

粤东横田花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学和锆石 Lu-Hf 同位素组成及其地质意义

范飞鹏¹, 肖惠良¹, 陈乐柱¹, 李海立¹, 康从轩¹, 刘建雄², 邓中林², 李少斌³, 林梗伟³, 周霞³

FAN Feipeng¹, XIAO Huiliang¹, CHEN Lezhu¹, LI Haili¹, KANG Congxuan¹, LIU Jianxiong², DENG Zhonglin², LI Shaobin³, LIN Gengwei³, ZHOU Xia³

1. 中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京 210016;

2. 广东省佛山地质局, 广东 佛山 528000;

3. 广东省第二地质大队, 广东 汕头 515000

1. Nanjing Center of Geological Survey, CGS, Nanjing 210016, Jiangsu, China;

2. Foshan Geological Bureau of Guangdong Province, Foshan 528000, Guangdong, China;

3. No. 2 Geological Party of Guangdong, Shantou 515300, Guangdong, China

摘要:横田花岗斑岩位于粤东田东钨锡多金属矿床的中部。以横田花岗斑岩为研究对象,开展了 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年、岩石地球化学、锆石 Lu-Hf 同位素组成特征研究。花岗斑岩多呈岩株产出,灰白色,斑状结构,块状构造,主要由斑晶(10%)和基质(90%)组成,斑晶由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成,杂乱分布,粒度为 0.6~6mm,基质由长石、石英、黑云母组成,长石粒度为 0.02~0.25mm。获得花岗斑岩锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $142\pm 1\text{Ma}$,说明岩体形成于早白垩世。主量、微量元素特征显示,花岗斑岩属于高钾钙碱性强过铝质,富集 Rb、U、Nd、Hf 等元素,亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti 等,与高分异的 S 型花岗岩相似。花岗斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于 0,在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 图上,所有样品点均落在球粒陨石演化线之下和华南中元古代基底演化线之上,二阶段模式年龄变化范围为 1.28~1.47Ga,表明成岩物质主要来源于中元古代古老地壳变质泥岩部分熔融。

关键词:粤东;横田;花岗斑岩;SHRIMP 锆石 U-Pb 定年;地球化学;Lu-Hf 同位素

中图分类号:P588.12⁺1;P597⁺.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2017)07-1218-13

Fan F P, Xiao H L, Chen L Z, Li H L, Kang C X, Liu J X, Deng Z L, Li S B, Lin G W, Zhou X. SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and zircon Lu-Hf isotopic composition of Hengtian granite porphyries in eastern Guangdong Province and their geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(7):1218-1230

Abstract: The granite porphyry related to tungsten-tin polymetallic deposits was discovered in Hengtian area, eastern Guangdong Province. In this paper, the authors reported detailed studies of SHRIMP zircon U-Pb dating, major elements, trace elements and zircon Hf isotopic compositions of the granite porphyry. The granite porphyries are mostly grayish white dykes with porphyritic texture and massive structure. They mainly consist of phenocrysts (10%) and matrix (90%), the phenocrysts are composed of plagioclase, K-feldspar, quartz and biotite with particle size of 0.6~6mm in mixed and disorderly distribution, whereas the matrix is composed of feldspar, quartz and biotite, with the feldspar particle size being generally 0.02~0.25mm. Zircon U-Pb age analysis for the granite porphyry yielded a weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ age of $142\pm 1\text{Ma}$, indicating that the rock was formed in Early Cretaceous. Major

收稿日期:2016-09-12;修订日期:2017-01-19

资助项目:中国地质调查局项目《广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区找矿预测模型构建与找矿预测研究》(编号:12120114015701)和

《武夷山成矿带龙泉—上杭地区地质矿产调查》(编号:DD20160037)

作者简介:范飞鹏(1982-),男,硕士,高级工程师,从事矿产资源调查评价、岩石学与矿床学工作。E-mail:fanfp1111@163.com

and trace element characteristics show that the granite porphyry belongs to high potassium calc-alkaline peraluminous series enriched in Rb, U, Nd, HF and depleted in Ba, Nb, Sr, P, Ti, similar to features of highly fractionated S-type granites. The $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of the granite porphyry are less than 0; in $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ and $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ diagrams, all points fall under the chondritic evolution line and above the south of the Mesoproterozoic basement evolution line. Moreover, the ages are between 1.28Ga and 1.47Ga, indicating that rock-forming materials were mainly derived from the partial melting of metamorphic mudstone in Mesoproterozoic ancient crust.

Key words: eastern Guangdong Province; Hengtian; granite porphyry; SHRIMP zircon U-Pb dating; geochemistry; Lu-Hf isotopes

华南中生代花岗岩成因、形成构造环境、运动机制及其与成矿关系是当前研究的热点^[1-7]。虽然大多数学者认为,华南中生代花岗岩的构造环境和形成机制与太平洋板块俯冲有关,但对其形成过程的认识还存在分歧,主要观点有洋脊俯冲^[8-9]、平板俯冲^[10]、俯冲方向变化^[8]、俯冲角度变化^[7,11]、俯冲板块后撤^[12]、俯冲引起弧后伸展^[13]等。另外,还有学者提出了地幔柱构造模型^[14]、圈层滑脱和洋陆过渡型的构造模型^[15]。

粤东地区位于南岭东西向构造-岩浆带与东南沿海北东向火山带复合部位(图1-a),该区出露大量的中生代火山岩和大规模的中生代花岗岩^[16-20],形成遍及全区的火山-侵入杂岩^[11-2,16-17]。这些中生代岩浆活动与区内的钨、锡、铜、金、铅、锌等矿产有密切的成因联系。但华南西南缘(粤东地区)研究程度总体较东南缘低,主要研究工作集中于20世纪八九十年代,除部分测年数据精度稍高外^[16,21-23],其余测年数据精度低^[21,24-26]。近年来,在以上研究的基础上,很多学者对该地区的花岗岩和矿产进行了研究^[27-29],获得了一些高精度测年数据和资料。笔者所在项目组根据“广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区找矿预测模型构建与找矿预测研究”专题任务,对厚婆坳地区岩浆成因、构造-岩浆演化与成矿关系进行了综合研究。由于特殊的构造-岩浆活动部位,本次研究对区内2个带的岩浆时空演化关系进行了详细研究,在刘鹏等^[29]研究的基础上,选取粤东田东锡多金属矿区与矿化关系密切的花岗斑岩进行 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及锆石 Lu-Hf 同位素研究,探讨岩石成因、构造背景及其与成矿的关系,丰富该地区不同花岗岩类的成岩成矿特征。

1 地质背景

粤东地区出露上三叠统一下侏罗统沉积岩和第四系沉积物^[30-31]。上三叠统一下侏罗统海相类复理石含铁磷建造为粤东地区主要沉积层位,中

侏罗统为湖泊相含火山质碎屑岩建造,上侏罗统为中酸性陆相火山岩建造。区内岩浆活动强烈,花岗岩以中生代花岗岩为主,多为I型和S型火山-侵入杂岩,与区内金属矿床的成矿作用有密切的成因联系^[1-2,18,32-33]。火山岩主要为晚侏罗世火山岩。海西期-印支期岩浆和火山活动微弱,燕山期岩浆活动持久而频繁,早期主要为花岗岩和花岗闪长岩,晚期为黑云母花岗岩、花岗斑岩及火山岩,火山活动早期为海相中基性火山岩,中晚期则为陆相中酸性火山岩。区内断裂构造发育,主要由北东向海丰-丰顺超岩石圈断裂带、北东向莲花山断裂带、东西向佛冈-丰良、北西向绕平-大埔断裂带组成,这些断裂带的交会部位和与之相关的次级断裂控制着粤东地区中生代岩体、盆地和矿产的分布、规模和产出特征。该地区发育大量的锡、钨、铜、银、金多金属矿床(点),构造-岩浆活动关系非常密切(图1-b)。

横田位于田东锡多金属矿区(潮州市北西约22km)中东部,矿区内发育多个钨、锡、铅锌多金属矿点(矿化点)。整个矿区沉积盖层主要为下侏罗统长埔组 and 上龙水组、三叠系-侏罗系银瓶山组及全新统。矿区发育近东西向的背斜,由东向西贯穿全区,发育的断裂主要为北东向和北西向。区内出露大面积早侏罗世-早白垩世侵入岩,主要岩性为中粒斑状黑云母二长花岗岩、细粒斑状角闪黑云二长花岗岩、细粒含斑黑云母正长花岗岩、细粒含斑黑云母二长花岗岩和花岗斑岩,另外可见花岗闪长岩脉或岩株(图1-c)。区内矿脉多呈近东西向和近南北向分布,多沿背斜核部及岩体内外接触带分布,在空间上与花岗斑岩关系较密切。

