

桂东南早三叠世火山通道的发现 及岩石成因

农军年¹⁾, 孙明行²⁾, 郭尚宇³⁾, 李昌明¹⁾, 韦守东¹⁾, 覃初礼¹⁾,
赵子宁¹⁾, 周辉¹⁾, 张鹏¹⁾



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

1) 中国—东盟地学合作中心(南宁), 南宁, 530023;

2) 广西壮族自治区地质调查院, 南宁, 530023; 3) 广西矿产资源储量评审中心, 南宁, 530023

内容提要: 位于扬子地块与华夏地块拼合带西南段的桂东南容县下罗杏发现早三叠世火山通道, 对剖析华南印支期区域构造演化具有重要的地质意义。该火山通道出露主要岩性为隐爆角砾岩、流纹岩、粗面安山玢岩、霏细斑岩等, 柱状节理发育, 为超浅成相—溢流相。流纹岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学分析表明, 加权平均值为 249.9 ± 1.6 Ma (MSWD=1.9), 代表了火山喷出年龄, 属早三叠世(印支期)岩浆活动产物。岩石具有钾玄岩—高钾钙碱性系列, 较低的 TiO_2 含量、较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值、明显亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素, 显示出弧火山岩的特征。锆石的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-14.50 \sim -6.61$, 对应的单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM}) 为 $1.17 \sim 1.49$ Ga, 二阶段 Hf 模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 为 $1.70 \sim 2.20$ Ga。综合地球化学、锆石 Hf 同位素组成特征及区域地质资料, 认为下罗杏火山岩, 为地壳减压松弛的构造背景下, 地幔或软流圈物质上涌, 诱发地壳物质发生高温熔融作用的形成, 其构造—岩浆热事件的动力应该来源于古太平洋向华南板块的俯冲。

关键词: 火山通道; 早三叠世; LA-ICP-MS; 锆石 U-Pb 定年; Hf 同位素; 地球化学

近年来, 越来越多的学者开始对印支期成岩成矿作用及其构造环境进行研究, 但由于华南印支期地质构造异常复杂, 构造叠加十分强烈, 具有多期次、多层次滑覆特征, 使得目前对华南印支期的大地构造演化及形成机制仍然存在严重的分歧。归纳起来主要有以下几个观点: 一部分学者采用阿尔卑斯碰撞造山模式来解释华南早三叠纪岩浆岩的形成机制(许靖华等, 1987; Hsü et al., 1989), 认为华南印支期花岗岩产生于俯冲碰撞岛弧环境。另一部分学者认为华南印支期为陆内造山带或陆内变形(Rodgers, 1989; Yu Xinqi et al., 2005; Shu Liangshu et al., 2008; 宋美佳, 2017), 早中生代华南内陆不存在洋盆或洋陆俯冲事件(Rowley et al., 1989)。而持陆内造山或陆内变形观点的不同学者对于华南印支期的动力学机制与构造背景也存在不同的解释模式, 如印支板块与华南板块碰撞模式(Carter et al., 2001; Lepvrier et al., 2004; Wang Yuejun et al., 2005; Zhou Xinmin et al., 2006; He

Zhenyu et al., 2010)、多板块汇聚模式(Mao Jianren et al., 2013)、古太平洋板块向华南板块的俯冲模式(Wang Qiang et al., 2005; Li Zhengxiang et al., 2007; Carter et al., 2008)等。由此可见, 全面的系统的剖析华南内陆地区印支期构造—岩浆活动标志性产物(花岗岩、流纹岩等)对深入认识华南早中生代构造—岩浆活动演化具有十分重要的地质意义(王岳军等, 2005)。然而, 与花岗岩相比, 华南地区有关印支期火山岩却鲜有报道, 研究资料相对缺乏(曹明轩等, 2020), 因而限制了对华南的岩浆岩年代学骨架、构造—岩浆活动框架及地质发展演化的全面认识(丁兴等, 2005)。本次在广西 1:5 万容县区域地质调查中发现区内存在早三叠世中—酸性火山通道(火山岩筒), 其产于扬子地块与华夏地块拼合带的西南段, 对其进行野外详细调查的基础上进行岩石学、年代学及地球化学等深入研究, 将为认识华南地区印支期的地球动力学过程提供新的思路。

注: 本文为中国地质调查局地质调查项目(编号: DD20160035-11)、广西科技厅项目(编号: 桂科 AD20297091)的成果。

收稿日期: 2021-11-11; 改回日期: 2021-12-30; 网络首发: 2022-01-20; 责任编辑: 刘志强。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.056

作者简介: 农军年, 男, 1986年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事区域地质矿产调查工作; Email: 175070721@qq.com。

