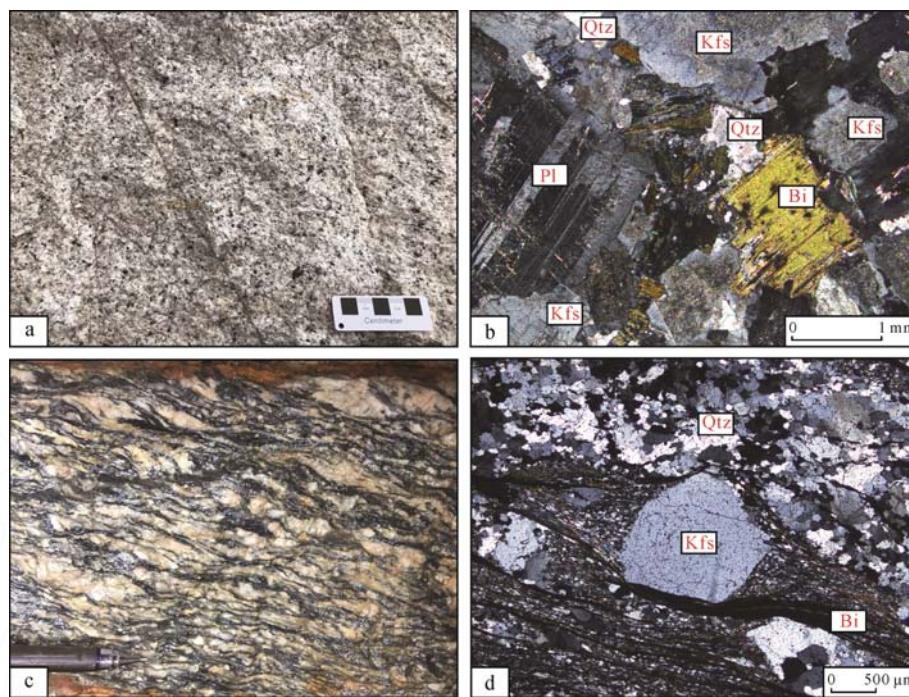


年龄数据来源: Zhang et al., 2015; Qiu et al., 2017a; Yan et al., 2017; Li et al., 2020; 王晓虎等, 2020。

Age data from: Zhang et al., 2015; Qiu et al., 2017a; Yan et al., 2017; Li et al., 2020; WANG et al., 2020.

图 2 莲花山断裂带地质简图(a)(据 Li et al., 2020 改编)和采样点位置(b)

Fig. 2 Sketch map of the Lianhuashan fault zone (a) (after Li et al., 2020) and sampling locations (b)



a—中粒黑云母花岗岩; b—中粒黑云母花岗岩正交偏光镜显微照片; c—糜棱岩化花岗岩; d—σ型钾长石旋斑(XZ面); Qtz—石英; Kfs—钾长石; Pl—斜长石; Bi—黑云母。

a-field photograph of medium-grained biotite granite; b-photomicrographs of medium-grained biotite granite (crossed nicols); c-myloitic granite (XZ plane); d-photomicrographs of σ-type asymmetric K-feldspar phenocrystal (crossed nicols; XZ plane); Qtz-quartz; Kfs-K-feldspar; Pl-plagioclase; Bi-biotite.

图 3 莲花山岩体野外(a, c)及镜下照片(b, d)

Fig. 3 Representative field photographs (a, c) and photomicrographs (b, d) of the Lianhuashan granitoids

15~20 s 空白信号时间和 45 s 样品信号时间。锆石 U 含量、U/Pb 分馏分别用标准玻璃 SRM610 和标准锆石 GJ-1 为外标。测试完成后, 使用 ICPMSDataCal 程序(侯可军等, 2009; Liu et al., 2010)处理原始数

据。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值计算和 U-Pb 协和图绘制使用 3.0 版 Isoplot 程序完成(Ludwig, 2003), 详细的实验步骤和分析流程见李怀坤等(2009)。

锆石 Hf 同位素测试在武汉上谱分析科技有限

责任公司完成。选择已经进行了 U-Pb 同位素测定的锆石颗粒, 选取测点位置与前者的测点位置尽可能接近, 或选取该颗粒的同一环带的对称部位。激光剥蚀的斑束直径 50 μm , 剥蚀频率 10 Hz, 采用 GJ-1 作为外标计算 Hf 同位素比值, 所用仪器型号为 MC-ICP-MS(Neptune Plus), 具体试验流程参见耿建珍等(2011)。

全岩主微量元素分析在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。主量元素测试利用 Primus II X 射线荧光光谱仪(XRF)完成, 误差不超过 0.5%。微量元素测试仪器为 Agilent 7700e ICP-MS, 分析精度优于 10%。具体实验流程及原理见何红蓼等(2002)。

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 同位素

三个样品的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素数据、U-Pb 谐和图、代表性锆石阴极发光(CL)图见附表 1 和图 4。

样品 WH09-1 的锆石多为无色、透明, 晶体呈柱状, 自形程度较高。长轴 150~250 μm , 长短轴比 1.5:1~3:1。锆石具有清晰的振荡环带(图 4d), 为典型的岩浆成因锆石。Th 和 U 含量分别为 $84.6 \times 10^{-6} \sim 425 \times 10^{-6}$ 和 $187 \times 10^{-6} \sim 1011 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.33~0.66, 表明锆石为岩浆结晶成因。在 U-Pb 谐和图中, 数据投

影点均落于谐和线或其附近, 表明锆石没有遭受明显的后期构造-热事件影响。它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (142.5 ± 1.5) Ma(MWSD=3.5, $n=30$)(图 4a), 该年龄代表了锆石的结晶年龄。

样品 WH12-3 的锆石为无色、透明-半透明、柱状, 长轴 120~250 μm , 长宽比 2:1~3.5:1。锆石具有清晰的振荡环带(图 4d), 为典型的岩浆成因锆石。锆石 Th 和 U 含量变化较大, 分别为 $140 \times 10^{-6} \sim 1170 \times 10^{-6}$ 和 $461 \times 10^{-6} \sim 4101 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.19~0.40。所有分析点的年龄均谐和, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (138.9 ± 0.6) Ma(MWSD=1.4, $n=30$), 该年龄代表样品的结晶年龄。

样品 TTX63-1 的锆石多为无色、透明、自形-半自形柱状。长轴 150~260 μm , 长宽比 2:1~3:1。锆石具有清晰的振荡环带(图 4d), 为典型岩浆结晶锆石。Th 和 U 含量较高且变化范围极大, 分别为 $356 \times 10^{-6} \sim 3491 \times 10^{-6}$ 和 $790 \times 10^{-6} \sim 16471 \times 10^{-6}$, Th/U 比值介于 0.14~0.69。测试点的年龄均落在谐和线或附近, 它们的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (145.5 ± 0.7) Ma(MWSD=1.19, $n=28$), 该年龄代表了样品的结晶年龄。

4.2 锆石 Hf 同位素

本文对 2 个已完成锆石 U-Pb 同位素测定(WH09-1、WH12-3)的花岗岩样品进行锆石 Lu-Hf 同位素测试, 结果见附表 2。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段