2 岩体岩相学

花岗斑岩多分布在横田矿段,呈岩株产出,多侵入长埔组、上水龙组和银瓶山组地层中,在花岗

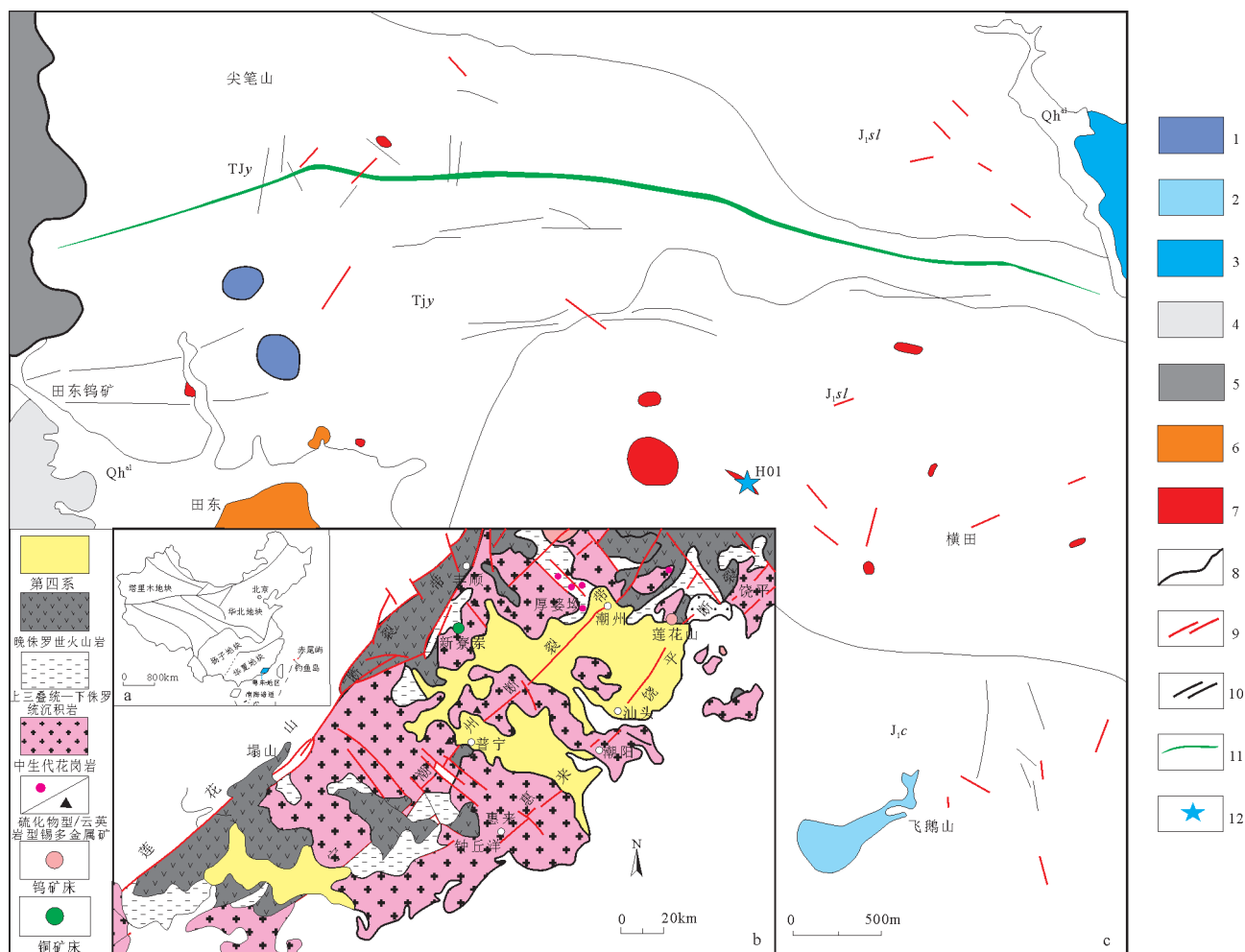


图1 矿区地质简图(据参考文献[16]①修改)

Fig. 1 Generalized geological map of the Tiandong ore district

Qh^{al}—全新世冲积物;J_{1c}—上龙水组;Tjy—银瓶山组;1—早白垩世细粒含斑黑云母二长花岗岩;
2—早白垩世花岗岩斑岩;3—早白垩世细粒含斑黑云母正长花岗岩;4—早侏罗世中细粒斑状角闪黑云二长
花岗岩;5—早侏罗世中粒斑状黑云母二长花岗岩;6—花岗闪长岩脉或岩株;7—花岗斑岩脉或
岩株;8—地质界线;9—断层;10—矿脉;11—背斜轴线;12—同位素样品采样位置

斑岩内外接触带普遍发生云英岩化,肉眼可见到锡石、黑钨矿、辉钼矿等。岩石表面见褐铁矿化,呈蜂窝状,发育一组节理,产状 $225^{\circ}\angle 63^{\circ}$,密度5条/m(图2-a)。

花岗斑岩呈灰白色,斑状结构,块状构造(图2-b)。主要由斑晶(10%)和基质(90%)组成,具多斑结构,基质以微细粒结构为主。斑晶由斜长石、钾长石、石英、黑云母组成,杂乱分布,粒度为0.6~6mm。斜长石斑晶占15%~20%,钾长石斑晶占20%~25%,石英斑晶约占10%,黑云母斑晶含量小于1%。基质由长石、石英、黑云母组成,长石粒度主要为0.02~

0.25mm,少数为0.25~1mm,以斜长石为主,钾长石次之,占25%~35%;石英呈他形粒状,占10%~15%;黑云母呈片状,星散状分布,部分被绿泥石、白云母交代。

3 样品及测试方法

同位素样品采自横田一带的花岗斑岩体(图1-c),共取1件样品(H01(花岗斑岩):北纬 $23^{\circ}44'24.99''$ 、东经 $116^{\circ}28'46.34''$),同时采集配套岩石化学样品1件。

主量元素采用XRF法分析,测试工作在国土资



图2 花岗斑岩特征

Fig. 2 Characteristics of granite porphyry

a—地貌露头;b—标本

源部华东矿产资源监督检测中心完成。稀土和微量元素采用等离子质谱仪定量分析,测试工作在中国科学院地球化学研究所完成。

锆石单矿物分选在河北省廊坊市诚信地质服务有限公司实验室完成。新鲜岩石样品经人工破碎后进行人工分选和淘洗,在双目镜下根据锆石颜色、自形程度、形态、透明度等初步分类,挑选出测年锆石颗粒。在北京离子探针中心,将挑选的锆石和标样一起放置在玻璃板上,用环氧树脂做成样品靶,将靶上锆石磨至一半并抛光,使锆石内部暴露^[34-35]。进行透射光、反射光照相、阴极发光(CL)和背散射扫描电镜图像分析,选取锆石中没有裂纹和包体的部位作为测试点。SHRIMP 锆石 U-Pb 分析在中国地质科学院北京离子探针中心 SHRIMP II 上完成,分析原理和流程见参考文献[36-38]。在分析过程中,一次离子流强度 4nA,一次离子流束斑为 25 μm 。每个数据点测试由 5 组扫描获得。标样选择、年龄校正、详细的 SHRIMP 分析流程、数据处理和年龄计算见参考文献[36-37,39]。普通铅校正根据直接测定的 ^{204}Pb 进行^[40],衰变常数采用 Steiger 等的推荐值^[41],其组成用 Stacey-Kramers 模式给出的相应时间的地壳平均铅同位素^[42]。因年龄小于 1000Ma 的锆石放射成因 ^{207}Pb 量较少,分析中易产生较大误差,因此对年龄小于 1000Ma 的锆石使用 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 年龄。本文数据表中所列数据均为同一

测点连续 5 次分析的平均值,误差为 1σ ,但样品最终年龄结果采用 $^{206}\text{Pb} / ^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值,其误差为 95% 置信度的误差。

Lu-Hf 同位素测试在南京大学内生金属矿床成矿机制国家重点实验室进行,选取对象为 SHRIMP U-Pb 测年所用锆石。所用仪器为 Neptune II MC-ICP-MS,该仪器配有 New Wave UP 213 激光剥蚀探针。对锆石中的年龄测试点采用 44 μm 直径的激光斑束进行原位分析,以氦气为载体气体,同时向气相载体中加入少许氮气以获得更高的灵敏度。测定时使用锆石标样 GJ-1 作为参考物质,分析点与 U-Pb 测年分析点位于同一颗锆石的相同位置。

4 测试结果

4.1 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄

花岗斑岩中的锆石多为透明自形晶体,呈粒状,长 60~150 μm ,长宽比为 1:1~2:1。共选取 23 颗锆石点进行测试,阴极发光图像(图 3-a)显示,大多数锆石具有明暗相间环带,颜色以暗灰色为主,亮白色次之,为典型的岩浆锆石。个别锆石中见包裹体等。

