

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

丘增旺^{1,2}, 王核^{1*}, 闫庆贺^{1,2}, 李莎莎^{1,2}, 汪礼明³,
卜安⁴, 慕生禄^{1,2}, 李沛^{1,2}, 魏小鹏^{1,2}

(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 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, 广东 广州 510060; 4. 广东省有色金属地质局九三一队, 广东 汕头 515041)

摘要: 广东省海丰县长埔锡多金属矿床位于粤东地区莲花山断裂带南西段, 是一个中型锡多金属矿床。以与长埔锡多金属矿床矿化联系密切的石英斑岩为研究对象, 首次对其进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年以及锆石 Hf 同位素分析, 获得其锆石 U-Pb 同位素加权平均年龄为(145.0±0.9) Ma, 形成于早白垩世初; 锆石 Hf 同位素特征显示其 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -7.95~-2.74, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1371~1704 Ma, 表明石英斑岩主要来源于中元古代古老地壳岩石的部分熔融, 可能有少量地幔物质的加入。根据所得数据, 结合区域构造演化, 长埔锡多金属矿床石英斑岩可能形成于古太平洋板块向欧亚大陆俯冲作用有关的区域伸展动力学背景。

关键词: 锆石 U-Pb 年龄; Hf 同位素; 石英斑岩; 长埔锡多金属矿床; 广东省

中图分类号: P597.3; P588.121 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2016)04-0374-13

Zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of quartz porphyry in the Changpu Sn polymetallic deposit, Guangdong Province, SE China and their geological significance

QIU Zeng-wang^{1,2}, WANG He^{1*}, YAN Qing-he^{1,2}, LI Sha-sha^{1,2}, WANG Li-ming³, BU An⁴,
MU Sheng-lu^{1,2}, LI Pei^{1,2} and WEI Xiao-peng^{1,2}

1. Key Laboratory of Mineralogy and Metallogeny, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province, Guangzhou 510060, China;

4. Geology Bureau for Nonferrous Metals of Guangdong Province 931 Battalion, Shantou 515041, China

Abstract: The Changpu Sn polymetallic deposit is located in the Lianhuashan Fault Belt, eastern Guangdong Province. The deposit is a medium-sized hydrothermal vein-type Sn-Pb-Zn deposit, and genetically related to quartz porphyry. In this paper, zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf isotopic composition of quartz porphyry have been obtained for the first time. Zircon LA-ICP-MS dating of quartz porphyry yields a concordant age of (145.0±0.9) Ma, indicating the quartz porphyry was formed in the Early Cretaceous. The Hf isotopic composition of the quartz porphyry shows that the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values vary from -7.95 to -2.74 with t_{DM2} ages of 1371 Ma to 1704 Ma, suggesting that the Changpu quartz porphyry probably originated from partial melting of the Mesoproterozoic ancient crustal rocks with a minor input of some mantle materials. Based on the analytical results and regional tectonic evolution, the quartz porphyry of the Changpu deposit was suggested to have been formed in a post-collision extensional tectonic setting that was triggered by the subduction of the paleo-Pacific plate.

Key words: zircon U-Pb dating; Hf isotope; quartz porphyry; Changpu Sn polymetallic deposit; Guangdong Province

收稿日期(Received): 2015-12-10; 改回日期(Revised): 2016-02-01; 接受日期(Accepted): 2016-02-20

基金项目: 中国地质调查局整装勘查关键基础地质研究项目(12120114015901)

作者简介: 丘增旺(1989-), 男, 博士研究生, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: qzwdeng@163.com

* 通讯作者(Corresponding author): WANG He, E-mail: wanghe@gig.ac.cn, Tel: +86-20-85291422

0 引言

华南地区以大规模发育与花岗质岩石有关的钨锡多金属矿床而著名。其中, 在华南内陆, 特别是在南岭及其邻区, 钨锡矿床多呈爆发式集中产于 160~150 Ma 之间, 例如芙蓉, 荷花坪和锡田锡多金属矿床, 窑岭、淘锡坑和漂塘钨矿床; 此外, 在南岭西南侧的右江盆地中, 也发育了与花岗质侵入体有关的锡(钨)矿床, 这些矿床主要产于 100~80 Ma, 例如个旧、大厂和都龙锡多金属矿床, 这些地区的矿床都得到了国内外学者的广泛关注^[1-6]。位于南岭东南面的粤东地区, 区内锡(钨、铜)多金属矿床(点)星罗棋布, 亦是我国东部锡、钨、铜、铅、锌、银等多金属矿产重要基地(图 1), 然而其研究程度远不及华南其他地区。

粤东地区广泛发育与中生代火山-侵入杂岩密切相关的锡(钨、铜)多金属矿床, 例如长埔、塌山、金坑、厚婆坳、西岭锡多金属矿床, 莲花山斑岩型钨矿等^[7]。与南岭及其邻区锡钨多金属矿床(以下简称“南岭区矿床”)相比, 存在明显区别: 粤东地区锡钨多金属矿床(以下简称“粤东区矿床”)主要

的伴生元素是 Cu、Pb、Zn、Au、Ag 等, 而南岭区矿床主要是 W、Sn、Mo、Bi 等; 粤东区矿床与次火山岩-侵入岩有关, 而南岭区矿床则主要与花岗质侵入体有关; 粤东区矿床主要形成于 145~135 Ma, 而南岭区矿床主要集中形成于 160~150 Ma 之间^[8-19](表 1)。然而, 对粤东地区矿床成岩成矿年代学、矿床地球化学等方面的研究却极其有限。因此, 加强本区锡钨多金属矿床与华南其他地区矿床的对比研究, 显得尤为有意义。

粤东海丰县长埔锡多金属矿床位于莲花山断裂带南西侧, 是一中型热液脉型锡多金属矿床, 与石英斑岩密切相关^[8,20]。该矿床自 1958 年发现以来, 许多地质工作者对其进行过研究, 但由于受当时分析测试手段的限制, 在石英斑岩年代学等方面缺乏精确的数据。本文首次对长埔矿区石英斑岩进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年、锆石 Hf 同位素分析, 从而进一步探讨其成岩年龄、物质来源和成岩成矿地球动力学背景。

1 区域地质背景

粤东地区位于 EW 向南岭岩浆构造带东南部与

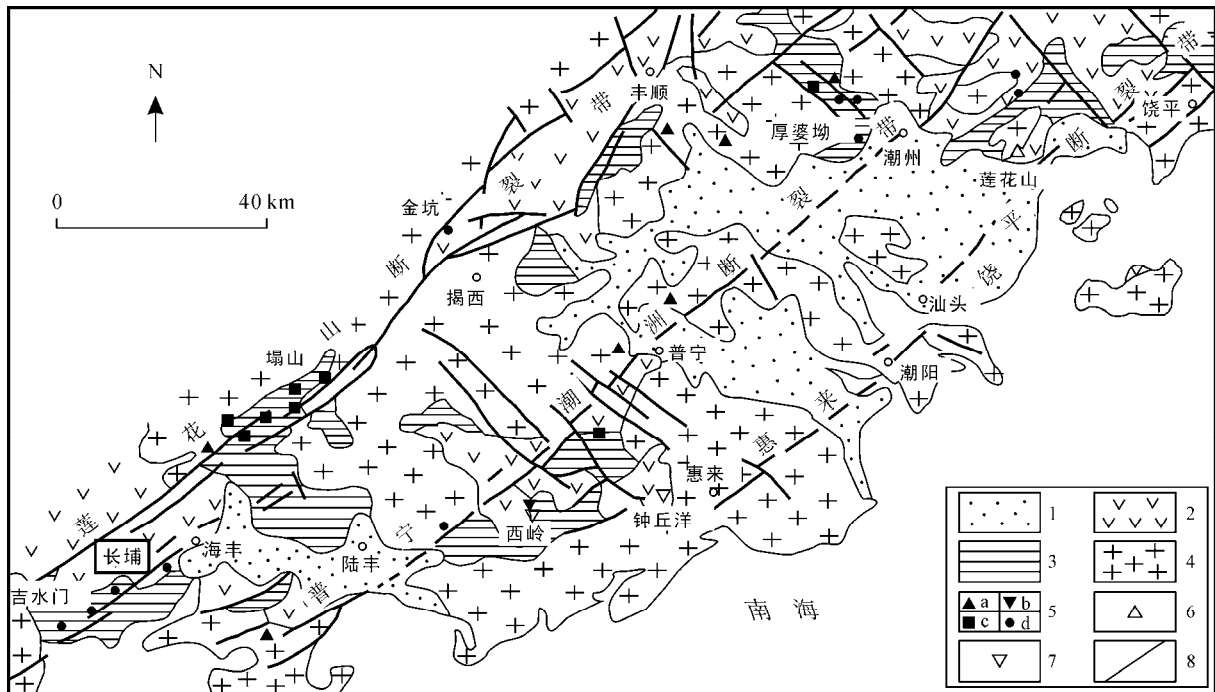


图 1 粤东地区地质略图(据文献[7]修改)

Fig.1 Geological schematic map of eastern Guangdong Province (modified from reference [7])

- 1. 第四系; 2. 晚侏罗世火山岩; 3. 上三叠统-下侏罗统沉积岩; 4. 中生代花岗岩; 5. 锡多金属矿床(a. 云英岩型; b. 石英脉型; c. 硅酸盐型; d. 硫化物型; 6. 钨矿床); 7. 铜矿床; 8. 断裂。

表 1 粤东地区与南岭地区锡钨矿床成矿特征对比
Table 1 Contrast on the characteristics of Sn-W deposits in eastern Guangdong and Nanling area

