https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.219

桂东南早白垩世晚期火山岩年代学、地球化学特征及地质意义

李衣鑫[1],康志强[1*],许继峰[2],杨　锋[1],刘冬梅[1],刘珊珊[1],单纯希[1]

1. 桂林理工大学地球科学学院,有色金属矿产勘查与资源高效利用协同创新中心,广西桂林 541004
2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

摘　要: 桂东南地区晚中生代岩浆活动广泛发育,其形成构造背景以及动力学机制仍存在争议.本文对桂东南新州塘、大业地区火山岩进行了年代学、全岩地球化学和Sr-Nd-Hf同位素研究.结果显示新州塘、大业火山岩主体分别为安山岩和英安岩,锆石U-Pb年龄分别为98.5~100.5 Ma、99.2 Ma,均形成于早白垩世晚期.两者均具有低TiO_2(平均值<1%)、高Al_2O_3(平均值>15%)的特点,属于高钾钙碱性-钾玄系列,均富集LILE、亏损HFSE,在稀土元素配分模式上均表现为轻稀土富集右倾型,无明显的Eu异常.新州塘样品与大业样品相比具有较低的SiO_2含量、更高的$Mg^{\#}$值以及更高的Cr、Ni的含量,属于高镁安山岩.Sr-Nd-Hf同位素结果显示新州塘安山岩样品相对大业英安岩样品具有更加亏损的特征$\varepsilon_{Nd}(t)$值(分别为-6.26~-7.11、-9.35~-9.37)和$\varepsilon_{Hf}(t)$值(分别为-6.47~-8.95、-8.70~-14.08).综上所述,桂东南地区新州塘高镁安山岩应该是由富集地幔部分熔融形成,而大业英安岩是同期古元古代地壳物质部分熔融所形成,它们的形成与晚中生代华南大陆的拉张伸展构造密切相关.

关键词: 白垩纪;火山岩;锆石U-Pb定年;地球化学;桂东南.

中图分类号: P588.14;P595;P597　　**文章编号:** 1000-2383(2023)08-2872-16　　**收稿日期:** 2021-12-22

Chronological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Volcanic Rocks in the Late Early Cretaceous in Southeast Guangxi

Li Yixin[1], Kang Zhiqiang[1*], Xu Jifeng[2], Yang Feng[1], Liu Dongmei[1], Liu Shanshan[1], Shan Chunxi[1]

1. *College of Earth Sciences, Collaborative Innovation Center for Exploration of Hidden Nonferrous Metal Deposits and Development of New Materials in Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin* 541006, *China*
2. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences, Beijing* 100083, *China*

Abstract: The late Mesozoic magmatism was widely developed in southeastern Guangxi, and its formation background and dynamic mechanism are still controversial. Chronological, whole-rock geochemistry and Sr-Nd-Hf isotope studies were carried out on the volcanic rocks in Xinzhoutang and Daye areas in southeast Guangxi. The results show that the main bodies of the Xinzhoutang and Daye volcanic rocks are andesite and dacite, respectively, and the zircon U-Pb ages are 98.5 to 100.5 Ma and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 42173048, 41863005);广西八桂学者项目(许继峰);国家重点研发计划项目(No. 2020YFA0714804);第二次青藏高原综合科学考察项目(No. 2019QZKK0703).

作者简介: 李衣鑫(1997-),男,硕士研究生,主要从事岩石地球化学研究.ORCID: 0000-0002-8549-9431. E-mail: 892740094@qq.com

* **通讯作者:** 康志强,E-mail: ZK99201@163.com

引用格式: 李衣鑫,康志强,许继峰,杨锋,刘冬梅,刘珊珊,单纯希,2023.桂东南早白垩世晚期火山岩年代学、地球化学特征及地质意义.地球科学,48(8):2872-2887.

Citation: Li Yixin, Kang Zhiqiang, Xu Jifeng, Yang Feng, Liu Dongmei, Liu Shanshan, Shan Chunxi, 2023. Chronological, Geochemical Characteristics and Geological Significance of Volcanic Rocks in the Late Early Cretaceous in Southeast Guangxi. *Earth Science*, 48(8): 2872-2887.

99.2 Ma, respectively, which were formed in the late Early Cretaceous. Both have the characteristics of low TiO_2 (average value< 1%) and high Al_2O_3 (average value>15%). They belong to the high potassium calcium-alkaline-potassium series. Both are enriched in LILE and depleted in HFSE, in the rare earth element distribution mode The above all showed the light rare earth enrichment right-leaning type, without obvious Eu anomaly. Compared with the Daye sample, the Xinzhoutang sample has a lower SiO_2 content, a higher $Mg^{\#}$ value, and a higher Cr and Ni content, It belongs to high magnesium andesite. The Sr-Nd-Hf isotope results show that the Xinzhou Tang andesite samples are more depleted than the Daye dacite samples ($\varepsilon_{Nd}(t)$ values are (−6.26～−7.11, −9.35～−9.37), $\varepsilon_{Hf}(t)$ values are (−6.47～−8.95, −8.70～−14.08)). Comprehensive regional data The Xinzhoutang andesite should be formed by partial melting of the enriched mantle, while the Daye dacite was formed by partial melting of the Paleoproterozoic crustal material during the same period. Their formation is closely related to the extensional structure of the South China continent in the Late Mesozoic.

Key words: Cretaceous; volcanic rocks; zircon U-Pb dating; geochemistry; Southeast Guangxi.

0　引言

华南板块(扬子和华夏地块拼合而成)北邻华北克拉通和秦岭—大别造山带，东临太平洋，西连三江造山带，西南与印支地块接壤，处于多板块的交汇地带，受到了多个构造域的影响．华南中生代岩浆活动十分旺盛，特别是晚中生代，发育了众多长英质岩石(Zhou *et al.*, 2006；杨帆等，2018)．前人对华南晚中生代岩浆活动进行了大量的研究与调查，就其成因提出了地幔柱假说(毛建仁等，1999)、岩石圈伸展假说(李献华等，1999；Li, 2000)、平板俯冲假说(Li and Li, 2007)、弧后环境假说(Zhou *et al.*, 2006；谭俊等，2008)等．需要注意的是，前人对于华南晚中生代的相关研究大多集中东南沿海地区，对于华南内陆地区的研究相对较少．且研究的对象集中于分布广泛的花岗岩等酸性侵入岩体，其他种类岩浆岩的证据(例如基性—中性火山岩等)相对较少，尚需更多资料进一步完善研究．

桂东南地区位于华南内陆，处于华南重要的多金属成矿带钦杭结合带的西南端，出露有晚中生代火山岩，是研究完善华南晚中生代岩浆活动成因机制和构造背景的理想研究对象．尽管前人开展了一定程度的研究工作，但对其成因还是存在较大争议：(1)岩浆岩的形成受古太平洋板块影响，处于同碰撞挤压或伸展的环境下(毛景文等，2008；毕诗健等，2015；李程，2018)；(2)岩浆岩的形成是新特提斯洋脊向南海北缘俯冲的结果(强萌麟，2016；刘洋等，2021)；(3)岩浆岩的形成与软流圈地幔上涌和岩石圈伸展—减薄有关(陈新跃等，2013；劳妙姬等，2015)．因此，本文选择桂东南地区新州塘、大业晚中生代火山岩进行了系统的年代学、地球化学研究，探讨其岩石成因及形成环境，从而为桂东南地区晚中生代岩浆岩形成的大地构造背景提供约束．

1　地质背景及样品描述

桂东南地区位于扬子地块与华夏地块拼合带西南段(钦杭成矿带西南缘，如图1)，研究区属于钦州—云开地块，夹持于凭祥—大黎断裂系和岑溪—博白断裂系之间，白垩纪火山活动多以安山质岩浆喷发开始，向英安质、流纹质演化(强萌麟，2019)．本文研究区火山岩分布于玉林市新州塘、岑溪市大业一带(如图2)，新州塘地区出露的主要地层为志留系、泥盆系、石炭系、白垩系、第四系；大业地区出露的主要地层为志留系、侏罗系和白垩系．

本次研究8件样品采自新州塘地区的燕山晚期紫苏安山玢岩(N：22°31′51″，E：110°13′20.5″)，2件样品采于大业地区的晚白垩世西垌组火山岩(N：22°58′16.98″，E：111°12′43.32″)．对其中用于锆石U-Pb定年的样品19XZT-01、19XZT-02、19DY-02、20XZT-02、20XZT-04进行了详细的镜下鉴定，结合野外观察，新州塘样品均为安山岩，大业样品为英安岩．

19XZT-01样品手标本呈紫红色，具斑状结构(图3a)．镜下斑晶主要为斜长石(1%～3%)和暗色矿物假晶(5%～10%)，另外还有少量的石英(<1%)．其中斜长石呈自形—半自形板柱状，粒径0.5～1.2 mm，具明显双晶并且具有溶蚀边以及爆裂纹；暗色矿物(角闪石、辉石)蚀变较强，形态不明显(图3b)．基质具比较明显的安山结构，主要以暗色矿物微晶为主，其间充填斜长石微晶．定名为紫红色安山岩．