23 颗锆石中除 18 号点偏离谐和线外,其余 22 个点均落于谐和线上(表 1;图 3-b)。22 个数据中 U 含量为 $143 \times 10^{-6} \sim 1797 \times 10^{-6}$,Th 含量为 $45 \times 10^{-6} \sim$

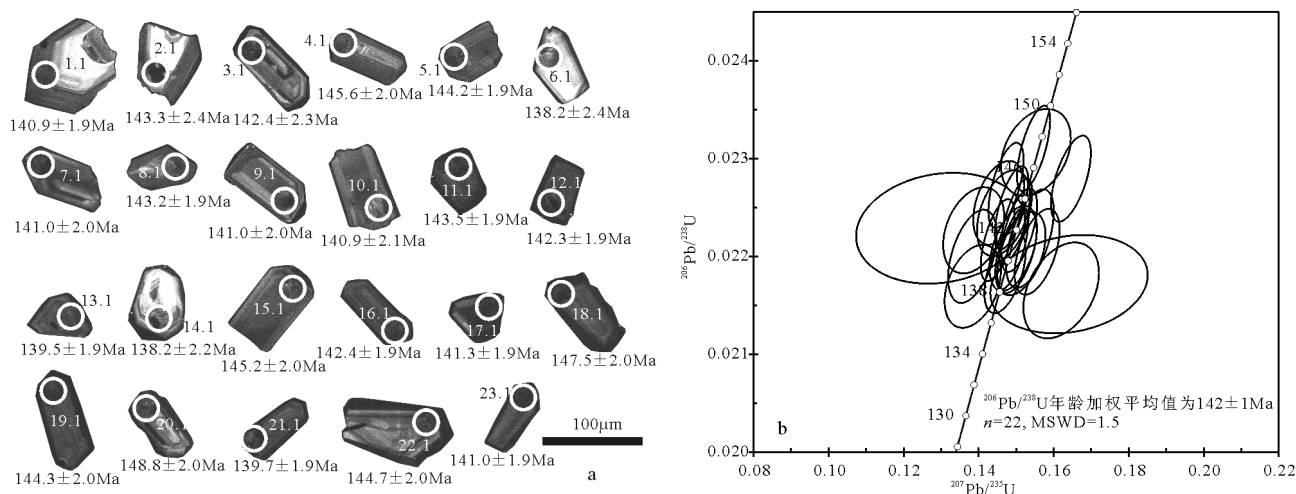


图3 花岗斑岩锆石阴极发光(CL)图像(a)和SHRIMP U-Pb谐和年龄图(b)

Fig. 3 Zircon CL images (a) and SHRIMP zircon U-Pb concordia diagram (b) of granite porphyry

1068×10^{-6} , Th/U 值为 0.32~0.75, 多数大于 0.4, 具有典型的岩浆锆石特征。 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 138~143 Ma, 年龄加权平均值为 $142 \pm 1 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.5$, $n=22$), 代表岩体的结晶年龄, 表明岩体形成于早白垩世。

4.2 地球化学特征

本次采集花岗斑岩地球化学分析样品 2 件, 搜集粤东地区前人花岗斑岩样品 7 件, 分析结果见表 2。从表 2 可以看出, 区内及粤东花岗斑岩在主量

元素组成上具有富硅、富碱的特征, 研究区 2 个样品的 SiO_2 含量为 75.12%~77.06%, 其余 SiO_2 含量为 73.38%~77.18%, 多数大于 75%; 区内 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4\% \sim 7.45\%$, 粤东地区 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 4.99\% \sim 8.38\%$, 大多数相对富钾(图 4-a)。区内花岗斑岩的 A/CNK 值为 1.196~2.813, 其余 A/CNK 值为 1.098~1.638, 表明区内及粤东地区岩体均属于强过铝质花岗岩(图 4-b)。

相对于原始地幔, 花岗斑岩表现为相对亏损大

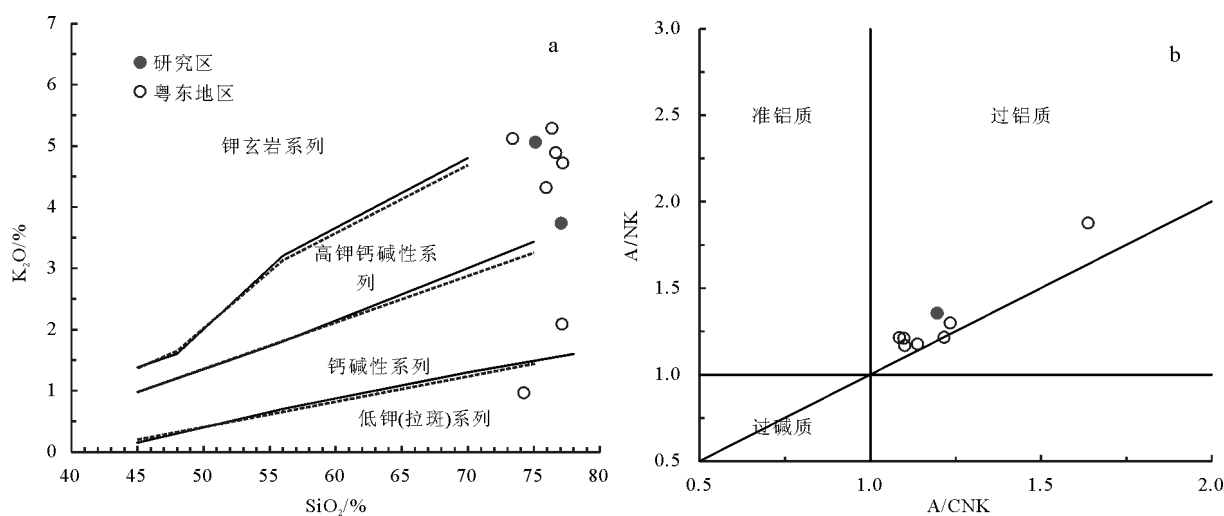
图4 花岗斑岩 SiO_2 - K_2O 图解(a, 底图据参考文献[46])和 A/CNK-A/NK 图解(b, 底图据参考文献[47])(a 图中, 实线据参考文献[48]; 虚线据参考文献[49])Fig. 4 SiO_2 - K_2O (a) and A/CNK-A/NK (b) plots of granite porphyry

表 1 花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 同位素测试分析结果

Table 1 SHRIMP zircon U-Pb data of granite porphyry

测试点	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*/\%$	$^{206}\text{Pb}/\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{206}\text{Pb}^*$	$\pm\%$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$\pm\%$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma
H01-1.1	652	235	0.37	12.3	--	0.04960	2.1	0.1511	2.4	0.02210	1.3	140.9 ± 1.9
H01-2.1	143	45	0.32	2.78	1.23	0.04870	4.6	0.1510	4.9	0.02247	1.6	143.3 ± 2.4
H01-3.1	700	338	0.50	13.4	0.10	0.05570	1.9	0.1714	2.4	0.02233	1.5	142.4 ± 2.3
H01-4.1	1081	511	0.49	21.1	0.00	0.05101	1.5	0.1606	2.0	0.02284	1.3	145.6 ± 2.0
H01-5.1	1279	617	0.50	24.8	0.06	0.04960	2.3	0.1546	2.6	0.02263	1.3	144.2 ± 1.9
H01-6.1	285	196	0.71	5.30	--	0.05510	3.0	0.1647	3.3	0.02167	1.5	138.2 ± 2.4
H01-7.1	947	408	0.45	17.9	0.12	0.05263	1.7	0.1605	2.1	0.02211	1.3	141.0 ± 1.9
H01-8.1	694	219	0.33	13.3	0.48	0.05220	1.9	0.1616	2.3	0.02246	1.3	143.2 ± 1.9
H01-9.1	607	300	0.51	11.5	--	0.05350	2.1	0.1630	2.4	0.02211	1.3	141.0 ± 2.0
H01-10.1	895	333	0.38	17.0	0.37	0.04923	1.8	0.1500	2.3	0.02210	1.4	140.9 ± 2.1
H01-11.1	1797	956	0.55	34.5	--	0.05335	1.2	0.1656	1.7	0.02251	1.2	143.5 ± 1.9
H01-12.1	1466	702	0.50	27.9	0.05	0.05334	1.3	0.1642	1.8	0.02233	1.3	142.3 ± 1.9
H01-13.1	876	354	0.42	16.4	0.45	0.05282	1.8	0.1593	2.2	0.02187	1.3	139.5 ± 1.9
H01-14.1	304	164	0.56	5.65	--	0.05330	3.3	0.1592	3.6	0.02168	1.4	138.2 ± 2.2
H01-15.1	943	408	0.45	18.4	--	0.05193	1.7	0.1631	2.1	0.02278	1.3	145.2 ± 2.0
H01-16.1	1168	538	0.48	22.3	--	0.05153	1.6	0.1587	2.0	0.02234	1.3	142.4 ± 1.9
H01-17.1	1687	777	0.48	32.0	--	0.05179	1.3	0.1582	1.8	0.02216	1.2	141.3 ± 1.9
H01-18.1	1588	881	0.57	31.5	--	0.05007	1.3	0.1598	1.8	0.02315	1.2	147.5 ± 2.0
H01-19.1	1118	507	0.47	21.6	0.26	0.05452	1.4	0.1702	1.9	0.02264	1.3	144.3 ± 2.0
H01-20.1	1012	445	0.45	20.1	0.38	0.05900	2.3	0.1900	2.6	0.02336	1.3	148.8 ± 2.0
H01-21.1	1027	434	0.44	19.3	0.11	0.05120	1.7	0.1547	2.1	0.02191	1.3	139.7 ± 1.9
H01-22.1	1465	1068	0.75	28.3	0.03	0.05503	1.2	0.1722	1.8	0.02270	1.2	144.7 ± 2.0
H01-23.1	1102	551	0.52	20.9	--	0.05201	1.8	0.1586	2.2	0.02212	1.3	141.0 ± 1.9