矿床	矿化组合	蚀变组合	致矿岩体			成矿年龄(Ma)		地区	参考文献
			类型	方法	年龄(Ma)	方法	年龄(Ma)		
长埔	Sn-Pb-Zn	电气石化、硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化	石英斑岩	全岩 K-Ar	143.7±3.5	/	/	粤东	[8]
塌山	Sn-Pb-Zn	硅化、钠化、黄玉化、云英岩化、白云母化、黑云母化、绿泥石化、石榴石化	花岗斑岩	锆石 U-Pb	138	/	/		[9]
金坑	Sn-Cu-Pb-Zn	硅化、黑云母化、白云母化、绿泥石化、碳酸盐化	细粒黑云母花岗岩	锆石 U-Pb	141.1±0.8	辉钼矿 Re-Os 等时线	139.3±2.5		作者未发表数据
厚婆坳	Sn-Pb-Zn-Ag	硅化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化	二长花岗岩	全岩 Rb-Sr 等时线	144.9±9.4	绢云母 Ar-Ar 等时线	145.4±1.9		[10]
莲花山	W-Au-(Cu-Ag)	斑岩型蚀变组合: 钾化、云英岩化、绿泥石化、绢云母化和青磐岩化	石英正长斑岩	全岩 Rb-Sr 等时线	135.8	白云母 Rb-Sr 等时线	135		[11-12]
漂塘	W-Sn-Cu-Zn	硅化、钾长石化、云英岩化、白云母化	中细粒斑状黑云母花岗岩	锆石 U-Pb	161.8±1.0	白云母 Ar-Ar 坪年龄	152.0±1.9	赣南	[13]
			中细粒含黑云母花岗岩	锆石 U-Pb	153.3±1.9	辉钼矿 Re-Os 等时线	151.1±8.5		
柿竹园	W-Sn-Mo-Bi-Be	硅化、萤石化、云英岩化、夕卡岩化	钾长花岗岩	钾长石 Ar-Ar 坪年龄	162-158	石榴子石、透辉石 Sm-Nd 等时线年龄	160.8±2.4		[14]
				辉钼矿 Re-Os 等时线	151.0±3.5	湘南	[15]		
芙蓉	Sn-W-Mo-Bi-(Cu-Pb-Zn)	夕卡岩化、硅化、萤石化、黄玉化、云英岩化、绿泥石化	角山黑云母花岗岩	黑云母 A-Ar 坪年龄	157.5±0.3	白云母 Ar-Ar 坪年龄	156.1±0.4		[16]
窑岭	W-Sn-Cu	云英岩化、硅化、绢云母化、萤石化	黑云母花岗岩闪长岩	锆石 U-Pb	158±1	白云母 Ar-Ar 坪年龄	149.4±0.7	粤北	[17]
水源坝	W-Sn-Cu-(Pb-Zn)	云英岩化、夕卡岩化	黑云母花岗岩	锆石 U-Pb	160~165	白云母 Ar-Ar 坪年龄	162.5±1.2	桂东北	[18-19]
						白云母 Ar-Ar 等时线年龄	162.0±1.9		

NE 向东南沿海岩浆岩带西南部的交汇部位^[21], 区内出露的地层主要包括上三叠统小坪组和下侏罗统金鸡组沉积岩, 上侏罗统高基坪群火山岩以及下白垩统官草湖群火山碎屑红层盆地沉积, 其中前三者是本区主要的赋矿层位。区内构造主要以 NE、NW 向为主, EW 向构造局部断续出现。其中, NE 向构造以 3 条区域性北东向断裂带, 自西向东为莲花山断裂带(海丰-大埔断裂带)、普宁-潮州断裂带、惠来-饶平断裂带, 构成西部长埔-八乡、中部西岭-厚婆坳和东部钟丘洋-莲花山 3 个平行的金属成矿带^[7](图 1)。区内中生代岩浆活动十分强烈, 形成了大量的火山-侵入岩, 岩浆活动以晚侏罗世最强, 其次为早白垩世, 早中侏罗世较弱, 而晚白垩世仅有少量出露^[22]。其中, 花岗岩主要为二长花岗岩和黑云母花岗岩, 同位素年龄在 170~89 Ma 之间, 两者与早、晚两期成矿

密切相关, 二长花岗岩类等时年龄峰值为 145 Ma 左右; 晚期黑云母花岗岩等时线年龄峰值为 139 Ma 左右^[23]。区内火山岩为一套英安质-流纹质火山岩, 主要包括流纹岩、流纹英安岩、英安流纹岩及流纹质和流纹英安质凝灰岩, 同位素年龄在 175~110Ma 之间^[7]。徐晓春等将这些火山-侵入杂岩划分为 I-S 过渡型岩石^[24]。

2 矿床地质背景

长埔矿区位于莲花山断裂带南西段(图 1 和图 2)。矿区出露地层为下侏罗统金鸡组(J_{1j})碎屑岩和上侏罗统的高基坪组(J_{3g})火山岩, 为海陆交替变质砂页岩建造及酸性火山岩建造。区内断裂构造发育, 方向主要为 NE 向, 其次为 NW 向。最主要构造是

NE 向的层间滑动构造(如 F_1 、 F_2)，以成矿前及成矿期的构造活动最为强烈，以活动的多期性、继承性为其主要特点，与成矿关系最为密切，是本矿床主要的成矿和控矿构造，并直接影响矿体的规模和形态。强烈的构造作用，致使区内地层普遍片理化，广泛发育劈理和节理形成地区性的动力变质带，其中尤以一组倾向 $130^\circ\sim 155^\circ$ ，倾角 $45^\circ\sim 60^\circ$ 的节理对成矿最为重要，经多次活动张开，充填了锡石石英脉、硫化物细脉以及无矿石英脉等，是构成细脉浸染型矿石的主要裂隙构造。NW 向断裂如 $F_3^1\sim F_3^3$ 规模仅次于 NE 向，一般产状与地层和矿体近于直交，倾角很陡，具张扭性特征，多是成矿后构造。区内出露石英斑岩，侵入于金鸡组及上部高基坪组的地层之中。石英斑岩脉分布于整个矿区，以矿带部位出现较多，是矿区主要的脉岩组，其产状主要为层间侵入体也有成岩瘤状或沿北东向缓断层侵入的脉状体，产状与矿体一致，在空间上与矿体密切相关(图 2、图 3a 和图 3b)。

矿区内矿段可分为长埔段、树林山段和田心段 3 个工业矿段，其中以长埔段为主。各矿体皆呈层间脉状产出，矿体形态较简单，一般为似板状、连续透

镜状，其次为透镜状、饼状和充填脉状。全区各矿体产状基本一致，倾向 $146^\circ\sim 153^\circ$ ，倾角 $46^\circ\sim 56^\circ$ 。金属矿物成分主要为锡石、黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿、方铅矿、锰菱铁矿等。脉石矿物主要包括石英、电气石、绿泥石、绢云母等。矿石结构主要有压碎结构、他形粒状结构和交代结构。矿石构造主要有角砾状构造、浸染装构造、块状构造和细脉状构造。近矿围岩蚀变的种类有电气石化、硅化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化。

3 样品和分析方法

用于锆石 U-Pb 及 Hf 同位素分析的样品采自长埔矿段 V_4 矿脉旁侧的石英斑岩(CP-5-1)，坐标为 $115^\circ15'23''E$ ， $22^\circ56'11''N$ ，石英斑岩手标本呈灰白色，斑状结构，块状构造(图 3c)，斑晶主要为石英(10%~15%)，粒度为 0.2~1.0 mm，极少量的钾长石(1%)；基质为霏细结构，主要为石英(70%~80%)，少量次生绢云母(5%) (图 3d)。

2.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

用于锆石 U-Pb 年代学测试的样品经过人工破

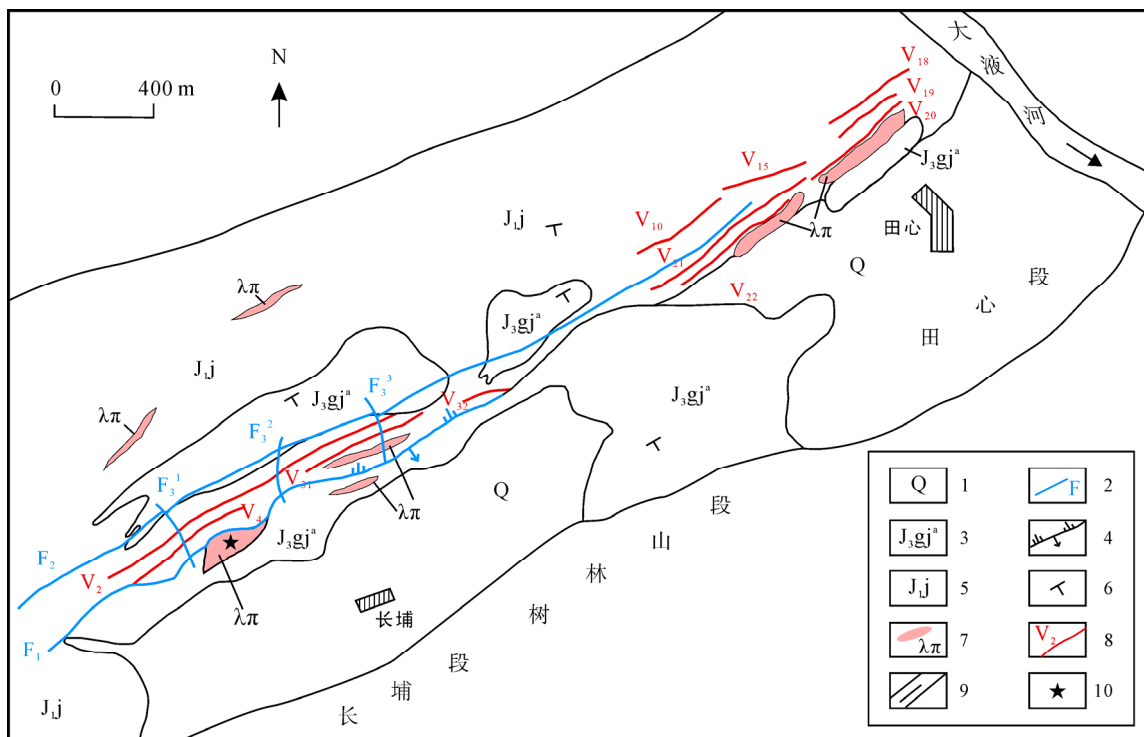


图 2 长埔矿区地质略图(据文献[25]修改)

