

粤北白沙地区晚侏罗世高分异 I 型细粒花岗岩年代学、地球化学特征及其地质意义*

黄孔文¹, 郭敏¹, 林杰春¹, 胡启锋¹, 王邱春¹, 汤珂¹, 周晗², 黄一栩²

(1 广东省地质调查院, 广东广州 510080; 2 广东省化工地质勘查院, 广东广州 510800)

摘要 受东西向佛冈-丰良断裂控制的佛冈复式岩体形成于多期次和不同来源的岩浆侵入作用。白沙地区细粒黑云母二长花岗岩体位于佛冈岩体北缘, 是佛冈岩体的一部分, 成因目前还不明确。文章以该岩体细粒黑云母二长花岗岩为研究对象, 进行了岩石学、锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Hf 同位素组成研究。研究结果显示, 白沙地区细粒黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 155.6~157.1 Ma, 表明其侵位于晚侏罗世。岩体具有高硅 ($w(\text{SiO}_2)=70.74\%\sim 77.47\%$)、富碱 ($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=5.78\%\sim 8.62\%$)、低磷 ($w(\text{P}_2\text{O}_5)=0\sim 0.10$) 等特征, 富集 Rb、Th、U、K、Pb、Nd、Zr 和 Hf 等元素, 亏损 Ba、Nb、La、Ce、Sr、P、Eu 和 Ti 等元素。岩石总体上明显富集轻稀土元素 ($(\text{La}/\text{Yb})_N=0.94\sim 54.69$, 1 个为 0.94), 具明显的负 Eu 异常 ($\delta\text{Eu}=0.07\sim 0.57$, $n=6$), 个别正 Eu 异常 ($1.00\sim 1.16$, $n=3$)。岩体地球化学特征指示, 细粒黑云母二长花岗岩为高分异 I 型花岗岩。岩体形成于古太平洋板块(库拉板块)与欧亚板块俯冲作用和菲律宾地块与南中国-印支地块的岩石圈消减作用下, 岩石圈伸展-减薄, 导致地幔物质上涌, 在高温条件热流作用下幔源物质诱导下地壳中-元古代物质部分熔融形成。

关键词 地球化学; 细粒黑云母二长花岗岩; LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄; 高分异 I 型花岗岩; 粤北白沙
中图分类号: P619.22² **文献标志码**: A

Geochemistry and geochronology of highly fractionated I-type fine grain granite in Late Jurassic from Baisha area of northern Guangdong Province and its significance

HUANG KongWen¹, GUO Min¹, LIN JieChun¹, HU QiFeng¹, WANG QiuChun¹, TANG Ke¹,
ZHOu Han² and HUANG YiXu²

(1 Guangdong Geologic Survey Institute, Guangzhou 510080, Guangdong, China; 2 Chemical Geological Exploration Institute of Guangdong, Guangzhou 510800, Guangdong, China)

Abstract

The Fogang complex controlled by East-West Fogang-Fengliang Fault formed from Multi-stages and different source magmatic intrusion. The petrogenesis of the fine-grained monzogranite in the Baisha area at the northern margin of the Fogang complex is still unknown. To solve this question, a compilation of petrology, zircon U-Pb chronology, geochemistry, and Hf isotopes were carried out on these granites. Our results show that the weighted average of the LA-ICP-MS zircon U-Pb ages of fine-grained biotite monzogranite in the Baisha area is 155.6~157.1 Ma, indicating that these granite formed in the late Jurassic. Our results show high content value of $w(\text{SiO}_2)$ (70.74%~77.47%), $w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ (5.78%~8.62%), low content value of $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ (0~0.10%), the enrichment in Rb,

* 本文得到中国地质调查局地质调查项目(编号:DD20160032-17)资助

第一作者简介 黄孔文,男,1985年生,地质矿产工程师,从事区域地质矿产调查及研究。Email:huangkongwen0466@163.com

收稿日期 2019-03-12;改回日期 2020-05-28。赵海杰编辑。

Th, U, K, Pb, Nd, Zr and Hf and depletion of Ba, Nb, Ta, La, Ce, Sr, P and Ti. These samples are characterized by obvious enrichment of REE $[(La/Yb)_n=0.94\sim 54.69]$ and obvious depletion of Eu $[\delta Eu=0.07\sim 0.57(n=6)]$ with a little enrichment of Eu $[1.00\sim 1.16(n=3)]$, indicating that these granites belong to highly fractionated I-type granite. The fine-grained granite from the Baisha area in the northern Guangdong likely formed in the post-collision stage of the subduction of the Paleo-Pacific plate and Philippine Blocks to the Eurasian plate. The resulting lithosphere extension and thinning may lead to the upwelling of mantle material, revealing that the Late Jurassic fine particle biotite adamellite mainly originated from the Palaeoproterozoic rock of the crust in the high-temperature condition, accompanied by a small amount of the mantle-derived material.

Key words: geochemistry, fine-grained granite, zircon U-Pb dating, highly fractionated I-type granite, northern Guangdong Baisha

花岗岩研究在大陆动力学研究中具有重要的指示意义。受东西向佛冈-丰良断裂控制的佛冈岩体的形成机制备受关注,原因是其明显不同于沿海地区呈北东向展布的其他花岗质岩体,且岩体来源于多期次、不同来源的岩浆侵入作用:佛冈岩体主体岩性为中侏罗世晚期粗粒-斑状黑云母花岗岩,占杂岩体总体面积85%以上,因使用不同划分准则,可划分为A型(包志伟等,2003;肖振宇等,1998)、I型(庄文明等,2000)、S型(涂光帜等,1979;赵子杰等,1987;梁敦杰等,1988;陈小明等,2002)和高分异I型花岗岩(邱检生等,2005;陈璟元等,2015)。关于岩石来源及特征方面也有不同观点,广东新丰乌石村见早侏罗世(Sm-Nd法,(206±26)Ma;Rb-Sr法,(198±13)Ma)华南同熔型石英闪长岩(黄友义等,2000);广东新丰乌石闪长岩为中侏罗晚期(LA-ICP-MS法和Rb-Sr法,160 Ma(徐夕生等,2007))高钾钙碱性系列岩体,来源于地幔部分熔融产生的新生幔源玄武质岩浆与下地壳玄武质岩石脱水部分熔融产生的混合岩浆;广东从化石岭以西从化石岭可见拉张环境下形成的早白垩世(Rb-Sr法,(144.9±5.9)Ma)方钠石正长岩为碱性正长岩(刘昌实等,2003);广东龙口南昆山见燕山晚期伸展背景形成的A型碱长花岗岩体(刘昌实等,2005);广东省从化市南的腊圃角闪黑云二长花岗岩锆石U-Pb为(163±1.2)Ma,是下地壳部分熔融的产物。但前人对佛冈复式岩体北缘白沙地区细粒二长花岗岩缺少年代学、地球化学和岩浆源区等方面的研究。

本文对白沙区晚侏罗世细粒二长花岗岩进行岩石学、地球化学、LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学和Hf同位素等工作,揭示该期岩体岩石学、年代学、源区及其演化规律,并为研究佛冈岩体演化提供证据。

1 区域地质背景

研究区位于广东省英德市白沙地区内,大地构造位于华夏板块(图1a),出露于近东西向展布佛冈岩体中段北侧边缘部位(图1b)。研究区内,泥盆系碎屑岩、碳酸盐岩主要分布于研究区北侧,石炭系碳酸盐岩主要分布于研究区北侧,三叠系碎屑岩主要分布于研究区北西侧,第四系出露较为普遍(图1c)。

研究区内岩体位于佛冈岩体北缘,为燕山期侵入活动形成的复式岩基,形成于中-晚侏罗世和白垩世。中侏罗世侵入岩体在本区普遍发育,岩性为粗、中粒斑状黑云母二长花岗岩和中粒斑状黑云母二长花岗岩,为超大型离子吸附型轻稀土矿赋存的地质体,局部见中粒斑状正长花岗岩和中粒含斑黑云母二长花岗岩,呈逐渐过渡。晚侏罗世侵入岩体主要分布于研究区中部、东侧和南西侧一带,岩性主要为中粒斑状黑云母二长花岗岩、细粒斑状黑云母二长花岗岩和细粒(含斑)黑云母二长花岗岩。本次针对晚侏罗世侵入岩边缘相的细粒(含斑)黑云母二长花岗岩进行研究。

研究区中部锁洞村以西和白沙镇以南等地可见早白垩世侵入岩,岩性主要为细粒黑云母二长花岗岩,侵入中-晚侏罗世岩体中,其内接触带可见早期侵入岩捕虏体,同时见电气石化、纳长石化和绿泥石化等蚀变。此外,新丰县遥田镇下遥村附近出露约1 km²晚白垩世粗中粒黑云母二长花岗岩。

2 岩体特征与样品描述

岩体主要分布于新丰县遥田镇鹿子坑-下洞以北一带、茶坑和英德市白沙镇小梅坑等地,由3个侵

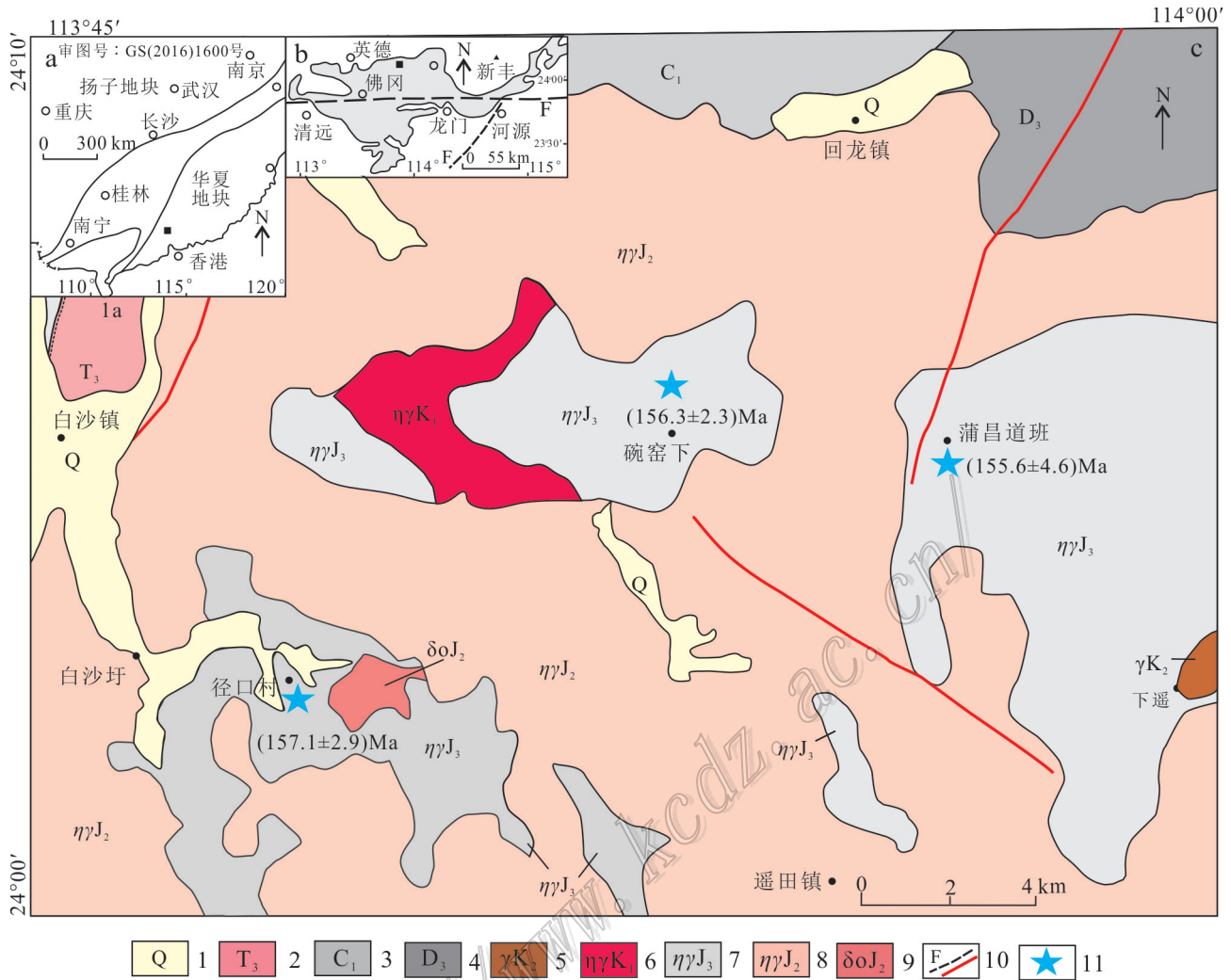


图1 粤北白沙地区大地构造位置(a)、佛冈岩体展布图(b)及白沙地区地质简图(c)