注: Pb 和 Pb* 分别代表普通铅和放射铅

离子亲石元素 Ba、Sr 和高场元素 Nb、P、Ti, 富集大离子亲石元素 Rb 和高场元素 U、Zr、Hf、Ce、Sm、Y, 以及轻稀土元素 La、Nd (图 5-a; 表 2)。由表 2 可知, 区内花岗斑岩稀土元素总量 (ΣREE) 为 $113.63 \times 10^{-6} \sim 153.29 \times 10^{-6}$, 粤东地区花岗斑岩为 151.56×10^{-6} 。稀土元素球粒陨石标准化配分曲线 (图 5-b) 显示, 区内花岗斑岩与粤东地区花岗斑岩相似, 略右倾, 总体呈海鸥状, 具有明显的四分组特征, 轻、重稀土元素分异不明显, 其中区内花岗斑岩 $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 1.66~4.80, 粤东地区花岗斑岩为 4.66。Eu 明显负异常, 其中区内花岗斑岩 δEu 为 0.06~0.31, 粤东地区花岗斑岩为 0.23。Ce 无明显异常, δCe 值均在 1.0 左右。

4.3 Lu-Hf 同位素特征

本次选择在 U-Pb 年龄所测同一锆石的同一位置进行 Lu-Hf 同位素分析, 结果如表 3 所示。花岗斑岩中锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0005 \sim 0.0018$, 低于上地壳值 ($^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}=0.0093$)。 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值在

0.282566~0.282650 之间, 平均值为 0.282606。计算所得的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值介于 -4.61~-1.78 之间, 平均值为 -3.29, 大多数集中于 -4.0~-3.0 之间 (图 6-a); 二阶段模式年龄 T_{DM2} 变化范围为 1.28~1.47 Ga 之间, 平均值为 1.38 Ga (图 6-b)。 $f_{\text{Lu-Hf}}$ 值在 -0.99~-0.95 之间, 小于镁铁质地壳的 $f_{\text{Lu-Hf}}$ 值 (-0.34^[51]) 和硅铝质地壳的 $f_{\text{Lu-Hf}}$ 值 (-0.72^[52])。

5 讨论

5.1 岩石形成时间

矿区内发生了多次岩浆活动事件, 分别发生在早侏罗世、晚侏罗世和早白垩世, 获得区内中粒花岗岩、粗粒花岗岩、细粒黑云母花岗岩锆石年龄分别为 $191.5 \pm 0.9 \text{ Ma}$ 、 $158.0 \pm 1.3 \text{ Ma}$ 和 $140.5 \pm 0.8 \text{ Ma}$ ^[30]。本次对未作报道的花岗斑岩进行了研究, 获得的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄加权平均值为 $142 \pm 1 \text{ Ma}$, 说明该岩体形成于早白垩世。

东南沿海火山-侵入岩带岩浆活动发生于 190~

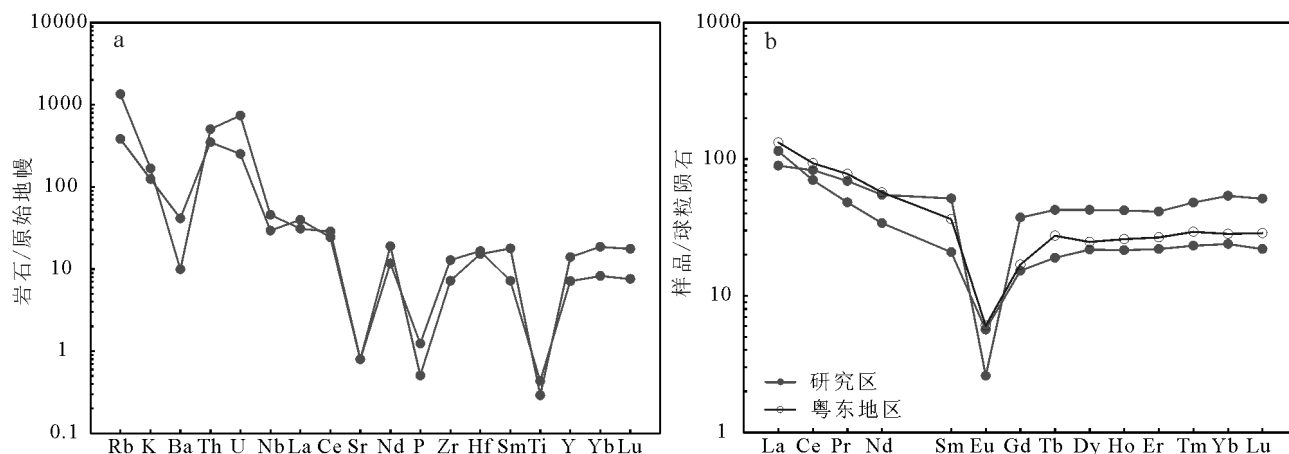


图5 花岗斑岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(a)和球粒陨石标准化稀土元素配分图(b)(标准化值据参考文献[50])

Fig. 5 Primitive mantle-normalized trace element patterns (a) and chondrite-normalized REE patterns (b) of granite porphyry

80Ma, 出现 3 个峰值, 分别为 170~155Ma、145~130Ma、110~90Ma^{[13,19,27,29,53-66]⑤⑥}。粤东地区岩浆活动和成矿时间主要集中在晚侏罗世(161~145Ma)和早白垩世(145~120Ma)^{[16,21-23,28-29]①⑤⑥}。晚侏罗世是粤东地区岩浆活动的高峰期和锡铜矿主要形成期,如厚婆埗、新寮崇、金坑等;早白垩世火山活动和侵入岩活动的强度与规模为区内最大,是粤东地区非常重要的一个成矿期,形成了很多的钨矿和成钨岩体,如莲揭阳葫芦田岩体、揭阳塘湖山岩体、澄海莲花山钨矿。矿区与花岗斑岩关系密切的辉钼矿 Re-Os 同位素加权平均年龄为 $139.4 \pm 2.2\text{Ma}$ ^[67],

该成矿时间与花岗斑岩的形成时间一致,也与粤东地区早白垩世花岗斑岩和与之相关的成矿时间^[43-45]一致。

5.2 岩石成因类型

花岗岩类是地壳的重要组成部分,已成为地质学者的主要研究对象。Chappell 等^[68]首次提出了 I 型和 S 型花岗岩,随后得到广泛应用,又出现了 M 型(mantle-type)和 A 型花岗岩^[69-72]。根据构造环境,又出现了造山型花岗岩、非造山花岗岩^[73]等。以往学者提出了 20 种以上的花岗岩类型,但当前最流行的花岗岩类分类方案主要为 M、S、I、A 型花

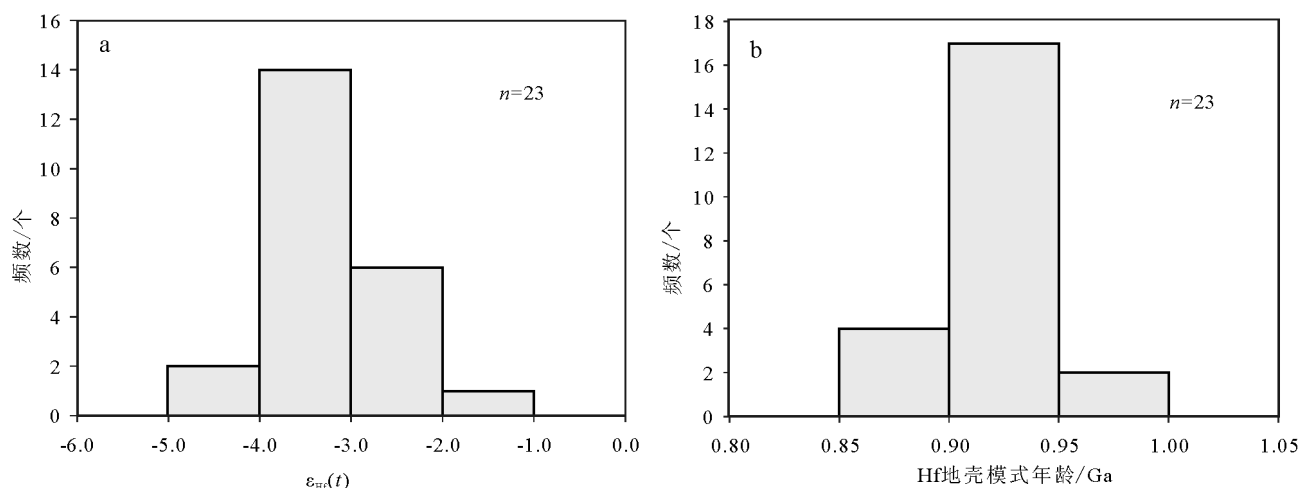


图6 花岗斑岩锆石 Lu-Hf 同位素组成(a)和模式年龄统计直方图(b)