Fig.2 Geological schematic map of the Changpu deposit (modified from reference [25])

1. 第四系坡积洪积层; 2. 断层; 3. 上侏罗统高基坪组火山岩; 4. 逆冲断层; 5. 下侏罗统金鸡组砂页岩; 6. 产状; 7. 石英斑岩脉;
8. 矿脉及编号; 9. 河流; 10. 采样位置。

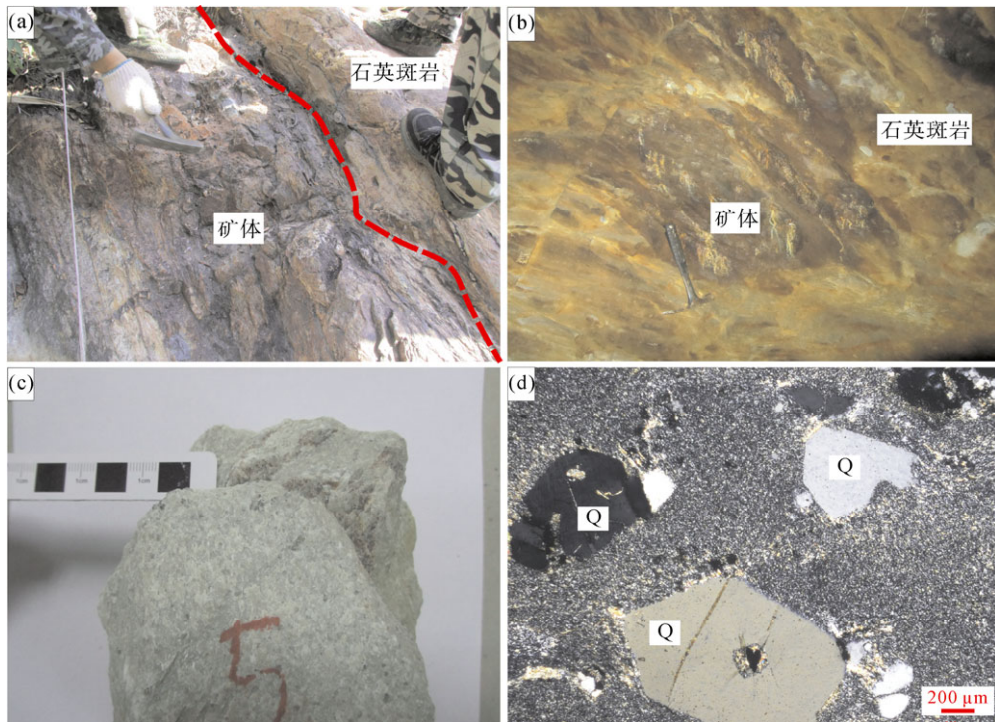


图 3 长埔矿区石英斑岩与矿化的空间关系(a和 b)、石英斑岩手标本照片(c)及显微镜照片(d, 正交偏光, Q-石英)

Fig.3 Intimate temporal relationship between mineralization and the quartz porphyry in the Changpu deposit (a and b), photos of hand specimens (c) and microphotographs (d, crossed polarized light, Q-quartz) of the Changpu quartz porphyry

碎成约 80 目(0.177 mm), 将粉末用清水淘洗, 得到重砂部分, 再经过电磁选分离出锆石, 在双目镜下挑选出颗粒完整、无裂隙、透明度好的锆石, 粘于环氧树脂表面, 固化后打磨抛光至露出一个光洁平面然后进行透反射和阴极发光(CL)照像, 结合这些图像选择适宜的测试点位及进行合理的数据解释。锆石的微区原位 U-Pb 定年和微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素室国家重点实验室利用激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)完成。仪器采用美国 Resonetics 公司生产的 RESOLUTION M-50 激光剥蚀系统和 Agilent 7500a 型的 ICP-MS 联机。用 He 作为剥蚀物质的载气。用美国国家标准技术研究院人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST610 进行仪器最佳化调试, 使仪器达到最佳的灵敏度、最小的氧化物产率(CeO/Ce<3%)和最低的背景值。实验采用标准锆石 TEMORA^[26]作为测年外标, 所测元素激光斑束直径为 31 μm , 频率为 8 Hz。相关分析方法详见文献[27]。数据处理使用软件 ICPMSDataCal 10.1^[28]。锆石的谐和年龄图绘制和年龄计算采用软件 Isoplot3.0^[29]。

2.2 锆石 Hf 同位素分析

锆石 U-Pb 年龄测试完毕后, 在中国科学院广州地球化学研究所同位素国家重点实验室进行 Hf 同

位素原位分析, 使用仪器为美国 Resonetics 公司生产的 Neptune Plus 型多接受等离子质谱仪(MC-ICP-MS), 激光剥蚀系统为 RESOLUTION M-50, 详细激光剥蚀参数如下: 分析时激光束斑直径为 45 μm , 前背景时间、激光剥蚀时间及冲扫时间分别为 30 s、30 s 和 5 s, 频率为 8 Hz, 能量为 80 mJ/cm^2 , 采用 He 和少量 Ne 作为气体介质。测试过程采用蓬莱锆石作为标样^[30], 数据标准化根据 $^{179}\text{Hf}/^{177}\text{Hf} = 0.7325$ 完成, 质量歧视校正用指数法则进行, Yb 和 Lu 的干扰校正取 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu} = 0.02655$ ^[31]和 $^{176}\text{Yb}/^{172}\text{Yb} = 0.5887$, 而 Yb 分馏校正则根据 $^{172}\text{Yb}/^{173}\text{Yb} = 1.35272$ 用指数法则进行^[32]。 ϵ_{Hf} 值的计算采用 ^{176}Lu 的衰变常数为 $1.867 \times 10^{-11} \text{ a}^{-1}$ ^[33]。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 Hf 模式年龄计算中采用的球粒陨石和亏损地幔的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值分别为 0.282772^[34]和 0.28325^[35], 二阶段模式年龄计算中采用平均地壳的 f_{cc} 为 -0.55^[35]。

3 测试结果

3.1 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

本文对石英斑岩(CP-5-1)中的锆石进行了 U-Pb 同位素分析, 其结果见表 2。

表 2 长埔石英斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测试结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb data for the Changpu quartz porphyry

测点	元素含量(μg/g)			Th/U	同位素比值				同位素年龄(Ma)			
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
1	32.66	306.48	1209.62	0.25	0.15715	0.00470	0.02268	0.00033	148.2	4.1	144.6	2.1
2	9.29	166.56	326.10	0.51	0.15382	0.00635	0.02267	0.00034	145.3	5.6	144.5	2.1
3	21.60	336.49	796.51	0.42	0.15379	0.00501	0.02280	0.00037	145.3	4.4	145.3	2.3
4	14.72	303.84	517.02	0.59	0.15041	0.00522	0.02296	0.00041	142.3	4.6	146.4	2.6
5	10.96	232.33	384.38	0.60	0.15153	0.00667	0.02276	0.00040	143.3	5.9	145.1	2.5
6	17.45	381.24	607.41	0.63	0.15218	0.00493	0.02279	0.00033	143.8	4.3	145.3	2.1
7	10.59	203.72	382.88	0.53	0.14474	0.00553	0.02277	0.00043	137.3	4.9	145.1	2.7
8	11.42	264.48	406.61	0.65	0.15377	0.00517	0.02269	0.00042	145.2	4.6	144.6	2.7
9	20.69	300.20	772.53	0.39	0.16151	0.00525	0.02288	0.00037	152.0	4.6	145.8	2.3
10	14.07	296.86	503.61	0.59	0.15196	0.00495	0.02285	0.00039	143.6	4.4	145.6	2.5
11	7.97	159.52	287.92	0.55	0.15244	0.00629	0.02266	0.00034	144.1	5.5	144.4	2.2
12	17.81	363.42	639.27	0.57	0.14465	0.00524	0.02275	0.00037	137.2	4.6	145.0	2.4
13	18.17	371.42	633.86	0.59	0.15279	0.00448	0.02282	0.00034	144.4	3.9	145.4	2.1
14	51.59	955.77	1835.67	0.52	0.15081	0.00453	0.02252	0.00028	142.6	4.0	143.5	1.8
16	30.78	575.58	1066.21	0.54	0.14077	0.00379	0.02264	0.00029	133.7	3.4	144.3	1.8
17	14.21	265.01	511.01	0.52	0.15436	0.00649	0.02273	0.00035	145.8	5.7	144.9	2.2
18	20.17	296.21	722.69	0.41	0.15788	0.00494	0.02281	0.00027	148.8	4.3	145.4	1.7
19	11.77	304.77	385.69	0.79	0.16368	0.00557	0.02276	0.00035	153.9	4.9	145.1	2.2
20	17.50	383.29	605.07	0.63	0.16085	0.00500	0.02265	0.00032	151.4	4.4	144.4	2.0
21	9.23	178.67	322.21	0.55	0.15429	0.00716	0.02300	0.00042	145.7	6.3	146.6	2.6
22	14.10	254.14	546.63	0.46	0.15387	0.00735	0.02291	0.00044	145.3	6.5	146.0	2.8
23	12.37	249.63	438.46	0.57	0.14982	0.00520	0.02288	0.00036	141.7	4.6	145.8	2.3
24	15.74	339.59	544.11	0.62	0.15359	0.00500	0.02275	0.00035	145.1	4.4	145.0	2.2
26	16.14	331.68	552.75	0.60	0.16739	0.00538	0.02281	0.00039	157.2	4.7	145.4	2.5
28	13.71	213.99	501.02	0.43	0.15423	0.00635	0.02267	0.00034	145.6	5.6	144.5	2.2
29	8.14	193.29	273.52	0.71	0.15697	0.00612	0.02262	0.00041	148.0	5.4	144.2	2.6
30	9.57	266.85	315.13	0.85	0.16150	0.00720	0.02282	0.00042	152.0	6.3	145.4	2.7