1—第四系;2—晚三叠世;3—早石炭世;4—晚泥盆世;5—晚白垩世花岗岩;6—早白垩世花岗岩;7—晚侏罗世花岗岩;8—中侏罗世中粒斑状黑云母二长花岗岩;9—中侏罗世石英闪长岩;10—断裂;11—采样位置

Fig.1 Geotectonic location map (a), distribution map of Fogang intrusion(b) and geological map of Baisha area (c) in northern Guangdong Province

1—Quaternary; 2—Late Triassic; 3—Early Carboniferous; 4—Late Devonian; 5—Late Cretaceous granite; 6—Early Cretaceous granite; 7—Late Jurassic granite; 8—The Middle Jurassic coarse-medium-grained biotite monzogranite; 9—The Middle Jurassic quartz diorite; 10—Fault; 11—Sampling location

入岩体组成,呈岩株产出,出露面积25.65 km²,占总面积的1.36%。该期岩体的中心相到边缘相呈逐渐过渡:中心相为粗中粒斑状黑云母二长花岗岩,逐渐过渡为粗中粒黑云母二长花岗岩、细粒斑状黑云母二长花岗岩和,边缘相为细粒(含斑)黑云母二长花岗岩;在新丰县遥田镇围心-下遥一带见该期岩体的中心相为粗中粒(黑云母)二长花岗岩,逐渐过渡为中粒(黑云母)二长花岗岩,边缘相为细粒(含斑)黑

云母二长花岗岩;于沙田镇下遥一带,该期侵入体呈南北向展布,呈岩株产出,与同期岩浆活动产物晚侏罗世细粒黑云母二长花岗岩呈脉动型侵入接触。岩体侵入于中侏罗世细粒石英闪长岩和中粒斑状黑云母二长花岗岩,内接触带见钠长石化和绿泥石化蚀变,外接触带见钾化等蚀变。

侵入岩岩石样品岩性主要为细粒(含斑)黑云母二长花岗岩(图2),呈肉红色-浅灰色,细粒花岗结

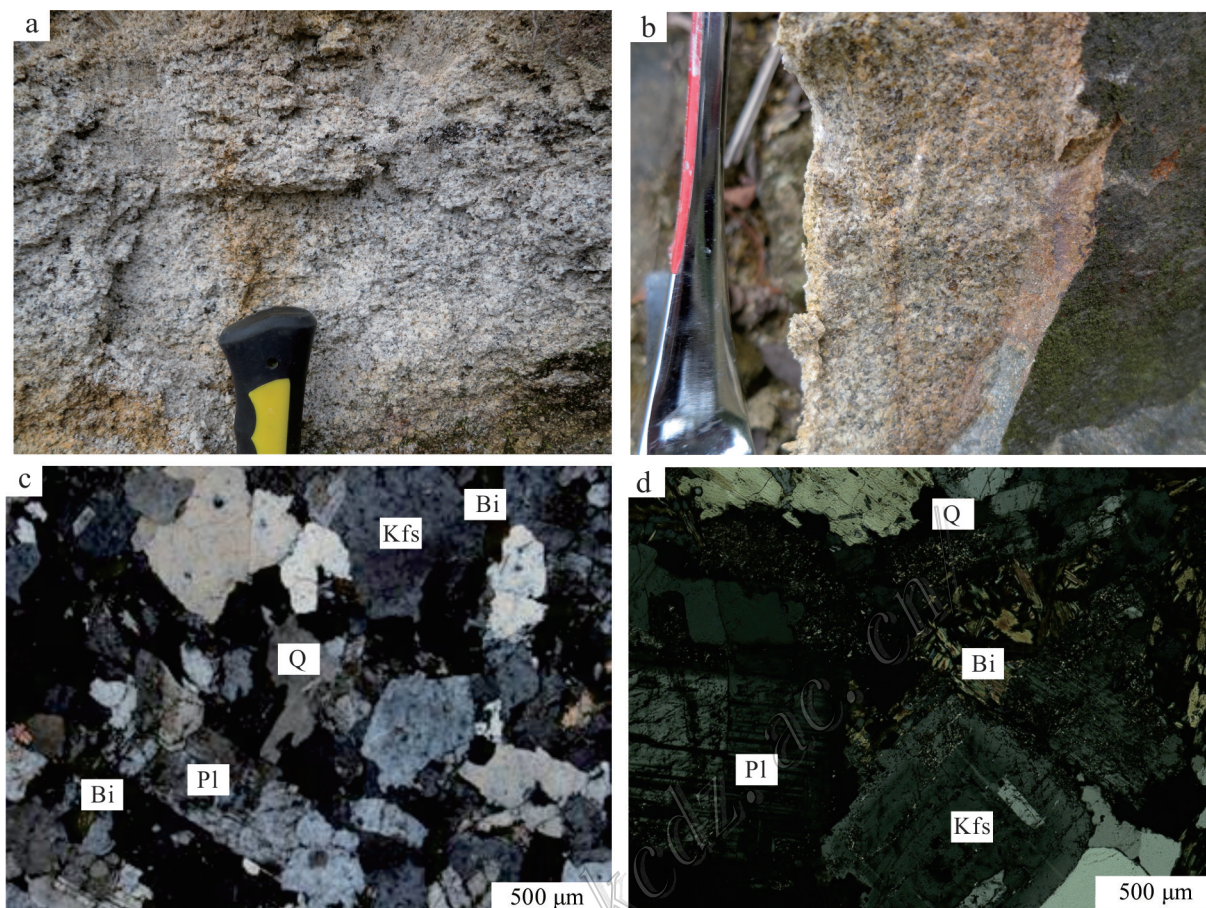


图 2 细粒黑云母二长花岗岩野外照片(a)、手标本照片(b)及显微镜下照片(c、d)

Pl—斜长石;Kfs—钾长石;Q—石英;Bi—黑云母

Fig.2 Photos (a, b) and microphotographs (c, d) of fine-grained biotite monzogranite

Pl—Plagioclase; Kfs—K-feldspar; Q—Quartz; Bi—Biotite

构,局部见似斑状结构,主要由钾长石(34%~45%)、石英(25%~30%)、斜长石(30%~35%)和黑云母(3%~10%)等组成。斑晶主要为钾长石,呈自形,粒径多5~8 mm,个别大于15 mm。钾长石主要为微斜微纹长石,呈半自形-他形晶粒状,具格状双晶及钠长石显微条纹,粒度多为0.4~2 mm。斜长石呈自形-半自形板状,具聚片双晶,为更长石(牌号:20~29),粒度在0.4~2.0 mm之间。石英呈他形晶粒状,粒度多为0.4~2.0 mm±, >2~4 mm者次之。黑云母呈片状,粒度多在0.2~2.0 mm之间。副矿物多呈黑云母包裹体出现。副矿物组合为磁铁矿-独居石(钛铁矿)-锆石型。

3 分析方法

岩石主量元素、微量元素、稀土元素等在河北区

域地质矿产调查研究所实验室完成。主量元素测试用硅酸岩岩石化学分析方法,主要检测仪器为Axios max X射线荧光光谱仪,FeO测试用氧化亚铁量测定法,主要检测仪器为50 ml滴定管,分析精度一般优于2%;灼失量、H₂O+、H₂O测试采用化合水测定法,主要检测仪器为P124S电子分析天平;稀土、微量元素测试方法采用硅酸岩岩石化学分析:44个元素量测定,采用酸溶法制备样品,主要检测仪器为X Serise 2电感耦合等离子体质谱仪,相对误差不大于5%,测试方法见高剑峰等(2003)。

锆石单矿物分选是在河北省廊坊市诚信地质技术服务公司完成。制靶及锆石阴极发光是在北京皓年领航科技有限公司完成。参照锆石阴极发光(CL)及透反射光图像,选择锆石颗粒表面无裂痕、内部环带清晰、无包裹体的位置做U-Pb定年的测试点。锆石U-Pb同位素定年在安徽合肥工业大学利

用LA-ICP-MS分析完成。试仪器为Agilent 7500a,激光剥蚀系统为GeoLas 2005,激光剥蚀斑束直径为32 μm ,激光剥蚀深度为20~40 μm 。对分析数据的离线处理采用软件ICP-MS DataCal完成详细的仪器操作条件和数据处理方法同Liu等(2010a; 2010b)详细描述。数据处理采用Ludwig (2003)SQUID1.0及Isoplot程序。数据处理采用Ludwig K R(2003)SQUID1.0及Isoplot程序。普通Pb采用 ^{204}Pb 校正,标准样和未知样的普通Pb校正用Stacey等(1975)的417 Ma模型 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=0.864$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}=2.097$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}=18.052$ 。

锆石Hf同位素测试是在北京科荟测试技术有限公司Neptune plus多接收等离子质谱及配套的ESI NWR193紫外激光剥蚀系统(LA-ICP-MS)上进行,实验过程中采用He作为剥蚀物质载气,剥蚀直径为50 μm ,测定时使用锆石国际标样GJ1作为参考物质,分析点与U-Pb分析点为同一位置。分析过程中锆石标准GJ1的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 测试加权平均值为 $0.282\ 007\pm 0.000\ 007$,与文献报道值在误差范围内完全一致。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学特征

岩石的主微量元素分析结果见表1。从表中可见,样品的 $w(\text{SiO}_2)$ 为70.74%~77.47%, $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为12.49%~15.41%,全碱 $w(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ 为7.62%~8.62%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为0.97~2.02。 $w(\text{TFe}_2\text{O}_3)$ 为0.63%~3.82%。在TAS分类图(图3)中,样品投影在花岗岩区域内,在 $w(\text{SiO}_2)$ - $w(\text{K}_2\text{O})$ 图(图4)中,样品投影点落在高钾钙碱性区域内。样品的铝饱和指数(A/CNK)在1.01~1.46之间,A/NK-A/CNK(图5)投影在过铝质区域内。从表1可以看出,岩石的分异指数(DI)较高(88.52~96.63),固结指数(SI)较低(0.84~5.90),表明岩体岩浆分异程度相对较高。综上所述,样品为钙碱性过铝质、高钾钙碱性、高分异的细粒黑云母二长花岗岩。

样品的稀土元素含量及其比值变化范围基本一致(表1),均具有相似的稀土元素地球化学特征。稀土元素总量 $w(\Sigma\text{REE})$ 为 $(68.72\sim 345.2)\times 10^{-6}$,轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)为2.24~24.73, $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为0.94~54.69, δEu 为0.07~0.57($n=6$),少量正Eu异常(1.00~1.16, $n=3$),表明该期侵入岩明显具轻稀

土元素富集、稀土元素配分模式相似以及总体为右倾斜等特征(图6),且大部分具有明显的Eu亏损,少量表现为正Eu异常。相对平坦的稀土元素配分模式以及较微弱的Eu异常特点表明岩浆源区相对较浅,残留相中有斜长石,而没有石榴子石。该稀土元素配分曲线与下地壳稀土元素总量相近,与地壳球粒陨石标准化曲线相一致,表明其成岩物质很可能来自上、下地壳混合岩。

在微量元素原始地幔标准化图解(图7)中,样品具有相似的配分模式,富集Rb、Th、U、K、Pb、Nd、Zr和Hf等元素,亏损Ba、Nb、Ta、La、Ce、Sr、P和Ti等元素。具体数据见表1。

4.2 锆石U-Pb定年结果

对不同位置细粒黑云母二长花岗岩进行LA-ICP-MS锆石定年,所得详细数据见表2,U-Pb谐和年龄见图8。

白沙镇径口-坪子村样品D7271dy和D5104dy的锆石呈浅玫瑰色、浅黄色,半自形柱状、次棱角柱状,个别呈长柱状,粒径以50~250 μm 为主,个别为260~300 μm 。阴极发光图像可见清晰环带,锆石Th/U比值大于0.1(Th/U=0.11~0.90),为典型的岩浆锆石(吴元保等,2004;钟玉芳等,2006)。分析41个点,剔除谐和度小于90%的5个测点和前侏罗纪捕获锆石20个测点,其余16个测点年龄全部落在谐和曲线或者临近谐和曲线(图8a), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于151~169 Ma。测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (157.1 ± 2.9) Ma(MSWD=1.7)。

白沙镇碗窑下以北1 km样品D5005dy,将原定为早白垩世侵入岩修定为晚侏罗世侵入岩体,锆石呈黄粉色、褐粉色,半自形柱状,长、宽比为1:1至4.6:1,颗粒大小以20~250 μm 为主,少量为250~600 μm ,锆石Th/U比值为0.10~1.05,CL图像显示锆石发育典型的震荡环带结构,表明其为岩浆成因锆石(吴元保等,2004;钟玉芳等,2006)。对该样品的41颗锆石进行了U-Pb同位素分析,剔除谐和度小于90%的12个测点和前侏罗纪捕获锆石14个测点,其余15个测点年龄全部落在谐和曲线或者临近谐和曲线(图8b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于150.6~168.9 Ma。测点 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (156.3 ± 2.3) Ma(MSWD=2.3),该年龄代表细粒黑云母二长花岗岩的结晶年龄。