Fig. 6 Histograms of $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and Lu-Hf model ages (b) of zircons for granite porphyry

表 2 花岗斑岩主量、微量和稀土元素分析结果

Table 2 Major, trace and rare earth element compositions of granite porphyry

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	77.06	75.12	75.93	76.66	77.18	73.38	76.37	74.24	77.12	Ba	289.38	69.32	160.55(4)						
TiO ₂	0.094	0.063	0.186	0.07	0.07	0.19	0	0.05	0.08	Hf	5.12	4.71					5.9		
Al ₂ O ₃	13.07	12.78	12.49	12.62	12.41	13.27	12.71	15.31	13.22	Ta	3.18	6.62	3.5(4)						
Fe ₂ O ₃	2.75	0.42	0.82	0.88	0.72	1.06	0.49	0.41	0.46	W	503	1140	4.29(4)				5		
FeO	0.4	1.55	0.66	1.19	0.71	1.54	1.23	0.41	2.1	Tl	1.34	1.52							
MnO	0.0065	0.065		0.08	0.03	0.07	0.03	0.03	0.04	Pb	25.4	12	46.83(4)						
MgO	0.14	0.057	0.3	0.15	0.11	0.28	0.13	0.13	0.86	Bi	15.4	1.36	0.3(4)						
CaO	0.094	0.7	0.59	0.01	0.21	0.73	0.29	0.45	0.57	Th	29.65	42.81							
Na ₂ O	0.26	2.39	3.42	3.08	3.29	3.26	2.46	7.32	2.90	U	5.28	15.51							
K ₂ O	3.74	5.06	4.32	4.89	4.72	5.12	5.29	0.97	2.09	Mo	2.27	0.465	4.09(4)						
P ₂ O ₅	0.027	0.011	0.03	0.01	0.01	0.06		0.15	0.06	Ag	0.377	0.504							
灼失	2.27	1.34		0.56	0.59	1.11			1.03	Cd	1.17	1.11	0.15(4)						
总计	99.90	99.56	98.77		98.05	100.05		99.90		In	0.411	0.299							
分异指数(DI)	86.19	90.88	92.17	94.43	95.28	90.99	93.15	95.18	85.68	Sn	26.8	19.8	1.2(4)				86	100	
液相线温度	682	728	720	720	708	771	716	762	709	Sb	0.259	0.0482	0.15(4)						
H ₂ O 含量	5.16	4.63	4.72	4.73	4.86	4.15	4.77	4.25	4.84	La	27.18	21.20	31.41						
A/CNK	2.813	1.196	1.098	1.216	1.138	1.085	1.234	1.101	1.638	Ce	43.06	50.89	57.18						
A/NK	2.913	1.356	1.211	1.217	1.178	1.215	1.299	1.169	1.878	Pr	4.58	6.56	7.41						
SI	1.97	0.6	3.16	1.47	1.15	2.49	1.35	1.41	10.23	Nd	15.85	25.59	26.65						
AR	1.87	2.1	3.19	2.9	3.18	2.74	2.22	3.22	2.13	Sm	3.19	7.90	5.56						
A/MF	2.95	4.44	4.55	3.95	5.63	3.12	4.71	10.67	2.3	Eu	0.33	0.15	0.35						
C/MF	0.04	0.44	0.39	0.01	0.17	0.31	0.2	0.57	0.18	Gd	3.13	7.69	3.47						
Li	16.10	94.50	7.05(4)							Tb	0.71	1.59	1.03						
Be	4.99	4.27	4.44(4)							Dy	5.53	10.81	6.29						
Sc	4.22	3.26								Ho	1.22	2.38	1.47						
V	0.67	1.38	2.59(4)							Er	3.64	6.84	4.43						
Cr	6.12	7.53	53.39(4)							Tm	0.59	1.23	0.75						
Co	221.00	565.00	1.19(4)							Yb	4.06	9.16	4.83						
Ni	5.60	20.30	3.72(4)							Lu	0.56	1.30	0.73						
Cu	7.26	5.84	11.75(4)							Y	32.30	63.30	44.14						
Zn	11.30	38.50	15.74(4)							ΣREE	153.29	113.63	151.56						
Ga	19.90	19.60								LREE	112.28	94.18	128.56						
Ge	1.41	1.74								HREE	41.00	19.44	23.00						
As	166.00	1.81	0.91(4)							LREE/HREE	2.74	4.84	5.59						
Rb	243.10	855.40					204			(La/Yb) _N	1.66	4.80	4.66						
Sr	16.72	16.83					64			δEu	0.06	0.31	0.23						
Zr	144.00	80.50					73			δCe	1.05	0.86	0.89						
Nb	20.90	32.45	9.52(4)							资料来源	本文	本文	③	④	④	④	[43]	[44]	[45]
Cs	4.81	8.96	6.8(4)																

注:(4)表示括号内样品件数;主量元素含量单位为%,稀土和微量元素为10⁻⁶

岗岩,同时也出现了区分这几种类型的花岗岩地球化学甄别方法^[74-77]。

粤东地区花岗岩主要为I型和S型花岗岩^[1,29-30],但由于大地构造背景及其成岩作用方式等不同,导致形成的花岗岩在岩石地球化学特征方面存在很

大差异。

横田花岗斑岩是一种强过铝质的富钾高硅碱性花岗岩(图4;表2),SiO₂含量为75.12%~77.06%;碱含量较高,K₂O+Na₂O=4%~7.45%;A/CNK值为1.196~2.813。花岗斑岩表现为相对亏损大离子亲

表3 花岗斑岩Lu-Hf同位素分析结果
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of granite porphyry

测点编号(原锆石点号)	<i>t</i> /Ma	¹⁷⁶ Yb/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Lu/ ¹⁷⁷ Hf	¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf	2σ	(¹⁷⁶ Hf/ ¹⁷⁷ Hf) _i	ε _{Hf} (<i>t</i>)	<i>T</i> _{DM1} /Ga	<i>T</i> _{DM2}	<i>f</i> _{Lu-Hf}
H01-1(23.1)	141.0	0.0397	0.0014	0.282596	0.000023	0.282592	-3.69	0.94	1.40	-0.96
H01-2(22.1)	144.7	0.0376	0.0013	0.282618	0.000022	0.282614	-2.82	0.91	1.35	-0.96
H01-3(21.1)	139.7	0.0454	0.0016	0.282611	0.000027	0.282607	-3.20	0.92	1.37	-0.95
H01-4(20.1)	148.8	0.0250	0.0009	0.282592	0.000025	0.282589	-3.62	0.93	1.41	-0.97
H01-5(19.1)	144.3	0.0401	0.0014	0.282596	0.000018	0.282592	-3.62	0.94	1.40	-0.96
H01-6(18.1)	147.5	0.0397	0.0015	0.282566	0.000025	0.282562	-4.61	0.98	1.47	-0.96
H01-7(17.1)	141.3	0.0489	0.0018	0.282616	0.000018	0.282611	-3.01	0.92	1.36	-0.95
H01-8(16.1)	142.4	0.0362	0.0013	0.282610	0.000019	0.282606	-3.15	0.92	1.37	-0.96
H01-9(15.1)	145.2	0.0406	0.0015	0.282597	0.000024	0.282593	-3.57	0.94	1.40	-0.95
H01-10(14.1)	138.2	0.0310	0.0012	0.282589	0.000024	0.282586	-3.97	0.94	1.42	-0.97
H01-11(13.1)	139.5	0.0303	0.0011	0.282618	0.000024	0.282615	-2.91	0.90	1.35	-0.97
H01-12(12.1)	142.3	0.0453	0.0017	0.282634	0.000026	0.282630	-2.34	0.89	1.32	-0.95
H01-13(11.1)	143.5	0.0344	0.0013	0.282592	0.000025	0.282589	-3.76	0.94	1.41	-0.96
H01-14(10.1)	140.9	0.0352	0.0013	0.282600	0.000022	0.282597	-3.54	0.93	1.39	-0.96
H01-15(9.1)	141.0	0.0418	0.0015	0.282598	0.000024	0.282594	-3.63	0.94	1.40	-0.95
H01-16(8.1)	143.2	0.0271	0.0010	0.282589	0.000019	0.282586	-3.85	0.94	1.42	-0.97
H01-17(7.1)	141.0	0.0394	0.0014	0.282650	0.000021	0.282646	-1.78	0.86	1.28	-0.96
H01-18(6.1)	138.2	0.0444	0.0016	0.282640	0.000024	0.282636	-2.21	0.88	1.31	-0.95
H01-19(5.1)	144.2	0.0421	0.0015	0.282599	0.000020	0.282595	-3.52	0.94	1.40	-0.95
H01-20(4.1)	145.6	0.0313	0.0011	0.282583	0.000023	0.282580	-4.02	0.95	1.43	-0.97
H01-21(3.1)	142.4	0.0356	0.0013	0.282617	0.000020	0.282614	-2.90	0.91	1.36	-0.96
H01-22(2.1)	143.3	0.0131	0.0005	0.282632	0.000017	0.282631	-2.28	0.87	1.32	-0.99
H01-23(1.1)	140.9	0.0281	0.0010	0.282589	0.000020	0.282586	-3.90	0.94	1.42	-0.97