石英斑岩(CP-5-1)样品中锆石呈浅黄色—浅玫瑰色, 以多呈柱状, 晶体粒径一般为 80~200 μm, 长短轴比大多为 2 1~4 1。阴极发光图像(图 4)揭示

大部分锆石具有清晰的岩浆韵律环带, 裂纹不发育, 显示岩浆成因特征^[36]。石英斑岩(CP-5-1)样品中锆石的 U 含量为 273.52~1835.67 μg/g, Th 含量为 159.52~

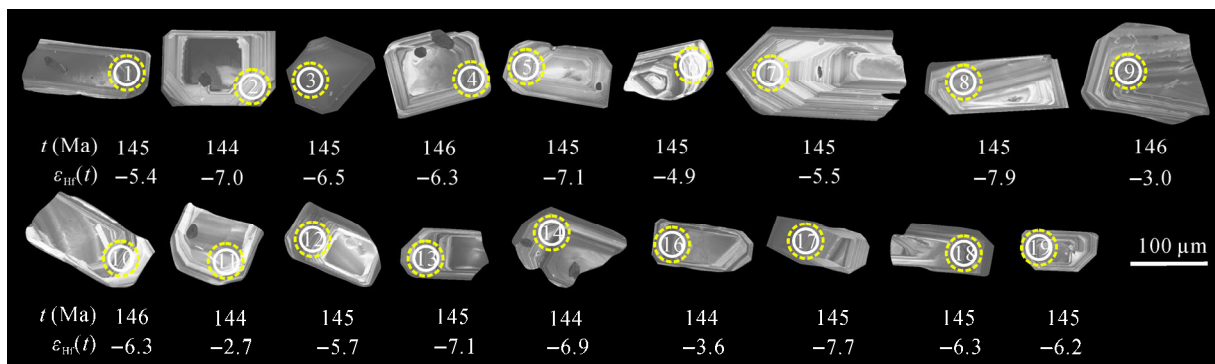


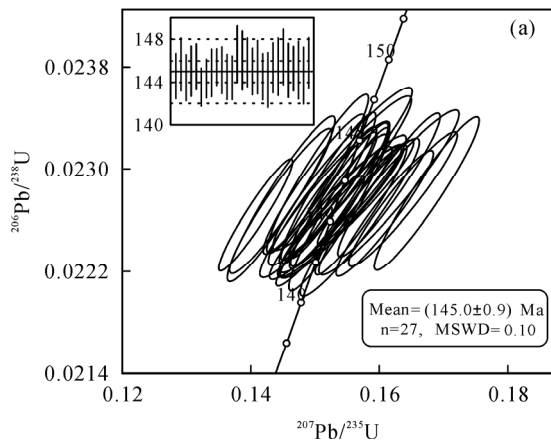
图 4 长埔石英斑岩锆石代表性阴极发光图像(CL)、分析点位、年龄及 ε_{Hf}(t)值

Fig.4 Representative CL images of zircons from the Changpu quartz porphyry, with analytical numbers, U-Pb ages, and ε_{Hf}(t) values
实线圆圈和虚线圆圈分别代表锆石 U-Pb 及 Hf 同位素分析点位置。

U-Pb analysis spots are shown by solid circles, and Hf isotope analysis spots are shown by dashed circles.

955.77 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比值介于 0.25~0.85 之间, 平均 0.56, 显示出岩浆锆石的特点^[37-38]。

石英斑岩(CP-5-1)样品中锆石共测定 30 个点, 其中 15、25、27 号点由于测试异常已删去, 剩余点在一组曲线中成群分布, 具有非常一致的年龄, 变化于(143.5 \pm 1.8) Ma~(146.6 \pm 2.6) Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均值年龄为(145.0 \pm 0.9) Ma, MSWD = 0.10



(图 5a), 为石英斑岩的侵位结晶年龄。结合近来发表的数据^[39-43], 得到粤东地区岩浆岩年龄分布直方图如图 5b 所示。

3.2 锆石 Hf 同位素

对花岗斑岩锆石 U-Pb 年龄测点进行原位 Hf 同位素分析结果见表 3, Hf 同位素演化图解如图 6a 所

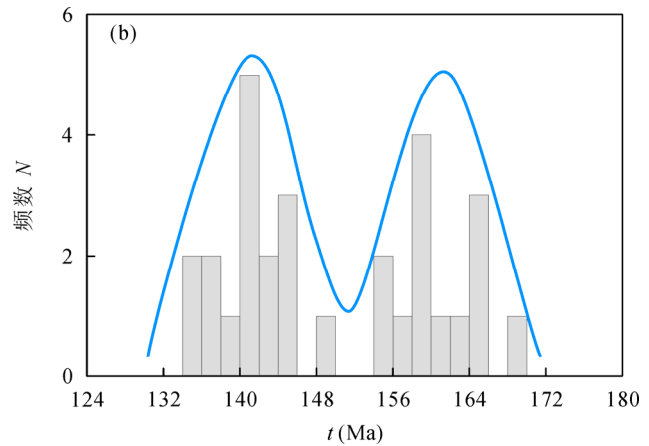


图 5 长埔石英斑岩锆石 U-Pb 谐和图(a)及粤东地区岩浆岩年龄分布直方图(b, 长埔石英斑岩年龄为本文数据, 其余数据收集自文献[39-43], 见表 4)

Fig.5 Zircon U-Pb concordia diagram for the Changpu quartz porphyry (a) and histogram of isotopic ages of magmatic rocks in eastern Guangdong (b, the data for the Changpu quartz porphyry are from this study, and the others are collected from references [39-43], Table 4)

表 3 长埔矿区石英斑岩锆石 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Changpu quartz porphyry

测点号	Age (Ma)	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	1σ	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	1σ	$t_{\text{DM1}}(\text{Ma})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ma})$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
1	144.6	0.045151	0.001410	0.282533	0.000009	-8.45	-5.41	0.32	1028	1541	-0.96
2	144.5	0.049276	0.001576	0.282488	0.000008	-10.06	-7.04	0.29	1098	1644	-0.95
3	145.3	0.030635	0.000999	0.282500	0.000007	-9.61	-6.52	0.26	1063	1612	-0.97
4	146.4	0.024286	0.000793	0.282507	0.000010	-9.39	-6.25	0.34	1048	1596	-0.98
5	145.1	0.043694	0.001372	0.282485	0.000008	-10.16	-7.10	0.28	1096	1649	-0.96
6	145.3	0.027554	0.000892	0.282546	0.000009	-8.00	-4.89	0.33	996	1509	-0.97
7	145.1	0.045675	0.001448	0.282531	0.000009	-8.53	-5.48	0.32	1032	1546	-0.96
8	144.6	0.023980	0.000794	0.282460	0.000009	-11.03	-7.93	0.31	1113	1701	-0.98
9	145.8	0.034017	0.001082	0.282599	0.000007	-6.13	-3.03	0.26	927	1391	-0.97
10	145.6	0.041738	0.001331	0.282508	0.000008	-9.33	-6.26	0.29	1061	1596	-0.96
11	144.4	0.047651	0.001297	0.282608	0.000011	-5.79	-2.74	0.40	918	1371	-0.96
12	145.0	0.048323	0.001511	0.282526	0.000010	-8.69	-5.65	0.34	1041	1557	-0.95
13	145.4	0.076846	0.002099	0.282487	0.000011	-10.08	-7.09	0.38	1114	1648	-0.94
14	143.5	0.051855	0.001591	0.282493	0.000008	-9.87	-6.87	0.29	1090	1633	-0.95
16	144.3	0.043065	0.001348	0.282585	0.000010	-6.63	-3.59	0.35	953	1425	-0.96
17	144.9	0.035697	0.001085	0.282467	0.000010	-10.77	-7.70	0.37	1112	1687	-0.97
18	145.4	0.038341	0.001213	0.282506	0.000008	-9.41	-6.34	0.27	1061	1601	-0.96
19	145.1	0.042890	0.001318	0.282511	0.000008	-9.24	-6.18	0.27	1057	1591	-0.96
20	144.4	0.051353	0.001586	0.282546	0.000010	-7.99	-4.97	0.36	1014	1513	-0.95
21	146.6	0.029176	0.000942	0.282504	0.000008	-9.49	-6.36	0.30	1057	1603	-0.97
22	146.0	0.022985	0.000749	0.282459	0.000010	-11.08	-7.95	0.35	1114	1704	-0.98
23	145.8	0.036272	0.001104	0.282544	0.000009	-8.07	-4.98	0.33	1005	1515	-0.97
24	145.0	0.034496	0.001093	0.282518	0.000008	-8.98	-5.90	0.30	1040	1573	-0.97
26	145.4	0.340983	0.007448	0.282566	0.000012	-7.30	-4.82	0.44	1171	1502	-0.78
28	144.5	0.018506	0.000602	0.282516	0.000009	-9.04	-5.92	0.33	1029	1574	-0.98

