

doi: 10.12029/gc20220420

魏春夏, 陆刚, 杨锋, 李巍, 钟锋运, 金靖杰, 潘艺文, 梁力杰, 白晓. 2022. 广西柳东地区火山岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征及其对岩浆源区的限定[J]. 中国地质, 49(4): 1309-1322.

Wei Chunxia, Lu Gang, Yang Feng, Li Wei, Zhong Fengyun, Jin Jingjie, Pan Yiwen, Liang Lijie, Bai Xiao. 2022. Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of volcanic rocks in Eastern Liuzhou, Guangxi: Constraint for source characteristics of magmas[J]. Geology in China, 49(4):1309-1322 (in Chinese with English abstract).

广西柳东地区火山岩锆石 U-Pb-Hf 同位素特征 及其对岩浆源区的限定

魏春夏^{1,2}, 陆刚¹, 杨锋², 李巍³, 钟锋运⁴, 金靖杰¹, 潘艺文¹, 梁力杰¹, 白晓¹

(1. 广西壮族自治区区域地质调查研究院, 广西 桂林 541002; 2. 桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541004; 3. 广西壮族自治区二七〇地质队, 广西 柳州 545005; 4. 广西三一〇核地质队, 广西 桂林 541004)

提要:【研究目的】柳东地区位于右江盆地东缘, 近年来该地区早三叠世石炮组中首次发现一套火山岩夹层, 为研究盆地东缘的构造演化特征提供了重要依据。【研究方法】本文以新发现的柳东地区火山岩为研究对象, 通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析, 研究右江盆地东缘火山岩的形成时代及岩浆源区特征。【研究结果】结果表明, 火山岩的岩性为凝灰岩-凝灰质熔岩-凝灰质火山角砾岩组合, 指示了典型的火山岩特征。其 2 件凝灰岩样品中锆石 LA-ICP-MS U-Pb 加权平均年龄分别为 (244.0±1.9)Ma 和 (247.1±0.9)Ma, 锆石微量元素 (U、Th、Hf、Nb) 表现出大陆岩浆弧属性特征。锆石 Hf 同位素结果显示 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -13.2~-1.2, 二阶段模式年龄 (T_{DM}^{c}) 为 1.35~2.06 Ga, 其岩浆源区主要为地壳物质, 平均地壳存留年龄为 1.7~2.06 Ga。【结论】该火山岩夹层与其所出露的地层时代基本相符, 属于早三叠世末期—中三叠世早期火山喷发产物, 火山岩形成于火山弧-同碰撞的构造环境, 代表了弧后盆地的沉积环境, 与印支期古特提斯洋的闭合相关。该成果为古特提斯构造域的演化研究提供了新的基础资料, 具有重要意义。

关键词: 火山岩; 锆石 U-Pb-Hf; 火山弧相关; 古特提斯; 地质调查工程; 广西柳州东部

创新点: 柳东地区火山岩属于早三叠世末期—中三叠世早期火山喷发产物, 形成于印支期古特提斯洋的闭合条件下的火山弧-同碰撞构造环境。

中图分类号: P597 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2022)04-1309-14

Zircon U-Pb ages and Hf isotopic compositions of volcanic rocks in Eastern Liuzhou, Guangxi: Constraint for source characteristics of magmas

WEI Chunxia^{1,2}, LU Gang¹, YANG Feng², LI Wei³, ZHONG Fengyun⁴,
JIN Jingjie¹, PAN Yiwen¹, LIANG Lijie¹, BAI Xiao¹

(1. Guangxi Institute of Regional Geological Survey, Guilin 541002, Guangxi, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. The 270 Geological Team of

收稿日期: 2019-04-02; 改回日期: 2019-09-19

基金项目: 广西地质矿产勘查开发局部门项目成果《广西三叠系》(桂地矿综[2015]01)、广西科技计划项目(2021AB29005)联合资助。

作者简介: 魏春夏, 女, 1990 年生, 硕士, 工程师, 从事区域地质调查工作; E-mail: 420717759@qq.com。

通讯作者: 陆刚, 男, 1969 年生, 高级工程师, 从事区域地质调查工作; E-mail: lugang020813@aliyun.com。

Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545005, Guangxi, China; 4. Guangxi 310 Nuclear Geological Team, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Eastern Liuzhou is located in the eastern margin of Youjiang Basin. In recent years, a set of volcanic rock interlayer has been found in the Early Triassic Shipao Formation in the eastern Liuzhou for the first time, which provides an important basis for studying the tectonic evolution of the eastern margin of the Youjiang Basin. **[Methods]** Taking the newly discovered volcanic rocks in Eastern Liuzhou as the research object, this paper investigates the formation age and magmatic source characteristics of the volcanic rocks in the eastern margin of the Youjiang Basin through LA-ICP-MS zircon U-Pb age and Hf isotope analysis. **[Results]** The results show that the volcanic rocks are composed of tuff, tuff lava, and tuffaceous volcanic breccia, showing typical characteristics of volcanic rock. LA-ICP-MS zircon U-Pb age dating results show that the weighted mean ages of zircon in the two tuff samples are (244.0 ± 1.9) Ma and (247.1 ± 0.9) Ma respectively. The trace elements (U, Th, Hf, Nb) compositions of zircon show the characteristics of continental magma arcs-derived zircons. The zircon have $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values of -13.2 to -1.2 , with second-stage model ages (T_{DM}^{C}) of 1.35–2.06 Ga, suggesting that their magma source is mainly crustal materials, with average crustal residual age of 1.7–2.06 Ga. **[Conclusions]** The timing volcanic rock interlayer is basically consistent with the stratigraphic age of the Early Triassic Shipao Formation, and are the product of volcanic eruption during the late Early Triassic to the early Middle Triassic. The volcanic rocks were formed in volcanic arc-related, syn-collisional tectonic setting, which is the representative of the sedimentary environment of back-arc basin, and is related to the closure of the paleo-Tethys during the Indosinian period. This outcome provides new and crucial information for a better understanding the tectonic evolution of the paleo-Tethys.

Key words: volcanic rocks; zircon U-Pb-Hf isotopic compositions; volcanic-arc correlated; Paleo-Tethys; geological survey engineering; Eastern Liuzhou in Guangxi

Highlights: The volcanic rocks in eastern Liuzhou are the products of volcanic eruption during the late Early Triassic to the early Middle Triassic, and were formed in volcanic arc-related, syn-collisional setting related to the closure of the Paleo-Tethys.

About the first author: WEI Chunxia, female, born in 1990, master, engineer, mainly engaged in regional geological survey; E-mail: 420717759@qq.com.

About the corresponding author: LU Gang, male, born in 1969, senior engineer, mainly engaged in regional geological survey; E-mail: lugang020813@aliyun.com.

Fund support: Supported by Guangxi Bureau of geology and mineral prospecting and exploitation's project "Triassic of Guangxi" (No. Guidikuangzong[2015]01), and the Science and Technology Plan Project of Guangxi(No. 2021AB29005).

1 引 言

古特提斯构造域的发育和演化是全球显生宙大地构造研究的热点问题,与古特提斯洋闭合相关的地质证据在东亚地区保存较完整(潘桂棠等, 1996; 钟大赉等, 1998),金沙江—哀牢山—Songma缝合带为古特提斯洋在东亚地区的主缝合带,延伸至滇桂—越北交界为八布—Song Hien缝合带,也称滇琼缝合带(吴根耀等, 2002; 张斌辉等, 2013),其研究程度较高。晚古生代—三叠纪右江盆地位于华南陆块西南缘,处于滇琼缝合带与钦防结合带的结合部位,是古特提斯洋东延与分支的关键部位,也有学者认为右江盆地晚古生代为古特提斯洋的

东延部分(陈丛林, 2006)。盆地及其周缘独特的地层沉积演化(黄虎等, 2013)、伸展构造特征的动力学演化(张能等, 2016)、与俯冲碰撞相关的蛇绿岩带与火山岩带,以及二叠纪与三叠纪前后强烈的岩浆活动等(周岱等, 2021),为古特提斯洋东延与分支构造演化提供了丰富的资料。

近年来部分学者认为钦—杭结合带西南段中三叠统板八组中酸性火山岩形成于火山弧环境(覃小锋等, 2011),具有洋壳俯冲—碰撞的造山体制(覃小锋等, 2017),为古特提斯沿滇琼缝合带的东延部分(Cai et al., 2009; 彭松柏等, 2016a, b)或者拗拉槽分支(胡丽沙等, 2012),凭祥一带出露的下三叠统中酸性火山岩形成于活动陆缘构造环境(梁金城

等, 2001), 是古特提斯洋发生俯冲消减形成的一条印支期岩浆弧(吴浩若等, 2001); 岑溪—罗定—云浮断裂为钦防结合带向北东延伸(覃小锋等, 2017), 是古特提斯域北大陆边缘弧后盆地(吴浩若等, 1994), 海南岛也报道了存在古特提斯残片(李献华等, 2000; 温淑女等, 2013)。20世纪70年代, 广西地质矿产勘查开发局^①曾在柳州三门江地区发现二叠系凝灰岩沉积, 认为是受东吴运动影响发生的海底喷发产物, 推测其来源于上地幔上部, 受桂西、桂西南晚古生代海底扩张的影响所致。

综合来说, 对右江盆地西南缘火山岩的研究程度较高, 以往的研究认为盆地的东缘不存在火山活动, 火山物质来源于盆地西南缘的古特提斯大陆岩浆弧(王曼等, 2018)。

近年来在柳州城市开发过程中柳东地区揭露出大面积基岩露头。随着地质勘查工作^②的深入开展, 该基岩为一套夹于下三叠统石炮组中的火山岩。三叠系岩层中的火山岩、沉火山岩夹层在右江盆地广泛出露, 主要分布于盆地西南部, 而在盆地东缘的柳东地区尚属首次发现。以新发现的柳东地区火山岩为研究对象, 通过精确的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及 Hf 同位素分析, 研究右江盆地东缘火山岩的形成时代、岩浆源区特征, 进而探讨右江盆地的大地构造背景, 为古特提斯构造域的演化研究提供基础资料, 具有重要意义。

2 地质背景

研究区位于扬子板块西南缘(图1), 属于桂中坳陷中部, 西接金沙江—哀牢山古特提斯构造带东缘, 南与钦防构造带相邻, 属于特提斯洋与环太平洋构造域结合部位(Wu et al., 2006)。