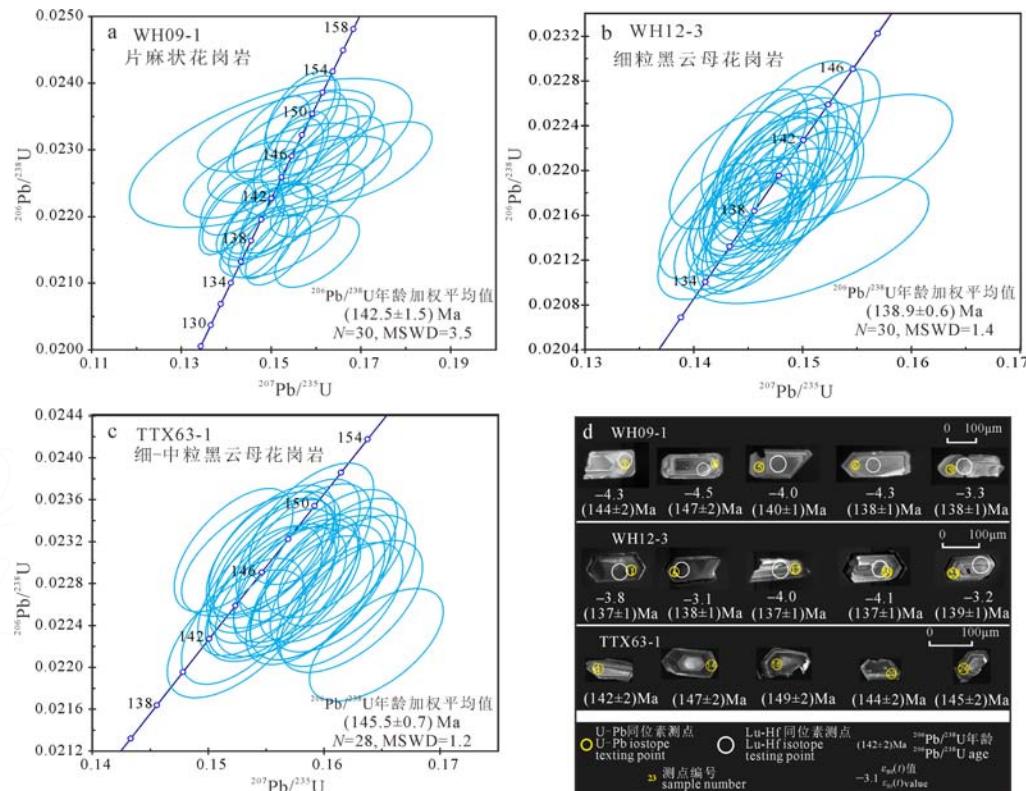
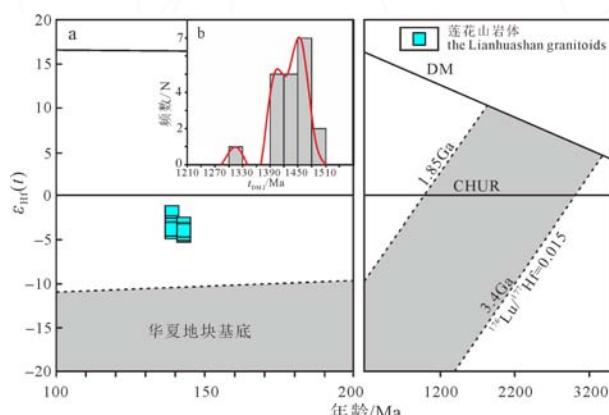


图 4 莲花山岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 谐和图(a、b、c)和代表性锆石阴极发光图(d)

Fig. 4 U-Pb concordia diagrams of zircons (a, b, c) and cathodoluminescence (CL) images of representative zircons (d) from the Lianhuashan granitoids

模式年龄计算中, 以该样品的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值作为锆石的年龄。所有样品测试点($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)值相对均一, 介于0.282 556~0.282 630之间, 对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为-4.5~-2.0, Hf单阶段模式年龄为994~875 Ma, 二阶段模式年龄为1481~1319 Ma(附表2, 图5a, b)。所有样品点 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为负值, 表明岩体源岩可能为中元古代基底物质。但在年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图中(图5a)样品点均落入球粒陨石演化线和华夏基底演化线之间, 因此源岩也可能为元古代基底与新生地壳物质的混合。



DM—亏损地幔; CHUR—球粒陨石均一源。

DM-depleted mantle; CHUR-chondritic uniform reservoir.

图5 莲花山岩体锆石年龄- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(a)和Hf二阶段模式年龄直方图(b)(华夏基底Hf同位素演化: Xu et al., 2007; He and Xu, 2012)

Fig. 5 Hf isotopic compositions of zircons from the Lianhuashan granitoids: $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values versus zircon U-Pb ages (a) and histograms of the depleted mantle two-stage Hf model ages (b) (Hf isotope evolution for Cathaysia crustal basement after Xu et al., 2007; He and Xu, 2012)

4.3 全岩地球化学

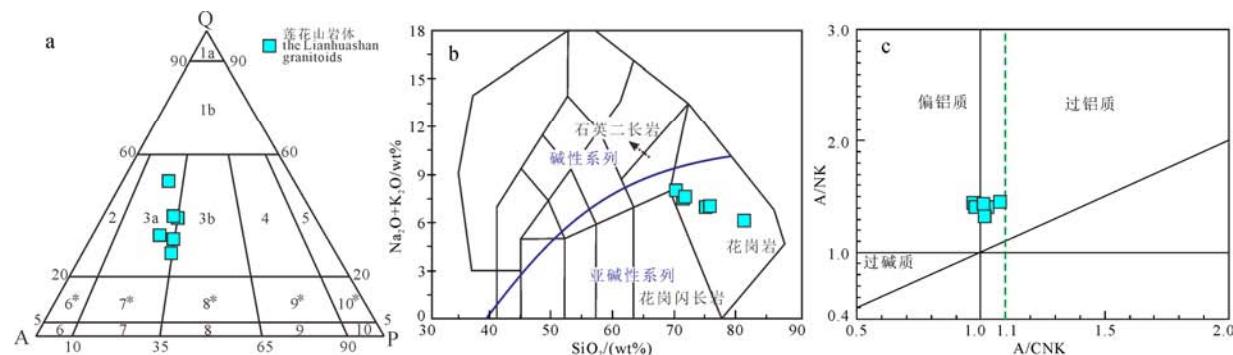
本文对岩体代表性的6件样品进行了全岩主、微量元素及稀土元素测试, 相关数据见附表2。样品 SiO_2 含量变化较大(69.5 wt%~80.6 wt%)、富钾($\text{K}_2\text{O}=3.94$ wt%~4.84 wt%; $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.35\sim 1.80$), 富碱($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}=6.12$ wt%~8.03 wt%), 属高钾钙碱性系列岩石(图8b)。在QAP图解, 样品点落入正长花岗岩区域(图6a)。在TAS图中, 所有样品均落入亚碱性花岗岩范围之内(图6b)。 Al_2O_3 含量较低(10.4 wt%~14.8 wt%), A/CNK值介于0.97~1.08之间, 为偏铝质-弱过铝质岩石(图6c)。在Harker图解中(图8a-i), 各样品点具良好的线性关系, 随着 SiO_2 含量增加, Al_2O_3 、 K_2O 、 TiO_2 、 CaO 、 FeO^T 、 MgO 、 P_2O_5 、 MnO 和Sr含量下降。

岩体稀土元素总量较高($\sum\text{REE}=152\times 10^{-6}\sim 315\times 10^{-6}$), 轻、重稀土分馏作用明显($\text{LREE}/\text{HREE}=5.42\sim 24.8$, $\text{La}_N/\text{Yb}_N=5.61\sim 34.3$), 球粒陨石标准化图解中(图7a), 呈轻稀土相对富集的右倾型(图7a), 具中等Eu负异常($\delta\text{Eu}=0.36\sim 0.57$)。微量元素蛛网图中(图7b), 所有样品均富集Rb、Th、U、K、Pb, 而相对亏损Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti, 与壳源岩浆特征类似。根据样品的主要元素和Zr含量, 运用Watson and Harrison(1983)实验得到的Zr饱和温度公式, 计算得到莲花山岩体的Zr饱和温度为793~820°C(平均为801°C)(附表3)。