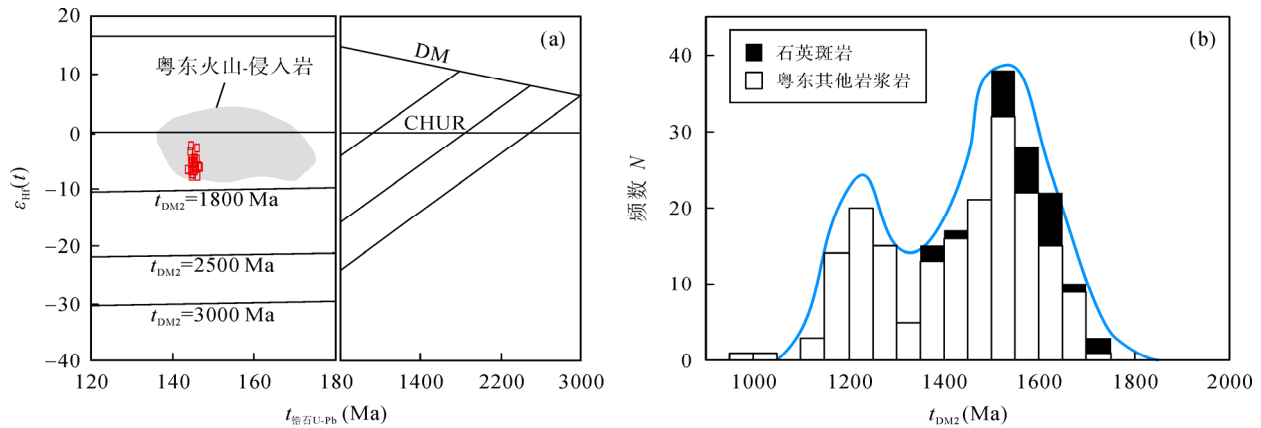


图 6 长埔石英斑岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -年龄图解(a)及粤东岩浆岩 t_{DM2} 频率分布直方图(b)

Fig.6 Diagram of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ -age for the Changpu quartz porphyry (a) and histogram of t_{DM2} for magmatic rocks in eastern Guangdong (b) (a) 背景数据引自文献[39-41,43]; (b) 数据引自本文及文献[39-41,43] (表 4)。

In figure a, the data of volcanic and intrusive rocks in eastern Guangdong are from references [39-41,43]. In figure b, the data of t_{DM2} for magmatic rocks from eastern Guangdong are from this study and references [39-41,43] (Table 4).

示。石英斑岩锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值大部分小于 0.002, 表明锆石在形成后具有较低的放射性成因 Hf 积累, 因而可以用初始 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值代表锆石形成时的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值^[44]。花岗斑岩初始 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于 0.282459~0.282608 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.95~ -2.74, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1371~1704 Ma。

4 讨 论

4.1 成岩年龄及意义

前人曾对长埔矿区石英斑岩开展过同位素定年工作, 谢华光等^[25]对长埔锡矿的石英斑岩进行全岩 K-Ar 同位素定年, 得到年龄为(143.7±3.5) Ma。K-Ar 体系的抗扰动性差, 加之封闭温度很低(约(200±50) °C)^[45], 导致定年结果常低于岩体的实际年龄, 因此早期的测试方法很难获得精确的成岩年龄。由于锆石具有很高的封闭温度($t > 800$ °C), 其在后期热液蚀变作用过程中能够很好地保存封闭的同位素体系^[46], 因此 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年方法能够较好地获得岩体的成岩时代。本文对长埔锡多金属矿床石英斑岩进行了锆石 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素定年, 得到石英斑岩年龄为(145.0±0.9) Ma (图 5a), 属于早白垩世初期的产物。

前人研究表明, 粤东地区及中国东南沿海中生代火山岩划分为上下 2 个岩系 4 个旋回, 并有相应的岩浆侵入, 形成大规模的火山-侵入杂岩^[47-48]。对照其划分方案, 莲花山断裂带南西段广泛发育的区

内上侏罗统高基坪群(英安岩-流纹岩组合)属下岩系第 旋回, 同位素年龄为 157~148 Ma, 其稍后侵入的酸性花岗质岩石, 年龄为 155~136 Ma^[48-50]。事实上, 通过对近期发表的年代学数据收集^[39-43](表 4), 我们发现粤东地区岩浆活动主要集中在 2 个时期: 早白垩世初期(150~134 Ma)和中晚侏罗世(170~154 Ma) (图 5b), 因而长埔矿区的石英斑岩正是早白垩世岩浆活动的产物, 与东南沿海第 旋回岩浆活动有关。

4.2 岩浆源区特征

研究表明, 锆石原位 Hf 同位素分析能够很好地鉴别花岗岩浆的物质来源^[35,44]。长埔石英斑岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -7.95~ -2.74, 均值为 -5.88, 二阶段模式年龄(t_{DM2})为 1371~1704 Ma。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ - t 图(图 6a)上, 全部样品分布于球粒陨石及下地壳 Hf 同位素分异演化线之间, 表明长埔矿区石英斑岩主要来源于中元古代地壳结晶基底(图 6b)。尽管石英斑岩样品中大部分锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值呈现出负值, 但 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值和二阶段模式年龄存在一定的变化范围, 暗示物质组分的不均匀性, 表明在地壳物质为主体的情况下, 可能有少量的新生地幔组分加入。如表 4 所示, Zhang *et al.*^[40]的研究表明, 粤东地区主要的中晚侏罗世花岗质岩石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.2~ +3.9, 二阶段模式年龄为 962~2166 Ma; Guo *et al.*^[43]对粤东中生代火山岩锆石 Hf 同位素进行研究, 得到中晚侏罗世火山岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.8~ +1.5, 二阶段模式年龄为 1219~1714 Ma, 早白垩世的火山岩 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -7.7~ +2.3, 二阶段模式年龄为 1230~1688 Ma; 丘增旺等^[39]得到陶锡湖锡多金属矿床早白垩世花岗斑

表4 粤东岩浆岩锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素组成
Table 4 Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of magmatic rocks in eastern Guangdong

岩体/矿区	岩石	t (Ma)	测试方法	$\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$	t_{DM2} (Ma)	参考文献
长埔	石英斑岩	145.0±0.9	LA-ICP-MS	-7.95 ~ -2.74	1371~1704	本文
陶锡湖	花岗斑岩	141.8±1.0	LA-ICP-MS	-10.5 ~ -5.9	1566~1863	[39]
龙窝	花岗闪长岩	164.7±1.5	SIMS	-6.6 ~ -2.7	1382~1629	[40]
龙窝	花岗闪长岩	165.2±1.9	LA-ICP-MS	-4.6 ~ -0.9	1272~2166	[40]
莲花山	花岗闪长岩	154.3±1.4	SIMS	-6.5 ~ -3.6	1432~1614	[40]
莲花山	花岗闪长岩	154.2±1.9	LA-ICP-MS	-7.2 ~ -3.6	1432~1662	[40]
乌石坑	黑云母花岗岩	159.7±1.7	LA-ICP-MS	-4.0 ~ +3.9	962~1466	[40]
石鼓山	黑云母花岗岩	158.5±1.3	SIMS	-5.1 ~ -2.5	1366~1538	[40]
赤寮	黑云母花岗岩	157.2±1.8	LA-ICP-MS	-5.6 ~ -3.2	1408~1565	[40]
葫芦田	黑云母花岗岩	158.6±1.4	LA-ICP-MS	-5.1 ~ -2.5	1368~1538	[40]
馒头山	黑云母花岗岩	163.8±2.1	LA-ICP-MS	-6.5 ~ -4.8	1502~1623	[40]
凤凰	黑云母花岗岩	161.3±1.2	LA-ICP-MS	-3.9 ~ -0.3	1228~1457	[40]
田东	粗粒花岗岩	158.0±1.3	LA-ICP-MS	-3.6 ~ -0.1	1217~1439	[41]
田东	细粒黑云母花岗岩	140.5±0.8	LA-ICP-MS	-5.4 ~ -1.6	1330~1423	[41]
大埔	黑云母花岗岩	136.3±0.6	LA-ICP-MS			[42]
揭西	黑云母钾长花岗岩	134.9±0.4	LA-ICP-MS			[42]
丰顺火山盆地	英安岩	168.2±2.0	LA-ICP-MS	-7.8 ~ -3.8	1463~1714	[43]
丰顺火山盆地	流纹岩	142.7±1.0	LA-ICP-MS	-6.5 ~ +0.3	1243~1621	[43]
丰顺火山盆地	英安岩	165.0±1.0	LA-ICP-MS	-3.9 ~ +1.5	1219~1475	[43]
丰顺火山盆地	英安岩	148.9±1.1	SIMS	-7.7 ~ -2.8	1602~1688	[43]
丰顺火山盆地	流纹岩	145.8±2.0	LA-ICP-MS			[43]
丰顺火山盆地	英安岩	143.3±0.5	LA-ICP-MS			[43]
丰顺火山盆地	英安岩	139.0±1.0	SIMS	-2.8 ~ +2.3	1230~1372	[43]

岩 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值为 -10.5 ~ -5.9, 二阶段模式年龄为 1566~1863 Ma; 刘鹏等^[41]通过对田东钨锡矿床花岗质岩石研究, 得到晚侏罗世的粗粒花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值为 -3.6 ~ -0.1, 二阶段模式年龄为 1217~1439 Ma, 早白垩世的细粒黑云母花岗岩 $\varepsilon_{\text{Hf}(t)}$ 值为 -5.4 ~ -1.6, 二阶段模式年龄为 1330~1423 Ma。这些测试结果均表明, 长埔矿区石英斑岩 Hf 同位素组成与粤东地区的早白垩世岩浆岩类似。事实上, 粤东地区中晚侏罗世岩浆岩与早白垩世岩浆岩 Hf 同位素组成亦是较一致, 均指示岩浆岩是主要在早中元古代下地壳部分熔融的基础上, 加入了一定比例的地幔物质混合而成的(图 6a 和 6b)。这个结论也得到了前人对粤东火山-侵入岩 Sr-Nd-Pb 同位素分析结果的支持^[42,51]。