19XZT-02样品手标本呈灰绿色，具斑状结构(图3c)．斑晶以辉石和斜长石为主(10%～20%)，

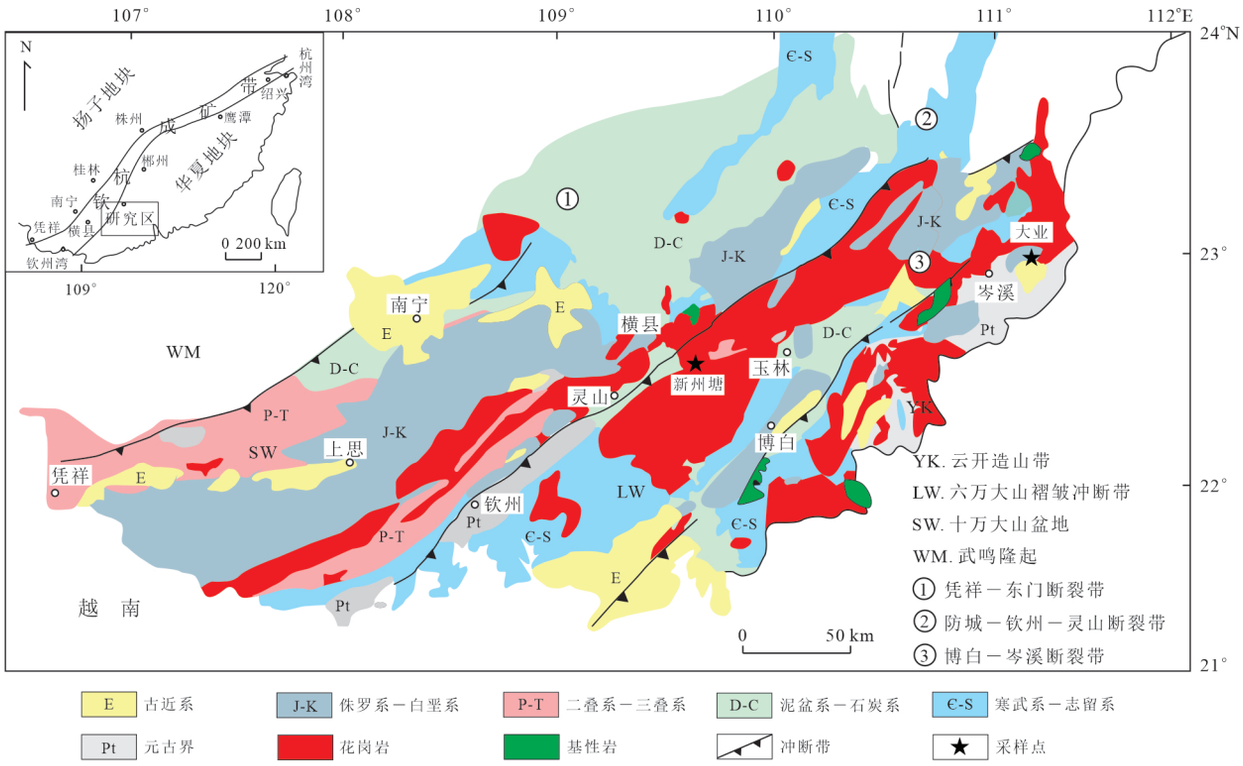

图 1　桂东南地质简图

Fig.1　Geological map of Southeast Guangxi

也含有少量的角闪石、黑云母、绿泥石(<1%). 其中斜长石呈自形－半自形板柱状,粒径 0.5～1.0 mm;辉石呈自形－半自形板柱状,粒径 0.2～0.8 mm,两者蚀变均较强. 黑云母、绿泥石等应该是由暗色矿物假晶的演化而来,暗示样品演化程度较强(图 3d). 基质具比较明显的安山结构,主要以暗色矿物微晶为主,其间充填斜长石微晶. 定名为灰绿色安山岩.

20XZT-02 样品手标本呈紫红色,具斑状结构(图 3e). 斑晶主要为暗色矿物(10%～15%),辅以斜长石(4%～5%)和石英(1%～2%). 其中暗色矿物斑晶以角闪石和辉石为主,角闪石数量相对较多,粒度 0.2～0.5 mm,蚀变程度较强;斜长石呈自形－半自形板柱状,粒度 0.3～0.9 mm,双晶比较明显;石英整体较平整光滑,粒度 0.5～1.2 mm,有些石英边部经受了比较明显的溶蚀(图 3f). 基质具比较明显的安山结构,主要以暗色矿物微晶为主,其间充填斜长石微晶. 定名为紫红色安山岩.

20XZT-04 样品手标本呈灰绿色,具斑状结构(图 3g). 斑晶主要为斜长石(5%～15%),另外还含有少量的石英与暗色矿物(2%～3%). 其中斜长石呈自形－半自形板柱状,粒径 0.5～2.0 mm,多数在 0.5～1.0 mm 之间,常具破碎纹,部分蚀变较强(图 3h). 基质具比较明显的安山结构,主要以暗色矿物微晶为主,其间充填斜长石微晶. 定名为灰绿色安山岩.

19DY-02 样品手标本为灰绿色,较为致密且具斑状结构(图 4a). 斑晶主要为斜长石(10%～20%)与暗色矿物(5%～10%). 其中斜长石自形情况不佳且破碎较严重,蚀变程度较高,具绢云母化以及暗色矿物矿化;暗色矿物蚀变程度也比较高,以角闪石和辉石居多,自形程度较斜长石更好,粒度 0.2～0.9 mm(图 4b). 基质具明显的隐晶质结构,主要以长英质物质为主. 定名为灰绿色英安岩.

2　测试方法

本次研究选取了新州塘地区的安山岩 19XZT-01、19XZT-02、20XZT-02、20XZT-04 和大业地区英安岩 19DY-02 进行定年. 研究用于进行锆石 U-Pb 年代学测试的样品交由河北廊坊市诚信地质服务有限公司代为分选锆石并制靶,在桂林理工大学精密显微镜实验室进行锆石透－反射照片拍摄,在广西隐伏金属矿产勘查重点实验室电子探针室拍摄锆石阴极发光(CL)图,通过透－反射照片和阴极发

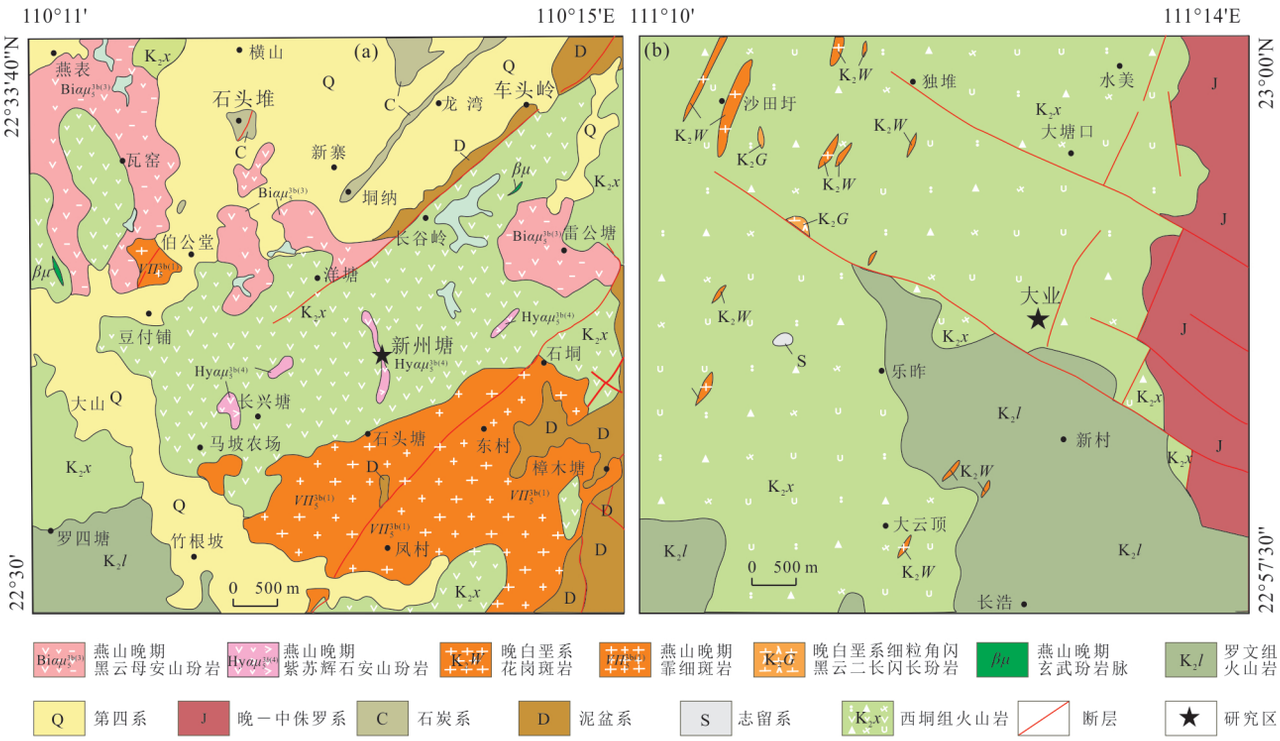

图 2　桂东南新州塘、大业研究区区域地质图(据广西 1:5 万区域地质图玉林幅、归义镇幅修改)

Fig.2　Regional geological map of xinzhoutang and Daye research area in Southeast Guangxi(After the 1:50 000 regional geological map of Guangxi, the Yulin sheet and the Guiyi town sheet)

光(CL)图像观察其锆石的晶体形貌和内部结构,从中挑选出合适的同位素分析区域. LA-ICP-MS 锆石微区原位定点年测试分析在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室内完成,分析仪器为激光电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS),激光取样系统 Coherent GeoLas HD 激光剥蚀系统与 Agilent 7900 电感耦合等离子体质谱仪连接. 本次分析激光器工作频率为 5 Hz,剥蚀物质载气为高纯度氦气,测试采用的激光束斑直径为 32 μm,锆石年龄计算采用标准锆石 Temora 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST610 作为外标. 数据处理通过 ICPMSDataCal7.2(Liu *et al.*, 2009)进行,普通 Pb 校正采用 Andersen 方法(Andersen,2002),锆石样品的 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄权重平均计算均采用国际标准程序 Isoplot3.0(Ludwig,2003). 详细的仪器操作条件和数据处理方法参考文献(Yuan *et al.*, 2004). U-Pb 同位素分析结果见附表 1 、附表 2.

样品的主、微量元素分析测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成. 主量元素采用碱熔玻璃片 XRF 法,使用仪器日本理学 ZSX Primus Ⅱ X 射线荧光光谱仪分析,微量元素采用高温高压消解,用 Angilent 7500cx 多接收电感耦合等离子质谱仪进行分析. 分析精度好于 5%,微量元素分析精度优于 10%,相关分析方法和程序参见文献刘颖等(刘颖等,1996). 分析结果见附表 3.

Sr、Nd 同位素测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成. 用阳离子树脂分离 Rb,Sr 和 REE,用 HDEHP 进一步分离 Sm 和 Nd. Sr-Nd 同位素用 Micromass Isoprobe 型多接收器等离子质谱仪(MC-ICP-MS)测定. $^{87}Sr/^{86}Sr$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 比值用 $^{87}Sr/^{86}Sr=0.119\ 4$ 和 $^{146}Nd/^{144}Nd=0.721\ 9$ 校正. 详细的 Sr-Nd 同位素分析方法采用梁细荣等(2003). 测试结果见附表 4.