采自回龙镇蒲昌道班样品D5061dy,将原定为中侏罗世细粒黑云母二长花岗岩修正为晚侏罗世

表 1 细粒花岗岩主量元素、微量元素和稀土元素分析结果
 Table 1 The analysis results of the major, trace elements and rare earth elements
 for the fine-grained granites

组分	D5164fx	D5005fx	D5061fx	D5199fx2	D3186fx	D5104fx	D7271fx	D7301fx1	D7302fx
	-	D5005dy	D5061dy	-	-	D5104dy	D7271dy	-	-
	<i>w(B)/%</i>								
SiO ₂	77.47	74.73	74.31	77.03	74.11	74.33	71.84	75.01	70.64
TiO ₂	0.07	0.17	0.18	0.08	0.22	0.14	0.22	0.16	0.37
Al ₂ O ₃	12.49	13.73	13.77	12.79	13.73	14.63	15.41	14.36	15.33
Fe ₂ O ₃	0.35	1.12	1.10	0.74	0.82	0.35	0.44	0.73	1.43
FeO	0.31	0.46	0.45	0.12	0.78	0.60	0.72	0.17	1.18
MnO	0.05	0.02	0.02	0.11	0.04	0.02	0.02	0.02	0.04
MgO	0.08	0.27	0.27	0.21	0.30	0.35	0.41	0.37	0.63
CaO	0.39	0.26	0.31	0.29	0.90	0.21	0.95	0.23	0.30
Na ₂ O	4.21	2.87	3.08	4.16	2.65	3.50	2.68	3.87	2.71
K ₂ O	4.36	5.40	5.54	4.12	5.35	4.83	5.11	3.75	5.07
P ₂ O ₅	0	0.06	0.07	0.01	0.05	0.02	0.06	0.03	0.10
灼失量	0.19	0.82	0.82	0.31	0.96	0.83	1.02	1.14	2.04
总和	99.97	99.92	99.91	99.97	99.90	99.82	99.79	99.83	99.84
刚玉(C)	0.14	2.85	2.33	0.98	2.06	3.32	3.88	3.58	5.09
Mg [#]	18.61	24.98	24.89	31.89	25.73	40.61	39.77	44.18	31.33
K ₂ O/Na ₂ O	1.04	1.88	1.80	0.99	2.02	1.38	1.91	0.97	1.87
TF ₂ O ₃	0.63	1.48	1.45	0.79	1.54	0.93	1.14	0.84	2.52
CaO/Na ₂ O	0.06	0.06	0.07	0.09	0.09	0.10	0.11	0.35	1.10
A/CNK	1.01	1.25	1.19	1.08	1.16	1.29	1.32	1.32	1.46
A/NK	1.07	1.30	1.25	1.13	1.35	1.33	1.55	1.38	1.54
SI	0.84	2.71	2.56	2.18	2.82	3.73	4.16	4.20	5.90
DI	96.63	92.79	93.12	95.70	89.82	92.48	88.71	93.19	88.52
σ	2.13	2.15	2.36	2.01	2.05	2.21	2.08	1.81	2.16
	<i>w(B)/10⁻⁶</i>								
La	14.05	93.58	49.14	8.86	48.6	17.44	41.6	26.0	58.9
Ce	38.20	98.55	95.15	23.5	91.0	29.93	64.6	35.2	107
Pr	3.50	19.96	10.78	2.60	11.1	3.22	7.97	5.69	12.7
Nd	12.10	74.54	40.45	9.72	40.2	11.90	25.0	19.5	42.6
Sm	2.24	14.71	7.73	2.81	8.15	2.03	3.78	3.73	7.90
Eu	0.06	1.74	0.73	0.068	1.11	0.78	1.14	1.13	1.34
Gd	2.08	14.04	6.85	2.78	7.21	2.04	2.95	3.02	6.08
Tb	0.32	2.24	1.02	0.67	1.27	0.33	0.32	0.46	0.81
Dy	1.95	12.24	5.35	5.01	7.34	2.29	1.21	2.49	3.61
Ho	0.43	2.14	0.94	1.17	1.27	0.47	0.20	0.46	0.60
Er	1.46	5.43	2.58	4.14	3.84	1.42	0.57	1.38	1.69
Tm	0.28	0.78	0.40	0.85	0.60	0.24	0.072	0.23	0.26
Yb	2.15	4.68	2.34	5.60	3.99	1.54	0.45	1.49	1.67

续表 1
Continued Table 1

组分	D5164fx	D5005fx	D5061fx	D5199fx2	D3186fx	D5104fx	D7271fx	D7301fx1	D7302fx
	-	D5005dy	D5061dy	-	-	D5104dy	D7271dy	-	-
	$w(B)/10^{-6}$								
Lu	0.35	0.63	0.34	0.96	0.58	0.22	0.065	0.23	0.25
Y	17.6	64.7	26.3	33.3	34.2	14.1	4.3	12.1	15.3
ΣREE	79.17	345.2	223.8	68.72	226.3	73.84	149.9	100.9	244.9
LREE	70.14	303.0	203.9	47.53	200.2	65.29	144.11	91.20	229.9
HREE	9.03	42.18	19.82	21.19	26.11	8.55	5.83	9.75	14.96
L/H	7.77	7.18	10.29	2.24	7.67	7.64	24.73	9.36	15.37
La _N /Yb _N	3.88	11.88	12.45	0.94	7.23	6.74	54.69	10.34	20.98
δEu	0.08	0.36	0.30	0.07	0.43	1.16	1.01	1.00	0.57
δCe	1.11	0.46	0.83	1.01	0.79	0.78	0.70	0.58	0.78
Rb	326.0	327.1	279.1	273.4	327.0	263.9	199.7	164.3	293.8
Ba	16.6	514.8	521.6	23.6	581	867.9	1510	1070	902
Th	29.4	39.1	38.5	37.2	25.1	10.1	17.9	10.3	38.0
U	15.4	16.0	10.96	13.15	9.31	3.80	8.9	3.49	10.8
Ta	4.36	3.41	2.92	2.57	3.58	1.16	0.58	1.28	3.10
Nb	45.2	21.9	19.8	63.1	23.3	8.0	7.9	7.4	20.3
Sr	6.2	92.3	59.4	9.9	112.1	165.2	216.3	170.8	150.7
Zr	122.1	131.9	128.7	84.0	140.7	86.3	110.6	82.4	213.7
Hf	8.38	4.60	4.57	5.80	5.12	2.89	3.58	3.08	6.70
10 ⁴ Ga/Al	2.03	2.18	2.06	2.34	2.37	2.08	2.99	2.09	2.84
Nb/Ta	10.37	6.44	6.80	24.50	6.50	6.90	13.63	5.81	6.55
Zr/Hf	14.57	28.67	28.18	14.48	27.45	29.89	30.92	26.78	31.89
Rb/Sr	52.72	3.54	4.70	27.69	2.92	1.60	0.92	0.96	1.95
Rb/Nb	7.21	14.92	14.07	4.34	14.06	33.05	25.15	22.11	14.44
Rb/Ba	19.63	0.64	0.54	11.56	0.56	0.30	0.13	0.15	0.33
锆石饱和温度/°C	753	771	763	731	765	742	756	746	824

注:比值单位为1;全碱 $ALK=w(K_2O+Na_2O)$; $TF_2O_3=1.1113*w(FeO)+w(F_2O_3)$; $SI=w(MgO) \times 100/w(MgO+FeO+F_2O_3+Na_2O+K_2O)$; $\sigma=[w(Na_2O+K_2O)]^2/(w(SiO_2)-43)$; L/H为轻、重稀土元素比值(LREE/HREE)。

侵入岩, 锆石呈粉黄色, 自半自形柱状, 粒径以 20~200 μm 为主、少量为 200~450 μm, 长宽比为 1:1 至 4.2:1, 锆石 Th/U 比值为 0.19~4.22, CL 图像显示锆石发育典型的震荡环带结构, 表明其为岩浆成因锆石(吴元保等, 2004; 钟玉芳等, 2006)。对该样品的 20 颗锆石进行了 U-Pb 同位素分析, 剔除谐和度小于 90% 的测点(13、16、18)和受热液蚀变影响致年龄偏新的测点(3、5、9、14、15), 其余 12 个测点年龄全部落在谐和曲线或者临近谐和曲线(图 8c), ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄介于 146~176 Ma。测

点 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (155.6±4.6) Ma (MSWD = 2.8), 该值代表细粒黑云母二长花岗岩的结晶年龄。

4.3 Lu-Hf 原位分析

对已获得的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的 D5061 样品中的 12 个锆石颗粒进行 LA-ICP-MS 锆石 Lu-Hf 同位素分析, 得出 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 0.282 462~0.282 463, 平均值为 0.282 431, f_{Lu-Hf} 值为 0.94~0.97, 平均值为 -0.96, $\epsilon_{Hf}(t)=-10.3\sim-7.5$, 平均值为 -8.9, 二阶段模式年龄 $T_{DM2}=1688\sim1858$ Ma, 平

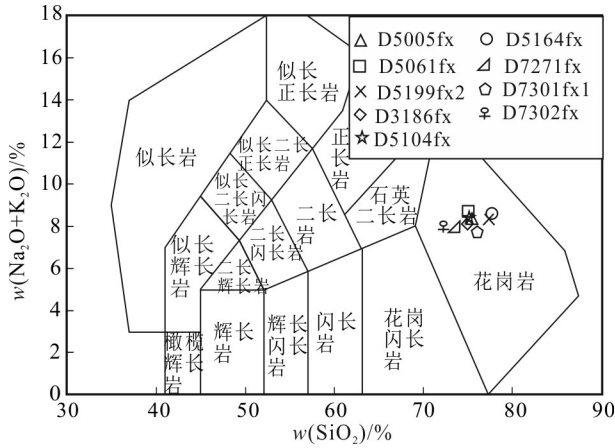


图 3 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩 TAS 分类图解(底图据 Middlemost, 1994)

Fig.3 TAS diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province (base map after Middlemost, 1994)

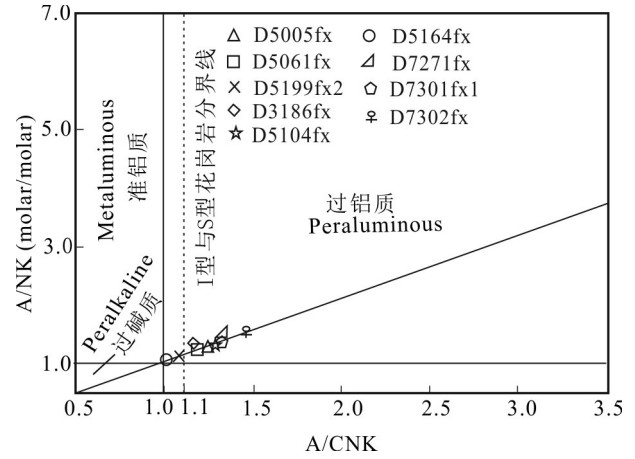


图 5 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩

A/NK-A/CNK 图解(底图据 Miniar et al., 1989)

Fig.5 A/NK-A/CNK diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province (base map after Miniar et al., 1989)

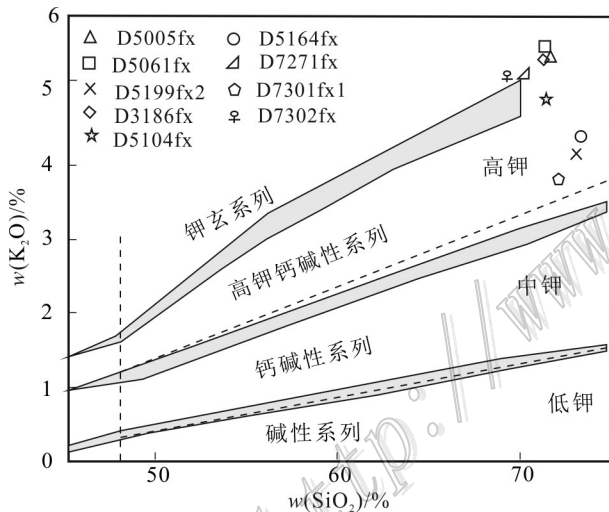


图 4 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩

w(SiO₂)-w(K₂O)图解(底图据 Peccerillo et al., 1976)