研究区位于桂林—柳州断裂、柳州—来宾—钦州断裂、南丹—河池—宜山—柳州断裂的相交部位, 这3条深大断裂共同控制了该区早泥盆世至中三叠世持续演化的沉积古地理格局(图1)。研究区沿柳州—来宾—钦州断裂带两侧出露的沉积岩石体系独具特色, 以西为深水盆地相沉积, 以东为陆棚相沉积。新生代有一系列白垩纪断陷盆地的形成并为断裂后期活动所破坏。

泥盆纪地层以碳酸盐岩和泥质岩为主, 含底栖生物腕足类、珊瑚、层孔虫等, 属稳定开阔台地相或

台棚相沉积; 早石炭世地层岩性较为稳定, 多为一套深水盆地—斜坡相碎屑岩与灰岩沉积, 晚石炭世地层演变为台地相沉积。

研究区内沿桂林—来宾断裂带西侧出露连续的二叠系栖霞组、孤峰组、大隆组与下三叠统石炮组地层, 东侧多为第四系碎屑岩覆盖。栖霞组为连陆碳酸盐缓坡相沉积区, 岩性以深灰、黑灰为主, 泥质含量高、泥灰岩十分发育, 硅质团块、条带发育; 孤峰组由深灰、灰黑色薄层硅质岩(放射虫、骨针)生物屑硅质岩组成, 底部夹较多泥岩、含锰泥岩、上部夹较多骨针灰岩、泥—粉晶灰岩或凸镜体; 大隆组以泥岩、生物屑泥岩、硅质泥岩、凝灰质碎屑岩为主, 夹凝灰岩、沉凝灰岩、晶屑凝灰岩及少量硅质岩、细砂岩组合, 偶夹灰岩、锰质灰岩组合, 为斜坡—盆地相沉积; 石炮组下部主要为深灰色薄层泥岩、粉砂质泥岩, 局部夹细砂岩, 上部主要为灰色薄层泥岩夹极薄层的泥灰岩, 属盆地沉积。

柳东地区新发现的火山岩分布于桂林—来宾断裂带西侧, 由沉凝灰岩、凝灰熔岩、玻屑晶屑凝灰岩、火山角砾熔岩、凝灰质火山角砾岩、凝灰熔岩、偶见弱蚀变石英闪长玢岩, 与粉砂岩、泥岩、硅质岩组合构成, 夹于石炮组上部的砂泥岩中, 呈整合接触关系, 根据火山岩附近地层中采获的 *Claraia* sp. 等化石判断火山的喷发时代应为早三叠世。

3 样品岩石学特征

笔者采集了2件样品(R62, 910-5), 各约15 kg 用于锆石挑选进行 U-Pb 定年和 Hf 同位素分析, 样品特征如下(图2):

样品 R62 为凝灰质火山角砾岩(图2b、e), 可见凝灰岩(图2c、d左上)沿凝灰质熔岩(图2d右下)裂隙充填, 将凝灰质熔岩分割呈角砾状(图2d)。火山碎屑以岩屑为主, 次为长石晶屑, 石英晶屑、玻屑较少。岩屑由酸性熔岩、酸性凝灰质熔岩、凝灰岩组成, 以前二者为主, 粒径 0.5~50 mm 以上不等, 2~5 mm 以上者占岩石总体的 60% 以上, 具轻微硅化、绿泥石化; 长石晶屑棱角状, 由斜长石、少量钾长石组成, 大小 0.05~2 mm, 具轻微绢云母化、高岭石化; 石英晶屑棱角状, 大小 0.05~1.25 mm; 玻屑鸡骨状、撕裂状, 大小 0.05~0.4 mm, 已脱玻, 被石英、斜长石取代。基质由火山灰土组成, 具硅化、绿泥石

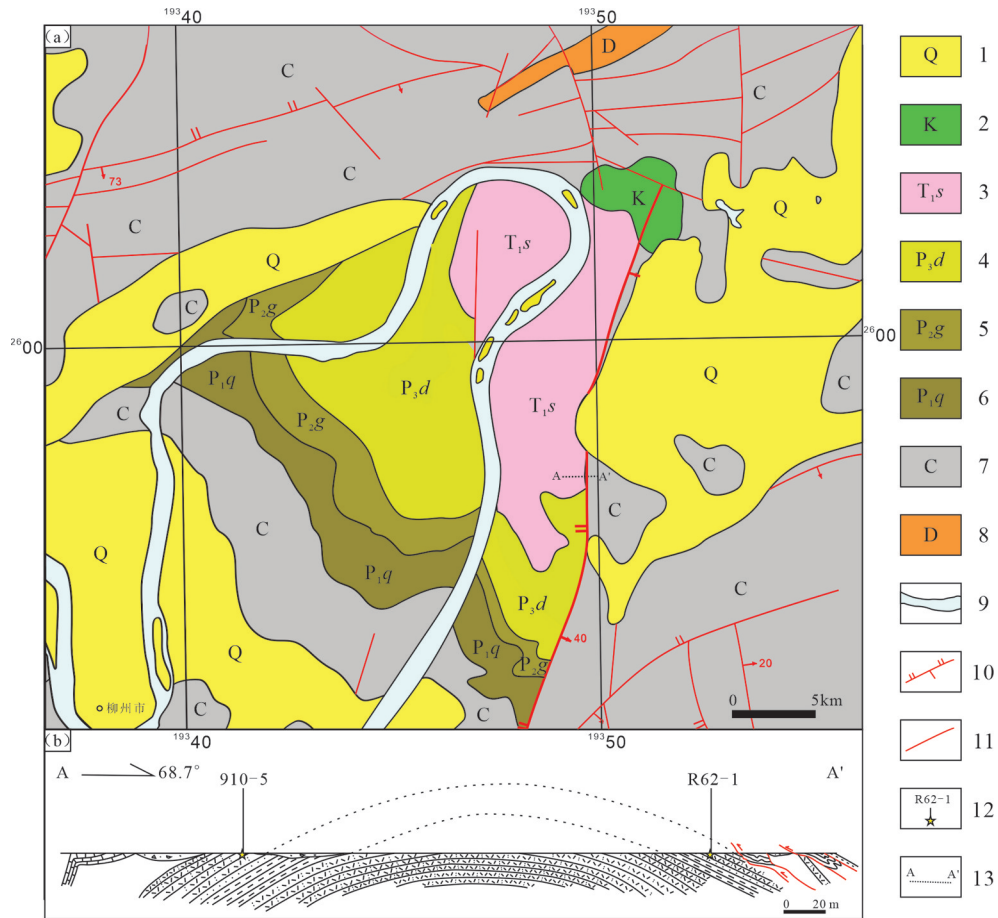


图1柳东地区地质简图(a,据广西地矿局,2019资料修编)及实测剖面图(b)

1—第四系;2—白垩系;3—下三叠统石炮组;4—上二叠统大隆组;5—下二叠统孤峰组;6—下二叠统栖霞组;7—石炭系;8—泥盆系;9—水系;
10—逆冲断层;11—断层;12—采样位置及编号;13—剖面位置及编号

Fig.1 Simplified geological map of the Liudong area(a) and schematic measured section(b)

1—Quaternary sediment; 2—Cretaceous; 3—Lower Triassic Shipao Formation; 4—Upper Permian Dalong Formation; 5—Lower Permian Gufeng Formation; 6— Lower Permian Qixia Formation; 7—Carboniferous, 8—Devonian; 9—River system; 10—Thrust fault; 11—Fault; 12—Sample location and numbers; 13—Section location and numbers

化、黏土化、绿帘石化。少量绿帘石、褐铁矿沿微裂隙充填、渲染。

样品 910-5 为风化蚀变玻屑凝灰岩,岩石风化较松散,黏土化,被少量铁质染色,手标本土黄色。火山碎屑以玻屑为主,少量晶屑、岩屑。玻屑鸡骨状、撕裂状,大小 0.1~0.5 mm,少部分由玻璃质组成,大部分已脱玻由黏土矿物、玉髓、绿泥石等组成,少量则被铁质等染色;晶屑量不多,由石英、斜长石组成,棱角状、圆粒状(个别石英)。石英 0.05~0.4 mm(有的可见熔蚀现象);斜长石棱角状,被黏土矿物取代,有的因风化流失,外形保留,以假象出现,大小 0.1~1 mm;岩屑不规则棱角状,由中酸性凝灰岩组成,大小 0.1~0.5 mm;岩石中还有少量绿

泥石集合体,呈圆粒状、不规则状,可能为取代玻屑、基质形成。基质由火山灰尘组成,因风化蚀变,被绢云母、高岭石、少量绿泥石等取代,被少量褐铁矿不均匀染色(图 2f)。

4 分析方法

采集的每个用于挑选锆石的样品重约 15 kg,经过粉碎过筛至 60 目,利用人工重砂挑选获得锆石,并在双目显微镜下进行挑纯。待测锆石颗粒制成环氧树脂样品靶,磨光至一半,露出锆石的中心部位进行抛光镀金。用光学显微镜及扫描电子显微镜进行锆石的透反射、阴极发光(CL)、背散射(BSE)显微结构照相和观察。为锆石进行原位 U-