5 讨论

5.1 莲花山岩体的形成时代

本文对莲花山岩体中部三个花岗岩样品进行



1a—硅英岩(石英岩); 1b—富石英花岗岩类; 2—碱长花岗岩; 3a—花岗岩(正长花岗岩); 3b—花岗岩(二长花岗岩); 4—花岗闪长岩; 5—英云闪长岩; 6*—石英碱长正长岩; 6—碱长正长岩; 7*—石英正长岩; 7—正长岩; 8*—石英二长岩; 8—二长岩; 9*—石英二长闪长岩、石英二长辉长岩; 9—二长闪长岩、二长辉长岩; 10*—石英闪长岩、石英辉长岩、石英斜长岩; 10—闪长岩、辉长岩、斜长岩;

$A=\text{Al}_2\text{O}_3$, $C=\text{CaO}$, $N=\text{Na}_2\text{O}$, $K=\text{K}_2\text{O}$ 。

1a-quartzite; 1b-quartz-rich granites; 2-alkali feldspar granite; 3a-granite (orthoclase granite); 3b-granite (monzonitic granite); 4-granodiorite; 5-tonalite; 6*-alkali feldspar-quartz syenite; 6-alkali feldspar syenite; 7*-quartz syenite; 7-syenite; 8*-quartz monzonite; 8-monzonite; 9*-quartz monzodiorite, quartz monzogabbro; 9-monzodiorite, monzogabbro; 10*-quartz diorite, quartz gabbro, quartz anorthosite; 10-diorite, gabbro, anorthosite; $A=\text{Al}_2\text{O}_3$, $C=\text{CaO}$, $N=\text{Na}_2\text{O}$, $K=\text{K}_2\text{O}$ 。

图6 莲花山岩体QAP图解(a)、TAS图(b, 据 Middemost, 1994)和A/CNK-A/NK图(c, 据 Miniar and Piccoli, 1989)

Fig. 6 QAP diagram (a), TAS diagram (b) (after Middemost, 1994) and A/CNK-A/NK diagram (c) (after Miniar and Piccoli, 1989) for the Lianhuashan granitoids

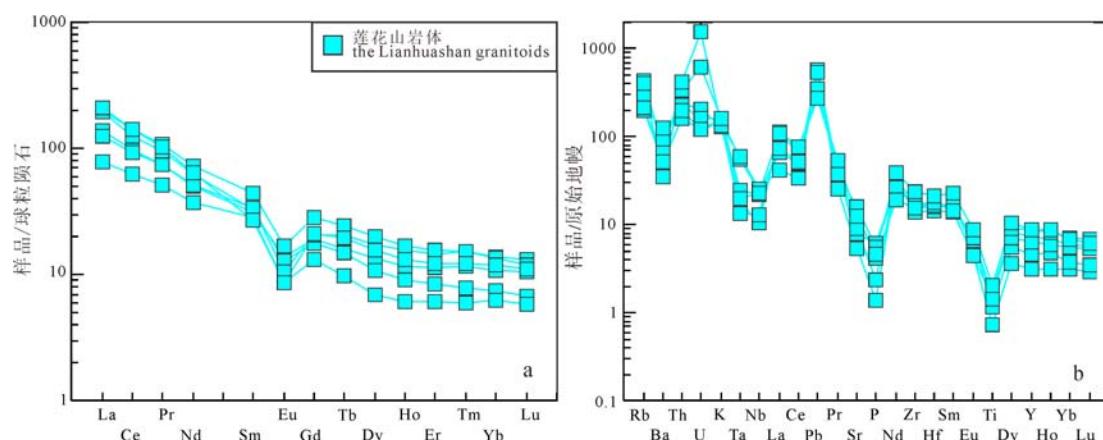


图 7 莲花山岩体稀土元素球粒陨石标准化配分模式图(a, 球粒陨石标准化数据据 Taylor and McLellan, 1985)和微量元素蛛网图(b, 原始地幔标准化数据据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive mantle-normalized multiple trace element diagrams (b) of the Lianhuashan granitoids (chondrite and primitive mantle normalizing values after Taylor and McLennan, 1985; Sun and McDonough, 1989, respectively)

LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测定, 获得片麻状花岗岩、细粒黑云母花岗岩和细-中粒黑云母花岗岩的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值分别为: (142.5 ± 1.5) Ma (MWSD=3.5, $n=30$)、 (138.9 ± 0.6) Ma (MWSD=1.4, $n=30$)、 (145.5 ± 0.7) Ma (MWSD=1.19, $n=28$) (图 4a, b, c)。除了本文获得的锆石 U-Pb 年龄, Zhang et al.(2015)获得莲花山岩体西南部花岗闪长岩结晶年龄为 (154 ± 2) Ma 和 (154 ± 1) Ma(LA-ICP-MS 和 SIMS); Li et al.(2020)获得莲花山岩体西部剪切变形花岗岩的结晶时代为 164~133 Ma(LA-ICP-MS); 王晓虎等(2020)获得五华县城附近变形花岗岩年龄 (147 ± 1) Ma(LA-ICP-MS)。综合上述年龄数据可知, 莲花山岩体为幕式岩浆作用形成的复式岩体, 主要由中一晚侏罗世($164 \sim 153$ Ma)和晚侏罗—早白垩世($147 \sim 133$ Ma)两期花岗岩组成。

5.2 莲花山岩体分离结晶作用

本文对莲花山岩体的两个样品(WH09-1、WH12-3)进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析, 它们具有十分相似的($^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$)_i 比值和 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(图 5, 附表 2), 但这两个样品的 SiO₂、Al₂O₃、TiO₂、CaO 等元素含量却截然不同(附表 3, 图 8), 这表明它们的源区组成基本一致, 但母岩浆遭受了不同程度的演化。根据 SiO₂ 含量的不同, 莲花山岩体样品可分为低硅和高硅两组: 低硅组样品 SiO₂ 含量($69.5 \text{ wt\%} \sim 71.1 \text{ wt\%}$)和 DI 分异指数($80.9 \sim 83.2$)偏低, 表明演化程度低; 高硅组样品 SiO₂($74.5 \text{ wt\%} \sim 80.6 \text{ wt\%}$)含量和 DI 分异指数($85.4 \sim 91.2$)较高, 暗示经过了一定程度的结晶分异。Harker 图解中, SiO₂ 与 Al₂O₃、CaO 和 Sr 含量呈负相关关系(图 8a, d, i), 表明发生斜长石的分离结晶。钾长石也可能经历一定程度的分离结晶, 因为 K₂O 含量随 SiO₂ 含量升高而略微下降(图 8b)。SiO₂ 与 TiO₂、FeO^T、MgO 的