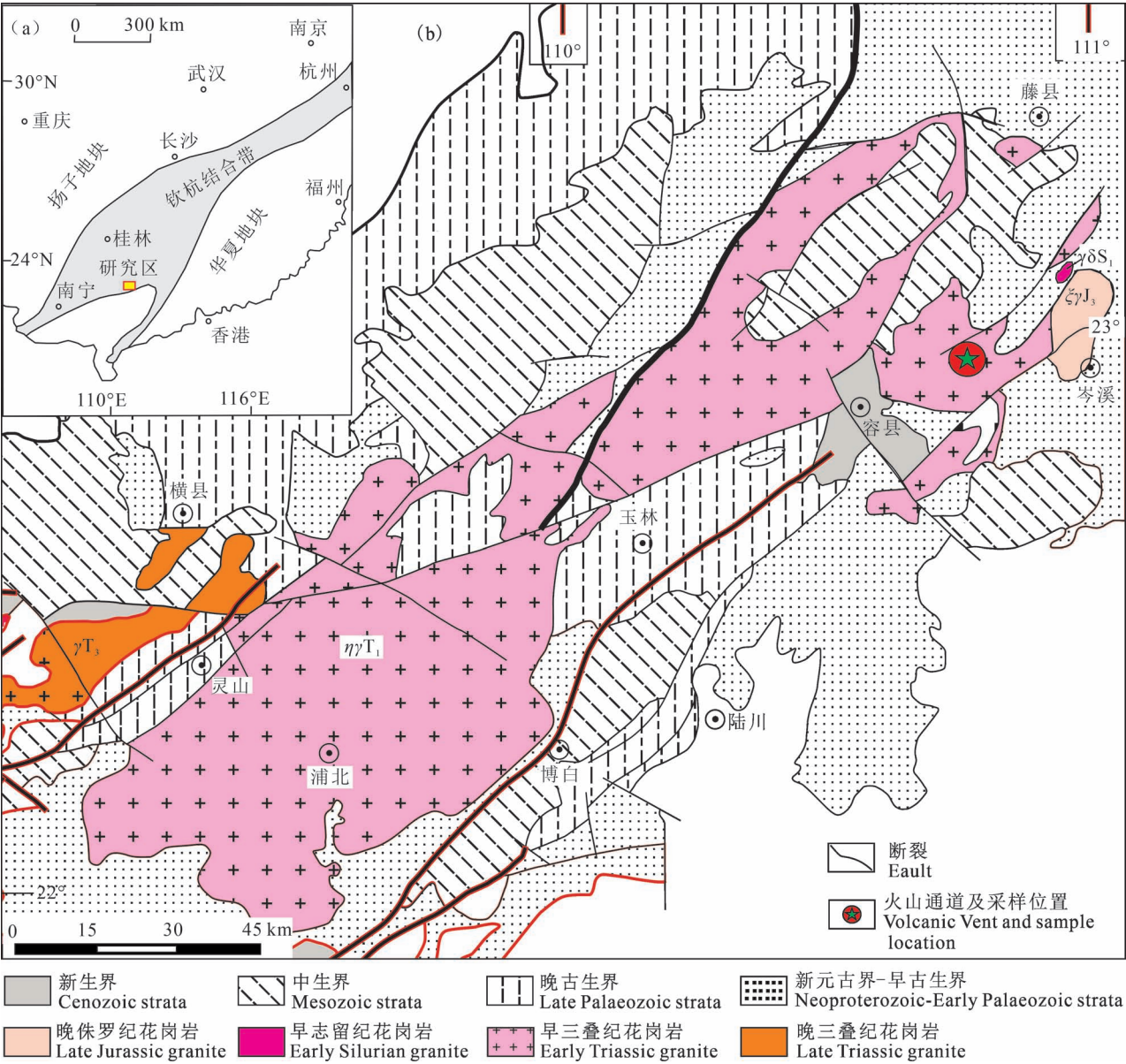


图 1 桂东南容县下罗杏地区大地构造位置图(a)和地质简图(b) (据王磊等, 2016 修改)

Fig. 1 Tectonic location (a) and geological sketch map (b) of the Xialuoxing area in Southeast Guangxi (after Wang Lei et al. , 2016&)

1 地质概况

调查区构造位置处于扬子地块与华夏地块的结合部位(图 1),区内构造发育,岩浆岩分布广,地层受到构造及岩浆岩的改造强烈,使各时代地层分布不连续,出露残缺不全。区内岩浆岩发育,可分加里东期、印支期及燕山期,以花岗岩为主,少量中生代火山岩,后者主要分布于调查区自良断陷盆地中,为一套中酸性火山碎屑岩。调查区侵入岩主要为印支期花岗岩,以大容山复式岩体为主体,呈巨大的岩

基状产出,空间上被博白—岑溪和灵山—藤县两个深大断裂所限,岩性为含堇青石黑云母二长花岗岩,分布于六万大山—大容山隆起带内,呈北东向巨型花岗岩基分布,往南西延伸出调查区,为典型的“S”型花岗岩。加里东期花岗岩仅在调查区东部波塘—三堡一带有少量出露,岩性主要为具片麻状构造花岗岩、花岗闪长岩。区内变质岩分布相当广泛,是两广地区地质构造及变质作用演化最复杂的地区之一。变质作用在新元古界至中生界均有表现,存在有不同类型、不同期次变质作用和岩浆作用的叠加和改造。



图2 桂东南容县下罗杏火山岩野外照片:(a)、(b)柱状节理;(c)流纹岩;(d)捕掳体

Fig. 2 Photograph of the Xialuoxing volcanic in southeastern Guangxi: (a), (b) columnar jointing; (c) rhyolite; (d) xenoliths

根据变质作用类型和成因,可分为区域变质岩、热接触变质岩和动力变质岩3种类型,其中以区域变质岩为主,区域变质作用改造强弱程度差别较大,局部变质程度相对较深,达角闪岩相(局部达麻粒岩相),动力变质岩和接触变质岩大多叠加在区域变质岩之上。位于大容山下罗杏村原定晚白垩世花岗岩($\gamma\pi K_2$),经调查证实为一套“隐爆角砾岩、流纹岩、粗面安山玢岩、霏细斑岩等”火山岩系组合。

1.1 火山通道(岩筒)地质特征

本次于桂东南容县十里乡下罗杏村附近发现存在早三叠世中—酸性火山通道,呈近圆状,直径约85 m,与大容山复式花岗岩体呈断层接触关系,断面近直立。火山通道的岩性主要为隐爆角砾岩、流纹岩、(含杏仁)粗面安山玢岩、(含杏仁体、粗面)霏细斑岩等,柱状节理发育(图2a、图3b),主要为超浅成相—溢流相。野外可以识别出三期岩浆活动,第一期岩性为灰白色—灰绿色流纹岩,第二期岩性

为粗面安山玢岩、(粗面)霏细斑岩,第三期为灰绿色流纹岩(图2c),后期岩石捕获前期的岩石碎块(图2d)。火山通道内流纹面理平行于岩筒壁或环绕前期岩石面的特征。

1.2 火山岩筒剖面介绍

广西容县下罗杏早三叠世火山通道剖面(图3)位于大容山东北缘(图1b)之下罗杏村北东约300 m处,呈南西西向(260°)展布,长约100 m。剖面起点坐标: $x=464675.95$, $y=2535183.89$ 。野外分层17层,室内综合分层4层,薄片样17件,地球化学样6件,年龄样1件。

火山通道(岩筒):

5. 灰绿色流纹岩。斑状结构,流纹构造,斑晶主体为石英,局部聚集呈弱纹层,含量约10%。基质主体为长英质隐晶质,矿物组合,含量 $>85\%$ 。流动面理较为发育。其上部发育大面积横向柱状构造,节理面完整,截面呈不规则六边形。在

柱状节理部位偶见椭球状安山玢岩、霏细斑岩捕虏体。

4. 含杏仁蚀变粗面安山玢岩、含杏仁体(粗面)霏细斑岩。捕虏体主要为玄武玢岩(中基性熔岩)、流纹岩。局部柱状节理发育。
3. 灰白色—灰绿色流纹岩。斑状结构,流纹构造。斑晶主体为石英、长石,基质为长英质隐晶质集合体。与从容山二长花岗岩呈断层接触,接触面平直,发育擦痕线理。内接触带发育宽介于 8~12 mm 的冷凝边。
2. 隐爆角砾岩。
1. 中粗粒二长花岗岩(从容山岩体)。