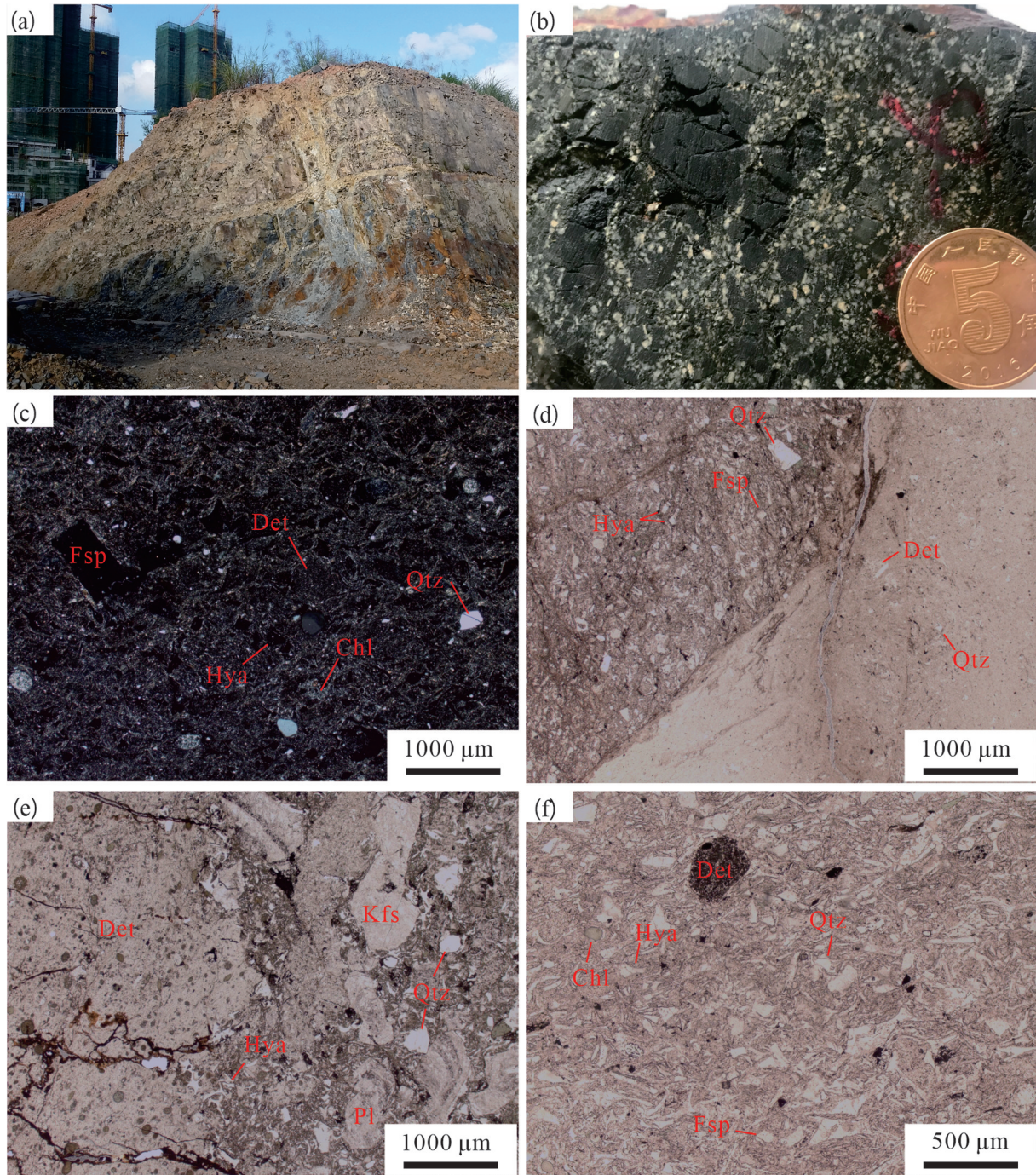


图2 柳州火山岩的手标本及显微图像

a—火山岩在野外呈层状出露;b—凝灰质熔岩被凝灰岩沿裂隙充填,分割呈角砾状;c—硅化玻屑凝灰岩;d—玻屑凝灰岩和凝灰质熔岩的边界;e—凝灰火山角砾岩;f—凝灰结构玻屑凝灰岩;Det—岩屑;Fsp—长石;Hya—玻屑;Qtz—石英晶屑;Chl—绿泥石;Kfs—钾长石;Pl—斜长石

Fig.2 Field images and photomicrographs of volcanic rocks in the Liuzhou area

a—Outcrops of the stratified volcanic rocks; b—Vitric tuff filled along the fissures of tuffaceous lava and divide it into breccia; c—Silicified vitric tuff; d—The boundaries of vitric tuff and tuffaceous lava; e—Tuffaceous volcanic breccia; f—Vitric tuff showing tuffaceous texture; Det—Detritus; Fsp—Feldspar; Hya—Vitreclastic; Qtz—Quartz phenocrysts; Chl—Chlorite; Kfs—K—Feldspar; Pl—Plagioclase

Pb定年和Hf同位素分析点位进行挑选,选出晶形较好、没有裂纹及包裹体不发育的锆石晶体进行测定。锆石的人工重砂挑选于广西区域地质调查研究院完成,制靶、显微结构照相、锆石U-Pb年龄及Hf同位素由北京锆年领航科技有限公司相关实验室完成,锆石的透反射图像在OLYMPUS偏光显微镜上完成,阴极发光(CL)、背散射(BSE)分别采用JEOL IT-500+CL、JEOL 6700F完成。锆石U-Pb年龄及Hf同位素测试使用193 nm的等离子质谱仪(ICP-MS)、多接受等离子质谱仪(MC-ICP-MS)分别先后原位测定。

锆石U-Pb同位素年龄分析采用LA-ICP-MS法,激光束斑直径为30 μm ,为了减少继承铅、铅丢失等对年龄的影响,在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 图中,谐和度低于95%的年龄数据点在计算年龄时排除(结果见表1)。为了获得更精确的年龄,在计算火山岩年龄时,只计算主群组锆石年龄,年龄计算及谐和图的绘制用Isoplot软件完成。

锆石原位 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 同位素比值测定使用MC-ICP-MS(多接收等离子质谱仪)。测点为进行过LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄分析的锆石颗粒,在原年龄分析位置或附近测试。锆石Hf同位素测定过程中采用标准锆石91500进行同位素分馏的校正。 ^{176}Lu 对 ^{176}Hf 的干扰采用 $^{176}\text{Lu}/^{175}\text{Lu}=0.02655$ 进行校正(Machado et al., 2001),同时假设Lu和Hf的分馏情况相同。 ^{176}Yb 对 ^{176}Hf 的干扰采用实测Yb的分馏系数进行校正,同时假定 $^{176}\text{Yb}/^{176}\text{Yb}$ 比值为0.5887(Wu et al., 2006)。 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 计算时,球粒陨石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.282772, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.0332(Blichert et al., 1997),以单颗粒锆石U-Pb年龄计算 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ (早于1000 Ma的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,其他的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄)。单阶段Hf模式年龄(T_{DM})计算时,亏损地幔 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.28325, $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 的比值采用0.0384(Vervoort et al., 1999)。两阶段Hf模式年龄(T_{DM}^{c})计算时,平均地壳 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值采用0.015(Griffin et al., 2002)。

5 锆石形态和U-Pb定年结果

CL图像显示样品中的锆石形态(图3)多为长柱状,结构清晰,结晶较好,具有典型的岩浆震荡环带结构,指示其为岩浆结晶的产物。

样品R62共分析27颗锆石,总计29个点,包括6个锆石核部及23个锆石边部,结果见表1。锆石中具有较多的继承核(图3中的6、9、12、16号点位),或具有核幔结构,核部为次圆一次棱角状,幔部具有环带结构,推测多数为岩浆结晶从源区捕获再结晶;少量锆石具有次圆一次棱角状的外形,内部环带清晰,应为火山喷发过程中从围岩所捕获古老沉积物的锆石(图3中的18、24、25号点位),通过选取以上两类锆石的核部进行年龄分析,得到503~2805 Ma的较大的、不一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄,证实推测的合理性。其余对环带清晰的锆石边部打点,给出较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄(239~250 Ma),去除谐和度<95%的点,剩余21个点获得加权平均年龄为(247.1 \pm 0.9)Ma(图4a),代表了岩浆的结晶年龄。

样品910-5分析31颗锆石,结果见表1。少量可见深色矿物包裹体(图3中的7、15、17),指示了岩浆结晶成因。去除7颗 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在321~1925 Ma的捕获锆石年龄以及其余谐和度<95%的数据,剩余21个点获得加权平均年龄为(244.0 \pm 1.9)Ma(图4b),略晚于样品R62所获得的年龄结果。

综上所述,柳州东部地区新发现的三叠系火山岩的年龄为247~244 Ma,形成时代为早三叠世末期—中三叠世早期。

6 锆石Hf同位素

样品的锆石Hf同位素测试点位置与锆石U-Pb同位素测试点位保持一致(图3),本次分析共获得63个锆石的Hf同位素数据(表2)。

样品除去个别分析点,大部分的分析点 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}\leq 0.002$,说明锆石形成后放射成因的Hf积累有限。锆石的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值均表现出 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)<0$ 的特征(图5a、b),表明岩石主要为壳源物质部分熔融的产物。在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄值为238~256 Ma的分析点中, $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值为0.282245~0.282587, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围为-13.2~-1.2,一阶模式年龄(T_{DM})变化范围为0.94~1.43 Ga,二阶模式年龄(T_{DM}^{c})变化范围为1.35~2.06 Ga。其中,样品910-5比较集中, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 在-12.1~-7.1范围内,一阶模式年龄(T_{DM})变化范围为1.16~1.43 Ga,二阶模式年龄(T_{DM}^{c})变化范围为1.71~1.99 Ga;样品R62的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 则分布相对分散,于-12.5~-1.2范围内,对应的一阶模式年龄(T_{DM})变

表1 柳东地区火山岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 分析结果
Table 1 U-Th-Pb LA-ICP-MS data of zircon from volcanic rocks in Liudong area