锆石原位 Hf 同位素分析是在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行,利用装配 ESI New wave 193 ArF 准分子激光器的高分辨率多接收器 ICP-MS 系统完成. 本次分析激光器重复频率为 10 Hz,剥蚀时间 60 s,测试采用的激光束斑直径为 44 μm,脉冲能量密度约为 5.2 ~6.1 J/cm^2,剥蚀深度 2 μm. 在实验过程中,采用标准锆石 GJ-1 来检验仪器的稳定性和可靠性,其平均值为 $^{176}Hf/^{177}Hf=0.281\ 996\pm0.000\ 020$($2\sigma$, n=121). 并且采用同一点的 β_{Yb} 的平均值 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 进行干扰校正

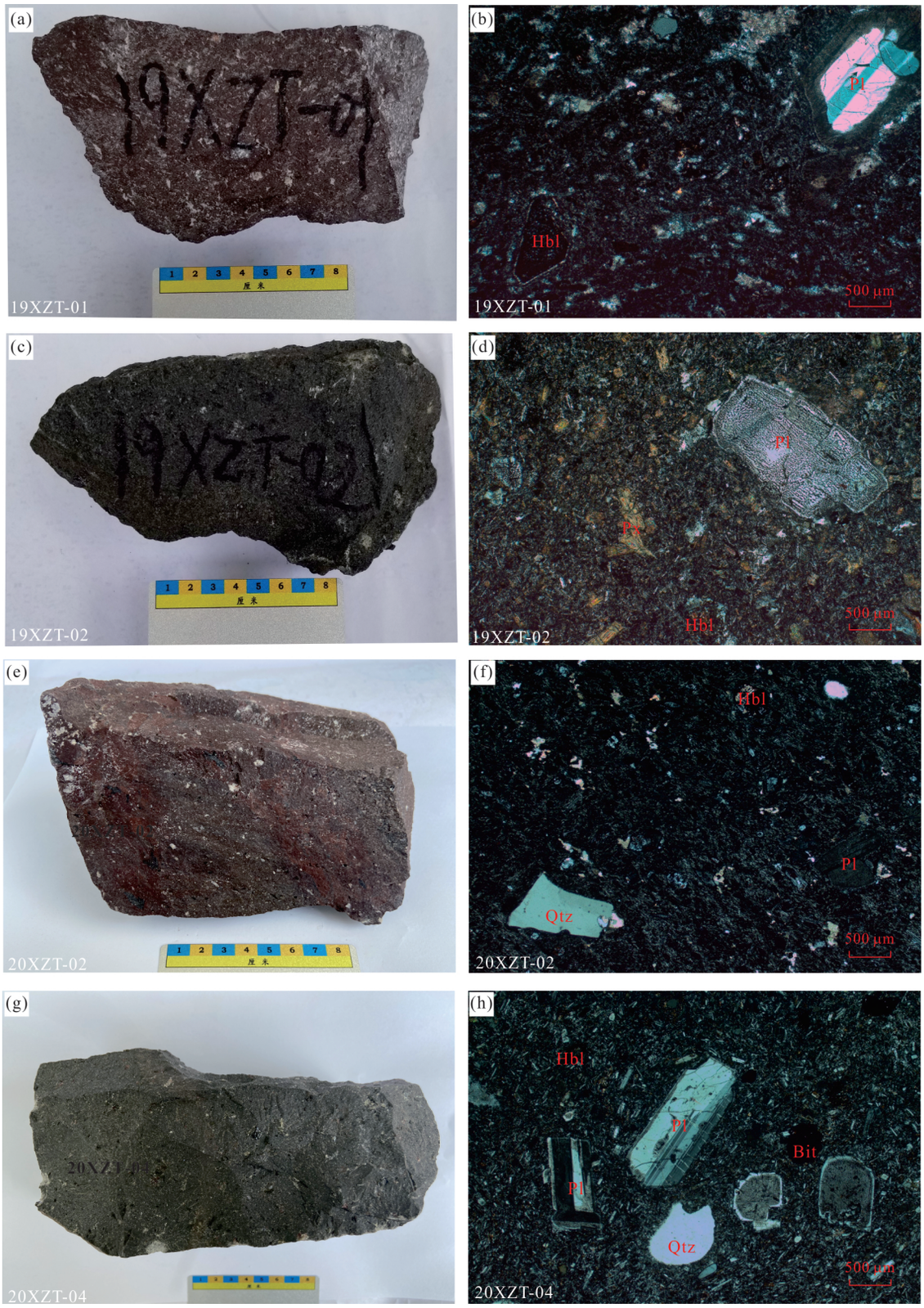

图 3　新州塘样品手标本及镜下显微照片

Fig 3　Photographs of Hand specimens and micrographs of Xinzhoutang samples

Pl. 斜长石；Hbl. 角闪石；Qtz. 石英；Bit. 黑云母；Px. 辉石

（唐红峰，2008），以此来确保数据的准确程度．初始 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值计算采用的 ^{176}Lu 衰变常数为

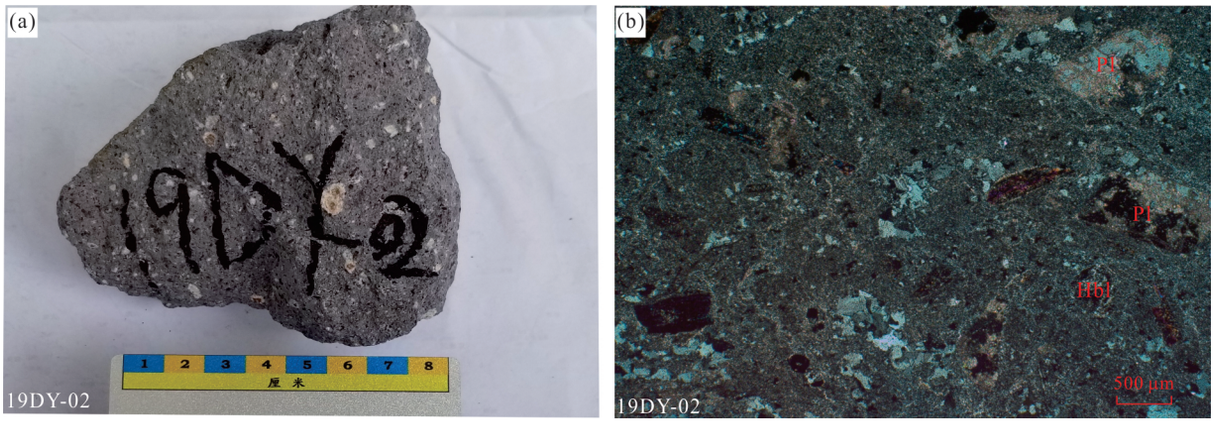

图 4　大业样品手标本及镜下显微照片

Fig 4　Photographs of Hand specimens and micrographs of Daye samples

Pl. 斜长石;Hbl. 角闪石

1.867×10^{-11}, 球粒陨石 $^{176}Hf/^{177}Hf=0.033\ 6\pm1$ 和 $^{176}Hf/^{177}Hf=0.282\ 785\pm11(2\sigma)$ 用作进行 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 计算,每个锆石的地壳模式年龄计算(T_{DM2})基于假设平均大陆地壳 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 值是 0.015 的两阶段模型,详细测试流程及方法详见文献侯可军等、吴福元等(吴福元等,2007). 测试结果详见附表 5、附表 6.

3　分析结果

3.1　锆石 U-Pb 年龄

样品 19XZT-01 中的锆石阴极发光(CL)图像显示大多无色透明,自形程度较好,呈短柱状—长柱状,长度为 100～200 μm,宽 60～120 μm,几乎所有的锆石都显示典型的韵律震荡环带,U、Th 元素含量分别为 $1\ 140\times10^{-6}$～$4\ 851\times10^{-6}$,816×10^{-6}～$2\ 444\times10^{-6}$,Th/U 比值均大于 0.4(附表 1),显示典型的岩浆锆石特点(Hoskin and Black, 2007). 选择样品中 35 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析测试,剔除谐和度小于 90% 的分析点后,有 15 个分析点位于 U-Pb 年龄谐和线附近(图 5a),使用 Isoplot 得出其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 100.5±1.7 Ma(图 5b),代表了火山岩的形成时代.

样品 19XZT-02 中的锆石阴极发光(CL)图像显示大多无色透明,自形程度较好,呈短柱状—长柱状,长度为 100～200 μm,宽 60～150 μm,几乎所有的锆石都显示典型的韵律震荡环带,U、Th 元素含量分别为 970×10^{-6}～$2\ 899\times10^{-6}$,716×10^{-6}～$1\ 837\times10^{-6}$,Th/U 比值均大于 0.4(附表 1),显示典型的岩浆锆石特点(Hoskin and Black, 2007). 选择样品中 35 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析测试,剔除谐和度小于 90% 的分析点后,有 17 个分析点位于 U-Pb 年龄谐和线附近(图 5c),使用 Isoplot 得出其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 98.6±1.5 Ma(图 5d),代表了火山岩的形成时代.

样品 20XZT-02 中的锆石阴极发光(CL)图像显示大多无色透明,自形程度较好,呈短柱状—长柱状,长度为 100～200 μm,宽 60～110 μm,几乎所有的锆石都显示典型的韵律震荡环带,U、Th 元素含量分别为 561×10^{-6}～$3\ 545\times10^{-6}$,450×10^{-6}～$2\ 251\times10^{-6}$, Th/U 比值均大于 0.4(附表 1),显示典型的岩浆锆石特点(Hoskin and Black, 2007). 选择样品中 32 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析测试,剔除谐和度小于 90% 的分析点后,有 17 个分析点位于 U-Pb 年龄谐和线附近(图 5e),使用 Isoplot 得出其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 98.6±0.7 Ma(图 5f),代表了火山岩的形成时代.

样品 20XZT-04 中的锆石阴极发光(CL)图像显示大多无色透明,自形程度较好,呈短柱状—长柱状,长度为 100～200 μm,宽 60～120 μm,几乎所有的锆石都显示典型的韵律震荡环带,U、Th 元素含量分别为 811×10^{-6}～$4\ 430\times10^{-6}$,622×10^{-6}～$2\ 739\times10^{-6}$,Th/U 比值均大于 0.4(附表 1),显示典型的岩浆锆石特点(Hoskin and Black, 2007). 选择样品中 32 颗锆石进行 U-Pb 同位素分析测试,剔除谐和度小于 90% 的分析点后,有 20 个分析点位于 U-Pb 年龄谐和线附近(图 5g),使用 Isoplot 得出其 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄加权平均值为 98.4±0.7 Ma(图 5h),代表了火山岩的形成时代.