该火山通道为工作区出露岩性较完整,岩石蚀变中等的。剖面次序取样,岩性分类主要有:

(1) 隐爆角砾岩。岩石褐铁矿化较强,呈红褐色,出露于次火山岩与围岩接触带附近。岩石具有隐爆角砾结构(图 4a),角砾主要为石英碎块,花岗岩碎块,不规则状,大小不一,0.5~10.0 mm,基质完全被绢云母取代,石英碎块大部分具有绢云母反应边,局部聚集不均匀分布。长石碎块完全绢云母化,黑云母斑晶熔蚀圆状,褐铁矿化,略有暗化边。基质具有霏细和显微花岗结构,主要由显晶质—隐晶质的长英质微粒和显微鳞片绢云母组成。岩石受成岩后期蚀变和构造作用,局部基质完全绢云母化,并且碎裂、黄(褐)铁矿化。

(2) 弱蚀变流纹岩。剖面中呈浅黄色,露头可见斑状结构,流纹构造,柱状节理发育,为该火山岩通道的主要岩性,剖面上不连续延长约有 20 m。岩

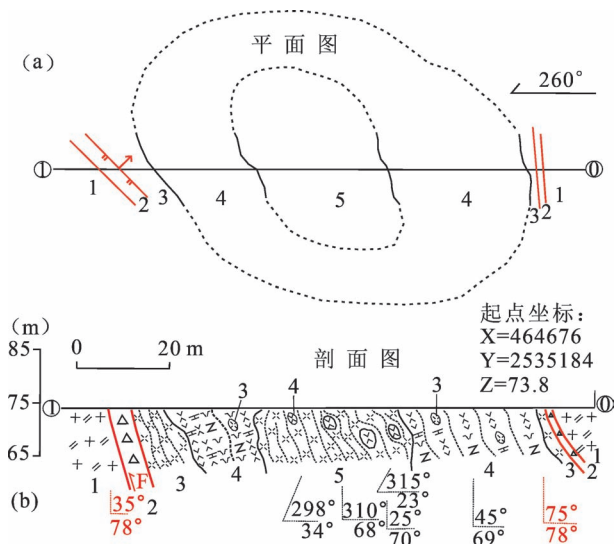


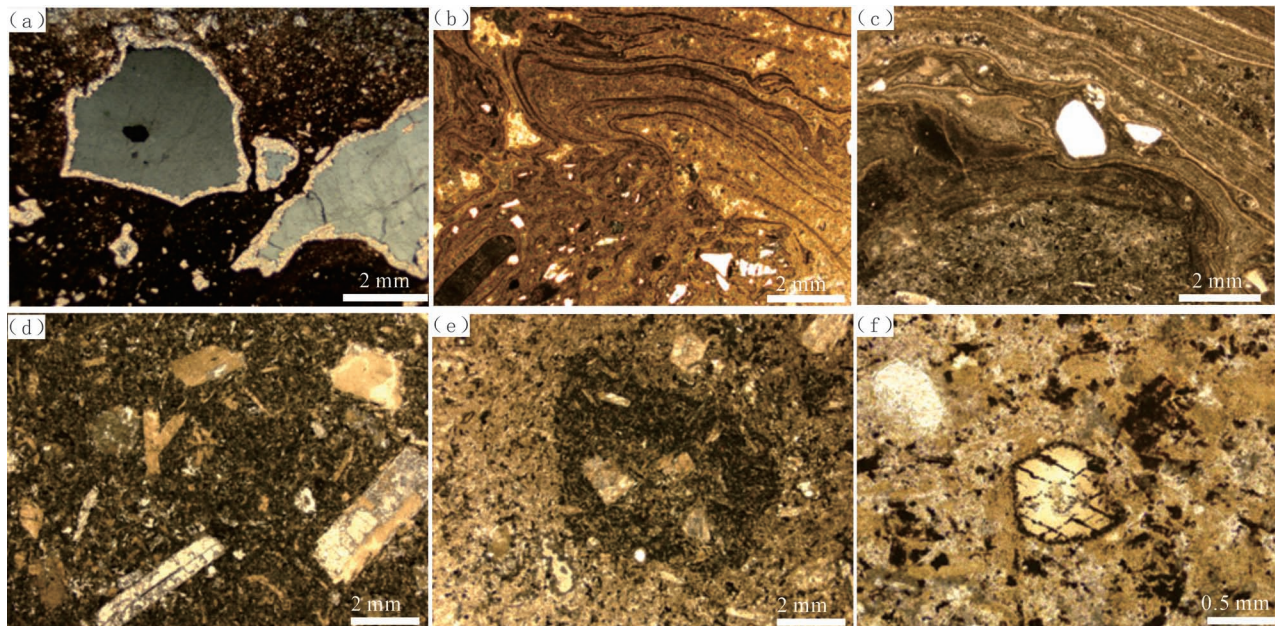
图 3 桂东南容县下罗杏火山岩通道平面图(a)和地质剖面图(b)

Fig. 3 The Plan (a) and geological section (b) of the Xialuoxing volcanic in southeastern Guangxi

1—二长花岗岩;2—隐爆角砾岩;3—早期流纹岩;4—粗面安山玢岩、霏细斑岩;5—晚期流纹岩

1—monzonite granite;2— cryptoexplosion breccia;3—early rhyolite;4— coarse antiporphyrite and pharitic porphyry;5—late rhyolite

石具有不等粒碎斑结构,流纹构造(图 4b),成份有石英、斜长石、钾长石绝大部分碎裂状、熔蚀圆状、不规则状尖棱角状,粒度 0.3~5.5 mm,黑云母斑晶片状、杆状,弱褐铁矿化,略有暗化边,并含有次棱角状安山质、花岗质捕虏体,有的被流纹层包绕。基质具有霏细结构,流纹构造发育,呈同心皮壳状圈层密集