测点号	含量/10 ⁻⁶			Th/U	同位素比值						表面年龄/Ma						Conc./%
	Pb	Th	U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	
R62																	
R62-1	12	189	255	0.74	0.05147	0.00161	0.27935	0.00863	0.03958	0.00050	261.2	72.2	250.1	6.8	250.2	3.1	99
R62-2	24	322	550	0.59	0.05099	0.00105	0.27729	0.00593	0.03951	0.00046	239.0	48.1	248.5	4.7	249.8	2.9	99
R62-3	15	183	336	0.54	0.05049	0.00143	0.27067	0.00783	0.03895	0.00049	216.7	66.7	243.2	6.3	246.3	3.0	98
R62-4	15	256	334	0.77	0.05049	0.00135	0.27114	0.00738	0.03913	0.00049	216.7	63.0	243.6	5.9	247.4	3.0	98
R62-5	7	77	157	0.49	0.05442	0.00333	0.28009	0.01488	0.03811	0.00064	387.1	132.4	250.7	11.8	241.1	3.9	96
R62-6	82	149	557	0.27	0.06859	0.00119	1.30604	0.02240	0.13830	0.00137	887.0	36.0	848.4	9.9	835.0	7.7	98
R62-7	7	89	159	0.56	0.05098	0.00312	0.27269	0.01595	0.03907	0.00064	239.0	137.9	244.8	12.7	247.1	4.0	99
R62-8	5	59	105	0.56	0.05288	0.00333	0.27664	0.01542	0.03933	0.00064	324.1	144.4	248.0	12.3	248.7	4.0	99
R62-9	37	72	369	0.19	0.06473	0.00120	0.85636	0.02429	0.09552	0.00196	764.8	38.9	628.1	13.3	588.1	11.6	93
R62-10	13	228	279	0.82	0.05408	0.00380	0.28199	0.02036	0.03786	0.00080	376.0	157.4	252.2	16.1	239.5	5.0	94
R62-11	3	46	78	0.58	0.05417	0.00598	0.28610	0.03410	0.03905	0.00196	388.9	250.0	255.5	26.9	247.0	12.1	96
R62-12	15	68	88	0.77	0.08100	0.00502	1.60795	0.10159	0.14398	0.00290	1221.3	122.2	973.3	39.6	867.1	16.4	88
R62-13	15	172	335	0.51	0.05444	0.00327	0.29157	0.01595	0.03917	0.00063	390.8	132.4	259.8	12.5	247.7	3.9	95
R62-14	8	107	186	0.58	0.05167	0.00419	0.27492	0.02378	0.03818	0.00082	333.4	191.6	246.6	18.9	241.5	5.1	97
R62-15	4	84	79	1.07	0.05558	0.00379	0.28451	0.01753	0.03837	0.00064	435.2	156.5	254.2	13.9	242.7	4.0	95
R62-16	12	200	92	2.18	0.06000	0.00229	0.66467	0.02408	0.08118	0.00106	603.4	81.5	517.5	14.7	503.2	6.3	97
R62-17	13	195	300	0.65	0.05304	0.00149	0.28518	0.00867	0.03903	0.00042	331.5	64.8	254.8	6.9	246.8	2.6	96
R62-18	276	193	419	0.46	0.19777	0.00139	14.86991	0.13152	0.54539	0.00416	2809.3	10.6	2807.0	8.4	2806.0	17.4	99
R62-19	9	162	203	0.80	0.05242	0.00162	0.27828	0.00799	0.03896	0.00045	305.6	70.4	249.3	6.3	246.4	2.8	98
R62-20	13	239	289	0.83	0.05944	0.00661	0.30574	0.03701	0.03713	0.00187	583.4	244.4	270.9	28.8	235.0	11.6	85
R62-21	10	124	226	0.55	0.05464	0.00437	0.28834	0.01748	0.03929	0.00119	398.2	181.5	257.2	13.8	248.4	7.4	96
R62-22	8	110	185	0.60	0.05417	0.00371	0.29128	0.02071	0.03897	0.00099	388.9	153.7	259.6	16.3	246.5	6.2	94
R62-23	6	70	144	0.49	0.05246	0.00224	0.28420	0.01212	0.03961	0.00064	305.6	130.5	254.0	9.6	250.4	4.0	98
R62-24	78	101	457	0.22	0.07244	0.00096	1.69366	0.02630	0.17016	0.00219	998.2	26.4	1006.1	9.9	1013.0	12.1	99
R62-25	106	233	317	0.73	0.09675	0.00094	3.80821	0.05537	0.28525	0.00322	1562.7	18.2	1594.5	11.7	1617.8	16.2	98
R62-26	9	106	204	0.52	0.05227	0.00238	0.28342	0.01312	0.03953	0.00105	298.2	103.7	253.4	10.4	249.9	6.5	98
R62-27	7	99	148	0.67	0.05175	0.00262	0.27674	0.01352	0.03930	0.00066	276.0	116.7	248.1	10.8	248.5	4.1	99
R62-28	5	187	268	0.70	0.05075	0.00270	0.10629	0.00537	0.01567	0.00028	227.8	122.2	102.6	4.9	100.2	1.8	97
R62-29	9	111	208	0.53	0.05139	0.00236	0.28059	0.01378	0.03951	0.00054	257.5	105.5	251.1	10.9	249.8	3.4	99
R62-30	9	94	202	0.46	0.05377	0.00502	0.29156	0.03103	0.03886	0.00124	361.2	183.3	259.8	24.4	245.8	7.7	94
R910-5																	
910-5-1	1	8	15	0.53	0.05461	0.00300	0.28614	0.01566	0.03821	0.00077	398.2	91.7	255.5	12.4	241.7	4.8	94
910-5-2	1	7	11	0.64	0.05564	0.00408	0.28361	0.01927	0.03768	0.00070	438.9	164.8	253.5	15.2	238.4	4.3	93
910-5-4	2	10	34	0.31	0.05082	0.00175	0.26603	0.00994	0.03798	0.00067	231.6	79.6	239.5	8.0	240.3	4.2	99
910-5-6	1	13	24	0.53	0.04692	0.00392	0.24963	0.02273	0.03824	0.00108	55.7	179.6	226.3	18.5	241.9	6.7	93
910-5-7	1	5	10	0.49	0.05522	0.00815	0.28766	0.04246	0.03785	0.00133	420.4	333.3	256.7	33.5	239.5	8.2	93
910-5-8	1	8	13	0.60	0.05647	0.00332	0.29596	0.01914	0.03804	0.00076	472.3	125.0	263.2	15.0	240.7	4.7	91
910-5-11	1	6	12	0.54	0.06201	0.00330	0.32378	0.01761	0.03838	0.00079	675.9	108.3	284.8	13.5	242.8	4.9	84
910-5-12	1	11	19	0.56	0.05983	0.00426	0.31569	0.02310	0.03795	0.00070	598.2	155.5	278.6	17.8	240.1	4.3	85
910-5-14	1	11	26	0.45	0.04894	0.00222	0.25527	0.01118	0.03825	0.00070	146.4	110.2	230.8	9.0	242.0	4.4	95
910-5-15	1	10	17	0.62	0.04993	0.00314	0.26172	0.01701	0.03816	0.00093	190.8	146.3	236.1	13.7	241.4	5.8	97
910-5-16	1	16	17	0.93	0.04768	0.00287	0.24023	0.01374	0.03782	0.00075	83.4	137.0	218.6	11.3	239.3	4.7	90
910-5-17	2	23	39	0.59	0.05776	0.00195	0.30526	0.01207	0.03813	0.00067	520.4	69.4	270.5	9.4	241.3	4.2	88
910-5-18	1	6	15	0.43	0.05426	0.00319	0.27477	0.01488	0.03783	0.00077	388.9	133.3	246.5	11.8	239.4	4.8	97
910-5-21	1	9	21	0.45	0.05740	0.00273	0.29597	0.01399	0.03791	0.00070	505.6	105.5	263.2	11.0	239.9	4.4	90
910-5-22	1	7	12	0.57	0.05131	0.00335	0.27241	0.01824	0.03929	0.00093	253.8	150.0	244.6	14.6	248.4	5.7	98
910-5-23	1	14	22	0.62	0.05268	0.00226	0.27556	0.01204	0.03844	0.00062	322.3	98.1	247.1	9.6	243.2	3.8	98
910-5-24	3	15	70	0.21	0.05187	0.00144	0.27638	0.00857	0.03894	0.00069	279.7	64.8	247.8	6.8	246.3	4.3	99
910-5-26	1	10	19	0.56	0.05555	0.00236	0.29723	0.01378	0.03944	0.00081	435.2	91.7	264.2	10.8	249.3	5.1	94
910-5-29	1	11	23	0.48	0.04728	0.00188	0.25730	0.01161	0.03935	0.00073	64.9	88.9	232.5	9.4	248.8	4.5	93
910-5-30	1	13	24	0.56	0.05257	0.00205	0.28643	0.01315	0.03971	0.00083	309.3	88.9	255.7	10.4	251.0	5.2	98
910-5-31	2	12	41	0.29	0.04868	0.00182	0.25543	0.00980	0.03854	0.00065	131.6	87.0	231.0	7.9	243.8	4.0	94
910-5-32	0	4	8	0.51	0.05402	0.00335	0.29653	0.02028	0.04056	0.00119	372.3	136.1	263.7	15.9	256.3	7.4	97
910-5-33	2	27	36	0.73	0.05125	0.00156	0.28043	0.00913	0.04003	0.00063	253.8	65.7	251.0	7.2	253.0	3.9	99