4.3 构造背景

当前, 学术界对于华南地区中生代岩浆-构造-成矿机制存在不同见解, 提出了许多模型用以解释构造-岩浆-成矿作用, 例如: (1)古太平洋板块俯冲角度由缓变陡^[52-53]; (2)古太平洋俯冲模型^[54-55]; (3)多阶段岩石圈伸展模型^[56]; (4)陆内裂谷伸展^[57-58]; (5)古太平洋板块倾斜俯冲^[59]; (6)洋中脊俯冲模型^[60-61]。由

于与伸展有关的成矿和岩浆作用均呈多期幕式爆发出现, 因而岩石圈多阶段伸展模型可能更好解释其形成机制^[56]。

区域岩石圈伸展可能开始于早中侏罗世^[1,3,56,62], 而峰值主要集中在 180~155 Ma、145~125 Ma 和 110~75 Ma 三个阶段, 而 145~125 Ma 阶段的伸展作用很可能是由于太平洋板块俯冲方向改变引发的^[56,63]。徐晓春等^[24,49]通过对粤东地区中生代火山-侵入岩研究, 得出本区在晚侏罗世-早白垩世具有从活动大陆边缘向后造山伸展环境转变的特征。笔者对同处莲花山断裂带上陶锡湖锡多金属矿床及金坑锡多金属矿床的花岗斑岩((141.8±1.0)Ma)和细粒花岗岩((141.1±0.8)Ma)地球化学特征研究表明, 两者均产于后碰撞伸展动力学背景(图 7)。此外, 据丘元禧等^[66]研究表明, 燕山期以来, 莲花山断裂带经历过 3 期变形变质事件, 其中, 在晚侏罗世-早白垩世早期, 发生了强烈的左行剪切, 同时由于地壳隆升而逐步伸展, 沿莲花山断裂带有大规模的中酸性火山喷溢和花岗质岩浆的侵入, 而长埔矿区石英斑岩正是该期构造-岩浆事件的产物, 形成于地壳隆升而引发的拉张环境下。

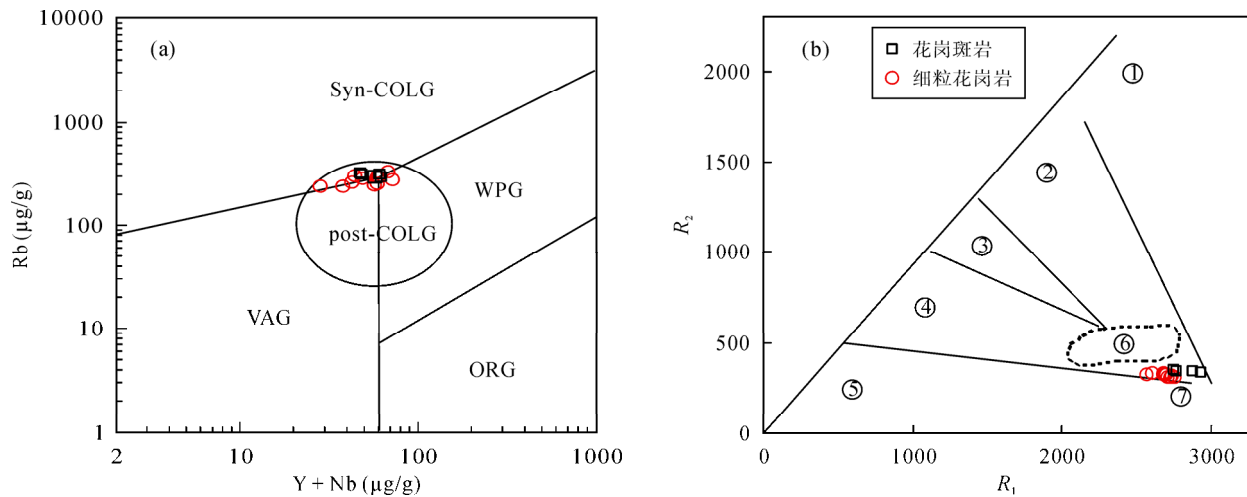


图7 陶锡湖花岗斑岩及金坑细粒花岗岩 Rb-(Y+Nb)图解(a, 据 Pearce^[64])和 R_2 - R_1 图解(b, 据 Batchelor *et al.*^[65])构造环境判别图(陶锡湖花岗斑岩数据引自文献[40], 金坑细粒花岗岩数据来自作者未发表数据)

Fig.7 Rb-(Y+Nb) and R_2 - R_1 discrimination diagrams of the Taoxihu granite porphyry and the Jinkeng fine-grained granite (the data of the Taoxihu granite porphyry and the Jinkeng fine-grained granite are cited from reference [40] and authors' unpublished paper, respectively)
Syn-COLG—同碰撞花岗岩; VAG—火山弧花岗岩; WPG—板内花岗岩; ORG—洋中脊花岗岩; post-COLG—后碰撞花岗岩。地幔斜长花岗岩; 破坏性活动板块边缘(板块碰撞前)花岗岩; 板块碰撞后隆起期花岗岩; 晚造山期花岗岩; 非造山 A 型花岗岩; 同碰撞(S 型)花岗岩; 造山期后 A 型花岗岩。

syn-COLG – syn-collision granite; VAG – volcanic-arc granite; WPG – within-plate granite; ORG – ocean-ridge granite; post-COLG – post-collision granite. mantle-derived granite; pre-plate-collision granite; post-collisional-uplift granite; late-orogenic granite; anorogenic granite; syn-collisional granite; post-orogenic granite.

5 结 论

(1) 长埔锡多金属矿床石英斑岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(145.0±0.9) Ma, 属于早白垩世初期岩浆作用的产物。

(2) 石英斑岩锆石 Hf 同位素特征表明, 其岩浆源区主要来自于地壳, 并伴随有少量地幔物质的加入。

(3) 长埔锡多金属矿床石英斑岩形成于古太平洋板块向欧亚板块俯冲所引起的岩石圈伸展的构造背景, 是大陆岩石圈大面积伸展背景下的产物。

感谢两位审稿人对本文提出的建设性的意见! 锆石 U-Pb 和 Hf 同位素测试分别得到中国科学院广州地球化学研究所李聪颖博士和张乐助理研究员的帮助; 野外工作得到广东省有色金属地质局九三一队同行的大力支持, 在此一并表示感谢!

参考文献(References):

- [1] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 陆建军. 论华南地区中生代 3 次大规模成矿作用[J]. 矿床地质, 2005, 24(2): 99–107.
Hua Ren-min, Chen Pei-rong, Zhang Wen-lan, Lu Jian-jun. Three major metallogenic events in Mesozoic in South China [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(2): 99–107 (in Chinese with English abstract).
- [2] 华仁民, 李光来, 张文兰, 胡东泉, 陈培荣, 陈卫锋, 王旭

东. 华南钨和锡大规模成矿作用的差异及其原因初探[J]. 矿床地质, 2010, 29(1): 9–23.

Hua Ren-min, Li Guang-lai, Zhang Wen-lan, Hu Dong-quan, Chen Pei-rong, Chen Wei-feng, Wang Xu-dong. A tentative discussion on differences between large-scale tungsten and tin mineralizations in South China [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(1): 9–23 (in Chinese with English abstract).

- [3] 毛景文, 谢桂青, 郭春丽, 袁顺达, 程彦博, 陈毓川. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 510–526.
Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Guo Chun-li, Yuan Shun-da, Cheng Yan-bo, Chen Yu-chuan. Spatial-temporal distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their metallogenic settings [J]. Geol J China Univ, 2008, 14(4): 510–526 (in Chinese with English abstract).
- [4] Hu R Z, Zhou M F. Multiple Mesozoic mineralization events in South China — An introduction to the thematic issue [J]. Min Deposit, 2012, 47(6): 579–588.
- [5] Mao J W, Cheng Y B, Chen M H, Pirajno F. Major types and time-space distribution of Mesozoic ore deposits in South China and their geodynamic settings [J]. Min Deposit, 2013, 48(3): 267–294.
- [6] 陈毓川, 王登红, 徐志刚, 黄凡. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要[J]. 大地构造与成矿学, 2014, 38(2): 219–229.
Chen Yu-chuan, Wang Deng-hong, Xu Zhi-gang, Huang Fan. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China [J]. Geotecton Metallogen, 2014, 38(2): 219–229 (in Chinese with English abstract).
- [7] 徐晓春, 岳书仓. 粤东锡(钨、铜)多金属矿床的成矿物质来源和成矿作用[J]. 地质科学, 1999, 34(1): 81–92.