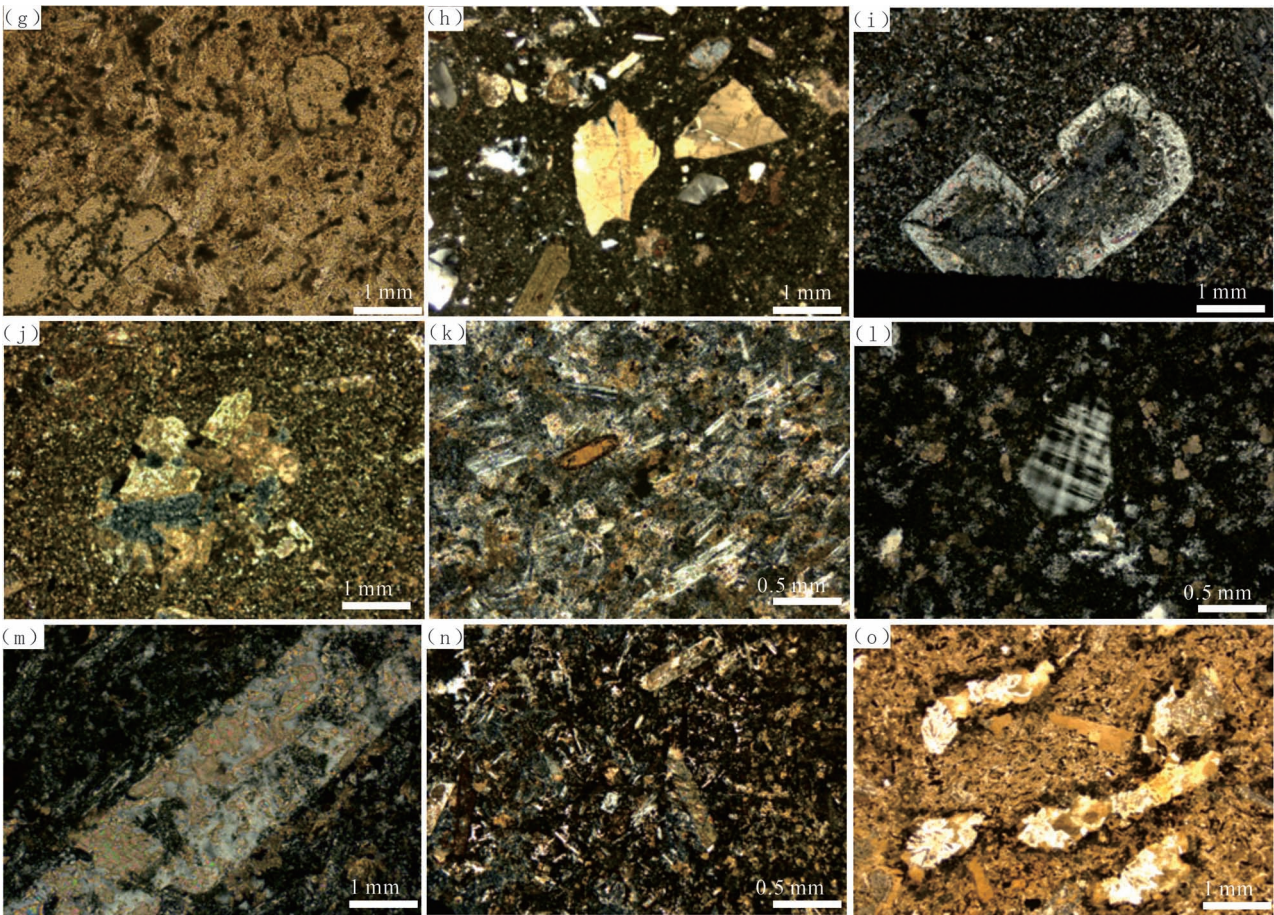


图 4 桂东南容县下罗杏火山岩镜下照片

Fig. 4 Photomicrographs of the Xialuoxing volcanic in Southeast Guangxi Province

(a) 角砾结构(隐爆角砾岩);(b) 碎斑结构与流纹构造;(c) 流纹构造;(d) 不等粒斑状结构(长柱状为玄武玢岩);(e) 暗色矿物斑晶;(f) 角闪石斑晶(暗化边结构,角闪石假晶横截面,两组菱形解理);(g) 间隐间粒结构;(h) 不等粒碎斑结构;(i) 斜长石斑晶具有环带结构(基质具有隐晶—霏细结构);(j) 聚斑结构;(k) 假粗面结构;(l) 钾长石格子双晶;(m) 长柱状正长石斑晶碳酸盐化;(n) 隐晶质结构和霏细结构;(o) 杏仁构造

(a) Cryptoexplosive breccia;(b) porphyroclastic texture and rhyolitic structure;(c) rhyolitic structure;(d) heterogranular texture;(e) phenocryst;(f) amphibole;(g) interstitial intergranular texture;(h) heterogranular texture;(i) zonal structure;(j) glomerophytic texture;(k) trachytic texture;(l) gridiron twining;(m) orthoclase porphyry;(n) cryptocrystalline texture and felsitic texture;(o) amygdaloidal structure

分布相片(图 4c),流纹基质成份为隐晶—显晶质长英质霏细颗粒,等轴状彼此镶嵌,界线不清,不同流纹层结晶程度略有差异,夹有少量绿泥石团块,岩石基质被少量晶粒方解石不均匀取代。

(3)含杏仁体蚀变玄武玢岩(中基性熔岩)。该岩性以角砾(捕虏体)的形式分布于蚀变粗面岩内,在火山岩与岩浆岩接触附近含量较多,粒度略大,向火山通道中心逐渐减少。呈比较深的灰绿色,有的具有弱的铁质烘烤边,交代蚀变较强。岩石具有不等粒斑状结构(图 4d),斑晶主要有自形蚀变的长石、暗色矿物(角闪石、透辉石,图 4e、f),含量相近,粒度 0.3~2.0 mm,呈连续不等粒状,偶见微细磷灰

石斑晶。基质具有间隐间粒结构(图 4g),成分主要为绿泥石化柱粒状暗色矿物(0.1~0.3 mm)和少量针状锥晶斜长石、暗色矿物杂乱分布,偶见斜长石构成三角区被绿泥石充填的辉绿结构。杏仁体含量 2%~4%,次圆形—圆形,一般<2.0 mm,完全被方解石、微粒石英(球颗)、显微鳞片绿泥石充填,有的具有铁质冷凝边,或矿物结晶韵律结构。岩石蚀变特征:几乎完全被微细粒方解石和显微鳞片绿泥石取代,矿物晶形大都保留。