表2 柳东地区火山岩锆石 Hf同位素数据

Table 2 Zircon Hf isotopic compositions of volcanic rocks in Liudong area

样品点号	t/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ (corr)	2σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ (corr)	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (corr)	2σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	T_{DM}	T_{DM}^c	f_{lawHf}
R62-1	250.2	0.0306	0.000373	0.001162	0.000009	0.282357	0.000019	0.282351	-14.7	-9.4	1271	1868	-0.97
R62-10	239.5	0.042494	0.001499	0.001521	0.000032	0.282367	0.000029	0.28236	-14.3	-9.3	1268	1854	-0.95
R62-11	247	0.019551	0.000542	0.000726	0.000017	0.282321	0.000022	0.282318	-15.9	-10.6	1306	1944	-0.98
R62-12	867.1	0.00745	0.00026	0.000311	0.000005	0.282375	0.000022	0.28237	-14	4.9	1218	1436	-0.99
R62-13	247.7	0.041279	0.000252	0.001646	0.000009	0.282293	0.000022	0.282286	-16.9	-11.8	1378	2015	-0.95
R62-14	241.5	0.019077	0.000059	0.000786	0.000002	0.28258	0.000021	0.282576	-6.8	-1.6	947	1371	-0.98
R62-15	242.7	0.021552	0.00038	0.000864	0.000014	0.282408	0.00002	0.282404	-12.9	-7.7	1190	1755	-0.97
R62-16	503.2	0.008561	0.000069	0.000318	0.000002	0.282078	0.000021	0.282075	-24.5	-13.6	1625	2320	-0.99
R62-17	246.8	0.03745	0.000674	0.001455	0.000022	0.282346	0.000021	0.282339	-15.1	-9.9	1297	1897	-0.96
R62-18	2806	0.032712	0.000498	0.001303	0.00002	0.28105	0.000019	0.28098	-60.9	-0.3	3088	3252	-0.96
R62-19	246.4	0.028956	0.000711	0.001146	0.000028	0.282382	0.000025	0.282376	-13.8	-8.6	1236	1815	-0.97
R62-2	249.8	0.044111	0.000771	0.001743	0.00003	0.282415	0.000018	0.282407	-12.6	-7.4	1208	1745	-0.95
R62-20	235	0.025019	0.000648	0.000942	0.000016	0.282375	0.000027	0.282371	-14	-9	1238	1834	-0.97
R62-21	248.4	0.038934	0.000395	0.001465	0.000013	0.282369	0.000021	0.282362	-14.2	-9	1264	1844	-0.96
R62-22	246.5	0.132159	0.025975	0.003376	0.000531	0.282419	0.000068	0.282403	-12.5	-7.6	1257	1753	-0.9
R62-23	250.4	0.023033	0.000457	0.000936	0.000019	0.282587	0.000022	0.282582	-6.6	-1.2	941	1352	-0.97
R62-24	1013	0.011205	0.000163	0.000487	0.000008	0.281388	0.000021	0.281378	-49	-27	2571	3527	-0.99
R62-25	1617.8	0.011207	0.000139	0.000452	0.000005	0.281248	0.000016	0.281234	-53.9	-18.5	2757	3457	-0.99
R62-26	249.9	0.037854	0.000504	0.001471	0.000009	0.28227	0.000019	0.282263	-17.8	-12.5	1405	2065	-0.96
R62-27	248.5	0.025068	0.000398	0.001024	0.000016	0.282326	0.000023	0.282321	-15.8	-10.5	1309	1936	-0.97
R62-28	100.2	0.019961	0.000265	0.000842	0.000013	0.282522	0.000018	0.282521	-8.8	-6.7	1029	1584	-0.97
R62-29	249.8	0.021995	0.000188	0.000904	0.000006	0.282514	0.000024	0.28251	-9.1	-3.8	1042	1513	-0.97
R62-3	246.3	0.033119	0.000817	0.00132	0.000022	0.282537	0.000023	0.282531	-8.3	-3.1	1021	1469	-0.96
R62-30	245.8	0.016584	0.000027	0.000688	0.000001	0.282565	0.000019	0.282547	-7.9	-2.6	986	1434	-0.98
R62-4	247.4	0.029667	0.000391	0.001186	0.000021	0.282459	0.000027	0.282453	-11.1	-5.8	1128	1642	-0.96
R62-5	241.1	0.01234	0.000027	0.000489	0.000001	0.282278	0.000018	0.282276	-17.5	-12.2	1357	2041	-0.99
R62-6	835	0.013213	0.000151	0.000513	0.000006	0.282192	0.000018	0.282184	-20.5	-2.4	1477	1870	-0.98
R62-7	247.1	0.015445	0.000087	0.000631	0.000002	0.28254	0.000016	0.282537	-8.2	-2.9	999	1455	-0.98
R62-8	248.7	0.021275	0.00116	0.000771	0.000035	0.282443	0.000032	0.282439	-11.6	-6.3	1138	1673	-0.98
R62-9	588.1	0.014398	0.000095	0.000564	0.000004	0.282354	0.000019	0.282348	-14.8	-2.1	1255	1661	-0.98
R910-5-1	242	0.019807	0.00017	0.000803	0.000006	0.282339	0.000019	0.282335	-15.3	-10.1	1284	1909	-0.98
R910-5-10	721	0.01533	0.000235	0.000631	0.000009	0.281773	0.000019	0.281765	-35.3	-19.8	2057	2867	-0.98
R910-5-11	243	0.016597	0.00017	0.000681	0.000006	0.2823	0.000017	0.282297	-16.7	-11.5	1334	1994	-0.98
R910-5-12	240	0.015992	0.000322	0.000632	0.000015	0.282384	0.000019	0.282381	-13.7	-8.6	1216	1808	-0.98
R910-5-13	411	0.019773	0.000108	0.000808	0.000004	0.28231	0.000016	0.282303	-16.4	-7.5	1325	1873	-0.98
R910-5-14	242	0.015249	0.00034	0.000588	0.000015	0.282391	0.000017	0.282388	-13.5	-8.3	1205	1791	-0.98
R910-5-15	241	0.020773	0.00015	0.000885	0.00001	0.282304	0.000018	0.2823	-16.5	-11.4	1335	1987	-0.97
R910-5-16	239	0.024659	0.000137	0.001009	0.000005	0.282382	0.000016	0.282378	-13.8	-8.7	1230	1816	-0.97
R910-5-17	241	0.032199	0.000775	0.001273	0.000026	0.28231	0.000019	0.282305	-16.3	-11.2	1340	1977	-0.96
R910-5-18	239	0.018386	0.000575	0.00076	0.000023	0.282319	0.000018	0.282316	-16	-10.9	1310	1953	-0.98
R910-5-19	280	0.017715	0.000155	0.000709	0.000006	0.282351	0.000017	0.282347	-14.9	-8.9	1264	1859	-0.98
R910-5-2	238	0.015475	0.000253	0.000627	0.000009	0.28235	0.000018	0.282348	-14.9	-9.8	1262	1883	-0.98
R910-5-20	732	0.012222	0.000113	0.00051	0.000005	0.282236	0.00002	0.282229	-18.9	-3.1	1416	1834	-0.98
R910-5-21	240	0.025584	0.000159	0.001062	0.000007	0.282308	0.00002	0.282304	-16.4	-11.3	1335	1980	-0.97
R910-5-22	248	0.022363	0.000339	0.000896	0.000013	0.282331	0.000019	0.282327	-15.6	-10.3	1298	1924	-0.97
R910-5-23	243	0.024049	0.000285	0.000947	0.000009	0.282322	0.000017	0.282318	-15.9	-10.7	1312	1946	-0.97
R910-5-24	246	0.067711	0.000779	0.002646	0.000027	0.282377	0.000016	0.282365	-14	-9	1293	1839	-0.92
R910-5-25	1925	0.008062	0.000179	0.000328	0.000007	0.281329	0.000022	0.281317	-51	-8.6	2640	3083	-0.99
R910-5-26	249	0.017409	0.000096	0.000703	0.000004	0.282378	0.000017	0.282374	-13.9	-8.6	1227	1817	-0.98
R910-5-27	321	0.017725	0.000174	0.000725	0.000005	0.282267	0.000021	0.282263	-17.9	-11	1381	2020	-0.98
R910-5-28	730	0.022051	0.000284	0.00093	0.000012	0.282017	0.000017	0.282005	-26.7	-11.1	1736	2334	-0.97
R910-5-29	249	0.022557	0.000669	0.000925	0.000025	0.282316	0.000018	0.282312	-16.1	-10.8	1320	1957	-0.97
R910-5-3	397	0.013635	0.000116	0.000562	0.000004	0.282375	0.000018	0.282371	-14	-5.4	1225	1731	-0.98
R910-5-30	251	0.021901	0.000211	0.000885	0.000008	0.28235	0.000018	0.282345	-14.9	-9.6	1272	1880	-0.97
R910-5-31	244	0.03634	0.000161	0.00143	0.000005	0.282367	0.000016	0.282361	-14.3	-9.2	1266	1851	-0.96
R910-5-32	256	0.030436	0.000308	0.001276	0.00001	0.282245	0.000023	0.282239	-18.6	-13.2	1432	2114	-0.96
R910-5-33	253	0.021316	0.00008	0.000862	0.000004	0.28232	0.000018	0.282316	-16	-10.6	1312	1945	-0.97
R910-5-4	240	0.039448	0.000313	0.001527	0.000011	0.282364	0.000015	0.282358	-14.4	-9.4	1273	1860	-0.95
R910-5-5	1774	0.017578	0.000089	0.000693	0.000003	0.281515	0.000019	0.281492	-44.4	-5.8	2412	2797	-0.98
R910-5-6	242	0.030583	0.000297	0.001207	0.000011	0.282315	0.000019	0.282309	-16.2	-11.1	1332	1967	-0.96
R910-5-7	240	0.017934	0.000262	0.000716	0.000011	0.282392	0.000021	0.282389	-13.4	-8.3	1206	1790	-0.98
R910-5-8	241	0.017999	0.00007	0.000726	0.000002	0.282425	0.000015	0.282422	-12.3	-7.1	1161	1716	-0.98
R910-5-9	208	0.041561	0.000887	0.001658	0.000034	0.282309	0.000015	0.282302	-16.4	-12.1	1356	2003	-0.95