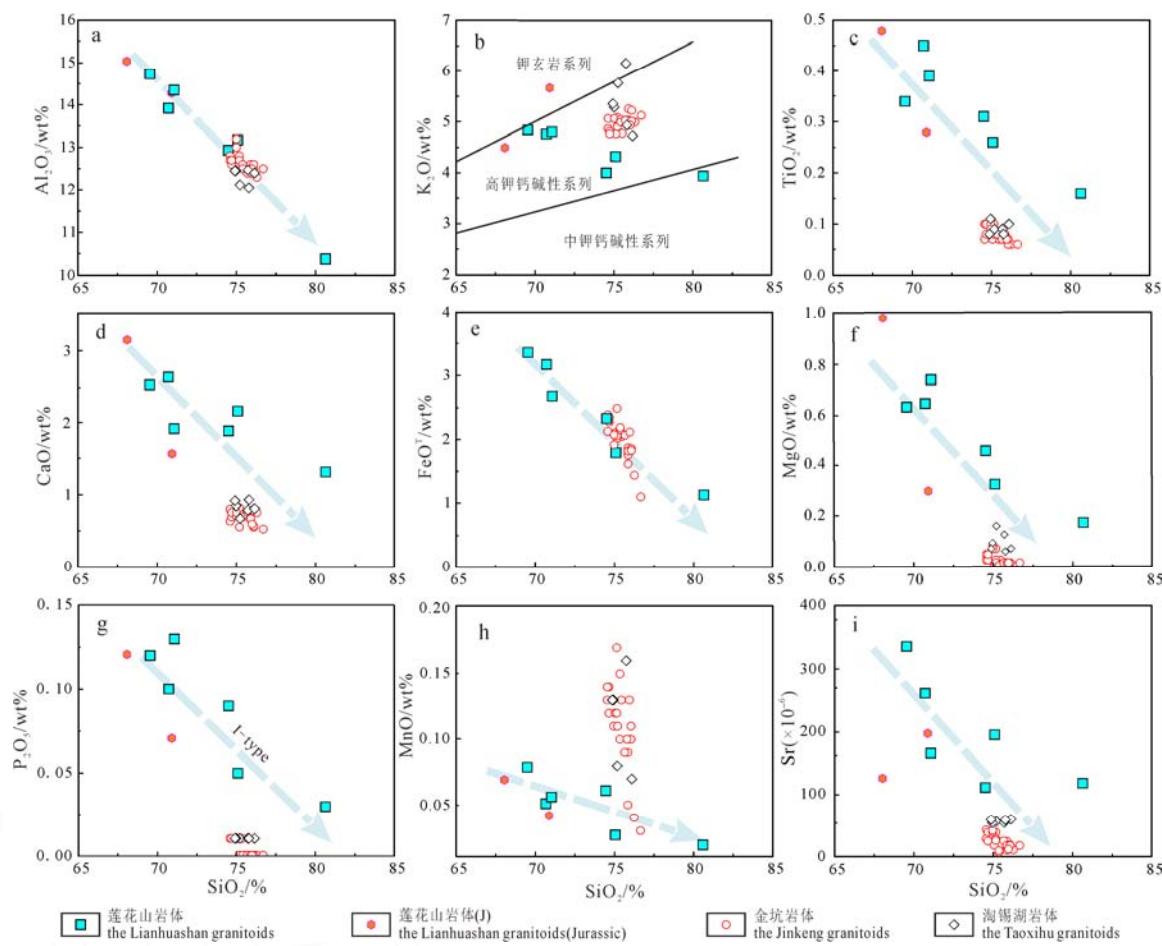
负相关关系表明黑云母和 Fe-Ti 氧化物等矿物发生了分离结晶(图 8c, e, f)。研究区及邻区早白垩世花岗岩也明显经历了一定程度的结晶分异(图 8), 这些分异的花岗岩通常与锡、铜等多金属成矿密切相关(李晓峰等, 2008), 说明分离结晶作用在成矿金属(如锡、铜)的富集过程中扮演重要角色(Xu et al., 2016; Yan et al., 2017)。鉴于分异样品已不能完全代表岩浆的原始成分, 因此, 下文我们主要使用低硅组数据判别花岗岩的类型及其源岩组成特征。

5.3 花岗岩类型

岩体为偏铝质-弱过铝质(A/CNK=0.97~1.1), 显示出 I 型花岗岩的地球化学特征(A/CNK<1.1, Chappell and White, 2001)。Wolf and London(1994)岩石学实验表明 P 元素在过铝质熔体(A/CNK>1.1)中溶解度相对较高, 因此 S 型花岗岩通常具有较高的 P₂O₅ 并与 SiO₂ 成正相关(>0.2 wt%, Chappell, 1999; Li et al., 2007), 而 I 型花岗岩的 P₂O₅ 与 SiO₂ 成负相关。莲花山岩体样品 P₂O₅ 含量较低($0.030 \text{ wt\%} \sim 0.13 \text{ wt\%}$), 而且 P₂O₅ 与 SiO₂ 成明显的负相关关系, 显示出 I 型花岗岩的特征(图 8g)。另外, 相比于 S 型花岗岩, I 型花岗岩 Th 和 Y 元素含量通常与 Rb 成正相关关系(Chappell and White, 1992), 这主要是由含 Th 和 Y 的矿物(如独居石)在偏铝质熔体中的分离结晶作用所导致。在 Rb-Th 和 Rb-Y 图解中(图 9a, b), 莲花山样品的 Rb 与 Th、Y 具明显的正相关性, 显示出 I 型花岗岩特征。综上所述, 本文认为莲花山早白垩世花岗岩为典型的 I 型花岗岩。

5.4 莲花山岩体的岩石学成因

关于分异的偏铝质-弱过铝质 I 型花岗岩成因, 目前学术界有两种主流观点: 1) 地壳长英质火成岩部分熔融(Champion and Chappell, 1992; Chappell et al., 2012); 2) 原生镁铁质岩浆结晶分异

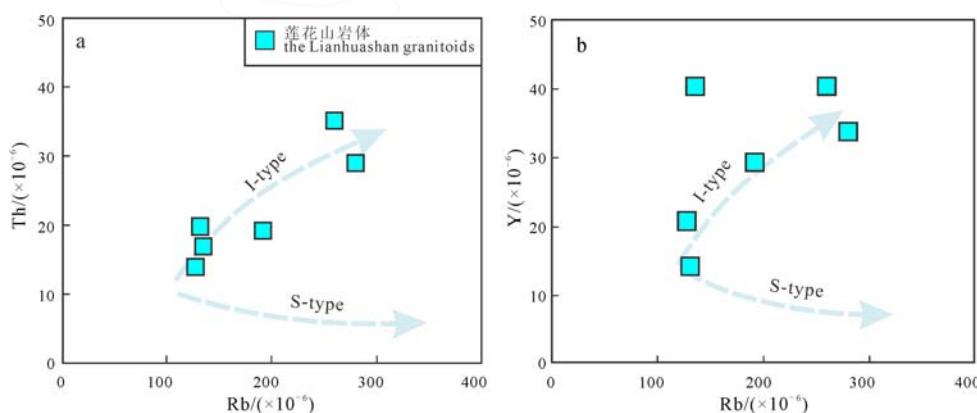


数据来源: Yan et al., 2017; Qiu et al., 2017a; Zhang et al., 2015;

a-Al₂O₃; b-K₂O; c-TiO₂; d-CaO; e-FeO^T; f-MgO; g-P₂O₅; h-MnO; i-Sr.

图 8 莲花山岩体 Harker 图解

Fig. 8 Diagrams of selected elements versus SiO_2 for the Lianhuashan granitoids



I-type—I型花岗岩; S-type—S型花岗岩。

I-type—I-type granite; S-type—S-type granite.