(4)含杏仁粗面安山玢岩。剖面中呈浅灰绿色,露头具有柱状节理构造,为该火山岩通道的主要岩性,剖面上不连续延长约有 30~40 m。岩石具有

典型不等粒斑状结构(图 4h),斑晶成份以自形斜长石、钾(正)长石为主,石英、暗色矿物(角闪石、透辉石)极少,斜长石斑晶可见聚片双晶、有点具有环带(图 4i),偶见碎裂钾长石斑晶,(正)长石为细长柱状,长宽比 $>3:1$,粒度 $0.3\sim 2.0\text{ mm}$,卡式双晶普遍可见。斑晶呈连续不等粒,反映出斑晶是在不同温压下连续结晶。部分同成分或不同成份的斑晶聚集呈团块,呈聚斑—联斑结构(图 4j)。基质具有霏细结构和似粗面结构(图 4k),成份主要为非晶质长英质,颗粒界线不明显且细小,等轴状,无光性,与针状碱性长石锥晶、暗色矿物假晶略定向较均匀分布。有些岩石杏仁体呈略定向团块分布,火山通道中心部位的杏仁体为次圆—圆形,完全被黄绿色粘土矿物、石英球颗充填。

(5)含杏仁体(粗面)霏细斑岩。出露于次火山岩与围岩接触带附近,偶见,岩石具有少斑结构,镜下仅见数个细小碎裂熔蚀状石英、钾长石斑晶,及暗色矿物假晶。粒度 $<1.0\text{ mm}$,钾长石斑晶具有格子双晶(图 4l),暗色矿物斑晶柱粒状,横截面四边形,完全碳酸盐化,弱暗化边。长柱状正长石斑晶,不完全碳酸盐化,卡式双晶保留(图 4m)。基质具有霏细结构(图 4n),主要成份为隐晶质—霏细长英质,颗粒界线模糊,大小 $0.1\sim 0.2\text{ mm}$,较均匀镶嵌分布,少量不规则石英球颗零星分布。不规则杏仁体呈定向团块分布(图 4o),被半自形的方解石和石英及石英球颗充填。

综上所述,下罗杏火山通道出露岩石大部分蚀变较强,但岩性还能具有以下岩石矿物、结构构造特征,斑晶成份由斜长石、钾(正)长石、石英、黑云母、暗色矿物(角闪石、透辉石)、磷灰石,斑晶自形程度较高,少有碎裂斑晶,斜长石具有环边,钾(正)长石卡式双晶普遍发育,格子双晶偶见,暗色矿物具有弱的暗化边,不等粒斑状结构,聚斑结构,少有碎斑结构,基质具有间隙间粒结构、霏细结构,似粗面结构,含(角)砾结构,隐爆角砾结构,杏仁体构造发育。

2 样品制备及分析方法

本次在下罗杏流纹岩中挑选一件具有代表性的新鲜样品(采样位置见图 1,样品 TW12-1161-2)进行锆石 U-Pb 测年、6 件样品进行全岩主量及微量元素分析。从样品中挑选出含包裹体少、无明显裂隙且晶形完好的锆石制成靶,制靶详见文献(李伟等, 2021), 然后进行透射光与反射光下的显微照相及阴极发光(CL)照相,据此选择典型的岩浆锆石进行

U-Pb 年龄。

锆石 U-Pb 同位素定年和原位微区锆石 Hf 同位素测试在武汉上谱分析科技有限责任公司完成。锆石 U-Pb 同位素定年采用 LA-ICP-MS 同时分析完成,详细的仪器参数和分析流程见文献(Zong Keqing et al., 2017)。GeolasPro 激光剥蚀系统由 COMPexPro 102 ArF 193 nm 准分子激光器和 MicroLas 光学系统组成, ICP-MS 型号为 Agilent 7700e。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 T 型接头混合,激光剥蚀系统配置有信号平滑装置(Hu Zhaochu et al., 2015)。本次分析的激光束斑和频率分别为 $32\text{ }\mu\text{m}$ 和 44 Hz 。U-Pb 同位素定年和微量元素含量处理中采用锆石标准 91500 和玻璃标准物质 NIST610 作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正。每个时间分辨分析数据包括大约 $20\sim 30\text{ s}$ 空白信号和 50 s 样品信号。对分析数据的离线处理(包括对样品和空白信号的选择、仪器灵敏度漂移校正、元素含量及 U-Pb 同位素比值和年龄计算)采用软件 ICPMSDataCal(Liu Yongsheng et al., 2008)完成。锆石样品的 U-Pb 年龄谱和图绘制和年龄加权平均计算采用 Isoplot/Ex_ver3(Ludwig, 2003)完成。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 Geolas HD(Coherent, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus(Thermo Fisher Scientific, 德国)。分析过程同时配备了信号平滑装置以提高信号稳定性和同位素比值测试精密度(Hu Zhaochu et al., 2012)。载气使用氦气,并在剥蚀池之后引入少量氮气以提高 Hf 元素灵敏度(Lin jie et al., 2016)。分析采用 Neptune Plus 新设计高性能锥组合。激光输出能量可以调节,实际输出能量密度为 5.3 J/cm^2 。采用单点剥蚀模式,斑束固定为 $44\text{ }\mu\text{m}$ 。详细仪器操作条件和分析方法可参照(Lin jie et al., 2016)。

主量元素和微量元素测试分析在广州澳实分析检测有限公司完成,主量元素采用 ME-XRF26(偏硼酸锂熔融, X 荧光光谱分析)方法测定,其分析精密度及准确度优 2% 。微量元素采用 ICP-MS(电感耦合等离子体质谱仪)方法测定,将试样加入到偏硼酸锂/四硼酸锂熔剂中,混合均匀,在 1025°C 以上的熔炉中熔化。熔液冷却后,用硝酸、盐酸和氢氟酸定容,再用等离子体质谱仪分析。其分析精密度及准