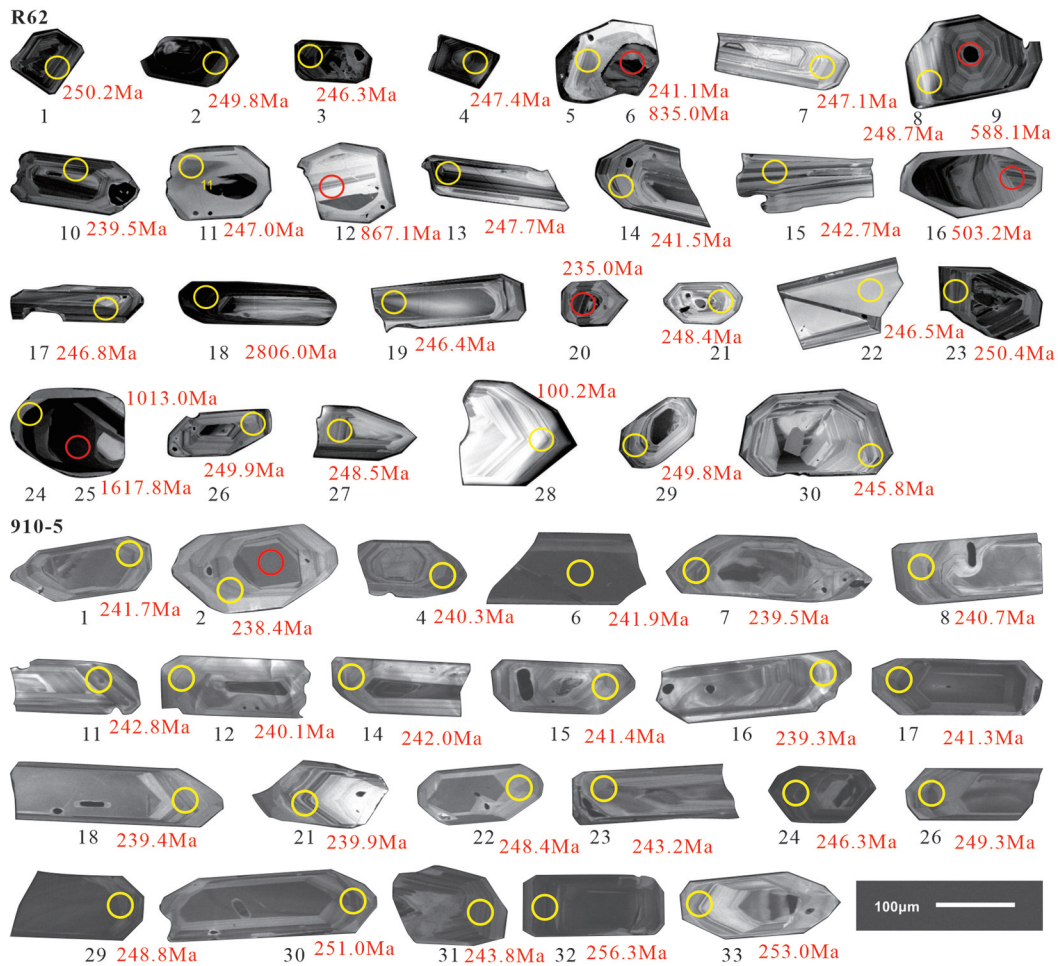


图3 柳州火山岩样品锆石 CL 图像
Fig.3 CL Images of zircon for samples in Liudong area

化范围为 0.94~1.40 Ga, 二阶模式年龄 (T_{DM}^c) 变化范围为 1.35~2.06 Ga。捕获锆石 (321~2805 Ma) 的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 变化范围为 -27.0~-0.3, 对应的二阶模式年龄 (T_{DM}^c) 变化范围为 1.25~3.08 Ga (图 6)。

7 讨论

7.1 柳东火山岩的源区

柳东火山岩岩石成分单一, 均为火山物质、火山碎屑, 岩屑均为熔岩、凝灰岩等火山岩的碎屑; 组合复杂, 含有爆发相的凝灰火山角砾岩、熔结角砾岩, 溢流相的火山角砾熔岩、熔岩、凝灰熔岩及空落相的熔结凝灰岩、凝灰岩、沉凝灰岩, 同时出现超浅成石英闪长玢岩, 说明该地发育由超浅层—爆发—溢流—空落的完整火山岩相序特征。同时溢流为主的火山岩相以及空落相的凝灰岩也是以粗的(晶

屑) 为主。其中可见的块状火山岩层中, 又识别出由火山角砾岩、熔岩到凝灰岩再到沉凝灰岩的沉积层序。块状火山岩中部分见有淬碎的特征, 使得岩石呈角砾状。同时, 凝灰岩、凝灰熔岩中极不均匀地分布有少量晶屑熔岩斑团, 它们的边界呈熔融状、撕裂状。偶见的石英闪长玢岩、安山岩也以此状态产出于块状火山岩中。块状火山岩尤其是粗粒的、含有火山角砾岩特征的熔岩, 表现出溢流相的火山岩特征, 其中所含的中性岩斑团推测为先形成的火山溢流相产物被火山碎屑流所携带而来, 暗示这套火山岩距火山口不远。

近期报道位于柳东地区西南的扶绥东攀地区同一时代的沉积地层中发现有由淬火形成的崩裂状石英晶屑的火山岩, 也指示了附近存在火山喷发中心 (张素新等, 2006; 赵天宇等, 2013)。东攀地区

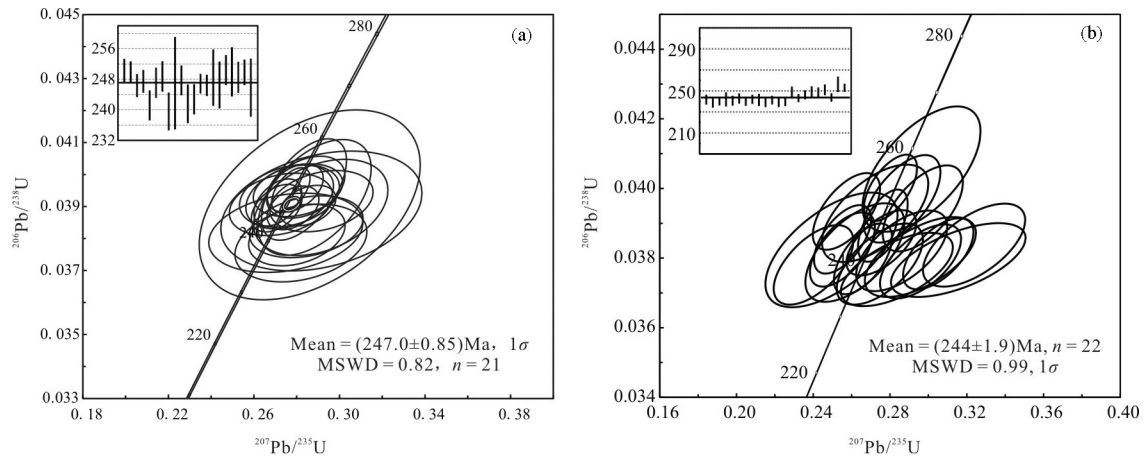


图4 柳州火山岩样品锆石U-Pb谐和曲线与直方图
Fig.4 LA-ICP MS zircon U-Pb concordia diagrams for samples in Liudong area

火山岩与贵港地区陈刘火山岩、钦州一线火山岩均沿柳州—来宾—凭祥大断裂发育,表现出以熔岩为代表的溢流相火山岩组合,柳东地区火山岩的展布范围有限,露头点均在大断裂旁侧,综合上述,推断柳东火山岩具有近源的特征。

锆石U-Pb年龄表现了非常单一的年龄峰值(238~256 Ma),基本为同一次火山喷发的结果。年龄结果中存在一定数量的元古宙—太古宙年龄数据,但通过分析这些数据点的锆石CL图可以发现,此类锆石多具有核幔结构,锆石的核部结构复杂,有的具有典型的岩浆震荡环带,这类锆石核为早期结晶的岩浆锆石核;有的内部弱分带或无分带,并有不同程度的圆化,这类锆石核应为早期的受变质作用而成变质锆石核,较老的年龄通常在锆石的核

部打出,而幔部通常具有典型的环带结构,获得的年龄数据均在上述获得的火山喷发年龄范围内,因此这些具有较老年龄的锆石,为火山喷发过程中,从源区或者火山通道所捕获的古老碎屑物质,经过岩浆再结晶作用而成。锆石的微观结构特征指示了柳东地区火山岩的岩浆成因。

分析样品中具有三叠纪年龄值锆石的Hf同位素数据, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 范围较广,为-13.2~-1.2,并且随着时间的增加, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 有逐渐减小的趋势,表明在该时期的岩浆活动,物源物质以元古代古老地壳为主,可能有少量古生代年轻组分的加入,。样品910-5的二阶模式年龄(T_{DM}^c)为1.71~2.06 Ga,表明柳东地区三叠纪火山岩主要来自1.71~2.06 Ga的地壳源区,该时期也是该区重要的地壳增长期。R62样品中较高

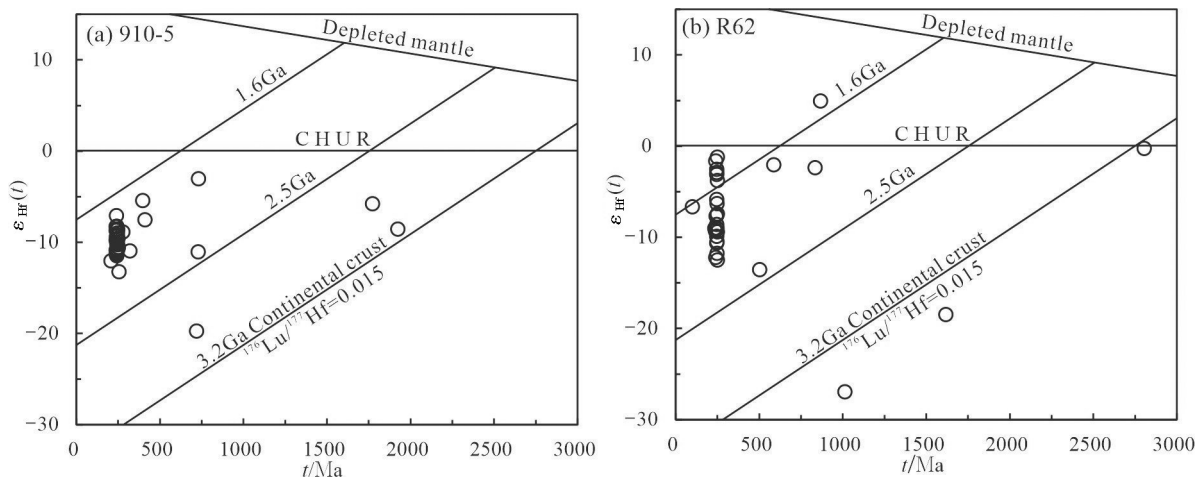


图5 柳东火山岩样品 $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 特征图
Fig.5 Zircon $t-\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ diagram of volcanic rocks in Liudong area