- Xu Xiao-chun, Yue Shu-cang. Source material and metallization of tin (tungsten, copper) polymetallic deposits in eastern Guangdong Province [J]. *Sci Geol Sinica*, 1999, 34(1): 81-92 (in Chinese with English abstract).
- [8] 戚建中, 黄宾. 粤东长埔-西岭地区锡矿断裂岩浆控制因素及成矿模式[J]. 中国地质科学院南京地质矿产研究所刊, 1988, 9(4): 76-94.
- Qi Jian-zhong, Huang Bin. Fault-magmatic control of tin mineralization in Changpu-Xiling region, east Guangdong, and regional model [J]. *Bull Nanjing Inst Geol Mineral Resour*, 1988, 9(4): 76-94 (in Chinese with English abstract).
- [9] 沈渭洲, 凌洪飞. 岩背和塌山含锡花岗岩斑岩的同位素地球化学特征和物质来源[J]. 地球学报, 1994, 15(1): 117-123.
- Shen Wei-zhou, Ling Hong-fei. Isotopic geochemical characteristics and material sources of tin-bearing granite porphyry in Yanbei and Tashan [J]. *Acta Geosci Sinica*, 1994, 15(1): 117-123 (in Chinese with English abstract).
- [10] 徐晓春. 粤东地区中生代岩浆作用和金属成矿的地球化学研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 1993.
- Xu Xiao-chun. Geochemical studies on the Mesozoic magmatic and metallization, Eastern Guangdong Province, China [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 1993 (in Chinese with English abstract).
- [11] 满发胜, 白玉珍, 倪守斌, 黎彤. 莲花山钨矿床同位素地质学初步研究[J]. 矿床地质, 1983, 2(4): 35-42.
- Man Fa-sheng, Bai Yu-zhen, Ni Shou-bin, Li Tung. Preliminary isotope studies of the Lianhuashan tungsten ore deposit [J]. *Mineral Deposits*, 1983, 2(4): 35-42 (in Chinese with English abstract).
- [12] 倪守斌, 满发胜, 白玉珍, 黎彤. 莲花山钨矿区 Rb-Sr 同位素地质年龄[J]. 中国科学技术大学学报, 1983, 13(2): 246-252.
- Ni Shou-bin, Man Fa-sheng, Bai Yu-zhen, Li Tung. Rb-Sr ages of rocks in Lianhuashan mining region [J]. *J China Univ Sci Technol*, 1983, 13(2): 246-252 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张文兰, 华仁民, 王汝成, 李惠民, 屈文俊, 季建清. 赣南漂塘钨花岗岩成岩年龄与成矿年龄的精确测定[J]. 地质学报, 2009, 83(5): 659-670.
- Zhang Wen-lan, Hua Ren-min, Wang Ru-cheng, Li Hui-min, Qu Wen-jun, Ji Jian-qing. New dating of the Piaotang granite and related tungsten mineralization in southern Jiangxi [J]. *Acta Geosci Sinica*, 2009, 83(5): 659-670 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘义茂, 戴憧谟, 卢焕章, 胥友志, 王昌烈, 康卫清. 千里山花岗岩成岩成矿的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 中国科学(D 辑), 1997, 27(5): 425-430.
- Liu Yimao, Dai Tongmo, Lu Huanzhang, Xu Youzhi, Wang Changlie, Kang Weiqing. The ^{40}Ar - ^{39}Ar and Sm-Nd isotopic dating for the Qianlishan granite and its associated mineralization [J]. *Sci China (D)*, 1997, 27(5): 425-430 (in Chinese).
- [15] 李红艳, 毛景文, 孙亚利, 邹晓秋, 何红蓼, 杜安道. 柿竹园钨多金属矿床的 Re-Os 同位素等时线年龄研究[J]. 地质论评, 1996, 42(3): 261-267.
- Li Hong-yan, Mao Jing-wen, Sun Ya-li, Zheng Xiao-qiu, He Hong-liao, Du An-dao. Re-Os isotopic chronology of molybdenites in the Shizhuyuan polymetallic tungsten deposit, Southern Hunan [J]. *Geol Rev*, 1996, 42(3): 261-267 (in Chinese with English abstract).
- [16] 毛景文, 李晓峰, Lehmann B, 陈文, 蓝晓明, 魏绍六. 湖南芙蓉锡矿床锡矿石和有关花岗岩的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄及其地球动力学意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(2): 164-175.
- Mao Jing-wen, Li Xiao-feng, Lehmann B, Chen Wen, Lan Xiao-ming, Wei Shao-liu. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of tin ores and related granite in Furong tin orefield, Hunan Province and its geodynamic significance [J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(2): 164-175 (in Chinese with English abstract).
- [17] 翟伟, 孙晓明, 邬云山, 孙红英, 华仁民, 李文铅. 粤北瑶岭钨矿成矿相关花岗岩的锆石 SHRIMP 年龄与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 成矿年龄及其地质意义[J]. 矿床地质, 2011, 30(1): 21-32.
- Zhai Wei, Sun Xiao-ming, Wu Yun-shan, Sun Hong-ying, Hua Ren-min, Li Wen-qian. ^{40}Ar - ^{39}Ar dating of Yaoling tungsten deposit in northern Guangdong Province and SHRIMP U-Pb zircon age of related granites [J]. *Mineral Deposits*, 2011, 30(1): 21-32 (in Chinese with English abstract).
- [18] 顾晟彦, 华仁民, 戚华文. 广西姑婆山花岗岩单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及全岩 Sr-Nd 同位素研究[J]. 地质学报, 2006, 80(4): 543-553.
- Gu Sheng-yan, Hua Ren-min, Qi Hua-wen. Study on zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and Sr-Nd isotope of the Guposhan granite in Guangxi [J]. *Acta Geol Sinica*, 2006, 80(4): 543-553 (in Chinese with English abstract).
- [19] 康志强, 冯佐海, 李晓峰, 廖家飞, 余勇, 潘会彬. 桂东北水岩坝钨锡矿田白云母 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年代学研究及其地质意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2010, 21(6): 610-615.
- Kang Zhi-qiang, Feng Zuo-hai, Li Xiao-feng, Liao Jia-fei, Yu Yong, Pan Hui-bin. ^{40}Ar - ^{39}Ar age of muscovite in the Shuiyanba tungsten-tin ore field in Northeast Guangxi and its geological significance [J]. *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2010, 21(6): 610-615 (in Chinese with English abstract).
- [20] 马秀娟. 长埔锡矿床成矿流体性质与演化[J]. 地球学报, 1995, 16(4): 386-396.
- Ma Xiu-juan. The characters and evolution of metallogenic fluids of Changpu tin deposit [J]. *Acta Geosci Sinica*, 1995, 15(4): 386-396 (in Chinese with English abstract).
- [21] 广东省地质矿产局. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1988: 1-191.
- Guangdong Bureau of Geology and Mineral Resources. Regional Geology of Guangdong Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988: 1-191 (in Chinese with English abstract).
- [22] 郭锐, 卜安. 粤东火山岩盆地铜-铅-锌多金属矿床找矿新发现与认识[J]. 矿产与地质, 2006, 20(3): 243-246.
- Guo Rui, Bu An. New discovery and understanding about seeking the copper-lead-zinc polymetallic deposits in volcanic basin of east Guangdong [J]. *Mineral Resour Geol*, 2006, 20(3): 243-245 (in Chinese with English abstract).
- [23] 岳书仓, 雷新勇, 龚昌瑞, 徐晓春. 粤东花岗岩及锡、钨矿床的地球化学研究[J]. 资源调查与环境, 1989, 10(1): 27-41.
- Yue Shu-cang, Lei Xin-yong, Gong Chang-rui, Xu Xiao-chun. Geochemical studies on tin and tungsten deposits and granitoid in eastern Guangdong Province [J]. *Resour Surv Environ*, 1989, 10(1): 27-41 (in Chinese with English abstract).
- [24] 徐晓春, 岳书仓. 粤东地区中生代火山岩与侵入岩的成因关系及成因类型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 1994,