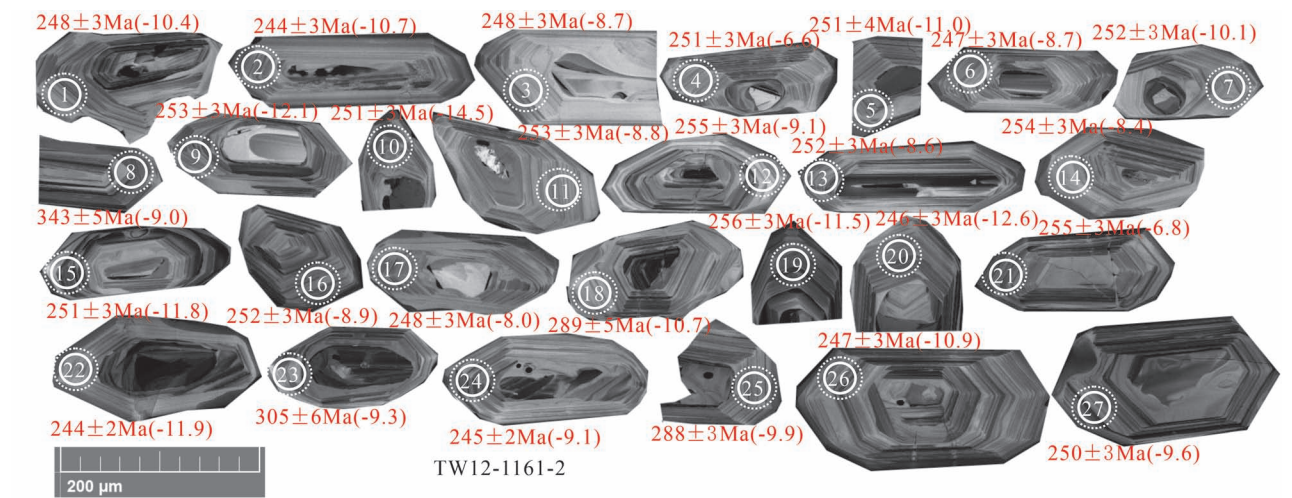


图5 桂东南容县下罗杏火山岩代表性锆石颗粒 CL 图像(图中实线圈为锆石 U-Pb 测年点;虚线圈为锆石 Hf 同位素分析点;圈内数字为点编号;248±3 Ma 为锆石 U-Pb 年龄;括号内的数值为 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值)

Fig. 5 CL images of representative zircons from the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi (The solid circle in the figure is the dating point of zircon U-Pb; the dotted line circle is the zircon Hf isotope analysis point. The number in the circle is the point number; 248±3Ma is the U-Pb age of the zircons. The value in parentheses is the $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ value)

准确度优 10%。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本文对一件流纹岩样品(TW12-1161-2,三期)进行了锆石 U-Pb 定年。对于放射性成因组分积累较少的年轻锆石来说, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄更能代表锆石的结晶年龄 (COMPSTON et al., 1992)。因此在以下的讨论中,本文用锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄来代表火

山喷出时代。样品中的锆石一般为无色,少数具有浅褐色,以自形锥柱状,透明至半透明为主,粒度较大,长度为 60~250 μm。在阴极发光图像上,大部分锆石具有明显的岩浆振荡环带(图 5)。

锆石 U-Pb 年龄测试结果见表 1。对样品 TW12-1161-2 测定了 27 颗锆石,除第 23 颗锆石的 Th/U 值为 0.08 外,其余 26 颗锆石的 Th/U 值介于 0.12~0.37,属于典型岩浆锆石的 Th/U 值范围内 (Chen et al., 2000; Belousova et al., 2002;

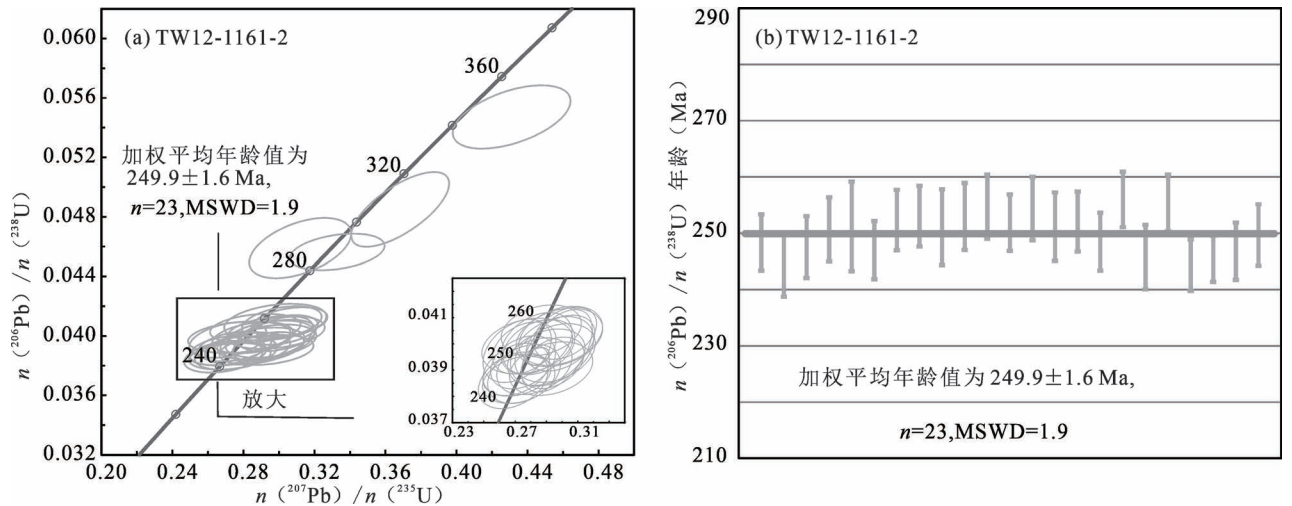


图6 桂东南容县下罗杏火山岩 U-Pb 同位素年龄谐和图

Fig. 6 Zircon U-Pb concordia diagram for the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi

表 1 桂东南容县下罗杏火山岩锆石 U-Pb 同位素定年结果
Table1 Zircon U-Pb results for the Xiaoluxing volcanic in Southeast Guangxi Province