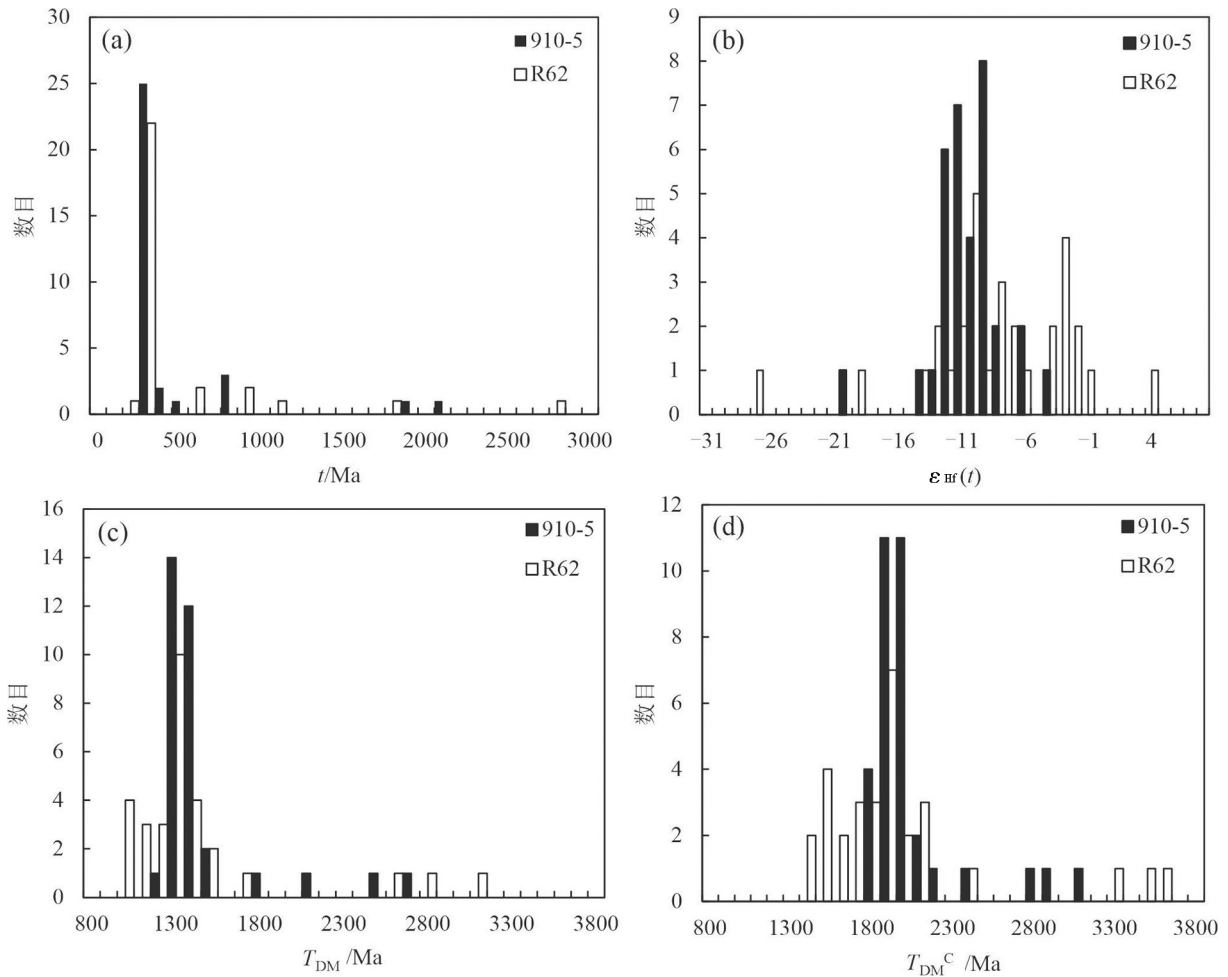


图6 柳东火山岩锆石 U-Pb 年龄(a)、 $\epsilon_{Hf}(t)$ (b)、 T_{DM} (c) 和 T_{DM}^C (d) 统计直方图
 Fig.6 Zircon U-Pb age(a)、 $\epsilon_{Hf}(t)$ (b)、 T_{DM} (c) and T_{DM}^C (d) diagram of volcanic rocks in Liudong area

的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 值 (-6.3~-1.2) 和对应较年轻的二阶模式年龄 (T_{DM}^C) (1.3~1.6 Ga) 暗示存在年轻的壳源加入的可能。继承锆石中有 U-Pb 年龄 0.7 Ga 左右的分析点与华南新元古代主要的岩浆活动时代一致, 对应的二阶模式年龄 (T_{DM}^C) 为 1.4~1.6 Ga, 与 R62 样品中三叠纪锆石少量的较年轻的二阶模式年龄 (T_{DM}^C) (1.3~1.6 Ga) 一致, 也指示了地壳存留年龄为 1.3~1.6 Ga 的物源区参与了火山岩的形成。二阶模式年龄 (T_{DM}^C) ≥ 2.0 Ga 的锆石在两个样品中均出现, 同时锆石 U-Pb 同位素年龄中也出现少量 2.0 Ga 左右的古老继承锆石, 二阶模式年龄 (T_{DM}^C) 为 2.5~3.1 Ga, 表明太古宙的地壳重熔也为该区提供了火山岩的物质来源。

7.2 柳东火山岩形成的地构造背景

锆石封闭温度高, 抗物理化学蚀变强, 对于已

通过锆石 U-Pb 定年获得确定结晶年龄的锆石, 利用其微量元素特征相对于传统的利用全岩主微量元素来判断火山岩形成的构造背景, 更容易消除外来杂质对数据结果的干扰。在锆石微量元素构造环境判别图解中 (图 7), 样品均落入弧相关/同碰撞环境, 代表岩浆弧的火山沉积, 与印支期古特提斯洋闭合有关的俯冲碰撞构造背景一致。

根据研究, 位于柳东地区西南的蓬莱滩二叠系与三叠系界线附近的火山物质来源于扬子板块西南缘古特提斯大陆岩浆弧 (王曼等, 2018); 在扬子板块和华夏板块结合带西南段的钦防一带的早中生代酸性火山岩形成于火山弧环境 (覃小锋等, 2011) 表明了钦防一带有古生代洋盆的存在; 那龙地区中三叠世基性火山岩形成于俯冲消减的岛弧环境 (胡丽沙等, 2012), 与金沙江-哀牢山构造带、

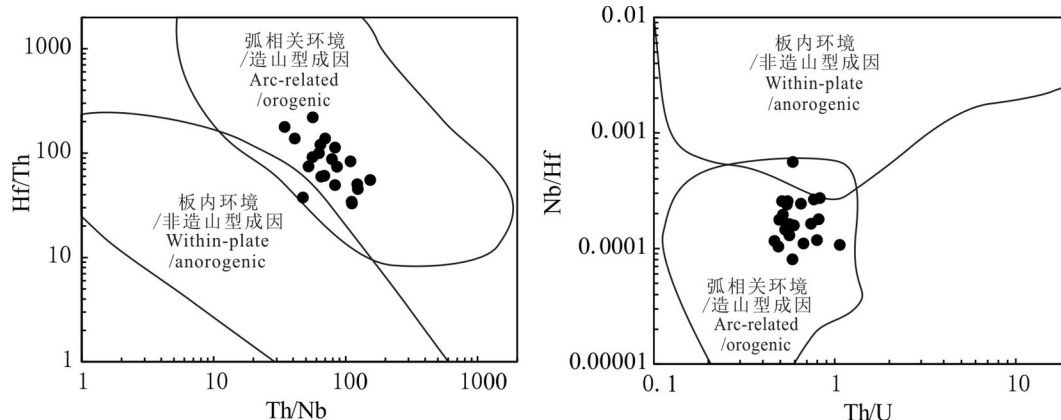


图7 柳州火山岩样品(R62)锆石微量元素 Hf/Th-Th/Nb 与 Nb/Hf-Th/U 图解(底图据杨江海等,2012)
Fig.7 Zircon trace element Th/U vs. Nb/Hf and Th/Nb vs. Hf/Th diagrams (after Yang Jianghai et al., 2012) for zircons from volcanic rocks of Liudong area

越北地区 Song Hien 带 (Hoa et al., 2008)、海南岛 (温淑女等, 2013) 报道大陆岩浆弧火山岩锆石微量元素均落入弧相关/同碰撞环境, 连成一条岩浆弧, 代表了早三叠世—中三叠世的俯冲消减的活动大陆边缘环境。柳东地区的早中三叠世之交弧—同碰撞性质火山岩的发现, 意味着在右江盆地东缘在早三叠世—中三叠世时期为弧后盆地沉积环境。

8 结 论

(1) 岩石学、岩相学研究表明, 柳东地区新发现的火山岩岩石组合、火山碎屑成分单一, 结构复杂, 总体表现为喷发沉积相, 同时具有溢流相火山岩特点, 指示火山岩具有近源沉积特点。

(2) LA-ICP-MS 锆石原位 U-Pb 同位素年代学研究柳东地区火山岩结晶年龄为 247~244 Ma, 形成于早三叠世末期—中三叠世早期。

(3) 锆石的 Hf 同位素组成表明柳东火山岩主要源于古老地壳物质的重熔, 并有少量较年轻物质的加入, 锆石微量元素指示了火山岩形成于火山弧—同碰撞的构造环境, 代表了弧后盆地的沉积环境, 与印支期古特提斯洋的闭合相关。

致谢: 感谢庞崇进教授、潘天望博士在论文撰写过程中提供的指导, 以及编辑和审稿专家认真审阅、提出的宝贵修改意见!

注 释

① 广西壮族自治区石油地质大队区调分队. 1988.1:5 万柳州市区域地质调查报告[R].

② 广西壮族自治区地球物理勘察院. 2015. 柳州市城市土地地下空间开发利用调查[R].

References

- Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu-Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle-crust system[J]. *Earth Planet Sci. Lett.*, 148: 243-258.
- Cai J X, Zhang K J. 2009. A new model for the Indochina and South China collision during the Late Permian to the Middle Triassic[J]. *Tectonophysics*, 467(1-4): 35-43.
- Chen Conglin, Shi Xiaoying. 2006. Sedimentary and tectonic evolution of Late Paleozoic deep-water strata in the Youjiang basin[J]. *Geology in China*, 33(2): 436-443(in Chinese with English abstract).
- Griffin W L, Wang X, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu X. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes[J]. *Lithos*, 61(3): 237-269.
- Hoa T T, Izokh A E, Polyakov G V, Borisenko A S, Anh T T, Balykin P A, Phuong N T, Rudnev S N, Van V V, Nien B A. 2008. Permo-triassic magmatism and metallogeny of northern Vietnam in relation to the emeishan plume[J]. *Russian Geology & Geophysics*, 49(7): 480-491.
- Hu Lisha, Du Yuansheng, Yang Jianghai, Huang Hu, Huang Hongwei, Huang Zhiqiang. 2012. Geochemistry and tectonic significance of Middle Triassic volcanic rocks in Nalong, Guangxi Area[J]. *Geological Review*, 58(3): 481-494(in Chinese with English abstract).
- Huang Hu, Du Yuansheng, Huang Zhiqiang, Yang Jianghai, Huang Hongwei, Xie Chunxia, Hu Lisha. 2013. Depositional chemistry of chert during late Paleozoic from western Guangxi and its implication for the tectonic evolution of the Youjiang Basin[J].