图 9 莲花山岩体微量元素图 Rb-Th(a)和 Rb-Y(b)(据 Chappell and White, 1992)

Fig. 9 Trace element variation diagrams for granitoids in the Lianhua Mountain: the diagrams of Rb-Th (a) and Rb-Y (b) (after Chappell and White, 1992)

(Cawthorn and Brown, 1976; Wyborn et al., 2001)。由于研究区未发现有同时期、大面积出露的镁铁质岩石，因此莲花山早白垩世花岗岩不可能通过原生镁铁质岩浆结晶分异而形成(Chappell, 1999)。岩体具有负 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($-4.5 \sim -2.0$) 和低 MgO ($0.18 \text{ wt\%} \sim 0.74 \text{ wt\%}$)，且在稀土元素配分模式图和微量元素蛛

网图中(图 7a, b)，样品均富集 Rb、Th、U、K、Pb，而相对亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti，显示出壳源岩浆的特征(Harris and Inger, 1992)，这些证据均暗示莲花山岩体主要源于壳源物质的部分熔融。莲花山岩体 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值较高($0.60 \sim 0.95$)，表明其源岩可能为贫黏土的碎屑岩或长英质火成岩，前者部分

熔融形成的熔体为强过铝质, 后者则形成偏铝质或弱过铝质熔体(Sylvester, 1998)。莲花山早白垩世花岗岩样品均为偏铝质-弱过铝质($A/CNK=0.98\sim1.1$), 同时具较低的 FeO_t+MgO ($1.30\text{ wt}\% \sim 3.99\text{ wt}\%$)及较高 K_2O ($3.94\text{ wt}\% \sim 4.84\text{ wt}\%$)含量, 这些特征均表明其源岩以长英质火成岩为主。在 CMF-AMF 源岩判别图解(图 10)中, 莲花山岩体的样品大多落入了火成岩源岩区域内, 进一步证实莲花山岩体主要源于长英质火成岩的部分熔融。综合上述证据可知, 莲花山岩体的源岩主要为地壳中长英质火成岩。莲花山岩体锆石 Hf 二阶段模式年龄 $1481\sim1319\text{ Ma}$ (中元古代), 在年龄- $\varepsilon_{Hf}(t)$ 图中, 样品点均落在球粒陨石演化线和华夏基底演化线之间, 且较靠近球粒陨石演化线(图 5a)。值得注意的是, 华夏地块基底年龄主要为新元古代和古元古代(Zhao and Cawood., 2012), 中元古代基底的报道极少。上述资料暗示其源岩更可能为元古代长英质火成岩, 并存在少量幔源物质混入。这种成因模式与莲花山断裂带邻区其他早白垩世花岗岩类似(Ren et al., 2015; Zhang et al., 2015; Qiu et al., 2017a; Yan et al., 2017; Liu et al., 2018b)。

综上所述, 莲花山早白垩世岩体为典型的 I 型花岗岩, 其源岩主要为壳源长英质火成岩, 幔源岩浆在岩体形成过程中贡献热量和少量物质, 母岩浆在成岩过程中经历了斜长石、钾长石、黑云母和 Fe-Ti 氧化物等矿物的结晶分异作用。

5.5 大地构造意义

莲花山岩体为典型的 I型花岗岩。早白垩世(约 $143\sim139\text{ Ma}$), 岩体源区经历一次强烈的高温熔融事件($>801\text{ }^{\circ}\text{C}$), 此过程中幔源岩浆为岩体的形成

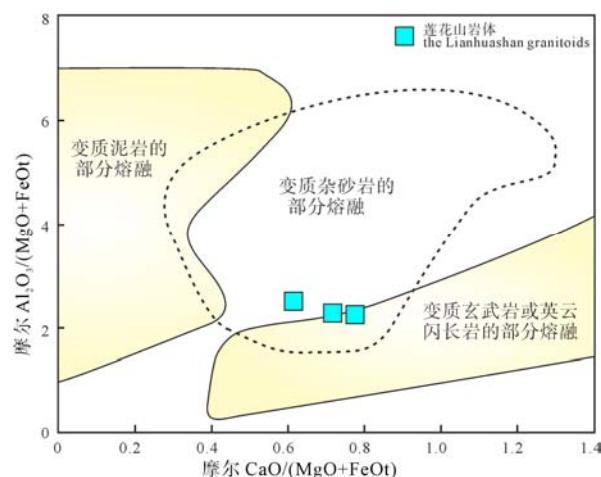


图 10 摆尔 $CaO/(MgO+FeO^T)$ -摩尔 $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ 图解(据 Altherr et al., 2000)

Fig. 10 Molar $CaO/(MgO+FeO^T)$ -molar $Al_2O_3/(MgO+FeO^T)$ diagram (after Altherr et al., 2000)

提供热量和少量物质, 暗示莲花山岩体形成于岩石圈伸展背景。区内同时代 I型花岗岩也有类似的成因, 如莲花山石英斑岩(Liu et al., 2018b)、金坑黑云母花岗岩(Qiu et al., 2017a)、淘锡湖花岗斑岩(Yan et al., 2017)、塌山花岗斑岩(同庆贺等, 2018)、田东花岗岩(刘鹏等, 2015)、东山地区片麻状花岗岩(Liu et al., 2012)、粤东流周山二长花岗岩(Jia et al., 2020)等, 这些岩体的产生表明早白垩世莲花山断裂带经历一次强烈的地壳伸展事件, 持续的地壳伸展导致岩石圈减薄, 软流圈地幔物质上涌, 形成大面积分布的壳-幔混合成因花岗岩。断裂带邻区同时代 A型花岗岩的报道(如三角窝、飞鹅山和香港西贡等岩体)也进一步证实这期伸展事件(Eby, 1990, 1992; Bonin, 2007; Liu et al., 2018a; Yan et al., 2018)。前人通过野外构造解析和年代学研究认为晚侏罗至早白

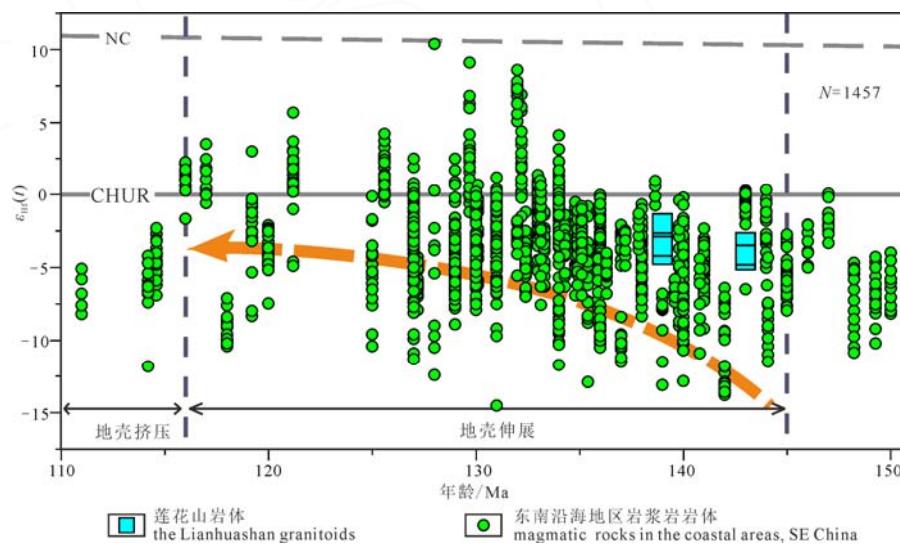


图 11 沿海地区晚中生代岩浆岩年龄- $\varepsilon_{Hf}(t)$ 趋势图(具体数据见附表 4)

Fig. 11 Age versus $\varepsilon_{Hf}(t)$ diagram of late Mesozoic granitoids in coastal areas (for detailed data see Supplementary Table 4)

垩世(147~120 Ma)期间,莲花山断裂带区域古构造应力场主要表现为近 NW-SE 的伸展,并在揭西北部盆地发育有与伸展相关的断陷沉积(Li et al., 2020)。通过统计东南沿海地区晚中生代岩浆岩 Lu-Hf 同位素资料(图 11),我们发现 150~110 Ma 期间 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值随年龄有明显的波动。在约 145~116 Ma 阶段,岩浆岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值逐渐增加,并且在约 135~116 Ma 期间显示正值,暗示此阶段幔源组分明显参与到岩浆岩的成岩过程中,进一步表明了早白垩世沿海地区持续性的地壳伸展。