- 17(4): 184–192.
- Xu Xiao-chun, Yue Shu-cang. Genetic relationship and type of the Mesozoic volcanic and intrusive rocks in eastern Guangdong, China [J]. J Hefei Univ Technol, 1994, 17(4): 184–192 (in Chinese with English abstract).
- [25] 谢华光, 王文斌. 广东长埔锡矿床的成矿特征及物质来源[J]. 地质找矿论丛, 1989, 4(3): 24–36.
- Xie Hua-guang, Wang Wen-bin. Metallogenic characteristics and substance source of Changpu tin deposit, Guangdong [J]. Contrib Geol Mineral Resour Res, 1989, 4(3): 24–36 (in Chinese with English abstract).
- [26] Black L P, Kamo S L, Allen C M, Aleinikoff J N, Davis D W, Korsch R J, Foudoulis C. TEMORA 1: A new zircon standard for Phanerozoic U-Pb geochronology [J]. Chem Geol, 2003, 200(1): 155–170.
- [27] 涂湘林, 张红, 邓文峰, 凌明星, 梁华英, 刘颖, 孙卫东. RESOLUTION 激光剥蚀系统在微量元素原位微区分析中的应用[J]. 地球化学, 2011, 40(1): 83–98.
- Tu Xiang-lin, Zhang Hong, Deng Wen-feng, Ling Ming-xing, Liang Hua-ying, Liu Ying, Sun Wei-dong. Application of RESOLUTION *in-situ* laser ablation ICP-MS in trace element analyses [J]. Geochimica, 2011, 40(1): 83–98 (in Chinese with English abstract).
- [28] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Gao C G, Zong K Q, Wang D B. 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]. J Petrol, 2010, 51: 537–571.
- [29] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel [R]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 4(1): 1–71.
- [30] Li X H, Long W G, Li Q L, Liu Y, Zheng Y F, Yang Y H, Chamberlain K R, Wan D F, Guo C H, Wang X C, Tao H. Penglai zircon megacrysts: A potential new working reference material for microbeam determination of Hf-O isotopes and U-Pb age [J]. Geostand Geoanal Res, 2010, 34(2): 117–134.
- [31] Chu N C, Taylor R N, Chavagnac V, Nesbitt R W, Boella R M, Milton J A, German C, Bayon G, Burton K. Hf isotope ratio analysis using multi-collector inductively coupled plasma mass spectrometry: An evaluation of isobaric interference corrections [J]. J Anal Atom Spect, 2002, 17(12): 1567–1574.
- [32] Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U-Pb geochronology [J]. Chem Geol, 2006, 234(1/2): 105–126.
- [33] Scherer E, Munker C, Mezger K. Calibration of the lutetium-hafnium clock [J]. Science, 2001, 293(5530): 683–687.
- [34] Blichert-Toft J, Albarede F. The Lu-Hf isotope geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle crust system [J]. Earth Planet Sci Lett, 1997, 148(1/2): 243–258.
- [35] Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y. Zircon geochemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes [J]. Lithos, 2002, 61(3/4): 237–269.
- [36] Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps [M]. Pagel M, Barbin V, Blanc P, Ohnenstetter D. Cathodoluminescence in Geosciences. Berlin: Springer, 2000: 373–400.
- [37] Belousova E A, Griffin W L, Suzanne Y, O'Reilly, Fisher N I. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type [J]. Contrib Mineral Petrol, 2002, 143(5): 602–622.
- [38] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(16): 1589–1604.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. The genesis of zircon and the constraints on the interpretation of U-Pb age [J]. Chinese Sci Bull, 2004, 49(16): 1589–1604 (in Chinese).
- [39] 丘增旺, 王核, 汪礼明, 卜安, 李莎莎, 慕生禄, 李沛, 魏小鹏. 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[J]. 大地构造与成矿学, 2016, 待刊.
- Qiu Zeng-wang, Wang He, Wang Li-ming, Bu An, Li Sha-sha, Mu Sheng-lu, Li Pei, Wei Xiao-peng. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Lu-Hf isotopes of the granite porphyry in the Taoxihu tin polymetallic deposit, Guangdong Province, SE China and its geological significance [J]. Geotecton Metallogen, 2016, in Press (in Chinese with English abstract).
- [40] Zhang Y, Yang J H, Sun J F, Zhang J H, Chen J Y, Li X H. Petrogenesis of Jurassic fractionated I-type granites in Southeast China: Constraints from whole-rock geochemical and zircon U-Pb and Hf-O isotopes [J]. J Asian Earth Sci, 2015, 111: 268–283.
- [41] 刘鹏, 程彦博, 毛景文, 王小雨, 姚薇, 陈叙涛, 曾晓剑. 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, 2015, 89(7): 1244–1257.
- Liu Peng, Cheng Yan-bo, Mao Jing-wen, Wang Xiao-yu, Yao Wei, Chen Xu-tao, Zeng Xiao-jian. Zircon U-Pb age and Hf isotopic characteristics of granite from the Tiandong W-Sn polymetallic deposit in Eastern Guangdong Province and its significance [J]. Acta Geol Sinica, 2015, 89(5): 1244–1257 (in Chinese with English abstract).
- [42] 赵希林, 余明刚, 刘凯, 毛建仁, 叶海敏, 邢光福. 粤东地区早白垩世花岗岩浆作用及其成因演化[J]. 地质论评, 2012, 58(5): 965–977.
- Zhao Xi-lin, Yu Ming-gang, Liu Kai, Mao Jian-ren, Ye Hai-min, Xing Guang-fu. The magmatic and genetic evolution of Early Cretaceous granitoids in eastern Guangdong Province [J]. Geol Rev, 2012, 58(5): 965–977 (in Chinese with English abstract).
- [43] Guo F, Fan W M, Li C W, Zhao L, Li H X, Yang J H. 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, 2012, 150: 62–84.
- [44] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185–220.
- Wu Fu-yuan, Li Xian-hua, Zheng Yong-fei, Gao Shan. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology [J]. Acta Petrol Sinica, 2007, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract).
- [45] 郑永飞, 魏春生, 王峥嵘, 黄耀生, 张宏. 大龙山岩体冷却史及其成矿关系的同位素研究[J]. 地质科学, 1997, 32(4): 465–477.
- Zheng Yong-fei, Wei Chun-sheng, Wang Zheng-rong, Huang Yao-sheng, Zhang Hong. An isotope study on the cooling his-

- tory of the Dalongshan granite massif and its bearing on mineralization process [J]. *Sci Geol Sinica*, 1997, 32(4): 465-477 (in Chinese with English abstract).
- [46] Cherniak D J, Watson E B, Grove M, Harrison T M. Pb diffusion in monazite: A combined RBS/SIMS study [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68(4): 829-840.
- [47] 尹家衡, 黄光昭, 徐明华. 粤东中生代火山旋回划分及对比[J]. *资源调查与环境*, 1989, 10(4): 16-28.
Yin Jia-heng, Huang Guang-zhao, Xu Ming-hua. Division and correlation of Mesozoic volcanic-cycles in east Guangdong [J]. *Resour Surv Environ*, 1989, 10(4): 16-28 (in Chinese with English abstract).
- [48] 毛建仁, 苏郁香, 陈三元, 程启芬. 东南沿海中生代侵入岩及与火山岩的时空关系[J]. *资源调查与环境*, 1989, 10(3): 44-59.
Mao Jian-ren, Su Yu-xiang, Chen San-yuan, Cheng Qi-fen. Mesozoic intrusive rocks and their time-space relation with volcanic rocks in southeastern coast of China [J]. *Resour Surv Environ*, 1989, 10(3): 44-59 (in Chinese with English abstract).
- [49] 徐晓春, 岳书仓. 粤东地区中生代岩浆作用的大地构造背景及构造-岩浆演化[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 1996, 19(1): 127-134.
Xu Xiao-chun, Yue Shu-cang. Tectonic background and evolution of Mesozoic magmatism, eastern Guangdong Province [J]. *J Hefei Univ Technol*, 1996, 19(1): 127-134 (in Chinese with English abstract).
- [50] 陶奎元, 谢家莹, 阮宏宏, 谢芳贵, 薛怀民. 中国东南沿海中生代火山作用基本特征[J]. *资源调查与环境*, 1988, 9(4): 12-28.
Tao Kui-yuan, Xie Jia-ying, Ruan Hong-hong, Xie Fang-gui, Xue Huai-ming. Characteristics of the Mesozoic volcanism in the coastal margin of southeastern China [J]. *Resour Surv Environ*, 1988, 9(4): 12-28 (in Chinese with English abstract).
- [51] 徐晓春, 岳书仓. 粤东中生代火山-侵入杂岩的地壳深熔成因——Pb-Nd-Sr 多元同位素体系制约[J]. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 829-835.
Xu Xiao-chun, Yue Shu-cang. Continental crust anatexite: the genesis of Mesozoic granitic volcanic-intrusive complexes, eastern Guangdong Province — Constraints on Pb-Nd-Sr multi-element isotopic systems [J]. *Geol Rev*, 1999, 45(suppl): 829-835 (in Chinese with English abstract).
- [52] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. *Tectonophysics*, 2000, 326(3/4): 269-287.
- [53] Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S, Niu Y L. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution [J]. *Episodes*, 2006, 29(1): 26-33.
- [54] Li Z X, Li X H. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model [J]. *Geology*, 2007, 35(2): 179-182.
- [55] Wong J, Sun M, Xing G F, Li X H, Zhao G C, Wong K, Yuan C, Xia X P, Li L M, Wu F Y. Geochemical and zircon U-Pb and Hf isotopic study of the Baijhuajian metaluminous A-type granite: Extension at 125-100 Ma and its tectonic significance for South China [J]. *Lithos*, 2009, 112: 289-305.
- [56] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 张长青, 梅燕雄. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. *地质前缘*, 2004, 11(1): 45-54.
Mao Jing-wen, Xie Gui-qing, Li Xiao-feng, Zhang Chang-qing, Mei Yan-xiong. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 45-55 (in Chinese with English abstract).
- [57] Gilder S A, Gill J, Coe R S, Zhao X X, Liu Z W, Wang G X, Yuan K R, Liu W L, Kuang G D, Wu H R. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. *J Geophys Res*, 1996, 101: 16137-16154.
- [58] Wang Y J, Fan W M, Cawood P A, Li S Z. Sr-Nd-Pb isotopic constraints on multiple mantle domains for Mesozoic mafic rocks beneath the South China Block hinterland [J]. *Lithos*, 2008, 106: 297-308.
- [59] Wang F Y, Ling M X, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Yang X Y, Liang H Y, Fan W M, Sun W D. Mesozoic large magmatic events and mineralization in SE China: Oblique subduction of the Pacific plate [J]. *Int Geol Rev*, 2011, 53: 704-726.
- [60] Ling M X, Wang F Y, Ding X, Hu Y H, Zhou J B, Zartman R E, Yang X Y, Sun W D. Cretaceous ridge subduction along the Lower Yangtze River Belt, eastern China [J]. *Econ Geol*, 2009, 104: 303-321.
- [61] Sun W D, Ding X, Hu Y H, Li X H. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west Pacific[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 262: 533-542.
- [62] Li X H, Li Z X, Ge W C, Zhou H W, Li W X, Liu Y, Wingate M T D. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. *Precamb Res*, 2003, 122: 45-83.
- [63] 谢桂青. 中国东南部晚中生代以来的基性岩脉(体)的地质地球化学特征及其地球动力学意义初探——以江西省为例[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2003: 1-128.
Xie Gui-qing. Late Mesozoic mafic dikes (body) from southeastern China: Geological and geochemical characteristics and its geodynamics) — A Case of Jiangxi Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2003: 1-128 (in Chinese with English abstract).
- [64] Pearce J A. Sources and settings of granitic rocks [J]. *Episodes*, 1996, 19(4): 120-125.
- [65] Batchelor R A, Bowden P. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters [J]. *Chem geol*, 1985, 48(1): 43-55.
- [66] 丘元禧, 丘津松, 李建超, 钟宏平. 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*, 1991 (14): 93-106.
Qiu Yuan-xi, Qiu Jin-song, Li Jian-chao, Zhong Hong-ping. Deformational and metamorphic features of Lianhuashan fault zone during Meso-Cenozoic time and mechanism of their formation [J]. *Bull Inst of Geomechan CAGS*, 1991 (14): 93-106 (in Chinese with English abstract).