Fig.4 w(SiO₂)-w(K₂O) diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province (base map after Peccerillo et al., 1976)

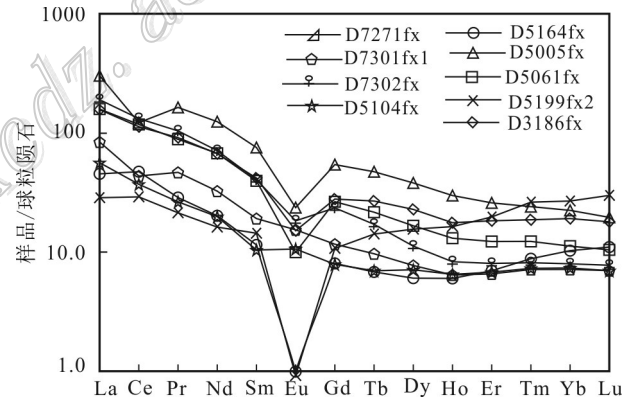


图 6 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩稀土球粒陨石标准化分布型式图(底图据 Sun et al., 1989)

Fig.6 Rare earth element spider diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province (base map after Sun et al., 1989)

均值为 1766 Ma; 样品 D7271DY 中 11 个锆石颗粒的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值 0.282 426~0.282 559, 平均值为 0.282 494, *f_{Lu-Hf}* 值为 -0.95~0.99, 平均值为 -0.97, *ε_{Hf}(t)* = -8.95~-4.06, 其平均值为 -6.49, 二阶段模式年龄 *T_{DM2}* = 1471~1774 Ma, 平均值为 1619 Ma。由此可知, 晚侏罗世细粒花岗岩来源于古元古代物质部分

熔融(图 9)。详细数据见表 3。

5 讨论

5.1 年代学及地质意义

赵子杰等(1987)统计了前人对广东龙窝、佛冈岩体 K-Ar 法测年结果, 得出年龄区间较大(100~200 Ma), 且年龄可信度值得怀疑。林小明等(2015)对研究区东侧佛冈岩体的另一部分进行了野外地质

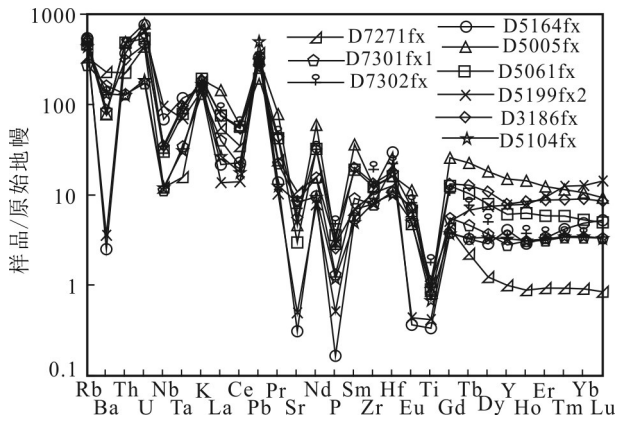


图7 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩微量元素原始地幔标准化分布型式图(底图据 Sun et al., 1989)

Fig.7 Primitive mantle normalized spider diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province(base map after Sun et al., 1989)

调查及年代学研究,认为晚侏罗世岩体出露面积为237.7 km²,岩性主要为细粒黑云母二长花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩和中粒斑状黑云母二长花岗岩,岩体 SHRIMP 锆石结晶年龄为154.9~156.3 Ma。陈小明等(2002)对佛冈岩体主体粗粒黑云母花岗岩进行Rb-Sr同位素测试,获得年龄(167.5±0.37)Ma。本次通过对研究区(图1)3个不同位置细粒黑云母二长花岗岩进行LA-ICP-MS锆石U-Pb定年,获得锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为(157.1±2.9)~(155.6±4.6) Ma,为佛冈岩体北缘白沙地区晚侏罗世细粒黑云母二长花岗岩的结晶年龄。

此外,本文去除谐和度小于90%的测点,将3个样品进行统计,发现样品中存在新元古代早期继承锆石(1112~924 Ma, n=3),其与研究区官渡六户山泥盆系底部复成份砾岩大量新元古代早期碎屑锆石(884.7~1193.6 Ma, n=20,待发表)均属于新元古代岩浆活动事件的产物。在邻区赣州市安远县孔田镇鹤仔出露面积约6.08 km²同碰撞片麻状花岗闪长岩,其LA-ICP-MS锆石Pb-Pb年龄为(996±29)Ma(邓中林等,2009)。说明了在佛冈白沙地区之下可能存在着新元古代早期古老基底。

白沙地区晚侏罗世花岗岩内发现大量加里东期继承锆石,年龄范围为493~403 Ma(n=18),16个测点²⁰⁶Pb/²³⁸U/加权平均值(449±12)Ma,与研究区西缘高排村出露宽约4 km²的片麻状中细粒黑云母二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄((441.5±13)Ma

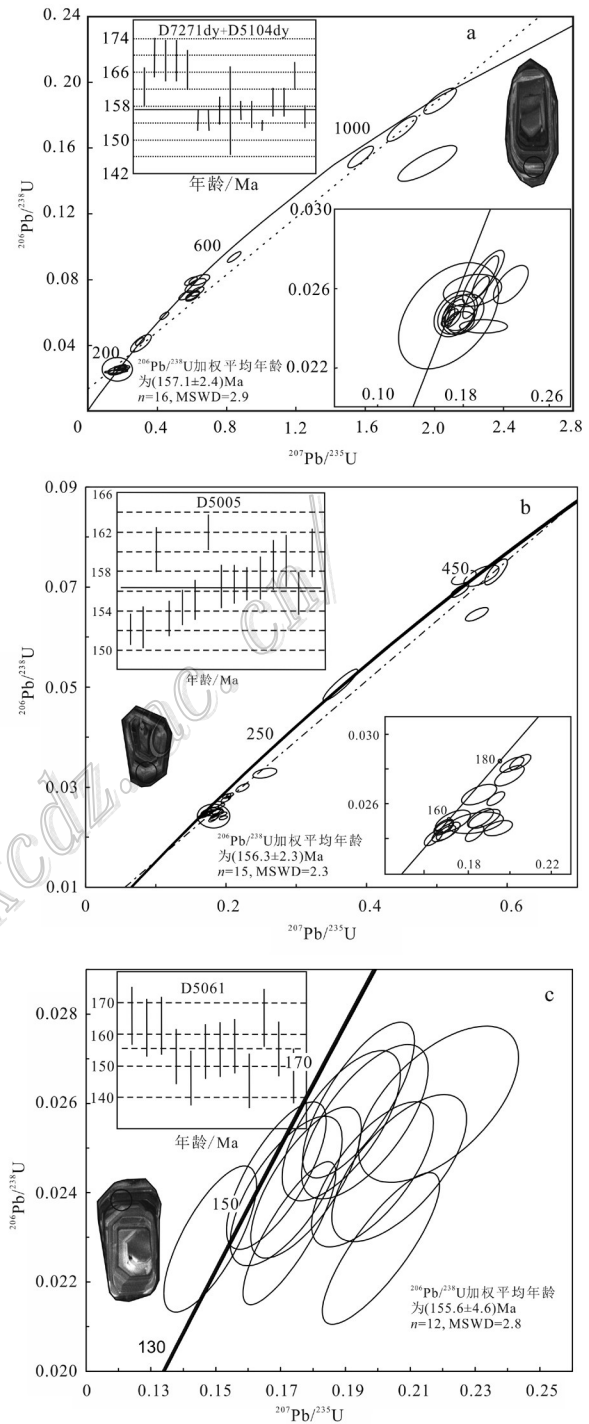


图8 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄谐和图和阴极发光(CL)图像

Fig. 8 U-Pb concordia diagrams of zircons of LA-ICP-MS and CL images of the Late Jurassic granites from the Baisha area in northern Guangdong Province

(MSWD=0.23, n=17)(待发表))几乎一致,属于华南加里东运动同碰撞挤压阶段(460~435 Ma)的产物

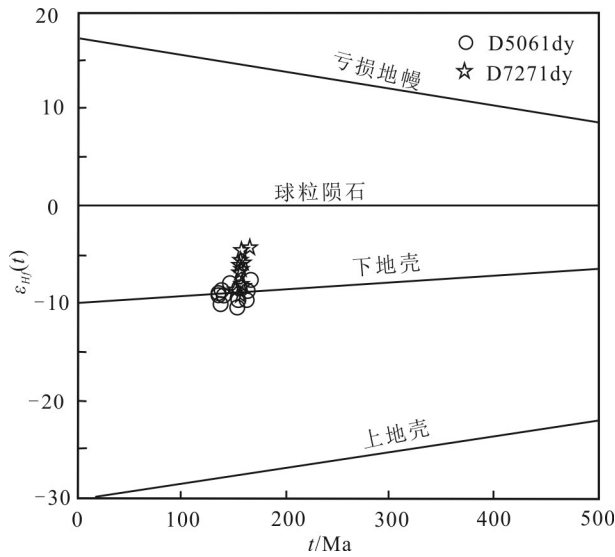


图 9 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩 $\epsilon_{Hf}(t)$ - t 图解
Fig.9 $\epsilon_{Hf}(t)$ - t diagram of of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province

(Qiu et al., 2000; Zhang et al., 2006a; 2006b; 张建光等, 2011)。

样品中晚古生代继承锆石年龄范围 363~262 Ma($n=5$), 分布较散, 但研究区内缺乏与其对应的岩浆热液事件。样品 D5005dy 中见 1 颗印支晚期继承锆石, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 208 Ma。研究区官渡镇林场-狮子岭一带见玄武质角砾熔岩、角砾状玄武凝灰质熔岩和玄武岩, 出露宽约 150 m, 其中玄武岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 (205.4 \pm 3.0)Ma。李建华等(2014)对近年来报道的华南陆块印支期岩体的锆石 U-Pb 年龄进行了详细统计, 认为晚期花岗岩(200~230 Ma)占印支期花岗岩的 90%, 包含泥质、玄武质岩石及明显幔源岩浆组分, 其形成与碰撞造山结束后地壳伸展-减薄背景下引发的减压熔融作用有关(Zhou et al., 2006; Wang et al., 2007)。

5.2 岩石成因

晚侏罗世细粒二长花岗岩 $w(\text{SiO}_2)=70.74\%\sim 77.47\%$, $A/\text{CNK}=1.01\sim 1.46$, 平均值为 1.22(Chappell et al., 1974), $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})=0.97\sim 2.02$, $\text{Rb}/\text{Sr}=0.92\sim 52.72$, 平均值(9.76)所得值远大于 0.9($\text{Rb}/\text{Sr}>0.9$ 时, 为 S 型花岗岩)(王德滋等, 1993), CIPW 标准矿物中见刚玉分子(0.14%, $n=1$, 0.98%~5.09%, $n=8$), 在 ACF 图解(图 10)中, 侵入岩样品落在“S 型”区域。但薄片鉴定中未见石榴子石、原生白云母和堇青石等富铝矿物, 且 $w(\text{P}_2\text{O}_5)(0\sim 0.10\%)$ 较低($<0.14\%$), 排除了

其为 S 型花岗岩的可能。在 $w(\text{K}_2\text{O})-w(\text{Na}_2\text{O})$ 图解(图 11)中, 样品落点较为分散, 但绝大部分在 A 型花岗岩区域内, 个别位于 I 型花岗岩内。锆石饱和温度(Watson et al., 1983)为 731~824 $^\circ\text{C}$, 平均值为 764 $^\circ\text{C}$, 明显小于 A 型花岗岩平均温度(833 $^\circ\text{C}$)。同时, 除 1 个样品(421×10^{-6})外, 岩体 $w(\text{Zr}+\text{Nb}+\text{Ce}+\text{Y})$ 值为 $137\times 10^{-6}\sim 355\times 10^{-6}$, 均小于 A 型花岗岩的下限值 360×10^{-6} 。 $10^4w(\text{Ga}/\text{Al})$ 介于 2.06~2.99 之间, 平均值(2.43)小于 A 型花岗岩的最低值(2.6)(Whalen et al., 1987), 更远低于全球典型的 A 型花岗岩的平均值 3.75。这样也排除了白沙地区细粒花岗岩为 A 型花岗岩的可能性。岩体虽在薄片未见 I 型花岗岩典型矿物角闪石, 具有较高的 $w(\text{SiO}_2)(70.74\%\sim 77.47\%)$ 和全碱含量高($w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})=5.78\%\sim 8.62\%$), 以及较高的分异指数($\text{DI}=88.52\%\sim 96.63\%$), 表明了它们经历了高程度结晶分异作用。岩体锆石饱和温度(764 $^\circ\text{C}$)等同于澳大利亚 Lachlan 褶皱带高分异 I 型花岗岩的平均值 764 $^\circ\text{C}$ ($n=103$), 远达不到典型铝质 A 型花岗岩的平均值 839 $^\circ\text{C}$ ($n=55$)(King et al., 1997)。同时, 白沙地区细粒花岗岩总体上随着 $w(\text{SiO}_2)$ 的增加, $w(\text{P}_2\text{O}_5)$ 降低, 与 I 型花岗岩的演化趋势一致, 并具有较高 $w(\text{FeO})^*/w(\text{MgO})$ 比值(2.25~7.79)。除上述特征外, 研究白沙镇出露同期岩浆活动事件的产物石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石加权平均年龄为(163.7 \pm 2.3)Ma、遥田镇下遥村石英闪长岩 LA-ICP-MS 锆石加权平均年龄为(156.5 \pm 4.4)Ma, 及大面积出露粗粒-中-细粒花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 158.8~165.0 Ma(林小明等, 2015)。因此推测白沙地区细粒花岗岩为高分异 I 型花岗岩。