- Science China: Earth Sciences, 43(2): 304–316 (in Chinese).
- Li Xianhua, Zhou Hanwen, Ding Shijiang, Li Jiayu, Zhang Renjie, Zhang Yeming, Ge Wenchun. 2000. Sm–Nd isotopic constraints on the age of the Bangxi–Chenxing ophiolite in Hainan Island: Implications for the tectonic evolution of eastern Paleo–Tethys [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16 (3): 425–432(in Chinese with English abstract).
- Liang Jincheng, Deng Jixin, Chen Maohong, Jiang Bochang, Zhu Jijiao. 2001. The Early Triassic intermediate–acid volcanics and its tectonic environment in southwestern Guangxi[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 25(2): 141–148 (in Chinese with English abstract).
- Machado N, Simonetti A. 2001. U–Pb dating and Hf isotopic composition of zircon by laser–ablation MC–ICP–MS[C]// Sylvester P(ed.). *Laser Ablation–ICPMS in the Earth Sciences: Principles and applications*. Mineralogical Association of Canada, St. John's, Newfoundland: 121–146.
- Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen, Xu Qiang, Jiang Xinsheng. 1996. Models for the evolution of the polyarcbasin systems in eastern Tethys[J]. *Lithofacies and Ancient Geography*, 16(2): 52–65.
- Peng Songbo, Liu Songfeng, Lin Musen, Wu Changfeng, Han Qingsen. 2016. Early Paleozoic Subduction in Cathaysia (I): New evidence from the Nuodong ophiolite[J]. *Earth Science*, 41(5): 765–778(in Chinese with English abstract).
- Peng Songbo, Liu Songfeng, Lin Musen, Wu Changfeng, Han Qingsen. 2016. Early Paleozoic Subduction in Cathaysia (II): New evidence from the Dashuang high magnesian–magnesian andesite[J]. *Earth Science*, 41(6): 931–947(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Gong Jianghua, Zhao Guiying, Shi Hao, Zhan Junyan, Wang Zhen. 2017. The confirmation of Caledonian intermediate–mafic volcanic rocks in northern margin of Yunkai block: Evidence for early Paleozoic paleo–ocean basin in southwestern segment of Qinzhou–Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 791–809(in Chinese with English abstract).
- Qin Xiaofeng, Wang Zongqi, Zhang Yingli, Pan Luozhong, Hu Guiang, Zhou Fusheng. 2011. Geochronology and geochemistry of Early Mesozoic acid volcanic rocks from Southwest Guangxi: Constraints on tectonic evolution of the southwestern segment of Qinzhou–Hangzhou joint belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 794–808.
- Vervoort J D, Blicherttoft J. 1999. Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(3–4): 533–556.
- Wang Man, Zhong Yuting, Hou Yingling, Shen Shuzhong, Xu Yigang, He Bin. 2018. Source and extent of the felsic volcanic ashes at the Permian–Triassic boundary in South China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 36–48(in Chinese with English abstract).
- Wen Shunv, Liang Xinquan, Fan Weiming, Wang Yuejun, Chi Guoxiang, Liang Xirong, Zhou Yun, Jiang Ying. 2013. Zircon U–Pb ages, Hf Isotopic composition of Zhizhong granitic intrusion in Ledong Area of Hainan Island and their tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 37(2): 294–307 (in Chinese with English abstract).
- Wu F Y, Yang Y H, Xie L W, Yang J H, Xu P. 2006. Hf isotopic compositions of the standard zircons and baddeleyites used in U–Pb geochronology[J]. *Chem. Geol.*, 234: 105–126.
- Wu Genyao, Ji Jianqing, He Shundong, Zhong Dalai. 2002. Early Permian magmatic arc in Pinxiang, Guangxi and its tectonic implications[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 22(3): 61–65 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haoruo, Kuang Guodun, Wang Zhongcheng. 2001. The Yunkai block since Silurian [J]. *Journal of Paleogeography*, 3(3): 32–40 (in Chinese with English abstract).
- Wu Haoruo, Xian Xiangyang, Kuang Guodun. 1994. Late Paleozoic radiolarian assemblages of southern Guangxi and its geological significance[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 29(4): 339–345(in Chinese with English abstract).
- Yang Jianghai, Cawood P A, Du yuansheng, Huang Hu, Huang Hongwei, Tao Ping. 2012. Large igneous province and magmatic arc sourced Permian–Triassic volcanogenic sediments in China[J]. *Sedimentary Geology*, 261/262: 120–131.
- Zhang Binhui, Ding Jun, Zhang Linkui, Zhang Bin, Chen Minhua. 2013. SHRIMP zircon U–Pb chronology of the Babu ophiolite in southeastern Yunnan province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 87(10): 1498–1509(in Chinese with English abstract).
- Zhang Neng, Huang Qiming, Tan Jianzheng, Li Jiang. 2016. Extensive structural characteristics of Youjiang Basin, western Guangxi[J]. *Geology in China*, 43(3): 953–968(in Chinese with English abstract).
- Zhang Suxin, Feng Qinglai, Gu Songzhu, Yu Jishun. 2006. Clay Stones Around Deep–Water Permian–Triassic Boundary from Guizhou and Guangxi Region[J]. *Geological Science and Technology Information*, 25(1): 9–13(in Chinese with English abstract).
- Zhao Tianyu, Feng Qinglai, Liu Rong, Zhou Qiue, Wei Xun. 2013. Volcanic characteristics and LA–ICP–MS zircon U–Pb ages of clay rocks along Dongpan section of Guangxi[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(9): 1402–1409(in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai, Wu Genyao, Ji Jianqing, Zhang Qi, Ding Lin. 1998. Discovery of the ophiolites in southeastern Yunnan, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 43(13): 1365–1369 (in Chinese).
- Zhou Dai, Hu Jun, Yang Wenqiang, Chen Qi, Wang Xiangdong, Wang Lei, Xu Deming. 2021. Formation age and petrogenesis of the Xinxing pluton in western Guangdong: Constraint on the closure of the East Paleo–Tethys Ocean[J]. *Geology in China*, 48(6): 1896–1923(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈丛林, 史晓颖. 2006. 右江盆地晚古生代深水相地层沉积构造演化[J]. 中国地质, 33(2): 436-443.
- 胡丽沙, 杜远生, 杨江海, 黄虎, 黄宏伟, 黄志强. 2012. 广西那龙地区中三叠世火山岩地球化学特征及构造意义[J]. 地质论评, 58(3): 481-494.
- 黄虎, 杜远生, 黄志强, 杨江海, 黄宏伟, 谢春霞, 胡丽沙. 2013. 桂西晚古生代硅质岩地球化学特征及其对右江盆地构造演化的启示[J]. 中国科学: 地球科学, 43(2): 304-316.
- 李献华, 周汉文, 丁式江, 李寄岫, 张仁杰, 张业明, 葛文春. 2000. 海南岛“邦溪—晨星蛇绿岩片”的时代及其构造意义——Sm-Nd同位素制约[J]. 岩石学报, (3): 425-432.
- 梁金城, 邓继新, 陈懋弘, 蒋柏昌, 朱继姣. 2001. 桂西南早三叠世中酸性火山岩及其构造环境[J]. 大地构造与成矿学, 25(2): 141-148.
- 潘桂棠, 陈智樑, 李兴振, 徐强, 江新胜. 1996. 东特提斯多弧—盆系统演化模式[J]. 岩相古地理, 16(2): 52-65.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 吴长峰, 韩庆森. 2016. 华夏早古生代俯冲作用(I): 来自糯垌蛇绿岩的新证据[J]. 地球科学, 41(5): 765-778.
- 彭松柏, 刘松峰, 林木森, 吴长峰, 韩庆森. 2016. 华夏早古生代俯冲作用(II): 大爽高镁—镁质安山岩新证据[J]. 地球科学, 41(6): 931-947.
- 覃小锋, 王宗起, 宫江华, 赵国英, 石浩, 詹俊彦, 王震. 2017. 云开地块北缘加里东期中—基性火山岩的厘定: 钦—杭结合带南西段早古生代古洋盆存在的证据[J]. 岩石学报, 33(3): 791-809.
- 覃小锋, 王宗起, 张英利, 潘罗忠, 胡贵昂, 周府生. 2011. 桂西南早中生代酸性火山岩年代学和地球化学: 对钦—杭结合带西南段构造演化的约束[J]. 岩石学报, 27(3): 794-808.
- 王曼, 钟玉婷, 侯莹玲, 沈树忠, 徐义刚, 何斌. 2018. 华南地区二叠纪—三叠纪界线酸性火山灰的源区与规模[J]. 岩石学报, 34(1): 36-48.
- 温淑女, 梁新权, 范蔚茗, 王岳军, 池国祥, 梁细荣, 周云, 蒋英. 2013. 海南岛乐东地区志留岩体锆石U-Pb年代学、Hf同位素研究及其构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 37(2): 294-307.
- 吴根耀, 季建清, 何顺东, 钟大赉. 2002. 广西凭祥地区早二叠世的岩浆弧及其构造意义[J]. 矿物岩石, 22(3): 61-65.
- 吴浩若, 邝国敦, 王忠诚. 2001. 志留纪以来的云开地块[J]. 古地理学报, 3(3): 32-40.
- 吴浩若, 咸向阳, 邝国敦. 1994. 广西南部晚古生代放射虫组合及其地质意义[J]. 地质科学, (4): 339-345.
- 张斌辉, 丁俊, 张林奎, 张彬, 陈敏华. 2013. 滇东南八布蛇绿岩的SHRIMP锆石U-Pb年代学研究[J]. 地质学报, 87(10): 1498-1509.
- 张能, 黄启明, 谭建政, 李江. 2016. 桂西右江盆地伸展构造特征[J]. 中国地质, 43(3): 953-968.
- 张素新, 冯庆来, 顾松竹, 于吉顺. 2006. 黔桂地区深水相二叠系—三叠系界线附近黏土岩研究[J]. 地质科技情报, 25(1): 9-13.
- 赵天宇, 冯庆来, 刘嵘, 周秋娥, 位荀. 2013. 广西东攀剖面黏土岩的火山岩特征及LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄[J]. 地质通报, 32(9): 1402-1409.
- 钟大赉, 吴根耀, 季建清, 张旗, 丁林. 1998. 滇东南发现蛇绿岩[J]. 科学通报, 43(13): 1365-1370.
- 周岱, 胡军, 杨文强, 陈奇, 王祥东, 王磊, 徐德明. 2021. 粤西新兴岩体的形成时代与成因研究: 对古特提斯洋东支关闭时间的约束[J]. 中国地质, 48(6): 1896-1923.