石元素 Ba、Sr 和高场元素 Nb、P、Ti, 富集大离子亲石元素 Rb 和高场元素 U、Zr、Hf、Ce、Sm、Y, 轻稀土元素 La、Nd(图 5-a; 表 2)。稀土元素总量较高 ($113.63 \times 10^{-6} \sim 153.29 \times 10^{-6}$), 总体呈海鸥状, 具有明显的四分组特征, 轻、重稀土元素分异不明显, 有强烈的负 Eu 异常(图 5-b)。由于元素 Rb、K 与 Sr、Ca 有相似的地球化学性质和地球化学行为, 随着壳幔分离和陆壳的逐渐演化, Rb 富集于成熟度高的地壳中, Sr 富集于成熟度低、演化不充分的地壳中。Rb/Sr 值能灵敏地记录源区物质的性质, 当 Rb/Sr > 0.9 时, 样品为 S 型花岗岩; 当 Rb/Sr < 0.9 时, 样品为 I 型花岗岩^[78], 本区花岗斑岩 Rb/Sr 值为 14.54~50.83。显微镜下对岩石薄片观察发现, 不含角闪石, 含斜长石、钾长石、石英和黑云母斑晶, 见白云母交代黑云母。根据地球化学性质及镜下观察结果, 花岗斑岩不属于 I 型花岗岩, 而与 S 型花岗岩相似。从区内花岗斑岩 Ce+Zr+Y+Nb 和 (K₂O+Na₂O)/CaO 特征^[79]看, 具有 A 型花岗岩和高分异花岗岩的特征。高场强元素 Ce、Zr、Y 和 Nb 含量偏低

(表 2), Ce+Zr+Y+Nb 总和为 $227.14 \times 10^{-6} \sim 240.26 \times 10^{-6}$, 低于 A 型花岗岩的下限值 (350×10^{-6})^[71]。综合分析, 横田花岗斑岩应该是高分异的 S 型花岗岩。

5.3 岩浆源区讨论

S 型花岗岩的源区一般被认为是变质沉积岩^[79-80]。花岗斑岩的 A/CNK 值为 1.196~2.813 (> 1.1), 属于强过铝质性质。花岗斑岩的 A/MF 值为 2.95~4.44, C/MF 值为 0.04~0.44, 与变质泥岩和变质砂岩部分熔融区域相符^[81]。因此, 整个粤东地区的花岗斑岩均与变质泥岩分布熔融区一致。

另外, 锆石由于具有高含量的 Hf 和极低的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 值(通常小于 0.002), 形成之后几乎没有明显的放射成因 Hf 的积累和很高的 Hf 同位素体系封闭温度(高于 U-Pb 和 Sm-Nd 体系的封闭温度), 使其保留有原始 Hf 同位素组成, 成为示踪其寄主岩源区属性、探讨母岩浆形成与演化和壳幔相互作用的重要矿物之一^[82]。刘鹏等^[30]对区内其他类型花岗岩进行锆石 Lu-Hf 同位素研究后认为, 花岗岩成岩物质主要来源于中元古代古老地壳部分熔融, 还有

幔源物质的加入。区内花岗斑岩锆石的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.0005~0.0018, 平均值0.0013)均低于0.002, 表明锆石形成后具较低的放射性成因 Hf 的积累; $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值(0.282566~0.282650)均小于0.2827, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(-4.16~-1.78)均小于0, 大多数介于-4.0~-3.0之间(图6-a), 样品 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为-0.99~-0.95, 明显小于镁铁质地壳(-0.34)和硅铝质地壳 $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值(-0.72)^[51]。所以, 样品二阶段模式年龄 T_{DM2} 更能反映横田花岗斑岩从亏损地幔被抽取的时间或源岩在地壳的平均存留年龄。二阶段模式年龄主要介于1.28~1.47Ga 之间(图6-b)。在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 图解(图7-a)和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 图解(图7-b)上, 所有样品点均落在球粒陨石演化线之下、华南中元古代基底演化线之上。综合以上, 表明成岩物质主要来源于中元古代古老地壳变质泥岩和变质砂岩部分熔融。

5.4 地质意义

粤东地区位于东南沿海火山-侵入岩带的西南端, 处于华南大陆边缘, 经历了加里东褶皱造山作用^[83-84]、印支运动和燕山运动的叠加改造^[85-87]。中生代是华南乃至整个东亚大陆大地构造剧烈变动的时期^[87-90]。华南190~160Ma 特提斯构造向太平洋构造域转折阶段^[7], 从约180Ma 开始, 华南尤其是南岭地区进入以岩石圈伸展-减薄为主的地球动力学环境, 并呈现出一种多阶段的伸展^[91-96]。中生代晚期, 古太平洋板块向欧亚板块的俯冲消减, 导致中国东部发生了大规模的中酸性岩浆侵位和火山喷发^[97]。180~170Ma, 华南已经完成了由特提斯构造域向滨太平洋构造域的转换^[5,98-102]。170~160Ma 期间, 华南板块发生俯冲板片多处撕裂, 160~150Ma, 俯冲板

块开天窗, 软流圈物质上涌到地壳形成壳幔源型高分异花岗质岩石^[6,103], 170~150Ma, 中国东南部大部分地区已处于东亚活动大陆边缘构造体制下, 古太平洋板块向东亚陆缘的北西向碰撞挤压作用已经凸显^[28]。147~117Ma, 东南沿海构造带从挤压构造应力体制向伸展构造应力体制转变, 于早白垩世早中期(135Ma)以来发生伸展垮塌^[101]。矿区各类花岗岩反映了粤东地区岩浆活动从太平洋板块开始俯冲到俯冲板片撕裂, 再到俯冲方向调整的整个事件过程^[30]。粤东地区早白垩世成矿事件^[48-50]多沿莲花山断裂带分布, 成矿时间与矿区成矿时间^[67]一致。本次研究认为, 田东矿区横田花岗斑岩可能为太平洋板块俯冲挤压后碰撞应力松弛期, 华南中生代岩石圈伸展事件的产物。

6 结 论

(1)横田花岗斑岩的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 $142 \pm 1\text{Ma}$, 代表岩体的结晶年龄, 表明岩体形成于早白垩世。

(2)横田花岗斑岩属于高钾钙碱性强过铝质花岗岩, 具有高分异的S型花岗岩特征。

(3)横田花岗斑岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均小于0, 在 $t-\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 和 $t-(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$ 图上, 所有样品点均落在球粒陨石演化线之下、华南中元古代基底演化线之上, 二阶段模式年龄 T_{DM2} 变化范围为1.28~1.47Ga, 表明成岩物质主要来源于中元古代古老地壳变质泥岩的部分熔融。