样品 19DY-02 中的锆石阴极发光(CL)图像显示大多无色透明,自形程度较好,呈短柱状—长柱

状，长度为100～200 μm，宽60～110 μm，几乎所有的锆石都显示典型的韵律震荡环带，U、Th元素含量分别为681×10^{-6}～4 653×10^{-6}，766×10^{-6}～3 253×10^{-6}，，Th/U比值均大于0.4（附表2），显示典型的岩浆锆石特点（Hoskin and Black，2007）．选择样品中35颗锆石进行U-Pb同位素分析测试，剔除谐和度小于90%的分析点后，有17个分析点位于U-Pb年龄谐和线附近（图6a），使用Isoplot得出其$^{206}Pb/^{238}U$年龄加权平均值为99.2±1.6 Ma（图6b），代表了火山岩的形成时代．

3.2 主量元素

新州塘地区火山岩的SiO_2含量为53.95%～58.61%，平均值为56.46%；Al_2O_3含量为13.45%～15.42%，平均值为14.64%；铝饱和度较高（A/CNK=0.73～1.17，平均值0.91）；全碱Na_2O+K_2O平均含量为5.99%，此外具有高镁（$Mg^{\#}$=65.5～71.8）和低钛（TiO_2值为0.66～0.73）的特征，详细主量数据见附表3．在Zr/TiO_2-Nb/Y图解中（图7a），样品均落入安山岩范围内，符合镜下安山岩的鉴定．在Th-Co图解上（图7b），样品位于高钾钙碱性系列．大业地区火山岩的SiO_2含量为65.00%～74.08%，平均值为69.54%；Al_2O_3含量为13.97%～15.87%，平均值为14.92%；铝饱和度较高（A/CNK=1.22～2.81，平均值2.01）；全碱Na_2O+K_2O平均含量为5.27%，此外具有低镁（$Mg^{\#}$=31.2～37.0）和低钛（TiO_2值为0.44～0.56）的特征．在Zr/TiO_2-Nb/Y图解中（图7a），样品落入英安岩－流纹岩与粗面安山岩交界处内，符合镜下英安岩的辨别．在Th-Co图解上（图7b），样品位于高钾钙碱性－钾玄系列．

3.3 微量元素

新州塘安山岩样品在球粒陨石标准化REE分布模式图上（图8a），总体表现轻稀土富集右倾型，稀土总量（∑REE含量）为（149.69×10^{-6}～212.73×10^{-6}），平均值为174.24×10^{-6}；$(La/Yb)_N$为15.37～18.87，平均值为17.01；Eu表现为无负异常到弱的负异常（δEu值为0.84～0.95）．大业英安岩样品在球粒陨石标准化REE分布模式图上也表现轻稀土富集右倾型，稀土总量（∑REE含量）为（297.43×10^{-6}～306.98×10^{-6}），平均值为302.20×10^{-6}；$(La/Yb)_N$为24.81～36.10，平均值为30.46；Eu表现为弱的负异常（δEu值为0.76～0.81），可能与斜长石在岩浆中的分离结晶有关，或与难熔残余相有关（Sun *et al.*，1989；曹延等，2020）．

在微量元素原始地幔标准化蛛网图中（图8b），安山岩与英安岩样品总体上富集大离子亲石元素Rb、K、Th和U等，亏损高场强元素Nb、Zr、Ta和Ti，其中英安岩还表现出明显Sr负异常，可能与岩浆演化过程中钛铁矿物和斜长石的结晶分离或残留于熔融残余体中有关（Sun *et al.*，1989）．

3.4 Sr-Nd元素

本次研究对所采样品进行了Sr-Nd同位素分析，岩石整体具有高的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$和低$^{143}Nd/^{144}Nd$的特点，新州塘安山岩样品的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值为0.708 309～0.708 442，$\varepsilon_{Nd}(t)$值为－6.26～－7.11；大业英安样品的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值为0.702 026～0.709 930，$\varepsilon_{Nd}(t)$值为－9.35～－9.37，两者样品均显示出富集特征．t-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解（图9a）中，大业英安岩样品落入华南元古宙地壳演化范围内（沈渭洲等，1993）；在$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解（图9b）中，样品均落在EMⅠ型富集地幔附近．

3.5 锆石Hf元素

原位锆石Hf同位素分析显示样品均具有负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值，并且$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$的值与二阶段Hf模式年龄T_{DM2}变化较小．其中新州塘安山岩的$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$的值为0.282 471～0.282 539，其$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化范围在－6.47～－8.95，二阶段Hf模式年龄T_{DM2}在1.55～1.70 Ga；大业英安岩的$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$的值为0.282 325～0.282 480，其$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化范围在－8.70～－14.08，二阶段Hf模式年龄T_{DM2}在1.68～2.02 Ga．在t～$\varepsilon_{Hf}(t)$图解（图10b）中，所有安山岩以及部分英安岩均落入球粒陨石与1.8 Ga地壳演化线之间，部分英安岩落入1.8 Ga地壳与2.5 Ga地壳演化线之间．在t-$(^{176}Hf/^{177}Hf)_i$图解中（图10a），所有安山岩均落入球粒陨石与下地壳演化线之间，而大部分英安岩点位于下地壳演化线与上地壳演化线之间．

4 讨论

4.1 岩浆成因与源区特征

新州塘安山岩样品样品MgO含量为5.44～6.82 %、FeO^T/MgO比值为0.91～1.23、Al_2O_3含量为13.45%～15.87%、CaO含量为1.18%～5.80%、$Mg^{\#}$值为65.5～71.8，与典型的高镁安山岩划分标准相符．根据前人研究，高镁安山岩的成因一般包括：①含水流体加入地幔楔后促使地幔橄榄岩部分熔融（Tatsumi，1982；Crawford *et al.*，1989）；②俯冲板

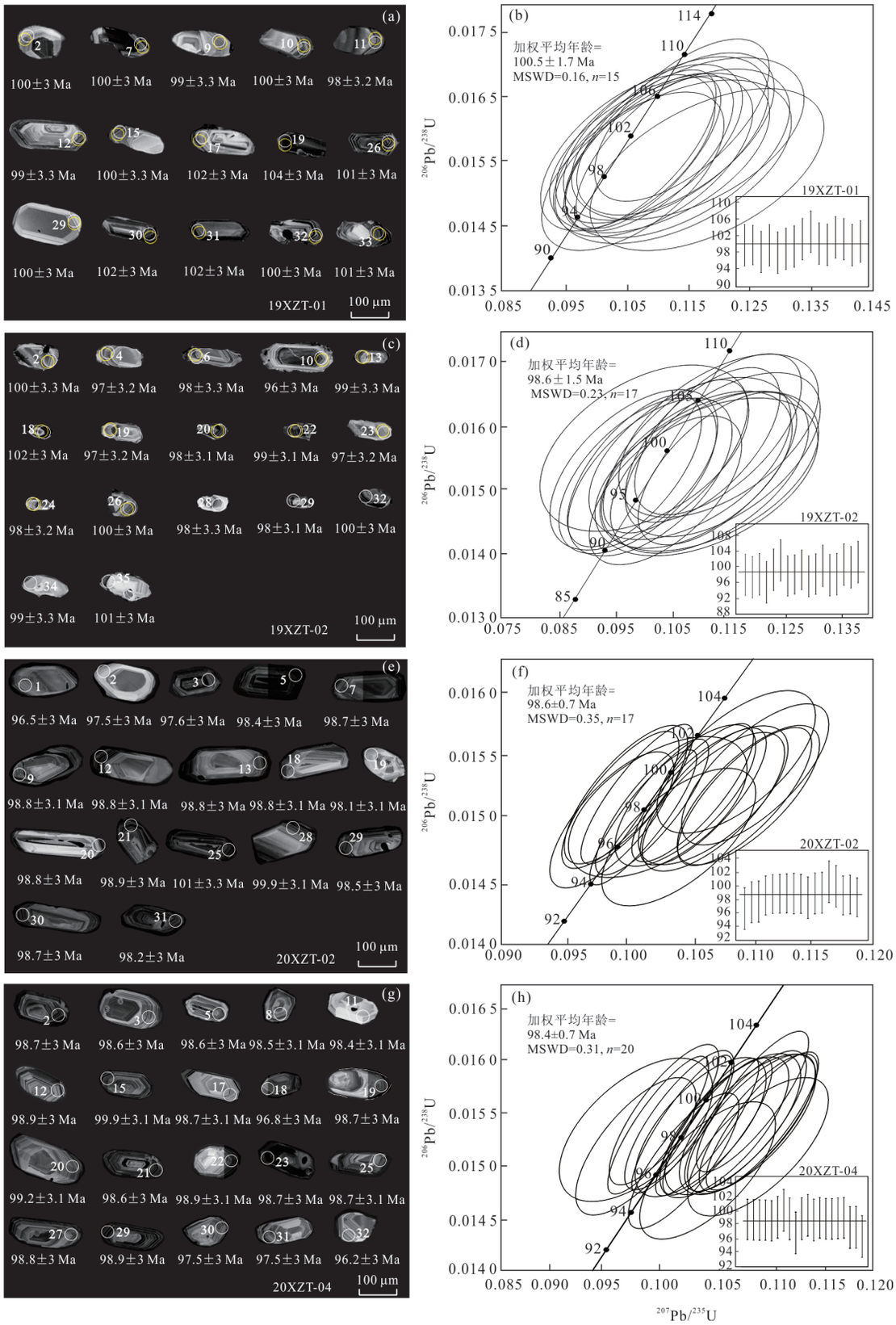

图 5　新州塘样品锆石 CL 图和锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5　CL images and U-Pb concordia diagrams for zircons of Xinzhoutang samples

左侧图片白色圆圈代表锆石 U-Pb 年龄选点,黄色圆圈代表锆石 Hf 同位素选点

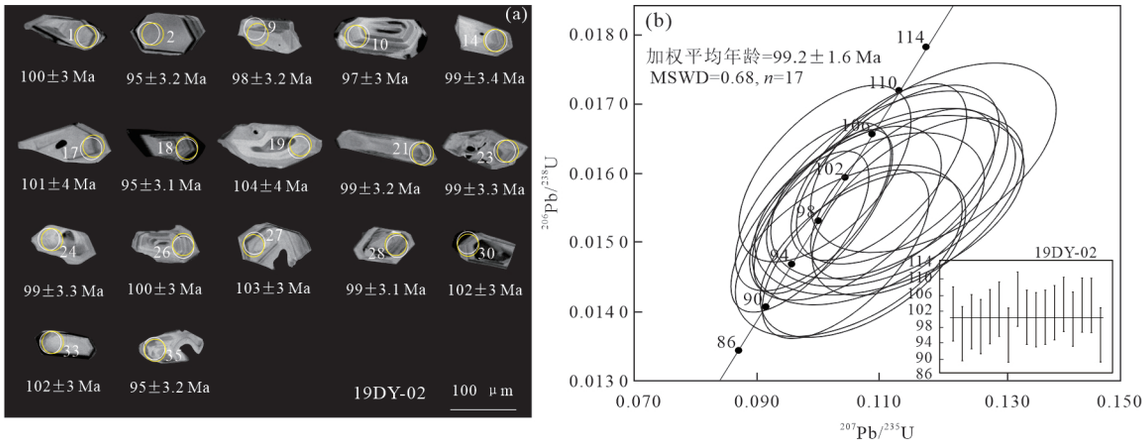

图6　大业样品锆石CL图和锆石U-Pb年龄谐和图

Fig. 6　CL images and U-Pb concordia diagrams for zircons of Daye samples

左侧图片白色圆圈代表锆石U-Pb年龄选点，黄色圆圈代表锆石Hf同位素选点

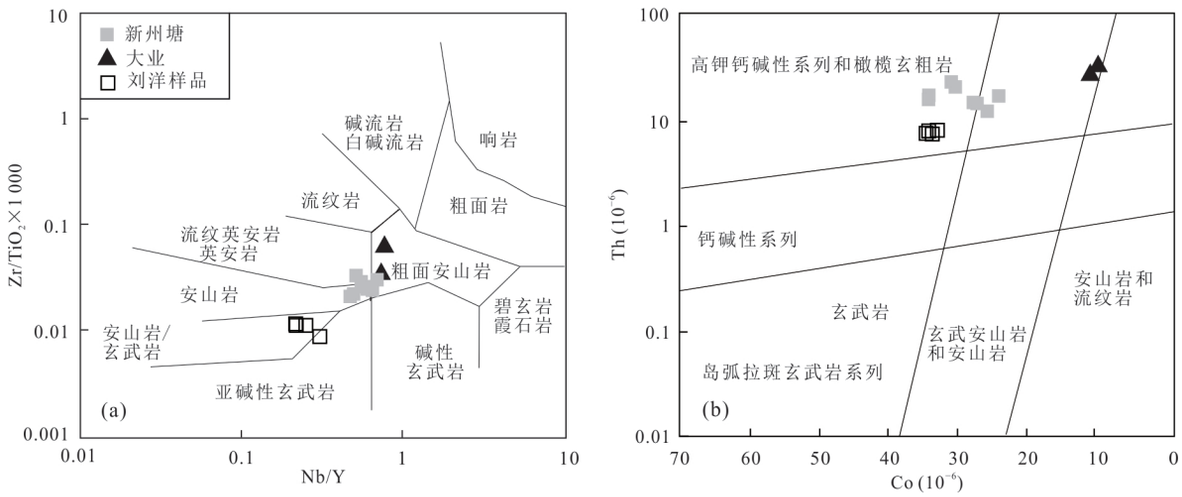

图7　新州塘、大业样品(a)Nb/Y-Zr/TiO_2×1 000图解据(Winchester and Floyd, 1977)和(b)Co-Th图解(据Hastie *et al.*, 2007)