5.3 岩浆源区

岩石样品 Rb/Sr 比值为 0.61~52.72, 明显高于中国东部上地壳平均值(0.31)(Gao et al., 1999)和全球上地壳平均值(0.32)(Taylor et al., 1985); 1 个样品值为 24.5 除外, Nb/Ta 比值为 5.81~13.75, 平均值为 7.67, 小于平均地壳值(12~13); Zr/Hf 比值为 14.48~31.89, 低于上地壳的 Zr/Hf 比值(~ 37)(Gao et al., 1999); 1 个样品 Rb/Nb 比值为 4.34 除外, 其余值为 7.21~33.05($n=8$), 远大于全球上地壳 Rb/Nb 比值(4.5)(Taylor et al., 1985)。地壳部分熔融形成的熔体不管熔融程度如何, 形成的岩石均具有较低的 $\text{Mg}^\#(<40)$, 岩体 $\text{Mg}^\#=18.61\sim 39.77(n=2)$ 。这些特征均说明岩体主要为地壳物质部分熔融形成。正 Eu 异常(1.00~1.16)主要出现在代表下地壳组分的基性

表2 白沙地区晚侏罗世细粒花岗岩锆石U-Pb分析结果

Table 2 Zircon U-Pb zircon analytical data for the fine-grained granite in the Baisha area

测点号	w(B)/10 ⁻⁶			Th/ U	同位素比值						同位素年龄/Ma				谐和 度/%
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
D5104dy-01	15	211	486	0.43	0.0551	0.0023	0.1932	0.0076	0.0256	0.0007	417	93	163	4.4	90
D5104 dy -02	5.55	50	170	0.29	0.0755	0.0048	0.2632	0.0166	0.0255	0.0007	1081	129.2	162	4.7	62
D5104 dy -03	37	186	435	0.43	0.0620	0.0024	0.6032	0.0248	0.0697	0.0020	676	81	434	11.9	90
D5104 dy -04	46	327	521	0.63	0.0621	0.0024	0.6060	0.0250	0.0701	0.0019	676	88	437	11.5	90
D5104dy-05	47	392	513	0.76	0.0583	0.0020	0.5636	0.0193	0.0699	0.0019	543	76	435	11.4	95
D5104dy-06	26	515	776	0.66	0.0550	0.0022	0.2022	0.0078	0.0266	0.0007	413	89	169	4.5	90
D5104dy-07	31	255	345	0.74	0.0592	0.0023	0.5716	0.0218	0.0698	0.0019	576	79	435	11.5	94
D5104dy-08	88	140	406	0.34	0.0920	0.0032	1.9679	0.1152	0.1506	0.0077	1533	60	904	43.0	80
D5104dy-09	5.83	58	169	0.34	0.0939	0.0058	0.3390	0.0215	0.0263	0.0008	1506	116.0	167	5.2	44
D5104dy-10	35	234	382	0.61	0.0639	0.0025	0.6311	0.0227	0.0724	0.0021	739	85	451	12.6	90
D5104dy-11	11	129	367	0.35	0.0548	0.0028	0.2003	0.0100	0.0265	0.0007	467	118	169	4.7	90
D5104dy-11	11	129	367	0.35	0.0548	0.0028	0.2003	0.0100	0.0265	0.0007	467	118	169	4.7	90
D5104dy-12	22	124	243	0.51	0.0632	0.0027	0.6304	0.0262	0.0725	0.0020	722	290	451	11.8	90
D5104dy-13	14	210	426	0.49	0.0619	0.0028	0.2234	0.0099	0.0262	0.0007	672	96	167	4.5	90
D5104dy-14	58	182	242	0.75	0.0782	0.0025	2.0341	0.0641	0.1883	0.0051	1152	63	1112	27.8	98
D5104dy-15	36	255	410	0.62	0.0629	0.0023	0.6119	0.0217	0.0704	0.0019	703	78	439	11.3	90
D5104dy-16	35	229	403	0.57	0.0627	0.0024	0.6035	0.0218	0.0699	0.0019	698	81	435	11.5	90
D5104dy-17	11.6	184	304	0.61	0.1200	0.0088	0.4675	0.0398	0.0263	0.0008	1967	130.4	167	5.3	20
D5104dy-18	84	106	479	0.22	0.0736	0.0023	1.5723	0.0478	0.1541	0.0042	1031	64	924	23.5	96
D5104dy -19	33.1	513	1704	0.30	0.0954	0.0037	0.1901	0.0064	0.0148	0.0005	1537	72.2	95	3.1	39
D5104dy -20	176	349	877	0.40	0.0762	0.0023	1.8011	0.0548	0.1701	0.0048	1102	61	1013	26.6	96
D7271dy -01	14.4	237	475	0.50	0.0533	0.0022	0.1786	0.0078	0.0243	0.0004	343	94.4	155	2.3	92
D7271dy -02	26.3	631	841	0.75	0.0506	0.0016	0.1690	0.0054	0.0243	0.0004	233	72.2	155	2.5	97
D7271dy -03	34.6	386	1163	0.33	0.0502	0.0015	0.1706	0.0058	0.0247	0.0005	211	100.9	157	3.3	98
D7271dy -04	98.2	108	915	0.12	0.0654	0.0012	0.8458	0.0233	0.0936	0.0018	787	41.7	577	10.8	92
D7271dy -05	27.3	434	481	0.90	0.0518	0.0020	0.3008	0.0117	0.0423	0.0008	276	87.0	267	5.1	99
D7271dy -06	42.7	183	440	0.42	0.0587	0.0035	0.6423	0.0378	0.0794	0.0020	567	131.5	493	12.2	97
D7271dy-07	6.0	68	204	0.33	0.0503	0.0106	0.1681	0.0321	0.0246	0.0016	206	429.6	157	10.3	99
D7271dy-08	10.6	165	351	0.47	0.0518	0.0027	0.1764	0.0098	0.0246	0.0004	276	118.5	157	2.2	94
D7271dy-09	76.3	71	871	0.08	0.0553	0.0015	0.6044	0.0152	0.0793	0.0011	433	59.3	492	6.6	97
D7271dy-10	27.7	620	871	0.71	0.0482	0.0020	0.1624	0.0063	0.0245	0.0005	109	98.1	156	3.2	97
D7271dy-11	288	3406	10077	0.34	0.0598	0.0043	0.1988	0.0153	0.0241	0.0002	594	155.5	153	1.2	90
D7271dy-12	17.6	393	571	0.69	0.0455	0.0109	0.1482	0.0337	0.0237	0.0003	-	-	151	2.0	92
D7271dy-13	15.6	269	500	0.54	0.0526	0.0034	0.1810	0.0114	0.0249	0.0005	322	143.5	159	3.2	93
D7271dy-14	111	900	1543	0.58	0.0552	0.0015	0.4370	0.0130	0.0576	0.0014	420	59.3	361	8.3	98
D7271dy-15	33.5	799	1015	0.79	0.0506	0.0031	0.1745	0.0117	0.0250	0.0005	233	145.4	159	3.2	97
D7271dy-16	13.1	212	407	0.52	0.0526	0.0052	0.1885	0.0197	0.0259	0.0005	309	227.8	165	3.3	93
D7271dy-17	57.3	237	619	0.38	0.0554	0.0022	0.6026	0.0261	0.0790	0.0018	428	88.9	490	10.8	97
D7271dy-18	25.5	237	333	0.71	0.0557	0.0019	0.4425	0.0170	0.0579	0.0011	439	77.8	363	6.6	97
D7271dy-19	20.5	413	659	0.63	0.0494	0.0022	0.1654	0.0068	0.0244	0.0004	165	101.8	156	2.4	99
D7271dy-20	19.5	79	431	0.18	0.0527	0.0030	0.3100	0.0392	0.0415	0.0035	322	126.8	262	21.9	95
D7271dy-21	65.5	489	666	0.73	0.0595	0.0026	0.6248	0.0376	0.0762	0.0027	583	96.3	473	16.5	95

续表 2-1
Continued Table 2-1

测点号	w(B)/10 ⁻⁶			Th/ U	同位素比值						同位素年龄/Ma				谐和 度/%
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
D5005dy-01	84.0	167	615	0.27	0.063	0.001	0.557	0.011	0.065	0.001	700	0.0009	403	5.4	91
D5005dy-02	159	614	4186	0.15	0.060	0.001	0.196	0.004	0.024		587	0.0003	432	5.2	90
D5005dy-03	149	1051	1000	1.05	0.056	0.001	0.183	0.004	0.024		439	0.0003	403	5.4	91
D5005dy-04	228	1136	1446	0.79	0.100	0.003	0.328	0.009	0.024		1617	0.0003	152	2.1	38
D5005dy-05	74.0	442	1277	0.35	0.054	0.001	0.186	0.004	0.025		367	0.0004	152	1.6	92
D5005dy-06	60.3	366	993	0.37	0.054	0.001	0.188	0.005	0.025		389	0.0004	152	2.1	91
D5005dy-07	252	1045	1229	0.85	0.138	0.005	0.470	0.015	0.025		2198	0.0004	159	2.3	15
D5005dy-08	46.1	239	520	0.46	0.057	0.003	0.255	0.011	0.033	0.001	494	0.0007	432	5.2	90
D5005dy-09	104	217	615	0.35	0.059	0.001	0.584	0.011	0.073	0.002	567	0.0017	180	1.9	97
D5005dy-10	102	744	1735	0.43	0.061	0.001	0.216	0.004	0.026		650	0.0004	162	2.3	80
D5005dy-11	265	548	4073	0.13	0.078	0.001	0.726	0.025	0.066	0.002	1154	0.0018	414	10.9	70
D5005dy-12	154	838	2269	0.37	0.053	0.001	0.193	0.003	0.026		345	0.0003	153	1.8	93
D5005dy-13	95.6	558	1728	0.32	0.050	0.001	0.168	0.003	0.025		189	0.0003	155	1.9	99
D5005dy-14	257	1677	1797	0.93	0.052	0.001	0.205	0.003	0.028		298	0.0003	155	2.0	94
D5005dy-15	113	674	2388	0.28	0.049	0.001	0.167	0.003	0.025		161	0.0004	156	2.0	99
D5005dy-16	112	153	1726	0.09	0.056	0.001	0.533	0.009	0.069	0.001	439	0.0009	208	4.1	99
D5005dy-17	197	771	936	0.82	0.149	0.004	0.538	0.011	0.026		2340	0.0004	167	2.3	10
D5005dy-18	66.4	370	1225	0.30	0.050	0.001	0.168	0.004	0.024		211	0.0003	157	2.2	98
D5005dy-19	32.2	178	445	0.40	0.051	0.001	0.186	0.005	0.027		232	0.0004	157	1.9	97
D5005dy-20	123	276	410	0.67	0.054	0.001	0.538	0.012	0.072	0.001	383	0.0009	450	8.4	97
D5005dy-21	387	1499	2959	0.51	0.064	0.001	0.234	0.004	0.026		750	0.0003	168	2.0	75
D5005dy-22	270	960	6044	0.16	0.055	0.001	0.183	0.003	0.024		391	0.0003	157	1.7	90
D5005dy-23	259	981	3018	0.33	0.052	0.001	0.200	0.004	0.028		300	0.0004	157	2.2	94
D5005dy-24	581	2012	3056	0.66	0.064	0.001	0.246	0.005	0.028		731	0.0003	177	2.0	77
D5005dy-25	551	3087	3999	0.77	0.114	0.002	0.319	0.006	0.020		1933	0.0004	130	2.5	26
D5005dy-26	152	679	1620	0.42	0.051	0.001	0.201	0.004	0.028		261	0.0003	159	2.5	96
D5005dy-27	38.7	55	297	0.19	0.056	0.001	0.564	0.017	0.072	0.001	478	0.0014	317	12.8	99
D5005dy-28	160	603	4381	0.14	0.049	0.001	0.163	0.003	0.024		146	0.0003	159	2.6	99
D5005dy-29	170	318	1588	0.20	0.052	0.001	0.363	0.016	0.050	0.002	272	0.0021	454	10.2	99
D5005dy-30	428	1547	5883	0.26	0.063	0.001	0.208	0.003	0.024		717	0.0003	152	2.0	76
D5005dy-31	39.5	181	419	0.43	0.050	0.002	0.173	0.005	0.025		213	0.0004	160	2.5	98
D5005dy-32	24.2	106	252	0.42	0.054	0.003	0.184	0.009	0.025		376	0.0004	160	2.3	92
D5005dy-33	101	433	1359	0.32	0.050	0.001	0.170	0.004	0.024		213	0.0003	162	1.8	97
D5005dy-34	60.9	254	700	0.36	0.051	0.001	0.179	0.005	0.025		256	0.0003	167	1.8	96
D5005dy-35	221	653	2770	0.24	0.074	0.003	0.225	0.008	0.022		1050	0.0003	139	1.7	61
D5005dy-36	225	652	3545	0.18	0.065	0.002	0.211	0.007	0.023		776	0.0003	148	1.7	73
D5005dy-37	193	511	5750	0.09	0.054	0.001	0.223	0.006	0.030	0.001	361	0.0005	176	2.5	92
D5005dy-38	131	537	1908	0.28	0.051	0.001	0.175	0.004	0.025		243	0.0003	179	1.9	96
D5005dy-39	690	851	1937	0.44	0.236	0.003	0.983	0.017	0.030		3091	0.0004	192	2.4	14
D5005dy-40	74.6	292	950	0.31	0.057	0.001	0.194	0.005	0.025		506	0.0003	151	2.4	91
D5005dy-41	158	670	2168	0.31	0.056	0.001	0.181	0.004	0.024		456	0.0004	169	2.5	91