(4)横田花岗斑岩可能为太平洋板块俯冲挤压后碰撞应力松弛期, 华南中生代岩石圈伸展事件的

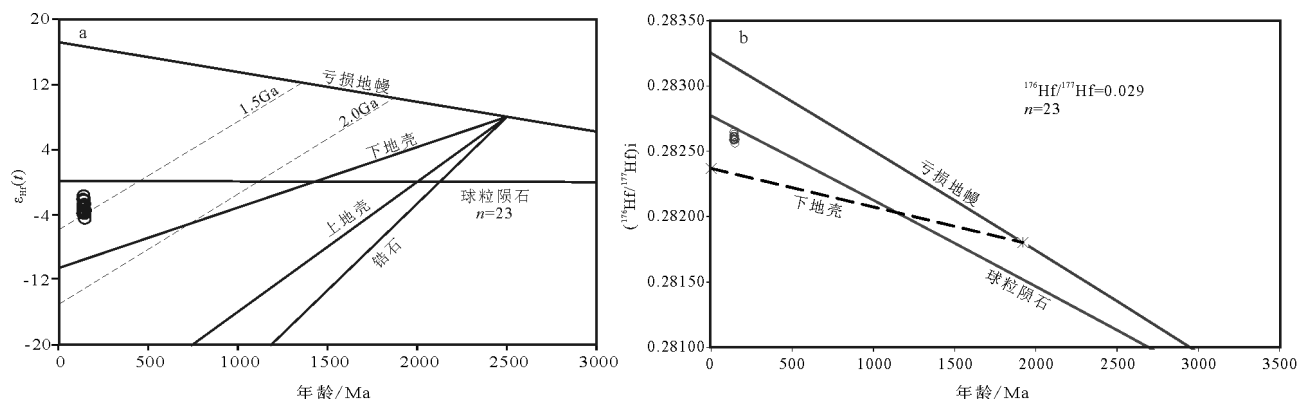


图7 花岗斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄与 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 关系(a)及相关演化图解(b)

Fig. 7 Relationship between SHRIMP zircon U-Pb ages and $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ (a) and associated evolution diagrams (b) of granite porphyry

产物。

致谢:野外调查研究期间得到广东省第二地质大队原队长刘石华、谢色新总工程师及广东省地质调查院同仁的帮助,北京离子探针中心的刘建辉老师指导锆石测年实验和完成了数据处理,岩石地球化学判别图使用路远发教授开发的Geokit软件,审稿专家对本文提出诸多宝贵的意见和建议,在此一并表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]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),1994,4:184-192.
- [2]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),1996,1:127-134.
- [3]周新民.南岭地区晚中生代花岗岩成因与岩石圈动力学演化[M].北京:科学出版社,2007:1-691.
- [4]李献华,李武显,李正祥.再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义[J].科学通报,2007,52(9):981-991.
- [5]毛景文,谢桂青,郭春丽,等.南岭地区大规模锡钨多金属成矿作用:成矿时限及地球动力学背景[J].岩石学报,2007,23(10):2329-2338.
- [6]毛景文,谢桂青,郭春丽,等.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,(4):510-526.
- [7]舒良树.华南构造演化的基本特征[J].地质通报,2012,31(7):1035-1053.
- [8]Sun W D, Ding X, Hua Y, et al. The golden transformation of the Cretaceous plate subduction in the west pacific[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 262: 533-542
- [9]李晓峰, Yasushi W, 华仁民, 等. 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, 2008, 82(5): 625-640.
- [10]Li X H, Li Z X, Li W X, et al. U-Pb Zircon, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on age and origin of Jurassic Iand A-type granites from central Guangdong, SE China: A major igneous event in response to foundering of a subducted flat-slab? [J]. Lithos, 2007, 96: 186-204.
- [11]周新民.对华南花岗岩研究的若干思考[J].高校地质学报,2003,9(4):556-565.
- [12]Niu Y L. Subduction initiation, trench retreat and global tectonic consequences: The origin of backarc basins in the western Pacific and effect on eastern China geology since the Mesozoic, In Plate Tectonics, Geological Events and Resources: New Advances in Geological Sciences[M]. Science Beijing: Press, 2013: 1-25.
- [13]Chen J Y, Yang J H, Zhang J H, et al. Geochemical transition shown by Cretaceous granitoids in southeastern China: Implications for continental crustal reworking and growth[J]. Lithos, 2014, 196: 115-130.
- [14]毛建仁,陶奎元,邢光福,等.中国东南大陆边缘中生代地幔柱活动的岩石学记录[J].地球学报,1999,20(3):253-258.
- [15]万天丰,赵庆乐.中国东部构造-岩浆作用的成因[J].中国科学(D辑),2012,42(2):155-163.
- [16]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,S1:829-835.
- [17]徐晓春,岳书仓.粤东地区中生代火成岩的时空分布:岩石特征及成岩物化条件[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1993,1:1-12.
- [18]徐晓春.粤东中生代火山-侵入杂岩的稀土元素地球化学研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),1993,2:121-127.
- [19]岳书仓,徐晓春.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.
- [20]邢光福.台湾:从粤东沿海逆时针旋转而来的陆块[J].火山地质与矿产,2000,21(3):157-165.
- [21]邢光福,陈荣,杨祝良,等.东南沿海晚白垩世火山岩浆活动特征及其构造背景[J].岩石学报,2009,25(1):77-91.
- [22]满发胜,白玉珍,倪守斌,等.莲花山钨矿床同位素地质学初步研究[J].矿床地质,1983,4:37-44.
- [23]陈惜华,胡祥昭,丛献东.西岭锡矿床岩体含矿性与成因类型的研究[J].地球化学,1986,1:50-57.
- [24]地质矿产部书刊编辑室.全国同位素年龄汇编(3)[M].北京:地质出版社,1983.
- [25]陶奎元,谢家莹,阮宏宏,等.中国东南沿海中生代火山作用基本特征[J].中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,1988,9(4):12-28.
- [26]尹家衡,黄光昭,徐明华.粤东中生代火山旋回划分及对比[J].中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,1989,10(4):16-28.
- [27]李坤英,沈加林,王小平,等.东南沿海火山、侵入杂岩同位素年代学[J].中国地质科学院南京地质矿产研究所所刊,1990,4:45-57.
- [28]赵希林,毛建仁,陈荣,等.闽西南地区紫金山岩体锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J].中国地质,2008,135(4):590-597.
- [29]王小雨.粤东新寮崇铜多金属矿床地质特征及成因初步研究[D].中国地质大学(北京)硕士学位论文,2015:1-99.
- [30]刘鹏,程彦博,毛景文,等.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,2015,7:1244-1257.
- [31]广东省地质矿产局.广东省区域地质志[M].北京:地质出版社,1988:6-274.
- [32]蒙晓莲.粤东地区地层含矿性探讨[J].有色金属矿产与勘查,1994,3:151-157.
- [33]徐晓春,谢巧勤,岳书仓.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),2000,1:99-103.
- [34]宋彪,张玉海,万渝生,等.锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J].地质论评,2002,(S1):26-30.
- [35]陈振宇,周剑雄.锆石等测年矿物的电子探针及阴极射线致发光综合研究新方法[J].地质论评,2002,48(增刊):31-35.