Fig. 7　(a) Nb/Y-Zr/TiO_2×1000 diagram (after Winchester and Floyd, 1977) and (b) Co-Th diagram (after Hastie *et al.*, 2007) of the Xinzhoutang and Daye samples

片(蚀变洋壳以及沉积物)熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应(Wang *et al.*,2011);③拆沉下地壳熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应(Kelemen *et al.*, 1998);④基性岩浆与酸性岩浆的混合(Tatsumi *et al.*,2002);⑤富集地幔的部分熔融.熔融实验认为含水的地幔橄榄岩部分熔融产生的高镁安山岩通常是与上地幔橄榄岩平衡的岩浆岩,具有典型的亏损地幔特征(Smithies *et al.*,2003).而新州塘样品具富集的$\varepsilon_{Nd}(t)$值(−6.26～−7.11)和较高的$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$值(0.708 309～0.708 442),不符合上述特征,排除第一种成因可能;而由俯冲板片部分熔融形成的岩石往往具有高的Sr/Y和La/Yb比值(王存智等,2016),新州塘安山岩样品Sr/Y比值介于12.6～41.8之间、La/Yb比值平均为23.7,与上述特征不符.并且据前人研究,晚侏罗世桂东南地区已经处于陆内拉张伸展的环境之下,尚无证据证明晚中生代时存在大洋板片,故排除第二种成因;通常来说,拆沉作用产生的高镁安山岩常显示出Eu、Sr元素的富集及埃达克岩相似的特点(张旗等,2006),而微量元素蛛网图(图8b)中显示,新州塘安山岩整体具有弱的Eu负异常,且部分样品存在比较明显的Sr负异常,与上述特征不符.此外,新州塘安山岩与典型埃达克岩(较高的SiO_2、极高的Sr、HREE亏损等)并不相同(例如样品SiO_2含量相对典型埃达克岩偏低、Cr>210×10^{-6}、Ni除少数外均>90×10^{-6}、Sr存在负异常、HREE较平坦),故排除

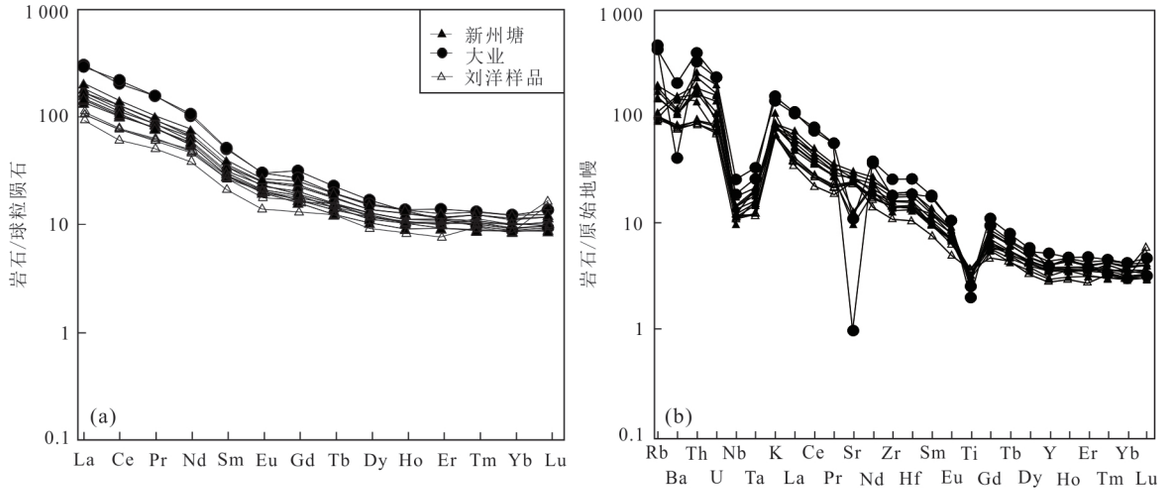

图 8　新州塘、大业样品稀土元素球粒陨石标准化图解(a)(球粒陨石标准化值据 Sun and Mcdonough,1989)和微量元素原始地幔标准化图解(b)(原始地幔标准化值据 Taylor and Mclennan,1985)

Fig. 8　Normalized REE chondrite diagrams (a) (chondrite normalized values after Sun and Mcdonough, 1989)and normalized trace element primitive mantle diagrams (b) (The normalized values of the original mantle after Taylor and Mclennan, 1985) of the Xinzhoutang and Daye samples

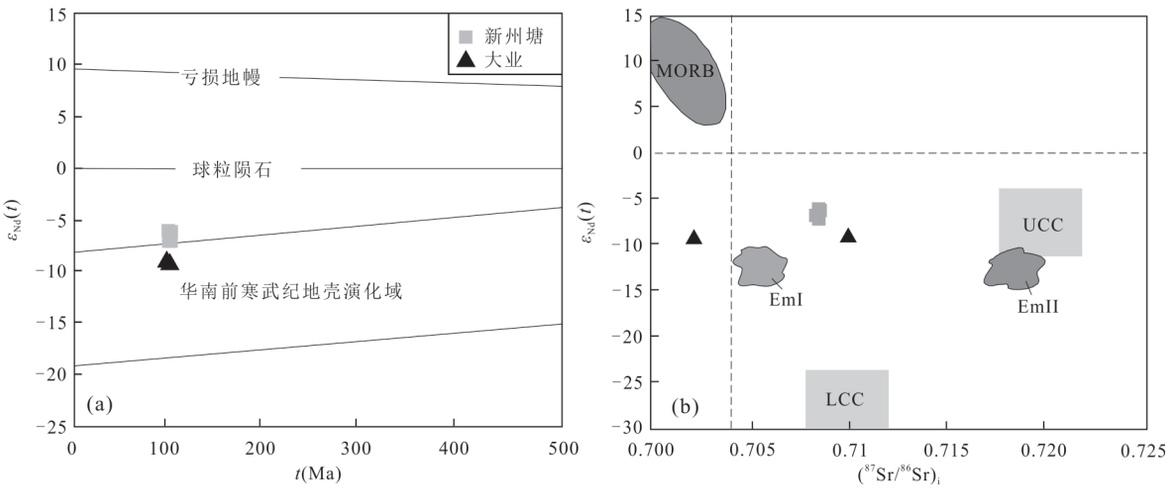

图 9　新州塘、大业样品(a)t-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解(据孙涛等,2003)和(b)$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解(据 Xie *et al.*,2012)

Fig. 9　t-$\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram (a) (after Sun *et al.*,2003) and $(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$ diagram(b) (after Xie *et al.*,2012) of Xinzhoutang and Daye samples

第三种成因.第四种成因模式岩浆混合作用是安山岩一种比较广泛的成因,认为安山岩是由基性岩浆与酸性岩浆混合形成.新州塘火山岩样品主量元素、Sr-Nd同位素的值变化不大,具有比较稳定的地球化学特征,未显示出明显的岩浆混合作用特点.本次样品中锆石Hf同位素的$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化范围很小(−6.5～−8.9),也暗示样品未经历过岩浆混合作用(吴福元等,2007).

那么新州塘安山岩是否是富集地幔部分熔融形成的呢?新州塘样品具有中等的SiO_2、高的MgO以及比较高的Cr、Ni的含量,与日本的赞岐岩比较类似(张旗等,2005).本次新州塘样品$Mg^{\#}$值很高,与原生岩浆的参考值相近($Mg^{\#}$=68～75),说明样品的母岩浆并非是起源于下地壳,而是源于地幔源区(Green, 1976).另外,新州塘样品具有高的Nb/Yb值(4.72～6.70)和低TiO_2/Yb值(0.32～0.47),在稀土元素配分图中呈现轻稀土元素富集右倾的特点,在锆石Hf同位素相关图解(图10)中,样品均落于地壳与球粒陨石演化线之间,具有比较明显的富集特征.在$(^{87}Sr/^{86}Sr)_i$-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解(图9b)中,样品均落在EMⅠ型富集地幔演化区附近,表明新州塘安山岩样品的源区可能为富集地幔源区.根据前人研

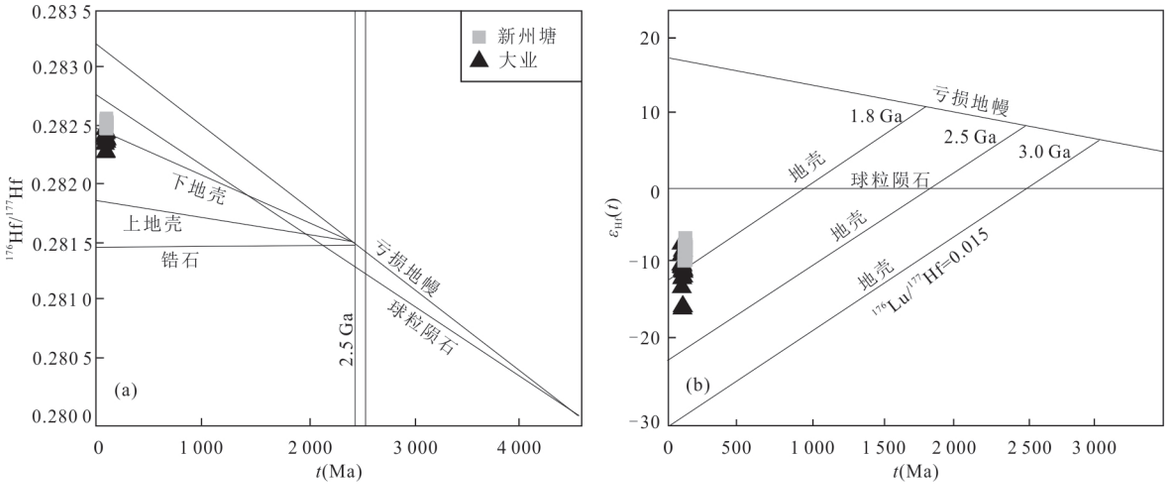

图10　新州塘、大业样品 t-(^{176}Hf/^{177}Hf)图解(a)和 t-$\varepsilon_{Hf}(t)$图解(b)(据吴福元等,2007)