续表 2-2
Continued Table 2-2

测点号	$w(B)/10^{-6}$			Th/ U	同位素比值						同位素年龄/Ma				谐和 度/%
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
D5061dy-1	33.1	419	1037	0.40	0.0541	0.0020	0.1941	0.0070	0.0261	0.0007	376	78.7	166	4.5	91
D5061dy-2	14.8	321	339	0.95	0.0585	0.0028	0.2218	0.0105	0.0277	0.0008	550	104.5	176	4.9	90
D5061dy-3	54.9	560	2275	0.25	0.0505	0.0017	0.1477	0.0049	0.0212	0.0006	217	50.0	135	3.6	96
D5061dy-4	27.8	534	787	0.68	0.0539	0.0022	0.1887	0.0075	0.0255	0.0007	369	92.6	162	4.3	92
D5061dy-5	66.4	540	2831	0.19	0.0483	0.0016	0.1465	0.0050	0.0220	0.0006	122	81.5	140	3.8	98
D5061dy-6	13.9	334	358	0.93	0.0546	0.0027	0.1844	0.0087	0.0265	0.0022	398	109.2	169	14.0	98
D5061dy-7	16.8	268	509	0.53	0.0557	0.0023	0.1960	0.0080	0.0256	0.0007	443	92.6	163	4.4	90
D5061dy-8	22.0	355	725	0.49	0.0520	0.0022	0.1717	0.0071	0.0240	0.0007	283.4	94.4	153	4.3	95
D5061dy-9	41.7	733	1590	0.46	0.0495	0.0020	0.1463	0.0059	0.0217	0.0007	172.3	94.4	138	4.3	99
D5061dy-10	32.9	804	1009	0.80	0.0469	0.0018	0.1483	0.0058	0.0230	0.0007	56	144.4	146	4.2	95
D5061dy-11	25.2	374	841	0.44	0.0535	0.0021	0.1779	0.0070	0.0242	0.0007	350	88.9	154	4.4	92
D5061dy-12	25.4	348	841	0.41	0.0504	0.0019	0.1687	0.0063	0.0244	0.0007	213.0	88.9	155	4.2	98
D5061dy-13	19.4	334	550	0.61	0.0614	0.0026	0.2066	0.0085	0.0246	0.0007	654	90.7	156	4.2	80
D5061dy-14	44.3	646	1776	0.36	0.0486	0.0016	0.1421	0.0049	0.0211	0.0006	131.6	77.8	135	3.8	99
D5061dy-15	60.1	1099	2379	0.46	0.0538	0.0018	0.1597	0.0053	0.0215	0.0006	361	75.9	137	3.6	90
D5061dy-16	60.2	863	2122	0.41	0.0644	0.0023	0.2010	0.0074	0.0228	0.0007	754	75.9	145	4.4	75
D5061dy-17	13.2	221	361	0.61	0.0611	0.0028	0.2187	0.0101	0.0260	0.0007	643	100.0	165	4.5	90
D5061dy-18	144	1280	6485	0.20	0.0637	0.0020	0.1726	0.0052	0.0197	0.0005	731	66.7	126	3.4	75
D5061dy-19	42.5	2378	564	4.22	0.0579	0.0024	0.1983	0.0077	0.0244	0.0007	524	90.7	155	4.2	90
D5061dy-20	42.9	1038	1285	0.81	0.0542	0.0018	0.1727	0.0058	0.0231	0.0007	389	74.1	147	4.1	90

麻粒岩和前寒武杂岩中(罗红玲等, 2010)。Nb、Ta 异常则可能说明岩浆演化过程中有幔源物质参与; δEu 值中 1 组为 0.07~0.57 ($n=6$), 远小于壳幔型花岗岩(0.84), 第 2 组为 1.00~1.16 则是接近或远大于壳幔型花岗岩(0.84), 研究区岩体少量 $\text{Mg}^\#$ 大于 40 (40.61~44.18, $n=2$)。锆石 Hf 同位素研究结果表明, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = -10.3 \sim -4.06$; 二阶模式年龄 $T_{\text{DM}2} = 1471 \sim 1858 \text{ Ma}$ ($n=23$), 平均值为 1695.7 Ma。在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解(图 9)中可见数据主要分布于下地壳区域内。说明岩体主要来自中-古元古代地壳物质部分熔融。

继承锆石是岩浆源区物质最直接的证据。本次岩石样品继承锆石主要来自新元古代早期、早古生代、晚古生代和印支期岩浆活动事件, 说明这些时代的岩石组分参与了花岗岩的形成。不论这些继承锆石是来源于源区残留, 或是岩浆上升过程中所捕获,

均说明了源区组分并非单一。

5.4 构造环境

早中生代(~200 Ma)太平洋板块向亚洲板块发生俯冲(Chen et al., 2005; 2007; 及其引用相关文献)持续俯冲一定时期(15~20 Ma), 后在原有薄弱构造带附近产生进一步伸展的背景下形成的(周新民等, 2007)。伸展构造环境可从下列地质事实中得到证实: 闽西南-赣南-湘东南-桂东南地区存在燕山早期的碱性花岗岩(176~178 Ma)(陈培荣等, 1998; 范春方等, 2000)、双峰式火山岩(158~179 Ma)(许美辉, 1992; 陈培荣等, 1999)、碱性玄武岩(Ar-Ar 年龄 175~178 Ma)(Chung et al., 1997; 赵振华等, 1998; 陈培荣等, 2002; Li et al., 2004; 王岳军等, 2004)和碱性杂岩体(K-Ar 年龄 199 Ma)(郭新生等, 2001)。发现晚侏罗世(165~142 Ma)镁铁质岩等, 主要有海南、广东一

表 3 白沙地区细粒花岗岩 Lu-Hf 同位素分析结果

Table 3 Lu-Hf isotopic data of the fine-grained granite in the Baisha area

测点号	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 2\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM1}/Ma	T_{DM2}/Ma	$f_{\text{Lu/Hf}}$
D5061DY-1	166	0.052080	0.001375	0.282462	0.000015	-11.0	-7.5	1128	1688	-0.96
D5061DY-3	135	0.041319	0.001114	0.282435	0.000016	-11.9	-9.0	1158	1764	-0.97
D5061DY-4	162	0.044664	0.001114	0.282405	0.000016	-13.0	-9.5	1200	1816	-0.97
D5061DY-5	140	0.046190	0.001215	0.282432	0.000014	-12.0	-9.1	1165	1770	-0.96
D5061DY-7	163	0.060337	0.001525	0.282432	0.000016	-12.0	-8.6	1175	1757	-0.95
D5061DY-8	153	0.026321	0.000693	0.282388	0.000017	-13.6	-10.3	1211	1858	-0.98
D5061DY-9	138	0.073429	0.001914	0.282451	0.000016	-11.4	-8.5	1161	1733	-0.94
D5061DY-10	146	0.032650	0.000893	0.282463	0.000014	-10.9	-7.8	1112	1694	-0.97
D5061DY-11	154	0.048106	0.001296	0.282411	0.000013	-12.8	-9.5	1198	1810	-0.96
D5061DY-12	155	0.034071	0.000891	0.282446	0.000016	-11.5	-8.2	1136	1728	-0.97
D5061DY-14	135	0.041691	0.001080	0.282442	0.000015	-11.7	-8.8	1148	1750	-0.97
D5061DY-15	137	0.071778	0.001816	0.282410	0.000016	-12.8	-10.0	1215	1823	-0.95
D7271DY-01	155	0.020130	0.000755	0.282490	0.000023	-10.0	-6.6	1070	1627	-0.98
D7271DY-02	155	0.028439	0.001150	0.282513	0.000022	-9.2	-5.9	1049	1578	-0.97
D7271DY-03	157	0.027826	0.001074	0.282456	0.000027	-11.2	-7.8	1127	1704	-0.97
D7271DY-07	157	0.014945	0.000579	0.282554	0.000032	-7.7	-4.3	977	1483	-0.98
D7271DY-08	157	0.012947	0.000453	0.282498	0.000026	-9.7	-6.3	1051	1607	-0.99
D7271DY-10	156	0.040965	0.001372	0.282426	0.000026	-12.2	-8.9	1179	1774	-0.96
D7271DY-12	151	0.044650	0.001672	0.282445	0.000044	-11.5	-8.4	1161	1736	-0.95
D7271DY-13	159	0.021009	0.000819	0.282449	0.000022	-11.4	-8.0	1130	1718	-0.98
D7271DY-15	159	0.035611	0.001407	0.282518	0.000024	-9.0	-5.6	1049	1566	-0.96
D7271DY-16	165	0.034316	0.001321	0.282559	0.000025	-7.5	-4.1	989	1471	-0.96
D7271DY-19	156	0.027257	0.001000	0.282527	0.000025	-8.7	-5.4	1026	1547	-0.97

些小的辉长岩等,也与 A 型花岗岩、碱性正长岩等伴生(云平等, 2002; Xu et al., 2007)。刘鹏等(2015)对包括粤东沿海地区火山-侵入杂岩的最新锆石 U-Pb 年龄进行了统计,发现沿海岩浆活动有 3 个峰期,分别为 170~155 Ma、145~130 Ma、110~90 Ma。白沙地区晚侏罗世岩石类型多样,主要为高钾钙碱性系列岩石,其次为钾玄质岩系列岩石。岩石富集 Rb、Th 等大离子亲石元素,相对亏损 Ba、Sr、Nb、Ta、P 和 Ti 元素,与岛弧岩浆岩具有类似的地球化学特征(高万里等, 2014)。稀土元素表现为轻稀土元素富集、重稀土元素相对亏损。这些特征表明了其符合后碰撞花岗岩的岩石地球化学特征。综合 $w(\text{Y+Nb})-w(\text{Rb})$ (Pearce et al., 1984)(图 12)微量元素构造判别图解中,样品落在多种构造环境区域内,为同碰撞、火山弧和后碰撞区域。Liegeois 等(1998)认为,花岗岩的

同碰撞环境与板内环境两者之间的界限并不是截然的,它们之间存在着连续的、发展的谱系,也就是后碰撞构造环境。由此推测,白沙地区晚侏罗世处于后碰撞阶段。

佛冈花岗质杂岩体分布于约北纬 24° 的近东西向构造-岩浆岩带上。据航测资料,在佛冈-河源-丰顺一带宽约 30 km,长约 300 km 的东西带内有 2 条相互平行延伸的航磁异常带,推测存在一个隐伏的东西向深断裂(佛冈-河源-丰顺断裂)(赵子杰等, 1987; 梁敦杰等, 1988)。中国东南沿海燕山期岩浆活动为西太平洋构造-岩浆旋回的一部分。佛冈东西向构造-岩浆带的形成可能受 2 种地球动力学环境的影响。一是古太平洋板块(库拉板块)向西向欧亚大陆俯冲;中侏罗或晚侏罗世形成了中国华南沿海安第斯型的大陆边缘岩浆弧,弧最宽可达 1000 km;