结合区域变形和岩浆记录,此次伸展事件在华南大陆形成了大面积展布的 NE-SW 走向的盆地和伸展穹隆,如雪峰山地区的沅麻盆地(张岳桥等, 2012; Li et al., 2012b)、庐山伸展穹隆(Lin et al., 2000)、衡山伸展穹隆(Li et al., 2016)和武功山伸展穹隆(Faure et al., 1996)等(图 1)。Li et al.(2020)对晚中生代(160~80 Ma)华南地区已发表的岩浆岩锆石年龄进行统计,认为这期伸展事件在华南范围内引发大规模的岩浆活动(136~118 Ma),岩浆岩主要分布在长江中下游、绍兴—江山缝合带及东南沿海区域。尽管岩浆岩的成因不尽相同,但大部分学者认为它们的形成背景,均为早白垩世地壳伸展背景(Wong et al., 2011; Zheng et al., 2017; 辛宇佳等, 2018; Li et al., 2020)。关于这期事件的动力学机制,前人提出了许多经典的地球动力学模型。虽然这些模型目前仍存较大争议,但都强调了古太平洋板块俯冲作用在华南晚中生代变形和岩浆事件中的重要性。值得注意的是早白垩世期间,莲花山断裂带区域古构造应力场方向与古太平洋板块的俯冲方向一致(Engebretson et al., 1985; Li et al., 2020),暗示这期伸展事件与古太平洋板块的俯冲作用有着必然联系,因此推测这期伸展事件与古太平洋板块俯冲后撤作用相关(Li et al., 2014)。本文认为:早白垩世,古太平洋板片俯冲后撤诱发弧后扩张,在地壳伸展减薄的背景下,软流圈幔源物质上涌,致使古老壳源基底物质部分熔融。岩浆在上涌过程中经过不同程度的结晶分异演化,最终在莲花山断裂带及邻区形成大面积出露的花岗岩岩体。

6 结论

(1)本文在莲花山北部新获得的花岗岩体锆石 U-Pb 年龄为 146~139 Ma,结合前人在莲花山其他地区的岩浆岩年龄数据,判断莲花山岩体为幕式岩浆作用形成的复式岩体,主要由晚侏罗世(164~153 Ma)和晚侏罗—早白垩世(147~133 Ma)两期花岗岩所组成。

(2)莲花山岩体为偏铝质-弱过铝质、富钾、富

碱,富集 Rb、Th、U、K、Pb,亏损 Ba、Ta、Nb、Sr、P、Ti,与壳源岩浆特征类似。岩体 SiO₂ 含量差异较大,高硅样品明显经历更高程度的结晶分异演化,属于分异的 I 型花岗岩。

(3)莲花山岩体源岩主要为地壳内古老的长英质火成岩,并可能伴有少量幔源岩浆的注入。

(4)研究区和邻区出露的同期花岗岩岩体是同一构造背景下岩浆活动的产物,它们的形成可能与古太平洋板片俯冲后撤(roll back)引起的弧后扩张作用有关。

致谢:两位审稿专家和编辑部对文章提出许多宝贵意见,在此表示感谢!

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 41822205 and 42072239), Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund (No. DZLXJK202005), and China Geological Survey (No. DD20190306).

本文附有增强材料(附表 1, 2, 3, 4),请通过本文网络版阅读或下载。

参考文献:

- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定 [J]. 地质通报, 30(10): 1508-1513.
- 何红蓼, 李冰, 韩丽荣, 孙德忠, 王淑贤, 李松. 2002. 封闭压力酸溶 ICP-MS 法分析地质样品中 47 个元素的评价[J]. 分析试验室, 21(5): 8-12.
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术[J]. 矿床地质, 28(4): 481-492.
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究[J]. 矿物学报, 29(S1): 600-601.
- 李晓峰, WATANABE Y, 华仁民, 毛景文. 2008. 华南地区中生代 Cu-(Mo)-W-Sn 矿床成矿作用与洋岭/转换断层俯冲[J]. 地质学报, 82(5): 625-640.
- 刘鹏, 程彦博, 毛景文, 王小雨, 姚薇, 陈叙涛, 曾晓剑. 2015. 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[J]. 地质学报, 89(7): 1244-1257.
- 钱龙兵, 余庆亮, 郭丽荣, 颜伦明, 温辉. 2018. 广东省揭西县淘锡湖锡多金属矿床成矿花岗岩研究[J]. 华东地质, 39(3): 218-226.
- 丘增旺, 王核, 余庆贺, 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[J]. 大地构造与成矿学, 41(3): 516-532.
- 邱检生, 胡建, MCINNES B I A, 蒋少涌, 徐夕生, ALLEN C M. 2004. 广东龙窝花岗闪长质岩体的年代学、地球化学及岩石成因[J]. 岩石学报, 20(6): 1363-1374.
- 邱元禧, 邱津松, 李建超, 钟宏平. 1991. 广东莲花山断裂带中、

- 新生代多期复合变形变质带的基本特征及其形成机制的探讨[J]. 中国地质科学院地质力学研究所所刊, 14: 93-106.
- 舒良树, 周新民. 2002. 中国东南部晚中生代构造作用[J]. 地质论评, 48(3): 249-260.
- 王晓虎, 张文高, 陈正乐, 周荣德, 陈柏林, 许典葵, 霍海龙, 李季霖, 张涛, 丁志磊, 李效壮. 2020. 华南沿海莲花山断裂带控矿构造变形时限: 来自锆石 U-Pb 年龄与地层时代的约束[J]. 中国地质, 47(4): 985-997.
- 辛宇佳, 李建华, 董树文, 张岳桥. 2018. 武夷山中段同岩体形成时代、地球化学特征及地质意义[J]. 地球学报, 39(3): 269-281.
- 徐晓春, 谢巧勤, 岳书仓. 2000. 粤东地区中生代金属矿床的成矿机制[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 23(1): 99-103.
- 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 同位素组成及其他地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 42(4): 718-731.
- 张岳桥, 董树文, 李建华, 崔建军, 施炜, 苏金宝, 李勇. 2012. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 33(3): 257-279.

References:

- ALTHERR R, HOLL A, HEGNER E, KANGER C, KREUZER H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (French) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. *Lithos*, 50(1-3): 51-73.
- BONIN B. 2007. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problem and prospects[J]. *Lithos*, 97(1-2): 1-29.
- CAWTHORN, R G, BROWN P A. 1976. A model for the formation and crystallization of corundum-normative calc-alkaline magmas through amphibole fractionation[J]. *Journal of Geology*, 84: 467-476.
- CHAMPION D C, CHAPPELL B W. 1992. Petrogenesis of felsic I-type granites: an example from northern Queensland[J]. *Trans. R. Soc. Edinb. Earth Sci.*, 83: 115-126.
- CHAPPELL B W, BRYANT C J, WYBORN D. 2012. Peraluminous I-type granites[J]. *Lithos*, 153: 142-153.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 1-26.
- CHAPPELL B W. 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites[J]. *Lithos*, 46(3): 535-551.
- CHAPPELL B W, WHITE A J R. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later[J]. *Australia Journal of Earth Sciences*, 48(4): 489-499.
- CUI Jian-jun, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, JAHN Bo-ming, XU Xian-bing, MA Li-cheng. 2013. Zircon U-Pb geochronology of the Mesozoic metamorphic rocks and granitoids in the coastal tectonic zone of SE China: Constrains on the timing of Late Mesozoic orogeny[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 62: 237-252.
- DAVIS D W, SEWELL R J, CAMPBELL S D G. 1997. U-Pb dating of Mesozoic igneous rocks from Hong Kong[J]. *Journal of the Geological Society, London*, 154(6): 1067-1076.
- EBY G N. 1990. The A-type granitoids: A review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis[J]. *Lithos*, 26(1-2): 115-134.
- EBY G N. 1992. Chemical subdivision of the A-type granitoids: Petrogenetic and tectonic implications[J]. *Geology*, 20(7): 641-644.
- ENGEBRETSON D C, COX A, GORDON R G. 1985. Relative motion between oceanic and continental plates in the Pacific basin[J]. *Spec. Pap. Geol. Soc. Am*, 206(9): 1-60.
- FAURE M, SUN Y, SHU L, MONIE P, CHARVET J. 1996. Extensional tectonics within a subduction-type orogen: the case study of the Wugongshan dome (Jiangxi Province, southeastern China)[J]. *Tectonophysics*, 263(1-4): 77-106.
- GENG Jian-zhen, LI Huai-kun, ZHOU Hong-ying, LI Hui-min. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508-1513(in Chinese with English abstract).
- GUO Feng, FAN Wei-ming, LI Chao-wen, ZHAO Liang, LI Hong-xia, YANG Jin-hui. 2012. Multi-stage crust-mantle interaction in SE China: Temporal, thermal and compositional constraints from the Mesozoic felsic volcanic rocks in eastern Guangdong-Fujian provinces[J]. *Lithos*, 150: 62-84.
- HARRIS N B W, INGER S. 1992. Trace element modelling of pelite-derived granites[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(1): 46-56.
- HE Hong-liao, LI Bing, HAN Li-rong, SUN De-zhong, WANG Shu-xian, LI Song. 2002. Evaluation of determining 47 elements in geological samples by pressurized acid digestion-ICPMS[J]. *Chinese Journal of Analysis Laboratory*, 21(5): 8-12(in Chinese with English abstract).
- HE Zhen-yu, XU Xi-sheng. 2012. Petrogenesis of the Late Yan-shanian mantle-derived intrusions in southeastern China: response to the geodynamics of paleo-Pacific plate subduction[J]. *Chemical Geology*, 328: 208-221.
- HOU Ke-jun, LI Yan-he, TIAN You-rong. 2018. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS[J]. *Mineral Deposits*, 28(4): 481-492(in Chinese with English abstract).
- JIA Li-hui, MAO Jing-wen, LIU Peng, YU Miao. 2020. Crust-mantle interaction during subduction zone processes: Insight from late Mesozoic I-type granites in eastern Guangdong, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 192: 1-18.
- LAPIERRE H, JAHN B M, CHARVET J, YU Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with tectonic activity in SE China[J]. *Tectonophysics*, 274: 321-338.
- LI Huai-kun, GENG Jian-zhen, HAO Shuang, ZHANG Yong-qing, LI Hui-min. 2009. Zircon U-Pb age dating by means of LA-MC-ICP-MS[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 29(S1): 600-601(in Chinese with English abstract).
- LI Jian-hua, CAWOOD P A, LOTHAR R, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, XIN Yu-jia, YANG Hang, ZHANG Pei-xing. 2020. Building Southeast China in the late Mesozoic: Insights from alternating episodes of shortening and extension along the Lianhuashan fault zone[J]. *Earth-Science Reviews*, 201: 1-29.
- LI Jian-hua, DONG Shu-wen, CAWOOD P A, ZHAO Guo-chun, JOHNSTON S T, ZHANG Yue-qiao, XIN Yu-jia. 2018. An Andean-type retro-arc foreland system beneath northwest South China revealed by SINOPROBE profiling[J]. *Earth and*