Fig. 10　t-(^{176}Hf/^{177}Hf) diagram (a) and t- $\varepsilon_{Hf}(t)$ diagram (b) (after Wu *et al.*, 2007) of Xinzhoutang and Daye samples

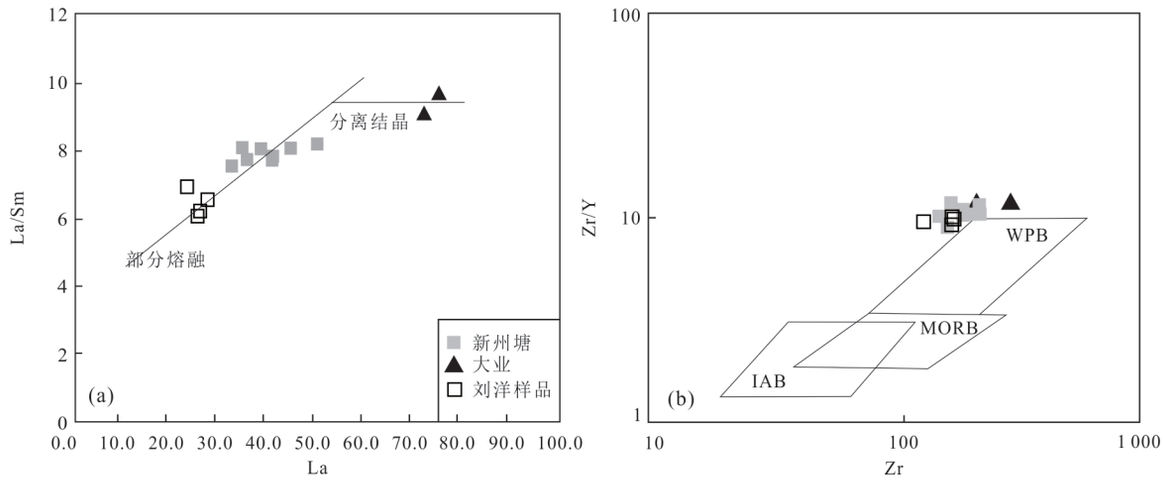

图11　新州塘、大业样品(a)La-La/Sm图解与(b)Zr-Zr/Y图解(据Pearce,1984)

Fig. 11　La-La/Sm diagram(a) and Zr-Zr/Y diagram(b) (after Pearce, 1984) of Xinzhoutang and Daye samples

WPB. 板内玄武岩; MORB. 洋中脊玄武岩; IAB. 岛弧玄武岩

究,赞岐岩可由富集地幔部分熔融而形成(MgO>6%、Ni和Cr>100×10^{-6}),其与俯冲板片(蚀变洋壳以及沉积物)熔融产生的熔体与地幔橄榄岩反应而形成的赞岐岩具有不同的地球化学特征(Stern *et al.*, 1989). 本次新州塘样品较高的MgO(平均5.99%)和Cr、Ni(Cr平均305.63,Ni平均88.27)含量,可与富集地幔部分熔融的赞岐岩相比,也暗示样品可能为富集地幔部分熔融的产物,与第五种成因相符. 此外,新州塘样品还具有较高的La/Sm(7.51~8.17)以及Ce/Pb(3.40~7.77)比值,部分样品具有明显的Sr负异常,表明在岩浆过程中存在着地壳物质的混染以及斜长石的分离结晶作用.

大业英安岩具有较低的Mg$^{\#}$值、$\varepsilon_{Nd}(t)$值(−9.35~−9.37)以及很低且变化范围较小的ε_{Hf}值(−8.7~−14.1),在 t-(^{176}Hf/^{177}Hf)图解中样品基本都处于下地壳与上地壳演化线之间,并未显示出地幔物质加入的特征,说明样品与地壳物质密切相关. 根据前人研究表明,古老地壳物质的部分熔融是华南绝大多数中酸性岩石的重要成因(周云等,2015). 结合样品在 t-$\varepsilon_{Nd}(t)$图解(图9a)中样品落入华南前寒武纪地壳演化域范围、样品比较老的Hf二阶段年龄(T_{DM2}=1.68~2.02 Ga)、在La-La/Sm图解(图11a)中较强的分离结晶趋势,大业英安岩样品很有可能是在富集地幔部分熔融的影响下,华南古元古代地壳物质受热导致部分熔融,随后经历AFC过程所形成的产物.

4.2　构造环境与动力学机制

华南中生代岩浆活动十分强烈,特别是晚中生

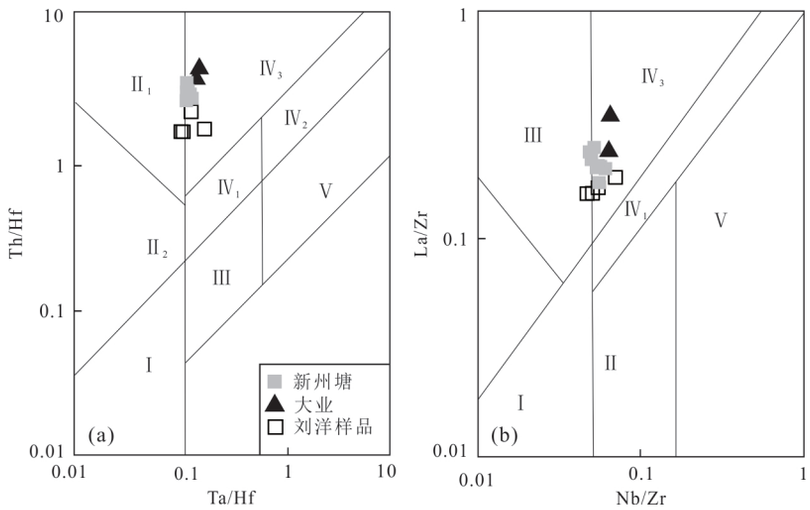

图 12　新州塘、大业中酸性岩 Th/Hf-Ta/Hf 图解(a)(据汪云亮等，2001)、La/Zr-Nb/Zr 图解(b)(据武莉娜等，2003)

Fig. 12　Th/Hf-Ta/Hf diagram (a) (after Wang *et al.*, 2001) and La/Zr-Nb/Zr diagram (b) (after Wu *et al.*, 2003) of intermediate acid rocks in Xinzhoutang and Daye

代形成了大规模的火山－侵入岩类和伸展断陷盆地(毛建仁，2013)，其成因与中国东南部此时岩石圈拉张伸展的背景有关(李献华等，2000；蔡明海等，2002；毛景文等，2008；张岳桥等，2012；杨振等，2014；Wang *et al.*，2020)．毕诗建等认为华南在燕山晚期就已经处于拉张伸展的环境之下，双峰式火山岩、A 型花岗岩、拉张盆地等典型产物均有分布(毕诗健等，2015)；毛景文等结合前人数据指出，华南在早白垩世晚期－晚白垩世早期(80～100 Ma)经历了比较大的岩石圈伸展减薄(毛景文等，2008)，甚至在早白垩世初就已经处于岩石圈强烈伸展的后造山阶段(曹明轩等，2020)；蔡明海等通过研究华南云开地块也指出，华南在中侏罗世(154～163 Ma)就已经开始从挤压环境向着伸展环境进行转换，白垩纪时华南已处于强烈的拉张伸展背景之下(蔡明海等，2002)．研究区位于云开地块，其夹持于凭祥－大黎断裂系和岑溪－博白断裂系之间，该区域广泛分布晚白垩世幔源基性岩浆作用，如广西龙昌煌斑岩脉(89 Ma)(李玺瑶，2015)、桂中都安－马山煌斑岩(100.4 Ma)(唐远兰等，2021)、粤北诸广山辉绿岩脉与煌斑岩脉(88～105 Ma)(李献华等，1997)、广东南雄玄武岩(95 Ma)(Shu *et al.*, 2004)、南岭中段长城岭斜斑玄武岩(79 Ma)(杨帆等，2018)、衡阳玄武岩和赣西北禾埠玄武岩(63～70 Ma)(Meng *et al.*, 2012)等，这些幔源岩石与同期的中、酸性岩石共同产出，表明在晚白垩世华南陆内处于连续的拉张伸展过程中．结合广东麒麟发现与玄武质岩浆底侵作用有关的辉长质麻粒岩捕掳体(112±17.8 Ma)、桂南出现岩石圈中等程度减薄(李玺瑶，2015)以及粤西阳春盆地侏罗纪－白垩纪岩浆岩岩性从钾玄质过渡到钙碱质的特点(李献华等，2000)，说明此时的华南内陆确实存在玄武质岩浆底侵以及岩石圈进一步拉张减薄的过程，桂东南以及周围地区已经处于岩石圈拉张伸展环境．

在 Zr-Zr/Y 图解(Pearce，1984)中(图 12b)，本次样品与前人桂东南玉林样品均落在 WPB(板内玄武岩)附近，为板内环境的产物．在 Th/Hf-Ta/Hf 和 La/Zr-Nb/Zr 判别图解中(汪云亮等，2001；武莉娜等，2003)中(图 12a)，样品投影点同样均位于陆内拉张区域，据此认为桂东南新州塘、大业样品应该形成于白垩纪的陆内拉张伸展环境，可能并非前人认为的新特提斯域洋脊向北俯冲的产物(强萌麟，2016；刘洋等，2021)．综上所述，笔者认为桂东南新州塘、大业地区在早白垩世晚期处于陆内拉张的构造背景之下，由于拉张伸展导致早期形成的富集地幔部分熔融形成新州塘高镁安山岩，随后古元古代地壳物质受热部分熔融并经历 AFC 过程形成大业英安岩．

5　结论

(1)桂东南研究区新州塘、大业火山岩形成时代分别为 98.5～100.5 Ma 和 99.2 Ma，二者时代一致，均属于早白垩晚期．

(2)新州塘高镁安山岩样品由富集地幔部分熔

融形成,大业英安岩样品是同期古元古代地壳物质受富集地幔熔融影响受热部分熔融并经过AFC过程形成.

(3)新洲塘高镁安山岩和大业英安岩均形成于晚中生代华南大陆拉张伸展构造背景.

附表见本刊官网:www.earth-science.net.