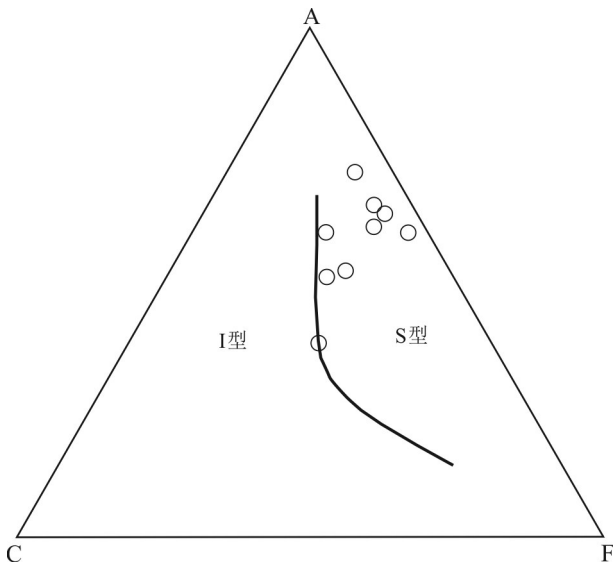


图10 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩 ACF 图解
 Fig.10 ACF Diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province

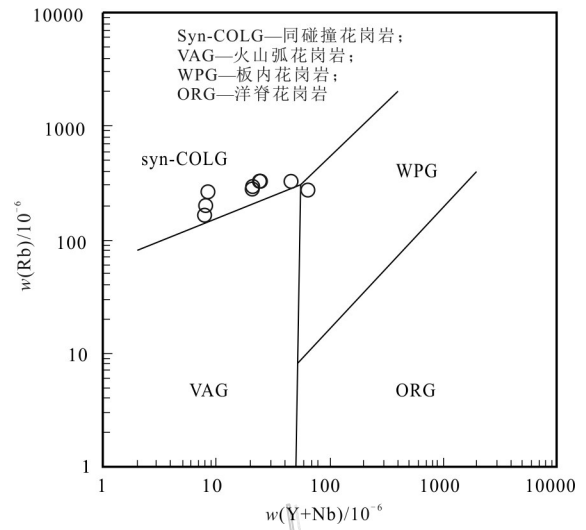


图12 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩 $w(Yb+Ta)-w(Rb)$ 图解
 (底图据 Pearce et al., 1984)
 Fig.12 $w(Yb+Ta)-w(Rb)$ diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province
 (base map after Pearce et al., 1984)

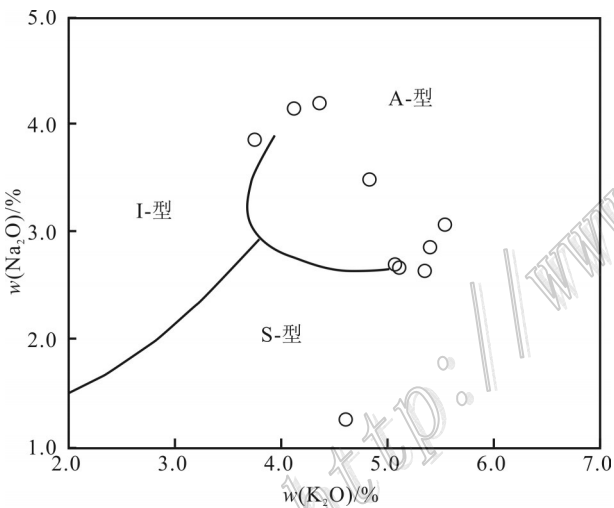


图11 粤北白沙地区晚侏罗世花岗岩 $w(K_2O)-w(Na_2O)$ 图解
 Fig.11 $w(K_2O)-w(Na_2O)$ diagram of the Late Jurassic granite from the Baisha area in northern Guangdong Province

晚侏罗世晚期由于俯冲带倾角变大速度减缓,岩石圈处于伸展应力环境(Zhou et al., 2000);古太平洋—欧亚大陆的岩石圈消减作用及其能量应该辐射到南岭地区;二是西菲律宾地块(West Philippines Block)向北中国-印支(China-Indochina)大陆边缘碰撞,可能由于俯冲速度随时间变化(Charvet et al., 1994; Lapiere et al., 1997),使南中国-印支地块内产出一系列北西向剪切带并生成对应的长英质

为主的岩浆岩带。南岭东西向构造岩浆岩带之一的本区佛冈花岗岩杂岩体可能是这2种地球动力学环境综合作用的结果。后一种作用可能更重要。

综上所述,粤北白沙地区晚侏罗世细粒二长花岗岩体形成于古太平洋板块(库拉板块)与欧亚板块俯冲作用和菲律宾地块与南中国-印支地块的岩石圈消减作用下,岩石圈伸展-减薄,导致地幔物质上涌,在高温条件热流作用下幔源物质诱导下地壳杂砂-泥质源岩部分熔融形成。

6 结 论

(1) 佛冈岩体北缘的白沙地区细粒黑云母二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 加权平均年龄为 155.6~157.1 Ma,表明细粒黑云母二长花岗岩侵位于晚侏罗世。

(2) 岩体为高硅 ($w(SiO_2)=70.74\% \sim 77.47\%$),高 $w(Na_2O+K_2O)(5.78\% \sim 8.62\%)$,低 $w(P_2O_5)(0 \sim 0.10\%)$,富集 Rb、Th、U、K、Pb、Nd、Zr 和 Hf 等元素,亏损 Ba、Nb、La、Ce、Sr、P、Eu 和 Ti 等元素。总体上明显富集轻稀土元素 ($(La/Yb)_N=0.94 \sim 54.69$),具明显的负 Eu 异常 ($\delta Eu=0.07 \sim 0.57, n=6$),少量正 Eu 异常 (1.00~

1.16, $n=3$)。这些地球化学特征指示细粒黑云母二长花岗岩为高分异I型花岗岩。

(3) 岩体形成于古太平洋板块(库拉板块)与欧亚板块俯冲作用和菲律宾地块与南中国-印支地块的岩石圈消减作用下,岩石圈伸展—减薄,导致地幔物质上涌,在高温热流作用下幔源物质诱导下地壳物质部分熔融形成。

致谢 匿名审稿人对本文进行了认真审阅并提出了宝贵的修改意见,使得本文质量有了很大的提高,在此表示衷心的感谢。

References

- Bao Z W and Zhao Z H. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fogang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China—A preliminary study[J]. *Geology Geochemistry*, 31(1): 52-61(in Chinese with English abstract).
- Chappell B W and White A J R. 1974. Two contrasting granite types[J]. *Pacific Geology*, 8: 173-174.
- Charvet J, Lapiere H and Yu Y. 1994. Geodynamic significance of the Mesozoic volcanism of South-eastern China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 9(4): 387-396.
- Chen G N, Grapes R and Zhang K. 2005. A model for Mesozoic crustal melting and deformation of SE China[J]. *International Geology Review*, 45: 948-957.
- Chen G N and Grapes R. 2007. Granite genesis: In-situ melting and crustal evolution[M]. Netherlands: Springer.
- Chen J Y and Yang J H. 2015. Petrogenesis of the Fogang highly fractionated I-type granitoids: Constraints from Nb-Ta-Zr-Hf[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(1): 846-851(in Chinese with English abstract).
- Chen P R, Zhang B T, Kong X G, Cai B C, Ling H F and Ni Q S. 1998. Geochemical characteristics and tectonic implication of Zhaibei A-type granitic intrusives in South Jiangxi Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 14(3): 163-173(in Chinese with English abstract).
- Chen P R, Kong X G, Wang Y X, Ni Q S, Zhang B T and Ling H F. 1999. The determination of Bimodal volcano-intrusive rocks from the Early Yanshanian period and their significance[J]. *Geology Review*, 45(Suppl.): 734-741(in Chinese).
- Chen P R, Hua R M, Zhang B T, Lu J J and Fan C F. 2002. The post collision granite in the Early Yanshanian periods from the Nanling area: The petrology restriction and geodynamic setting[J]. *Science in China(Series D)*, 32(4): 279-289(in Chinese).
- Chen X M, Wang R C, Liu C S, Hu H, Zhang W L and Gao J F. 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite of Conghua area, Guangdong Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 293-307(in Chinese with English abstract).
- Chung S L, Cheng H, Jahn B M O' Reilly Y Suzanne and Zhu B Q. 1997. Major, trace element, and Sr-Nd isotope constraints on the origin of Paleogene volcanism in South China prior to the South China Sea opening[J]. *Lithos*, 40:203-220.
- Fan C F and Chen P R. 2000. Geochemical characteristics and tectonic implication of Beitou A-type granite intrusive in South Jiangxi Province[J]. *Geochimica*, 29(4): 359-366(in Chinese with English abstract).
- Gao J F, Lu J J, Lai M Y, Lin Y P and Pu W. 2003. Analysis of trace elements in rock samples using HR-ICPMS[J]. *Journal of Nanning University(Natural Sciences)*, 39(6): 844-850.
- Gao W L, Wang Z X, Li C L and Wang D X. 2014. Zircon U-Pb geochronology, geochemistry and tectonic implication of Indosinian granite from southeastern Zhejiang, South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 88(6): 1055-1067(in Chinese with English abstract).
- Gao S, Luo T C, Zhang B R, Zhang H F, H Y W, Zhao Z D and Hartmutkern. 1999. Structure and composition of the continental crust in East China[J]. *Science in China (Series D)*, 43(2):129-140.
- Guo X S, Chen J F, Zhang X, Tang J F, Xie Z, Zhou T X and Liu Y L. 2001. Nd isotopic ratios of K-enriched magmatic complexes from southeastern Guangxi Province implications for upwelling of the mantle in southeastern China during the Mesozoic[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 19-27(in Chinese with English abstract).
- Deng Z L, Liao S T, Liu H D, Guo L, Zhang Z J and He X Y. 2009. The regional geological survey report of 1:250 000 Lianping county[R](in Chinese).
- Huang Y Y, Zhuang W M, Chen Z Q and Wang F H. 2000. The geological and geochemistry characteristics and formation age of Wushi rock body in Guangdong Province[J]. *Geology of Guangdong*, 15(3): 13-19 (in Chinese).
- King P L, White A J R, Chappell B W and Allen C M. 1997. Characterization and origin of aluminous A-type granites from the Lachlan Fold Belt, southeastern Australia[J]. *Journal of petrology*, 38(3): 371-391.
- Liegeois P J, Navez J, Hertogen J and Black R. 1998. Contrasting origin of post-collisional high-K calc-alkaline and shoshonitic versus alkaline and peralkaline granitoids[J]. *Lithos*, 45:1-28.
- Lapiere H, Jahn B M, Charvet J and Yu Y W. 1997. Mesozoic felsic arc magmatism and continental olivine tholeiites in Zhejiang Province and their relationship with the tectonic activity in southeastern China[J]. *Tectonophysics*, 274: 321-338.
- Li X H, Chung S L, Zhou H W, Lo H C, Liu Y and Chen H C. 2004. Jurassic intraplate magmatism in southern Hunan—eastern Guangxi: $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, Sr-Nd isotopes and implications for tectonic evolution of SE China[J]. *Geological Society London Special Publications*, 226(1): 193-216.
- Li J H, Zhang Y Q, Xu X B, Li H L, Dong S W and Li T D. 2014. SHRIMP U-Pb dating of zircon from the Baimashan Longtan super-unit and Wawutang Granites in Hunan Province and its geological implication[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science*