- Planetary Science Letters, 490: 170-179.
- LI Jian-hua, SHI Wei, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, MA Zhi-li. 2016. Thermal evolution of the Hengshan extensional dome in central South China and its tectonic implications: new insights into low-angle detachment formation[J]. *Gondwana Research*, 35: 425-441.
- LI Jian-hua, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, JOHNSTON S T. 2014. Cretaceous tectonic evolution of South China: A preliminary synthesis[J]. *Earth-Science Reviews*, 134(1): 98-136.
- LI Jian-hua, ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Hai-long. 2012b. Late Mesozoic-Early Cenozoic deformation history of the Yuanma Basin, central South China[J]. *Tectonophysics* 570-571(11): 163-183.
- LI San-zhong, SANTOSH M, JAHN B M. 2012a. Evolution of Asian Continent and its Continental Margins[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 1-4.
- LI Xian-hua, LI Wu-xian, LI Zheng-xiang, LO Ching-hua, WANG Jian, YE Mei-fang, YANG Yue-heng. 2009. Amalgamation between the Yangtze and Cathaysia Blocks in South China: Constraints from SHRIMP U-Pb zircon ages, geochemistry and Nd-Hf isotopes of the Shuangxiwu volcanic rocks[J]. *Precambrian Research*, 174(1-2): 117-128.
- LI Xian-hua, LI Zheng-xiang, LI Wu-xian, LIU Ying, YUAN Chao, WEI Gang-jian, QI Chang-shi. 2007. U-Pb zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic I- and A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab?[J]. *Lithos*, 96: 186-204.
- LI Xian-hua. 2000. Cretaceous magmasim and lithospheric extension in Southeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(3): 293-305.
- LI Xiao-feng, WATANABE Y, HUA Ren-min, MAO Jing-wen. 2008. Mesozoic Cu-Mo-W-Sn Mineralization and Ridge/Triple Subduction in South China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 82(5): 625-640(in Chinese with English abstract).
- LI Zheng-xiang, LI Xian-hua. 2007. Formation of the 1300-Km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model[J]. *Geology*, 35(2): 179-182.
- LIN Wei, FAURE M, MONIE P, SCHÄRER U, ZHANG Liang-sheng, SUN Yan. 2000. Tectonics of SE China: new insights from the Lushan massif (Jiangxi Province)[J]. *Tectonics*, 19(5): 852-870.
- LIU Peng, CHENG Yan-bo, MAO Jing-wen, WANG Xiao-yu, YAO Wei, CHEN Xu-tao, ZENG Xiao-jian. 2015. Zircon U-Pb Age and hf isotopic characteristics of granite from the tiandong tungsten-Sn polymetallic deposit in eastern Guangdong province and its significance[J]. *Acta Geology Sinica*, 89(7): 1244-1257(in Chinese with English abstract).
- LIU Peng, MAO Jing-wen, PIRAJNO F, JIA Li-hui, ZHANG Feng, LI Yang. 2018b. Ore genesis and geodynamic setting of the Lianhuashan porphyry tungsten deposit, eastern Guangdong Province, SE China: constraints from muscovite $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and zircon U-Pb dating and Hf isotopes[J]. *Miner Deposita*, 53: 797-814.
- LIU Peng, MAO Jing-wen, SANTOSH M, BAO Zhi-an, ZENG Xiao-jian, JIA Li-hui. 2018a. Geochronology and petrogenesis of the Early Cretaceous A-type granite from the Feie'shan W-Sn deposit in the eastern Guangdong Province, SE China: Implications for W-Sn mineralization and geodynamic setting[J]. *Lithos*, 300-301: 330-347.
- LIU Qian, YU Jin-hai, WANG Qin, SU Bin, ZHOU Mei-fu, XU Hai, CUI Xiang. 2012. Age and geochemistry of granites in the Pingtan-Dongshan Metamorphic Belt, Coastal South China: New constraints on Late Mesozoic magmatic evolution[J]. *Lithos*, 15: 268-286.
- LIU Yong-sheng, GAO Shan, HU Zhao-chu, GAO Chang-gui, ZONG Ke-qing, WANG Dong-bing. 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- LUDWIG K R. 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[J]. Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 70.
- MIDDEMEST E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- MINIAR P D, PICCOLI P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- QIAN Long-bing, XU Qing-liang, GUO Li-rong, YAN Lun-ming, WEN Hui. 2018. On ore-forming granite of the Taoxihu tin-polymetallic deposit in Jiexi County, Guangdong Province[J]. *East China Geology*, 39(3): 218-226(in Chinese with English abstract).
- QIU Jian-sheng, HU Jian, MCINNES B I A, JIANG Shao-yong, XU Xi-sheng, ALLEN C M. 2004. Geochronology, geochemistry and petrogenesis of the Longwo granodioritic pluton in Guangdong province[J]. *Acta Petrological Sinica*, 20(6): 1363-1374(in Chinese with English abstract).
- QIU Yuan-xi, QIU Jin-song, LI Jian-chao, ZHONG Hong-ping. 1991. Deformation and metamorphic features of Lianhuashan fault zone during Mesozoic time and mechanism of their formation[J]. *Bulletin of the institute of geomechanics Cags*, 14: 93-106(in Chinese with English abstract).
- QIU Zeng-wang, LI Sha-sha, YAN Qing-he, WANG He, WEI Xiao-peng, LI Pei, WANG Li-imng, BU An. 2017b. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 83: 63-83.
- QIU Zeng-wang, WANG He, YAN Qing-he, LI Sha-sha, WANG Li-ming, BU An, WEI Xiao-peng, LI Pei, MU Sheng-lu. 2016. Zircon U-Pb Geochronology, Geochemistry and Lu-Hf Isotopes of Granite Porphyry in Taoxihu Tin Polymetallic Deposit, Guangdong Province, SE China and its Geological Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenica*, 41(3): 516-532(in Chinese).
- QIU Zeng-wang, YAN Qing-he, LI Sha-sha, WANG He, TONG Lai-xi, ZHANG Rong-qing, WEI Xiao-peng, LI Pei, WANG Li-ming, BU An, YAN Lun-ming. 2017a. 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[J]. *Ore Geology Reviews*, 88: 718-738.
- SHU Liang-shu, ZHOU Xin-min. 2002. Late Mesozoic tectonism of Southeast China[J]. *Geology Review*, 48(3): 249-260(in Chinese).
- SUN S S, MCDONOUGH W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalt: implications for mantle composition and processes[C]//SAUNDERS A D, NORRY M J. (Eds.), *Magmatism in the Ocean Basins*. *Geol. Soc. Spec. Publ.*, (42): 528-548.
- SUN Wei-dong, DING Xing, HU Yan-hua, LI Xian-hua. 2007. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(3-4): 533-542.
- SUN Wei-dong, YANG Xiao-yong, FAN Wei-ming, WU Fu-yuan. 2012. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: preface[J]. *Lithos*, 150: 1-5.
- SYLVESTER P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites[J]. *Lithos*, 45(1): 29-44.
- TAYLOR S R, MCLENNAN S M. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks*[C]//The continental crust: its composition and evolution: an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Oxford: Blackwell Scientific Publications.
- WANG Qiang, LI Xian-hua, JIA Xiao-hui, WYMAN D, TANG Gong-jiang, LI Zheng-xiang, MA Lin, YANG Yue-heng, JIANG Zi-qi, GOU Guo-ning. 2012. Late Early Cretaceous adakitic granitoids and associated magnesian and potassium-rich mafic enclaves and dikes in the Tunchang-Fengmu area, Hainan Province (South China): partial melting of lower crust and mantle, and magma hybridization[J]. *Chemical Geology*, 328: 222-243.
- WANG Xiao-hu, ZHANG Wen-gao, CHEN Zheng-le, ZHOU Rong-de, CHEN Bail-in, XU Dian-kui, HUO Hai-long, LI Ji-lin, ZHANG Tao, DING Zhi-lei, LI Xiao-zhuang. 2020. Deformation time limit of ore-controlling structures in Lian-huashan fault zone along the South China coast: Constraints from zircon U-Pb age and stratigraphic age[J]. *Geology in China*, 47(4): 985-997(in Chinese with English abstract).
- WOLF M B, LONDON D. 1994. Apatite dissolution into peraluminous haplogranite melts: an experimental study of solubilities and mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58: 4127-4145.
- WONG Jean, SUN Min, XING Guang-fu, LI Xian-hua, ZHAO Guo-chun, WONG K, WU Fu-yuan. 2011. Zircon U-Pb and Hf isotopic study of Mesozoic felsic rocks from eastern Zhejiang, South China: geochemical contrast between the Yangtze and Cathaysia blocks[J]. *Gondwana Research*, 19(1): 244-259.
- WYBORN D, CHAPPELL B W, JAMES M. 2001. Examples of convective fractionation in high temperature granites from the Lachlan Fold Belt[J]. *Australia Journal of Earth Sciences*, 48: 531-541.
- XIN Yu-jia, LI Jian-hua, DONG Shu-wen, ZHNAG Yue-qiao. 2018. Geochronological and geochemical constraints on the Siqian granitoids in central Wuyishn and their geological implications[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(3): 269-281(in Chinese).
- XU Bin, JIANG Shao-yong, LUO Lan, ZHAO Kui-dong, MA Liang. 2016. Origin of the granites and related Sn and Pb-Zn polymetallic ore deposits in the Pengshan district, Jiangxi Province, South China: constraints from geochronology, geochemistry, mineral chemistry, and Sr-Nd-Hf-Pb-S isotopes[J]. *Miner Deposita*, 52(3): 337-360.
- XU Xiao-chun, XIE Qiao-qin, XUE Shu-cang. 2000. Metallogenic mechanism of Mesozoic metallic ore deposits in eastern Guangdong area[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 23(1): 99-103(in Chinese with English abstract).
- YAN Qing-he, LI Sha-sha, QIU Zeng-wang, WANG He, WEI Xiao-peng, DONG Rui, ZHANG Xiao-yu. 2017. Geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf-S-Pb isotopes of the early cretaceous Taoxihu Sn deposit and related granitoids, SE China[J]. *Ore Geology Reviews*, 89: 350-368.
- YAN Qing-he, WANG He, QIU Zeng-wang, WANG Min, MU Sheng-lu, WANG Li-ming, BU An, WANG Sai-meng, LI Sha-sha, WEI Xiao-peng, LI Pei. 2018. Zircon and Cassiterite U-Pb Ages and Lu-Hf Isotopic Compositions of Tashan Tin-bearing Porphyry in Guangdong Province, SE China and its Geological Significance[J]. *Geotectonica et Metallogenesis*, 42(4): 718-731(in Chinese with English abstract).
- YAN Qing-he, WANG He, QIU Zeng-wnag, WEI Xiao-peng, LI Pei, DONG Rui, ZHANG Xiao-yu, ZHOU Kai-lin. 2018. Origin of Early Cretaceous A-type granite and related Sn mineralization in the Sanjiaowo deposit, eastern Guangdong, SE China and its tectonic implication[J]. *Ore Geology Reviews*, 93(2018): 60-80.
- ZHANG Yang, YANG Jin-hui, SUN Jin-feng, ZHANG Ji-heng, CHEN Jing-Yuan, LI Xian-hua. 2015. Petrogenesis of Jurassic fractionated I-type granites in Southeast China: Constraints from whole-rock geochemical and zircon U-Pb and Hf-O isotopes[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 111: 268-283.
- ZHANG Yue-qiao, DONG Shu-wen, LI Jian-hua, CUI Jian-jun, SHI Wei, SU Jin-bao, LI Yong. 2012. The new progress in the study of Mesozoic tectonics of South China[J]. *Acta Geoscientica sinica*, 33(3): 257-279(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Guo-chun, CAWOOD P A. 2012. Precambrian geology of china[J]. *Precambrian Research*, 222-223: 13-54.
- ZHENG Wei, MAO Jing-wen, ZHAO Hai-jie, ZHAO Cai-sheng, YU Xiao-fei. 2017. Two Late Cretaceous A-type granites related to the Yingwuling W-Sn polymetallic mineralization in Guangdong province, South China: implications for petrogenesis, geodynamic setting, and mineralization[J]. *Lithos*, 274-275: 106-122.
- ZHOU Xin-min, LI Wu-xian. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326(3): 269-287.
- ZHOU Xin-min, SUN Tao, SHEN Wei-zhou, SHU Liang-shu, NIU Yao-ling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: a response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.