References

Andersen, T., 2002. Correction of Common Lead in U-Pb Analyses that do not Report ^{204}Pb. *Chemical Geology*, 192(1/2):59-79. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00195-X

Bi, S.J., Yang, Z., Li, W., et al., 2015. Late Cretaceous Porphyry Copper Deposit in Dayaoshan Area of Qinhang Metallogenic Belt: Zircon U-Pb Dating and Hf Isotopic Constraints. *Earth Science*, 40(9):1458-1479(in Chinese with English abstract).

Cai, M.H., Zhan, M.G., Peng, S.B., et al., 2002. Study on the Mesozoic Metallogenic Geological Background and Metallogenic Dynamics Mechanism in Yunkai Area. *Mineral Deposits*, 4(3):264-269(in Chinese with English abstract).

Cao, M.X., Chu, P.L., Duan, Z., et al., 2020. Temporal and Spatial Evolution of Mesozoic Volcanic Activity in South China and Its Problems. *Geological Review*, 66(4): 795-812(in Chinese with English abstract).

Cao, Y., Kang, Z.Q., Xu, J.F., et al., 2020. Chronological and Geochemical Characteristics of Volcanic Rocks of Dianzhong Formation in Shiquanhe Area, Western Lhasa Block and Their Tectonic Significance. *Earth Science*, 45(5): 1573-1592(in Chinese with English abstract).

Chen, X.Y., Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., et al., 2013. Chronological, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Nandu Syenite in Southeastern Guangxi. *Tectonics and Metallogenesis*, 37(2): 284-293(in Chinese with English abstract).

Crawford, A.J., Falloon, T.J., Green, D.H., 1989. The Classification, Petrogenesis and Tectonic Setting of Boninites. *Boninites and Related Rocks*, (1): 1-49.

Deng, J.F., Liu, C., Feng, Y.F., et al., 2010. High Magnesium Andesite/Diorite (HMA) and Magnesium Andesite/diorite (MA): Two Related to Ocean Subduction Type of Typical Igneous Rocks. *Geology in China*, 37(4):1112-1118(in Chinese with English abstract).

Gan, C.S., Wang, Y.J., Zhang, Y.Z., et al., 2016. The Determination of the Late Jurassic Shoshonitic High-Magnesium Andesite in Youjiang Basin and Its Tectonic Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 32(11):3281-3294(in Chinese with English abstract)

Green, D.H., 1976. Experimental Testing of "Equilibrium" Partial Melting of Peridotite under Water-Saturated, High-Pressure Conditions. *The Canadian Mineralogist*, 14(3): 255-268.

Hastie, A.R., Kerr, A.C., Pearce, J.A., et al., 2007. Classification of Altered Volcanic Island Arc Rocks Using Immobile Trace Elements: Development of the Th-Co Discrimination Diagram. *Journal of Petrology*, 48(12):341-2357. https://doi.org/10.1093/petrology/egm062

Hoskin, P.W.O., Black, L.P., 2000. Metamorphic Zircon Formation by Solid-State Recrystallization of Protolith Igneous Zircon. *Journal of Metamorphic Geologv*, 18:423-439. https://doi.org/10.1046/j.1525-1314.2000.00266.x

Hou, K.J., Li, Y.H., Zou, T.R, et al., 2007. LA-MC-ICP-MS Analysis Method and Geological Application of Apocalyptic Hf Site. *Acta Petrologica Sinica*, 23(10):2595-2604(in Chinese with English abstract).

Kelemen, P.B., Hart, S.R., Bernstein, S., 1998. Silica Enrichment in the Continental Upper Mantle via Melt/rock Reaction. *Earth & Planetary Science Letters*, 164(1):387-406. https://doi.org/ 10.1016/S0012-821X(98)00233-7

Lao, M.J., Zou, H.P., Du, X.D., et al., 2015. Studies on the Geochronology and Geochemistry of the Late Jurassic Potash Intrusive Rocks in Mashan, Hengxian County, Guangxi: Also on the Yanshanian Tectonic Setting of the Southwestern Qinhang Metallogenic Belt. *Frontiers of Earth Science*, 22(2): 95-107(in Chinese with English abstract).

Li, C., 2018. The Evolution of the Xintang Igneous Complex in Cenxi City, Guangxi and Its Geological Significance(Dissertation). Guilin University of Technology, Guilin(in Chinese with English abstract).

Li, X.H., Hu, R.Z., Rao, B., 1997. Chronology and Geochemistry of the Cretaceous Basic Dykes in Northern Guangdong, *Geochemistry*, 26(2):19-21+25-36. https://doi.org/10.19700/j.0379-1726.1997.02.003

Li, X.H., Zhou, H.W., Liu, Y., et al., 1999. Potassium Intrusive Rock Belt in Southeast Guangxi and Its Petrological and Geochemical Characteristics. *Science Bulletin*, 44(18): 7(in Chinese with English abstract).

Li, X.H., 2000. Cretaceous Magmatism and Lithospheric Extension in Southeast China, *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 293-305. https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00060-7

Li, X.H., Zhou, H.W., Liu, Y., et al., 2000. Mesozoic Potash-Shoshonitic Intrusive Rocks in Yangchun, Western

Guangdong and Their Tectonic Significance: Ⅰ.Petrology and isotopic geochronology. *Geochemistry*, 4(6):513－520 (in Chinese with English abstract).https://doi.org/ 10.3321/j.issn:0379-1726.2000.06.001.

Li, X. Y., 2015. The characteristics of Deep Lithosphere and Phanerozoic Evolution in Xianggui Area, South China (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Li, Z.X., Li, X.H., 2007. Formation of the 1 300 km wide Intracontinental Orogen and Postorogenic Magmatic Province in Mesozoic South China: A Flat-Slab Subduction Model. *Geology*, 35(2): 179－182.https://doi.org/182.10.1130/G23193A.1

Liang, X.R., Wei, G.J., Li, X.H.et al., 2003.Using MC-ICPMS to Accurately Determine the Ratio of $^{143}Nd/^{144}Nd$ and Sm/Nd. *Geochemistry*, 32(1):91－96(in Chinese with English abstract).

Liu, Y., Liu, H.C., Li, X.H., 1996. Accurate Determination of more than 40 Trace Elements in Rock Samples by ICP-MS. *Geochemistry*, 25(6): 552－558. (in Chinese with English abstrtracts).

Liu, Y., Gao, S., Hu, Z., et al., 2009.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. *Journal of Petrology*, 51(51): 392－399.https://doi.org/ 10.1093/petrology/egp082

Liu, Y., Fang, N.Q., Qiang, M.L., 2021.Geochronology, Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Andesite in the Middle Cretaceous in Guangdong-Guizhou Area. *Geoscience*, 35(4):968－980(in Chinese with English abstract).

Ludwig, K. R., 2003. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 192:59－79.

Mao, J.R., Tao, K.Y., Xing, G.F., et al., 1999.Petrological Records of Mesozoic and Cenozoic Mantle Plume Activities on the Continental Margin of Southeast China. *Acta Geosciences*, 20(3):253－8(in Chinese with English abstract).

Mao, J.W., Xie, G.Q., Guo, C.L., et al., 2008. Temporal and Spatial Distribution of Mesozoic Major Metal Deposits and Metallogenic Environment in South China. *Geological Journal of Universities*, 14(4):510－526(in Chinese with English abstract).

Mao, J.R, Ye, H.M., Li, Z.L., et al., 2013.Research on Mesozoic Magmatism in South China: Status Quo and Prospects. *Acta Geology*, 87(S1): 137－138(in Chinese with English abstract).

Meng, L.F., Li, Z.X., Chen, H.L., et al., 2012.Geochronological and Geochemical Results from Mesozoic Basalts in Southern South China Block Support the Flat-Slab Subduction Model. *Lithos*, 132－133:127－140.https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.022

Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984.Trace element Discrimination Diagram for the Tectonic Interpretation of Granitie Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956－983. https://doi.org/ 10.1093/petrology/25.4.956

Qiang, M. L., 2016. The Basic Characteristics of Cretaceous Andesite in the Northern Continental Margin of the South China Sea and Its Comparison with the Southeast Coastal Andesite(Dissertation).China University of Geosciences, Beijing(in Chinese with English abstract).

Shen, W.Z., Zhu, J.C., Liu, C.S., et al., 1993.Sm-Nd Isotopes of Metamorphic Rocks in the Basement of South China and Their Constraints on the Source of Granites. *Acta Petrologica Sinica*, 2: 115－124(in Chinese with English abstract).

Shu, L. S., Deng, P., Wang, B., et al., 2004. Lithology, Kinematics and Geochronology Related to Late Mesozoic Basin-Mountain Evolution in the Nanxiong-Zhuguang Area, South China. *Science in China(Series D:Earth Sciences)*, 47(8):673－688.https://doi.org/10.1360/03yd0113

Smithies, R.H., Champion, D.C., Cassidy, K.F., 2003.Formation of Earth's Early Archaean Continental Crust. *Precambrian Research*, 127(1):89－101.https://doi.org/10.1016/S0301-9268(03)00182-7

Stern, R.A., Hanson, G.N., Shirey, S.B., 1989.Petrogenesis of Mantle-Derived, Lile-Enriched Archean Monzodiorites and Trachyandesites (Sanukitoids) in Southwestern Superior Province. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26(9): 1688－1712.https://doi.org/ 10.1139/e89-145

Sun, S. S., Mcdonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematic of Oceanic Basalts: Implication and Processes. *Magmatism in the Ocean Basins*, 42:313－345.https://doi.org/ 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Sun, T., Zhou, X.M., Chen, P.R., et al., 2003.The Genesis of the Mesozoic Strong Peraluminous Granite in the Eastern Part of Nanling and Its Tectonic Significance. *Science in China (Series D: Earth Sciences)*, 12:1209－1218. https://doi.org/CNKI:SUN:JDXK.0.2003-12-009

Tan, J., Wei, J.H., Li, S.R., et al., 2008. Geochemical Characteristics and Tectonic Significance of Kunlunguan A-Type Granite in Guangxi. *Earth Science*, 33(6):743(in Chinese with English abstract).

Tang, H.F., Zhao, Z.Q., Huang, R.S., et al., 2008.Preliminary Study on Zircon Hf Isotopes of A-Type Granites in Eastern

Junggar, Xinjiang. *Acta Mineralogy Sinica*, 28(4):335—342. https://doi.org/10.16461/j.cnki.1000-4734. 2008.04.004

Tang, Y.L., Shi, Y., Wang, Y.Q., et al., 2021.Duan-Mashan lamprophyre in Central Guizhou and its tectonic significance. *Earth Science*, 46(6): 2083—2116. https://doi. org/10.3799/dqkx.2020.306

Tatsumi, Y., Ishizaka, K., 1982.Origin of High-Magnesian Andesites in the Setouchi Volcanic Belt, Southwest Japan, I. Petrographical and Chemical Characteristics. *Earth and Planetary Science Letters*, 60(2):293—304.https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90008-5

Tatsumi, Y., Nakashima, T., Tamura, Y., 2002.The Petrology and Geochemistry of Calc-Alkaline Andesites on Shodoshima Island, SW Japan. *Journal of Petrology*, 43(1):3—16.https://doi.org/ 10.1093/petrology/43.1.3

Taylor, S.R., Mclennan, S.M., 1985.The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochenical Record Preserved in Sedimentary Rock S. Blackwell Scientific Pub, Oxford, 1—312.