- Edition), 44(1): 158-175.
- Liang D J, Zhou G Q, Chen P Q, Guo Q F, Zhou Z L, Xu Y M, Xu Q C, Zhu B, Cai M H and He M. 1998. The Guangdong regional Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House. 458-509.
- Lin X M, Li H W, Lin J C, Huang J H, Huang K W, Huang H H and Liang W. 2015. The 1: 50 000 regional geological and mineral survey of Zhoubei commune, Longjie commune, Xinfeng County, Matou commune[R] (in Chinese).
- Liu C S, Chen X M, Wang R C and Hu H. 2003. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1-10 (in Chinese with English abstract).
- Liu C S, Chen X M, Wang R C, Zhang W L and Hu H. 2005. Isotopic dating and origin of complexly zoned micas for A-type Nankunshan aluminous granite[J]. *Geological Review*, 51(2): 193-200(in Chinese with English abstract).
- Liu P, Cheng Y B, Mao J W, Wang X Y, Yao W, Cheng X T and Zeng X J. 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 Geologica Sinica*, 89(7): 1244-1257.
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, Zong K Q and Wang D B. 2010a. Continental and oceanic crust recycling -induced melt-peridotite interactions in the Trans-China orogeny: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51(1-2): 537-571.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, Gao S, Xu J and Chen H H. 2010b. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1535-1546.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot 3.00: A geo-chronological toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronological Center: Special Publication, 41-73.
- Luo H L, Wu T R and Zhao L. 2010. Geochemistry and tectonic implications of the Permian I-type granitoids from Urad Zhongqi, Inner Mongolia[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 46(5): 805-820(in Chinese with English abstract).
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system[J]. *Earth-Science Reviews*, 37(3-4): 215-224.
- Miniar P D and Picelli P M. 1989. Tectonic discrimination of granitoids[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 101(5): 635-643.
- Pearce J A, Harris N B W and Tindle A G. 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 25: 956-983.
- Peccerillo A and Taylor S R. 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, northern Turkey[J]. *Contribution Mineral Petrology*, 58(1): 63-81.
- Qiu J S, Hu J, Wang X L, Jiang S Y, Wang R C and Xu X S. 2005. The Baishigang pluton in Heyuan, Guangdong Province: A highly fractionated I-type granite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 79(4): 503-514 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Y M, Gao S, Mcnaughton N J, Groves D I and Ling W L. 2000. First evidence of >3.2 Ga continental crust in the Yangtze Craton of South China and its implications for Archean crustal evolution and Phanerozoic tectonics[J]. *Geology*, 28(1): 11-14.
- Sun S S and McDough W F. 1989. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publications*, 43: 313-345.
- Stacey J S and Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207-221.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publication. 1-132.
- Tu G Z, Wang L K, Yang K Y, Fan S K, Wu X M, Yu X Y, Gu X F, Zhu W F, Hong W X, Gao Z M, Hou H Q, Wang S X, Zhang S L, Fan Y X, Sun S H, Zhao Z H, Wang Z G, Liu Y M, Li S B, Bai Z H, Zhao B, Lu H Z and Guo C J. Geochemistry of the South China granite[M]. Beijing: Sciencial Publishing House. 236(in Chinese).
- Wang D Z, Liu C S, Shen W Z and Chen F R. 1993. The contrast between Tonglu I-type and Xiangshan S-type clastoporphyrityc lava[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 9(1): 44-54(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Liao C L, Fan W M and Peng T P. 2004. Early Mesozoic OIB-type alkaline basalt in central Jiangxi Province and its tectonic implications[J]. *Geochimica*, 33: 109-117(in Chinese with English abstract).
- Wang Y J, Fan W M, Sun M, Liang X Q, Zhang Y H and Peng T P. 2007. Geochronological, geochemical and geothermal constraints on petrogenesis of the Indosinian peraluminous granites in the South China Block: A case study in the Hunan Province[J]. *Lithos*, 96(3-4): 475-502.
- Watson E B and Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited temperature and composition effects in a variety of crustal magma types[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295-304.
- Whalen J B, Crurrie K L and Chappell B W. 1987. A-type granite: Geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis[J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 95(4): 407-419.
- Wu Y B and Zheng Y F. 2004. The research of zircon mineralogy and restriction of U-Pb dating interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589-1604 (in Chinese).
- Xiao Z Y, Wang L M, Yang X M and Yang X Y. 1998. Petrological characteristics of geological of Shiling alkaline complex, Conghua, Guangdong Province, and its geological implications[J]. *Journal of China Universities*, 4(3): 133-138(in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Lu W M and He Z Y. 2007. The formation age and origin of Fogang granitic batholiths and the diorite-amphibole gabbro[J]. *Science in China (Series D)*, 37(1): 27-38 (in Chinese).
- Xu M H. 1992. Early Jurassic bimodal volcanic rocks and their structure environment in Yongding Country, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, (2): 115-125(in Chinese with English abstract).

- Yun P, Mo W R, Li S X and Xie S Z. 2002. Petrogeochemical characteristic basic minor intrusions in Hainan island and their tectonic[J]. *Guangdong Geology*, 17(4):9-16(in Chinese).
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao F Z, Gao S and Wu F Y. 2006a. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China[J]. *Precambrian Research*, 151(3-4): 265-288.
- Zhang S B, Zheng Y F, Wu Y B, Zhao F Z, Gao S and Wu F Y. 2006b. Zircon isotope evidence for ≥ 3.5 Ga continental crust in the Yangtze Craton of China[J]. *Precambrian Research*, 146(1-2): 16-34.
- Zhang J G, Yao G Q, Chen Y B, Fan Z H, Lin S Q and Yang Y L. 2011. Sub-Lacustrine Fan of Chengdian and zircon U-Pb ages and constraint on its provenance in Biyang depression, Nanxiang Basin, China[J]. *Journal of China University of Geosciences(Earth Science)*, 36(6): 1105-1108.
- Zhao Z H, Bao Z W and Zhang B Y. 1998. The geochemistry characteristics of the Mesozoic basalt in South Hunan Province[J]. *Science in China (Series D)*, 28(Suppl.): 7-14(in Chinese).
- Zhao Z J, M D S and Lin H K. 1987. Geochemistry characteristic of Longwo, Fogang granite body in Guangdong and their geological setting[M]. *The Geology and Mineral Research Report(First Series)*. Wuhan: Wuhan Geological Publishing House, 28-68(in Chinese).
- Zhong Y F, Ma C Q and Yu Z B. 2006. Grain size characteristics of Aeolian sand Dune at the Middle Reaches of the Yangtze River and its Paleoclimatic and environmental significance[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(1):27-34.
- Zhou X M and Li W X. 2000. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas[J]. *Tectonophysics*, 326: 269-287.
- Zhou X M, Sun T, Shen W Z, Shu L S and Niu Y L. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution[J]. *Episodes*, 29(1): 26-33.
- Zhou X M, Sun T and Shen W Z. 2007. Spatial-temporal pattern and genetic model of the granite-volcanic in the Mesozoic in the South China[M]. Beijing: Science in Publishing House(in Chinese).
- Zhuang W M, Chen S Q and Huang Y Y. 2000. Geological and geochemical characteristics of Fogang composite pluton and its source rock[J]. *Guangdong Geology*, 15(3):1-12(in Chinese with English abstract).
- 型花岗岩体的地球化学特征及其构造地质意义[J]. *岩石学报*, 14(3): 163-173.
- 陈培荣, 孔兴功, 王银喜, 倪琦生, 章邦桐, 凌洪飞. 1999. 赣南燕山早期双峰式火山-侵入岩的厘定及意义[J]. *地质论评*, 45(增刊): 734-741.
- 陈培荣, 华仁民, 章邦桐, 陆建军, 范春方. 2002. 南岭燕山早期后造山花岗岩类: 岩石学制约和地球动力学背景[J]. *中国科学(D辑)*, 32(4): 279-289.
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 胡欢, 张文兰, 高剑锋. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因[J]. *高校地质学报*, 8(3): 293-307.
- 范春方, 陈培荣. 2000. 赣南陂头A型花岗岩的地质地球化学特征及其形成的构造环境[J]. *地球化学*, 29(4): 359-366.
- 高剑峰, 陆建军, 赖鸣远, 林雨萍, 濮巍. 2003. 岩石样品中微量元素的高分辨率等离子质谱分[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 39(6): 844-850.
- 高万里, 王宗秀, 李春麟, 王对兴. 2014. 浙东南印支期花岗岩的锆石 U-Pb 年代学、地球化学及构造意义[J]. *地质学报*, 88(6): 1055-1067.
- 郭新生, 陈江峰, 张巽, 汤加富, 谢智, 周泰禧, 刘玉龙. 2001. 桂东南富钾岩浆杂岩的 Nd 同位素组成华南中生代地幔物质上涌事件[J]. *岩石学报*, 17(1): 19-27.
- 邓中林, 廖示庭, 刘辉东, 郭良, 张忠进, 贺小元. 2009. 1:25万连平县幅区域地质调查报告[R].
- 黄友义, 庄文明, 陈绍前, 王凤花. 2000. 广东乌石岩体的地质地球化学特征及形成年代[J]. *广东地质*, 15(3): 13-19.
- 李建华, 张岳桥, 徐先兵, 李海龙, 董树文, 李廷栋. 2014. 湖南白马山龙潭超单元、瓦屋塘花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 44(1): 158-175.
- 梁敦杰, 周国强, 陈培权, 郭清福, 周振林, 许益民, 徐庆登, 朱白, 蔡木湖, 何森. 1988. 广东省区域地质志[M]. 北京: 地质出版社. 458-509.
- 林小明, 李宏卫, 林杰春, 黄建桦, 黄孔文, 黄海华, 梁武. 2015. 广东省1:5万周陂公社、隆街公社、马头幅、新丰幅区域地质矿产调查[R].
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 胡欢. 2003. 广东龙口南山铝质A型花岗岩的成因[J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 1-10.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 张文兰, 胡欢. 2005. 广东南昆山A型花岗岩定年和环带云母研究[J]. *地质论评*, 51(2): 193-200.
- 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.
- 罗红玲, 吴泰然, 赵磊. 2010. 乌拉特中旗二叠纪 I 型花岗岩类地球化学特征及构造意义[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 46(5): 805-820.
- 邱检生, 胡建, 王孝磊, 蒋少涌, 王汝成, 徐夕生. 2005. 广东河源白石岗岩体: 一个高分异的 I 型花岗岩[J]. *地质学报*, 79(4): 503-514.
- 涂光帆, 王联魁, 杨科佑, 范嗣昆, 吴学孟, 于学元, 顾雄飞, 朱为方, 洪文兴, 高振敏, 候鸿泉, 王三学, 张绍立, 范育祥, 孙世华, 赵振

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探[J]. *地质地球化学*, 31(1):52-61.
- 陈璟元, 杨进辉. 2015. 佛冈高分异 I 型花岗岩的成因: 来自 Nb-Ta-Zr-Hf 等元素的制约[J]. *岩石学报*, 31(1): 0846-0851.
- 陈培荣, 章邦桐, 孔兴功, 蔡笔聪, 凌洪飞, 倪琦生. 1998. 赣南寨背 A

- 华, 王中刚, 刘义茂, 李绍柄, 白正华, 赵斌, 卢焕章, 郭承基. 1979. 华南花岗岩类的地球化学[M]. 北京: 科学出版社. 236.
- 王德滋, 刘昌实, 沈渭洲, 陈繁荣. 1993. 桐庐 I 型和相山 S 型两类碎斑熔岩对比[J]. 岩石学报, 9(1): 44-54.
- 王岳军, 廖超林, 范蔚茗, 彭头平. 2004. 赣中地区早中生代 OIB 碱性玄武岩的厘定及构造意义[J]. 地球化学, 33: 109-117.
- 吴元保, 郑永飞. 2004. 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, 49(16):1589-1604.
- 肖振宇, 汪礼明, 杨学明, 杨晓勇. 1998. 广东从化石岭碱性杂岩的岩石学特征及地质意义[J]. 高校地质学报, 4(3): 133-138.
- 徐夕生, 鲁为敏, 贺振宇. 2007. 佛冈花岗岩基及乌石闪长岩-角闪辉长岩体的形成年龄和起源[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 37(1): 27-38.
- 许美辉. 1992. 福建永定地区早侏罗世双峰式火山岩及其构造环境[J]. 福建地质, (2): 115-125.
- 云平, 莫位任, 李孙雄, 谢盛周. 2002. 海南岛中部侏罗纪基性小岩体岩石地球化学特征及其构造意义[J]. 广东地质, 17(4):9-16.
- 张建光, 姚光庆, 陈亚兵, 樊中海, 林社卿, 杨永利. 2011. 南疆盆地沁阳凹陷深水湖底扇厘定及碎屑锆石 U-Pb 年代学物源追踪[J]. 地球科学, 36(6): 1105-1108.
- 赵振华, 包志伟, 张伯友. 1998. 湘南中生代玄武岩类地球化学特征[J]. 中国科学(D辑), 28(增刊): 7-14.
- 赵子杰, 马大拴, 林惠坤. 1987. 广东龙窝、佛冈花岗岩体地球化学特征及其地质背景. 南岭地质矿产科研报告集(第一辑)[M]. 武汉: 武汉地质学院出版社. 28-68.
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵. 2006. 锆石地球化学特征及地质应用研究综述[J]. 地质科技情报, 25(1): 27-34.
- 周新民, 孙涛, 沈渭洲. 2007. 华南中生代花岗岩-火山岩时空格局与成因模式[M]. 北京: 科学出版社.
- 庄文明, 陈绍前, 黄友义. 2000. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及成岩源区[J]. 广东地质, 15(3):1-12.

<http://www.kcdz.ac.cn/>