- [36] Compston W, Williams I S, Meyer C. U-Pb geochronology of zircons from lunar breccia 73217 using a sensitive high mass-resolution ion microprobe[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 1984, 89(S02): 525–534.
- [37] Claesson S. Isotopic evidence for the Precambrian provenance and Caledonian metamorphism of high grade paragneisses from the Seve Nappes, Scandinavian Caledonides[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1987, 97(2): 196–204.
- [38] 简平, 刘敦一, 张旗, 等. 蛇绿岩及蛇绿岩中浅色岩的 SHRIMP U-Pb 测年[J]. *地质前缘*, 2003, 4: 439–456.
- [39] Ludwig K R. Users Manual for Isoplot 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley: Berkeley Geochronological Center, Special Publication, 2003.
- [40] Claoué-Long J C, Compston W, Roberts J, et al. Two Carboniferous ages: A comparison of SHRIMP zircon dating with Conventional zircon ages and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Analysis[J]. *Sepm. Spe. Publ.*, 1995, 54: 3–21.
- [41] Steiger R H, Jäger E. Sub commission on geochronology: Convention on the use of decay constants in geo- and cosmochronology[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1977, 36: 359–362.
- [42] Stacey J S, Kramers J D. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 1975, 26: 207–221.
- [43] 沈渭洲, 凌洪飞. 岩背和塌山含锡花岗斑岩的同位素地球化学特征和物质来源[J]. *地球学报*, 1994, Z1: 117–123.
- [44] 刘师先. 塌山斑岩锡矿床地质特征及成矿机理[J]. *地球化学*, 1992, 2: 149–157, 201–202.
- [45] 古法安. 广东省海丰县塌山矿区与斑岩有关的锡矿地质特征及成因[J]. *科技信息(学术研究)*, 2008, 25: 229–230.
- [46] Rollinson H R. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation[M]. New York: Longman Scientific and Technical, 1993: 1–352.
- [47] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1989, 101(5): 635–643.
- [48] Peccerillo R, Taylor S R. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1976, 58: 63–81.
- [49] Middlemost E A K. *Magma and Magmatic Rocks*[M]. London: Longman, 1985: 1–266.
- [50] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]// Saunders A D, Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313–345.
- [51] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, et al. Nature of the Earth's earliest crust from Hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399: 252–255.
- [52] Vervoort J D, Patchett P J, Blichert-Toft J, et al. Relationships between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system[J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1999, 168: 79–99.
- [53] 毛建仁, 许乃政, 胡庆, 等. 福建省上杭一大田地区中生代成岩成矿作用的构造环境演化[J]. *岩石学报*, 2004, 20(2): 285–296.
- [54] 毛建仁, 陈荣, 李奇崛, 等. 闽西南地区晚中生代花岗质岩石的同位素年代学、地球化学及其构造演化[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1723–1734.
- [55] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建太姥山地区花岗岩岩石地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(4): 593–609.
- [56] 李良林, 周汉文, 陈植华, 等. 福建沿海晚中生代花岗质岩石成因及其地质意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(7): 1047–1062.
- [57] 段政, 邢光福, 余明刚, 等. 浙闽边界区晚中生代火山作用时序与过程分析[J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 454–469.
- [58] 胡春杰, 黄文婷, 包志伟, 等. 福建紫金山矿田晚中生代英安玢岩形成时代及其成矿意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 36(2): 284–292.
- [59] 肖爱芳, 黎郭朋, 柳小明. 福建省紫金山铜金矿田石冒山群下组火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年与白垩纪岩浆活动期次[J]. *大地构造与成矿学*, 2012, 26(4): 613–623.
- [60] 张承帅, 苏慧敏, 于森, 等. 福建龙岩大洋-莒州花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr-Nd-Pb 同位素特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 2012, 28(1): 225–242.
- [61] Guo F, Fan W M, Li C W, et al. 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.
- [62] Huang H Q, Li X H, Li Z X, et al. Intraplate crustal remelting as the genesis of Jurassic high-K granites in the coastal region of the Guangdong Province, SE China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 280–302.
- [63] Liu L, Qiu J S, Li Z. Origin of mafic microgranular enclaves (MMEs) and their host quartz monzonites from the Muchen pluton in Zhejiang Province, Southeast China: Implications for magma mixing and crust-mantle interaction[J]. *Lithos*, 2013, 160: 145–163.
- [64] 陈润生, 李建威, 曹康, 等. 闽北上房钨矿床锆石 U-Pb 和辉钼矿 Re-Os 定年及其地质意义[J]. *地质论评*, 2013, 38(2): 289–304.
- [65] 李斌, 赵葵东, 杨水源, 等. 福建紫金山矿田二亩沟铜(金)矿区英安玢岩的成因及其成矿意义[J]. *岩石学报*, 2013, 29(12): 4167–4185.
- [66] 王对兴, 李春麟, 高万里, 等. 浙东早白垩世岩浆混合作用: 新昌小将岩体 U-Pb 年代学及地球化学证据[J]. *岩石学报*, 2013, 29(11): 2993–4003.
- [67] 李海立, 肖惠良, 范飞鹏, 等. 广东潮安飞鹅山钨钼多金属矿床辉钼矿 Re-Os 同位素定年[J]. *地质学报*, 2016, 2: 231–239.
- [68] Chappell B W, White A J R. Two contrasting granite types[J]. *Pac. Geol.*, 1974, 8: 173–174.
- [69] Loiselle M C, Wones D R. Characteristics and origin of anorogenic granites[J]. *Geol. Soc. Am. Abstr. Programs*, 1979, 11: 468.
- [70] Yang C Q. The genetic types of the granitoids in South China[C]// Xu K Q, Tu G Z. *Geology of Granites and Their Metallogenic Relations*. Proceed Int Symp Nanjing Univ. Beijing: Science Press, 1982: 253–276.

- [71] Whalen J B, Currie K L, Chappell B W. A-type granites: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1987, 95(4): 407-419.
- [72] Bonin B. A-type granites and related rocks: Evolution of a concept, problems and prospects[J]. Lithos, 2007, 97(1/2): 1-29.
- [73] Maniar P D, Piccoli P M. Tectonic discrimination of granitoids[J]. Geol. Soc. Am. Bull., 1987, 101: 635-643.
- [74] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25: 956-983.
- [75] Chappell B W, White A J R. I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt[J]. Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences, 1992, 83(1/2): 1-26.
- [76] Landenberger B, Collins W J. Derivation of A-type granites from a dehydrated charnockitic lower crust: Evidence from the Chaelundi Complex, Eastern Australia[J]. Journal of Petrology, 1996, 37(1): 145-170.
- [77] Clemens J D. S-type granitic magmas—petrogenetic issues, models and evidence[J]. Earth-Science Reviews, 2003, 61(1/2): 1-18.
- [78] 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 等. 桐庐 I 和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 1993, 9(1): 44-54.
- [79] Kalsbeek F, Jepsen H F, Nutman A P. From source migmatites to plutons: Tracking the origin of ca. 435Ma S-type granites in the East Greenland Caledonian orogeny[J]. Lithos, 2001, 57(1): 1-21.
- [80] Koester E, Pawley A R, Fernandes L A D, et al. Experimental melting of cordierite gneiss and the petrogenesis of syntranscurrent peraluminous granites in southern Brazil[J]. Journal of Petrology, 2002, 43(8): 1595-1616.
- [81] Alther R, Holl A, Hegner E, et al. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany)[J]. Lithos, 2000, 50: 51-73.
- [82] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 等. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(2): 185-220.
- [83] Li Z X, Li X H, Wartho J A, et al. Magmatic and metamorphic events during the early Paleozoic Wuyi-Yunkai orogeny, south-eastern South China: New age constraints and pressure-temperature conditions[J]. Geological Society of America Bulletin, 2010, 122(5/6): 772-793.
- [84] 舒良树. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带[J]. 高校地质学报, 2006, 12(4): 418-431.
- [85] Huang T K. On Major Tectonic Forms of China[J]. Geological Memoirs: Serial A, 1945, 20: 1-165.
- [86] 任纪舜. 印支运动及其在中国大地构造演化中的意义[J]. 地球学报, 1984, 6(2): 31-42.
- [87] 任纪舜. 论中国南部的大地构造[J]. 地质学报, 1990, 64(4): 275-288.
- [88] 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等. 燕山运动与东亚构造体制的转变[J]. 地质前缘, 2004, 11(3): 319-328.
- [89] Dong S W, Zhang Y Q, Long C X, et al. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the “Yanshan Movement”[J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2): 334-347.
- [90] 董树文, 施炜, 张岳桥, 等. 大巴山晚中生代陆内造山构造应力场[J]. 地球学报, 2010, 31(6): 769-780.
- [91] 彭建堂, 胡瑞忠, 袁顺达, 等. 湘南中生代花岗质岩石成岩成矿作用时限[J]. 地质论评, 2008, 54(5): 617-625.
- [92] 华仁民, 毛景文. 试论中国东部中生代成矿大爆发[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 300-308.
- [93] 华仁民, 陈培荣, 张文兰, 等. 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.
- [94] 华仁民, 李光来, 张文兰, 等. 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.
- [95] 毛景文, 王志良. 中国东部大规模成矿时限及其动力学背景的初步探讨[J]. 矿床地质, 2000, 19(4): 289-296.
- [96] 毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 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): 45-55.
- [97] 王德滋, 沈渭洲. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化[J]. 地质前缘, 2003, 10(3): 209-220.
- [98] 徐夕生, 谢听. 中国东南部晚中生代-新生代玄武岩与壳幔作用[J]. 高校地质学报, 2005, 11(3): 318-334.
- [99] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [100] 徐先兵, 张岳桥, 贾东, 等. 华南早中生代大地构造过程[J]. 中国地质, 2009, 36(3): 573-593.
- [101] 张岳桥, 董树文, 李建华, 等. 华南中生代大地构造研究新进展[J]. 地球学报, 2012, 33(3): 257-279.
- [102] 杨宗永, 何斌. 华南侏罗纪构造体质转换: 碎屑锆石 U-Pb 年代学证据[J]. 大地构造与成矿, 2013, 37(4): 580-591.
- [103] 毛景文, 邵拥军, 谢桂青, 等. 长江中下游成矿带铜陵矿集区铜多金属矿床模型[J]. 矿床地质, 2009, 28(2): 109-119.
- ① 广东省地质调查院. 广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区专项填图与技术应用示范成果报告. 2016.
- ② 南京地质矿产研究所. 中国东南大陆火山地质及矿产. 1991.
- ③ 广东地矿局 722 地质队. 汕头幅 F-50-18-C 澄海幅 F-50-18-D 南澳岛幅 F-50-19-C 潮阳幅 F-50-30-A 东湖幅 F-50-30-B 1/5 万区域地质图说明书. 1993.
- ④ 广东省地质局区域地质调查大队. 汕头幅 F-50-3 惠来幅 F-50-9 1/20 万区域地质调查报告. 1973.
- ⑤ 南京地质调查中心. 广东厚婆坳铜锡多金属矿整装勘查区找矿预测模型构建与找矿预测研究. 2016.
- ⑥ 广东省有色金属地质局九三一队. 广东莲花山断裂带南西段锡铜多金属矿整装勘查成果汇报. 2016.