Wang, C.Z., Yu, M.G., Huang, Z.Z., et al., 2016.The Discovery and Significance of the Neoproterozoic (~800 Ma) High Magnesium Andesite in the Ophiolite Belt in Northeastern Jiangxi. *Geological Review*, 62(5):1185—1200.

Wang, Q., Li, Z.X., Chung, S.L., et al., 2011.Late Triassic High-Mg Aandesite/dacite Suites from Northern Hohxil, North Tibet: Geochronology, Geochemical Characteristics, Petrogenetic Processes and Tectonic Implications. *Lithos*, 126(1—2):54—67.https://doi.org/10.1016/j.lithos. 2011.06.002

Wang, Q.F., Yang, L., Xu, X.J., 2020.Multi-Stage Tectonics and Metallogeny Associated with Phanerozoic Evolution of the South China Block: a Holistic Perspective from the Youjiang Basin. *Earth-Science Reviews*, 211:103405. https://doi.org/ 10.1016/j.earscirev.2020.103405

Wang, Y. L., Zhang, C. J., Xiu, S. Z., 2001. Th/Hf-Ta/Hf Graphical Discrimination of the Tectonic Environment Formed by Basalts. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):413—421(in Chinese with English abstract).

Winchester, J.A.Floyd, P.A., 1977.Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. *Chemical Geology*, 20: 325—343. https://doi. org/ 10.1016/0009-2541(77)90057-2

Wu, F.Y., Li, X.H, Zheng, Y.F., et al., 2007.Lu-Hf Isotope System and Its Petrological Application. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185—220(in Chinese with English abstract).

Wu, L.N., Wang, Z.C., Wang.Y.L., 2003.The Application of Trace Elements La, Nb, Zr in Distinguishing the Tectonic Environment. *Journal of East China Institute of Geology*, 26(4):343—348(in Chinese with English abstract).

Xie, W., Song, X.Y., Deng, Y.F., et al., 2012.Geochemistry and Petrogenetic Implications of a Late Devonian Mafic-Ultramafic Intrusion at the Southern Margin of the Central Asian Orogenic Belt. *Lithos*, 144/145:209—230. https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.03.010

Xu, X.S., Xie, X., 2005.Late Mesozoic-Cenozoic Basalt and Crust-Mantle Interaction in Southeastern China. *Geological Journal of Universities*, 11(3):318—334. https://doi.org/CNKI:SUN:GXDX.0.2005-03-004

Yang, F., Huang, X.L., Li, J., 2018. The Magmatism and Petrogenesis Constraints of the Late Cretaceous Porphyry Basalt in Changchengling, South China. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1):157—171(in Chinese with English abstract).

Yang, Z., Liu, R., Wang, X.Y., et al., 2014.The Petrogenesis and Tectonic Significance of Late Yanshan Granites in Yunkai area: Zircon U-Pb Age and Hf Isotopic Evidence. *Earth Science*, 39(9): 1258—1276(in Chinese with English abstract).

Yuan, H., Gao, S., Liu, X., et al., 2004.Accurate U-Pb Age and Trace Element Determinations of Zircon by Laser Ablation-Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3):353—370. https://doi.org/ 10.1111/j.1751-908X.2004.tb00755.x

Zhang, Q., Qian, Q., Zhai, M.G., et al., 2005.The Geochemical Characteristics, Genesis and Geodynamic Significance of Sanukite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(2):117—125(in Chinese with English abstract).

Zhang, Q., Jin, W.J., Wang, Y.L., et al., 2006.A Preliminary Study on the Delamination Model of the Continental Lower Crust. *Acta Petrologica Sinica*, 2:265—276. https://doi.org/CNKI:SUN:YSXB.0.2006-02-001

Zhang, Q., Jin, W.J., Li, C.D., et al., 2009.Large-Scale Magmatic Activity and Lithospheric Thinning During the Yanshanian Period in Eastern China: the Relationship with the Great Igneous Province. *Earth Science Frontiers*, 16(2):21—51 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y.Q, Dong, S.W., Li, J.H., et al., 2012.New Progress in the Study of Mesozoic Tectonics in South China. *Acta Geosciences*, 33(3): 257—279(in Chinese with English abstract).

Zhao, Z.H., Bao, Z.W., Zhang, B.Y., 1998.Geochemical Characteristics of Mesozoic Basalts in Southern Hunan. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 4(S2): 7—14(in Chinese with English abstract).

Zhou, X.M., Sun, T., Shen, W., et al., 2006. Petrogenesisof

Mesozoic Granitoids and Volcanic Rocks in South China: A Response to Tectonic Evolution. *Episodes*, 29(1):26－33. https://doi.org/ 10.18814/epiiugs/2006/v29i1/004

Zhou, Y., Liang. X.Q., Liang, X.R., et al., 2015. Chronological and Geochemical Characteristics of the Volcanic Rocks in the Liuluocun Formation of the Cretaceous in Hainan and Their Tectonic Significance. *Tectonics and metallogenesis*, 39(5):903－918(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

毕诗健，杨振，李巍，等，2015. 钦杭成矿带大瑶山地区晚白垩世斑岩型铜矿床：锆石U-Pb定年及Hf同位素制约. 地球科学，40(9):1458－1479.

蔡明海，战明国，彭松柏，等，2002. 云开地区中生代成矿地质背景及成矿动力学机制研究. 矿床地质，4(3):264－269.

曹明轩，褚平利，段政，等，2020. 华南中生代火山活动时空演化及其问题探讨. 地质论评，66(4):795－812.

曹延，康志强，许继峰，等，2020. 拉萨地块西部狮泉河地区典中组火山岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 地球科学，45(5):1573－1592.

陈新跃，王岳军，张玉芝，等，2013. 桂东南南渡正长岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 大地构造与成矿学，37(2):284－293.

劳妙姬，邹和平，杜晓东，等，2015. 广西横县马山晚侏罗世钾玄质侵入岩的年代学和地球化学研究：兼论钦杭成矿带西南段燕山期构造背景. 地学前缘，22(2):95－107.

李程，2018. 广西岑溪市新塘火成杂岩体的演化及其地质意义（硕士学位论文）. 桂林：桂林理工大学.

李献华，胡瑞忠，饶冰，1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学，26(2):19－21＋25－36.

李献华，周汉文，刘颖，等，1999. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征. 科学通报，44(18):1992－1998.

李献华，周汉文，刘颖，等，2000. 粤西阳春中生代钾玄质侵入岩及其构造意义：Ⅰ. 岩石学和同位素地质年代学. 地球化学，4(6):513－520.

李玺瑶，2015. 华南湘桂地区深部岩石圈特征及显生宙演化（硕士学位论文）. 北京：中国地质大学.

梁细荣，韦刚健，李献华，等，2003. 利用MC-ICPMS精确测定$^{143}Nd/^{144}Nd$和Sm/Nd比值. 地球化学，32(1):91－96.

刘颖，刘海臣，李献华，1996. 用ICP-MS准确测定岩石样品中的40余种微量元素. 地球化学，25(6):552－558.

刘洋，方念乔，强萌麟，等，2021. 粤桂地区白垩纪中期安山岩年代学、地球化学特征及其构造意义. 现代地质，35(4):968－980.

毛建仁，陶奎元，邢光福，等，1999. 中国东南大陆边缘中新生代地幔柱活动的岩石学记录. 地球学报，20(3):253－8.

毛建仁，叶海敏，厉子龙，等，2013. 华南中生代岩浆活动研究：现状和前景. 地质学报，87(S1):137－138.

强萌麟，2016. 南海北部陆缘白垩纪安山岩基本特征及其与东南沿海安山岩对比（博士学位论文）. 北京：中国地质大学.

毛景文，谢桂青，郭春丽，等，2008. 华南地区中生代主要金属矿床时空分布规律和成矿环境. 高校地质学报，14(4):510－526.

沈渭洲，朱金初，刘昌实，等，1993. 华南基底变质岩的Sm-Nd同位素及其对花岗岩类物质来源的制约. 岩石学报，9(2):115－124.

孙涛，周新民，陈培荣，等，2003. 南岭东段中生代强过铝花岗岩成因及其大地构造意义. 中国科学（D辑：地球科学），12(2003):1209－1218.

谭俊，魏俊浩，李水如，等，2008. 广西昆仑关A型花岗岩地球化学特征及构造意义. 地球科学，33(6):743.

唐红峰，赵志琦，黄荣生，等，2008. 新疆东准噶尔A型花岗岩的锆石Hf同位素初步研究. 矿物学报，28(4):335－342.

唐远兰，时毓，王永强等，2021. 桂中都安－马山煌斑岩成因及其构造意义. 地球科学，46(6):2083－2116.

王存智，余明刚，黄志忠，等，2016. 赣东北蛇绿岩带新元古代（～800 Ma）高镁安山岩的发现及其意义. 地质论评，62(5):1185－1200.

汪云亮，张成江，修淑芝，2001. 玄武岩类形成的大地构造环境的Th/Hf-Ta/Hf图解判别. 岩石学报，17(3):413－421.

吴福元，李献华，郑永飞，等，2007. Lu-Hf同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报，23(2):185－220.

武莉娜，王志畅，汪云亮，2003. 微量元素La，Nb，Zr在判别大地构造环境方面的应用. 华东地质学院学报，26(4):343－348.

杨帆，黄小龙，李洁，2018. 华南长城岭晚白垩世斜斑玄武岩的岩浆作用过程与岩石成因制约. 岩石学报，34(1):157－171.

杨振，刘锐，王新宇，等，2014. 云开地区燕山晚期花岗岩的岩石成因及构造意义：锆石U-Pb年龄及Hf同位素证据. 地球科学，39(9):1258－1276.

张旗，钱青，翟明国，等，2005. Sanukite（赞岐岩）的地球化学特征，成因及其地球动力学意义. 岩石矿物学杂志，24(2):117－125.

张旗，金惟俊，王元龙，等，2006. 大陆下地壳拆沉模式初探. 岩石学报，22(2):265－276.

张旗，金惟俊，李承东，等，2009. 中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄：与大火成岩省的关系. 地学前缘，16(2):21－51.

张岳桥，董树文，李建华，等，2012. 华南中生代大地构造研究新进展. 地球学报，33(3):257－279.

周云，梁新权，梁细荣，等，2015. 海南白垩纪六罗村组火山岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义. 大地构造与成矿学，39(5):903－918.