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)	
	Pb *	Th	U	Th/U	$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
					1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值			
TW12-1161-2-1	13.51	78.7	328	0.24	0.0545	0.0017	0.2939	0.0082	0.0393	0.0004	391	70.4	262	6.4	248	2.5	94
TW12-1161-2-2	13.14	86.1	324	0.27	0.0506	0.0017	0.2688	0.0091	0.0386	0.0004	233	79.6	242	7.3	244	2.7	98
TW12-1161-2-3	9.20	70.4	221	0.32	0.0521	0.0017	0.2823	0.0098	0.0391	0.0004	300	75.9	253	7.8	248	2.7	98
TW12-1161-2-4	12.23	105	283	0.37	0.0539	0.0019	0.2955	0.0105	0.0397	0.0005	369	84.3	263	8.2	251	2.8	95
TW12-1161-2-5	14.78	78.0	348	0.22	0.0541	0.0016	0.2967	0.0092	0.0397	0.0006	376	68.5	264	7.2	251	4.0	95
TW12-1161-2-6	11.40	97.0	267	0.36	0.0544	0.0020	0.2930	0.0108	0.0391	0.0004	387	88.0	261	8.5	247	2.6	94
TW12-1161-2-7	12.12	69.9	287	0.24	0.0503	0.0021	0.2778	0.0118	0.0399	0.0004	209	90	249	9.4	252	2.7	98
TW12-1161-2-8	18.77	40.5	337	0.12	0.0568	0.0016	0.4311	0.0136	0.0547	0.0009	483	63.0	364	9.6	343	5.3	94
TW12-1161-2-9	12.40	63.8	297	0.22	0.0541	0.0016	0.2989	0.0090	0.0400	0.0004	376	66.7	266	7.0	253	2.7	95
TW12-1161-2-10	12.55	62.7	303	0.21	0.0537	0.0021	0.2936	0.0108	0.0397	0.0005	367	54.6	261	8.5	251	3.4	95
TW12-1161-2-11	10.43	72.4	245	0.30	0.0511	0.0023	0.2836	0.0093	0.0400	0.0005	256	101.8	254	7.3	253	3.0	99
TW12-1161-2-12	10.45	86.1	238	0.36	0.0541	0.0020	0.2991	0.0109	0.0403	0.0005	376	85.2	266	8.5	255	2.8	95
TW12-1161-2-13	13.18	90.5	310	0.29	0.0500	0.0024	0.2759	0.0083	0.0398	0.0004	195	112.9	247	6.6	252	2.5	98
TW12-1161-2-14	11.39	79.1	262	0.30	0.0537	0.0020	0.2982	0.0113	0.0402	0.0005	367	83.3	265	8.8	254	2.8	95
TW12-1161-2-15	14.94	61.6	372	0.17	0.0496	0.0016	0.2713	0.0089	0.0397	0.0005	189	74.1	244	7.1	251	3.0	97
TW12-1161-2-16	12.62	80.7	297	0.27	0.0522	0.0017	0.2853	0.0093	0.0399	0.0004	300	75.9	255	7.4	252	2.7	98
TW12-1161-2-17	11.08	77.1	261	0.29	0.0509	0.0016	0.2751	0.0085	0.0393	0.0004	235	72.2	247	6.7	248	2.6	99
TW12-1161-2-18	11.90	84.4	233	0.36	0.0492	0.0017	0.3120	0.0117	0.0459	0.0008	167	81.5	276	9.1	289	5.1	95
TW12-1161-2-19	12.57	43.6	298	0.15	0.0513	0.0019	0.2867	0.0104	0.0405	0.0004	254	88.0	256	8.2	256	2.5	99
TW12-1161-2-20	10.08	73.4	236	0.31	0.0516	0.0018	0.2757	0.0095	0.0389	0.0005	333	81.5	247	7.5	246	2.9	99
TW12-1161-2-21	13.63	103	302	0.34	0.0544	0.0016	0.3019	0.0082	0.0404	0.0004	387	68.5	268	6.4	255	2.5	95
TW12-1161-2-22	10.80	50.3	261	0.19	0.0511	0.0018	0.2723	0.0094	0.0386	0.0004	256	81.5	245	7.5	244	2.3	99
TW12-1161-2-23	17.42	27.7	354	0.08	0.0548	0.0013	0.3683	0.0113	0.0485	0.0010	406	51.8	318	8.4	305	6.3	95
TW12-1161-2-24	12.49	85.8	296	0.29	0.0505	0.0016	0.2711	0.0088	0.0388	0.0003	220	75.9	244	7.1	245	2.0	99
TW12-1161-2-25	14.90	57.2	315	0.18	0.0529	0.0017	0.3329	0.0109	0.0456	0.0005	324	74.1	292	8.3	288	3.1	98
TW12-1161-2-26	11.67	62.9	285	0.22	0.0503	0.0016	0.2707	0.0086	0.0390	0.0004	209	39.8	243	6.9	247	2.5	98
TW12-1161-2-27	11.68	69.9	281	0.25	0.0531	0.0018	0.2899	0.0101	0.0395	0.0004	332	77.8	258	7.9	250	2.7	96

表 2 桂东南容县下罗杏火山岩主量元素含量 (%)

Table 2 Major elements contents(%) of the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi

样品编号	岩性	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	烧失	总量	A/CNK	K/Na	ALK	Mg [#]
YQ15-1161-7	粗面安山玢岩	63.72	14.1	4.65	3.62	1.1	1.66	3.85	0.61	0.07	0.14	6.31	99.89	1.04	2.32	5.51	29.86
YQ 15-1161-8	粗面安山玢岩	60.37	14.43	5.71	3.67	1.4	2.88	3.79	0.65	0.11	0.14	6.49	99.7	0.93	1.32	6.67	30.62
YQ 15-1161-10	流纹岩	73.93	13.08	2.15	1.23	0.45	1.75	4.89	0.19	0.02	0.03	2.16	99.94	1.25	2.79	6.64	27.36
YQ 15-1161-12	流纹岩	73.90	12.87	2.51	1.26	0.67	1.56	4.94	0.2	0.03	0.04	2.28	100.34	1.26	3.17	6.5	32.45
YQ 12-1161-2	流纹岩	71.42	12.29	2.81	2.55	0.91	1.38	4.41	0.31	0.04	0.07	3.48	99.71	1.05	3.2	5.79	36.83
YQ 12-1161-3	粗面安山玢岩	60.36	14.24	5.63	4.01	1.44	2.87	3.86	0.62	0.11	0.13	6.72	100.03	0.88	1.34	6.73	31.53

表 3 桂东南容县下罗杏火山岩稀土元素含量 (×10⁻⁶)

Table 3 REE contents (×10⁻⁶) of Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi

品号	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	ΣREE	LREE	HREE	LREE/HREE	La _N /Yb _N	δEu	δCe
YQ15-1161-7	40	80.3	8.86	31.3	6.35	1.1	5.57	0.84	4.84	0.99	2.81	0.41	2.71	0.4	26.7	186.48	167.91	18.57	9.04	10.59	0.55	1
YQ 15-1161-8	44.1	89.9	9.76	34.7	7.13	1.37	6.37	0.99	5.65	1.13	3.05	0.44	2.89	0.42	30.4	207.9	186.96	20.94	8.93	10.95	0.61	1.02
YQ 15-1161-10	52.7	102.5	11.05	36.8	7.32	0.82	6.18	0.91	5.4	1.03	2.9	0.43	2.83	0.42	29.4	231.29	211.19	20.1	10.51	13.36	0.36	0.99
YQ 15-1161-12	53.1	103	10.9	37.2	7.45	0.81	6.27	0.93	5.44	1.05	3.01	0.46	2.99	0.43	30.4	233.04	212.46	20.58	10.32	12.74	0.35	0.99
YQ 12-1161-2	44.7	81.2	8.45	30.6	6.21	0.75	5.43	0.84	5.02	0.97	2.82	0.38	2.37	0.38	30.2	190.12	171.91	18.21	9.44	13.53	0.39	0.96
YQ 12-1161-3	47.7	91.4	9.64	36.2	7.06	1.28	6.61	0.99	5.53	1.12	3.22	0.4	2.62	0.41	32.1	214.18	193.28	20.9	9.25	13.06	0.56	0.99

表 4 桂东南容县下罗杏火山岩微量元素含量 (×10⁻⁶)

Table 4 Table of trace elements contents (×10⁻⁶) in Xialuoxing volcanic rocks in Southeastern Guangxi

样品号	Li	Be	Sc	V	Cr	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Sn	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Th	U
YQ15-1161-7	33.8	3.26	9.9	61	20	17.3	187	69.5	236	13	3	23.8	558	6.3	1.2	1	17	2.53
YQ 15-1161-8	37.3	2.97	10.3	65	20	18.6	168.5	63.3	233	14.3	4	18.3	503	6.1	1.2	1	17	2.92
YQ 15-1161-10	53.9	3.42	6.2	16	10	16.5	243	66.3	188	14	5	13.95	623	5.7	1.3	2	24.9	4.73
YQ 15-1161-12	53.9	3.15	5.7	16	20	17.2	251	70.4	189	13.5	4	16.65	693	5.7	1.3	2	24.7	4.24
YQ 12-1161-2	38.8	2.65	8.9	39	30	15	209	79	190	12.6	4	18.6	488	5.1	1.2	2	19.55	4.07
YQ 12-1161-3	34	2.69	10.3	73	20	17.7	166.5	60	276	14.3	3	16.4	285	6.4	1.1	1	17.3	2.54

注: A/CNK = $w(\text{Al}_2\text{O}_3)/[w(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})]$; K/Na = $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$; ALK = $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$; $\text{Mg}^\# = 100 \ n(\text{Mg}^{2+})/[n(\text{Mg}^{2+})+n(\text{Fe}^{2+})]$;

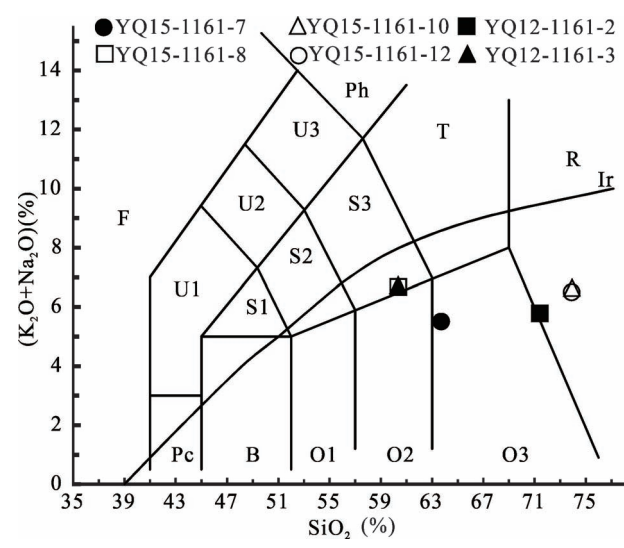


图 7 桂东南容县下罗杏火山岩 TAS 图解
(据 Peccerillo and Taylor, 1976)

Fig. 7 TAS Diagram for the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi(after Peccerillo and Taylor, 1976)

de Barros et al. , 2010)。所有测点均位于谐和线上,其中 4 个测点(08、18、23、25)的年龄相对较老(分别为 343 ± 5 Ma、 289 ± 5 Ma、 305 ± 6 Ma、 288 ± 3 Ma),相应的锆石具较复杂的内部结构或浑圆状核心(图 5),可能是继承锆石。余下 23 颗锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和年龄集中在 244~256 Ma,加权平均年龄值为 249.9 ± 1.6 Ma (MSWD=1.9) (图 6),代表火山岩的形成年龄。

3.2 主量元素

下罗杏火山岩样品的化学成分分析结果列于表 2~表 4。主量元素具有如下特征: $w(\text{SiO}_2)$ 为 60.36%~73.93%; $w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 为 5.51%~6.67%, $w(\text{K}_2\text{O})/w(\text{Na}_2\text{O})$ 值为 1.32~3.20; $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$ 为 12.29%~14.43%; $w(\text{CaO})$ 为 1.23%~4.01%; 铝饱和指数 A/CNK 为 0.88~1.26; $\text{Mg}^\#$ 值为 27.36~36.83。在 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O})$ 图解中,两个样品落入粗面安山岩、一个样品落入英安岩、三个样品落入流纹岩区域(图 7);在 $w(\text{SiO}_2)-w(\text{K}_2\text{O})$ 图解中,落入钾玄岩—高钾钙碱性系列(图 8);在 $A/\text{CNK}-A/\text{NK}$ 图解(略)中落入准铝质—过铝质的范围。

3.3 稀土与微量元素

下罗杏火山岩样品的稀土总量为 $\sum \text{REE} = 186.48\times10^{-6} \sim 233.04\times10^{-6}$, $\sum \text{LREE}/\sum \text{HREE}$ 介于 8.93~10.51, $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 10.59~13.56, $(\text{La}/$

$\text{Sm})_{\text{N}}$ 介于 3.99~4.65, $(\text{Gd}/\text{Yb})_{\text{N}}$ 介于 1.70~2.09,属轻稀土富集型,且 LREE 与 HREE 分异较明显;在稀土元素分布模式图上,呈右倾型的配分曲线(图 9a),轻稀土分布曲线较陡,分馏明显,重稀土相对平坦,明显的 Eu 负异常, δEu 值介于 0.35~0.61 之间,反映了大陆边缘安山岩的稀土分布型式特点。

在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 9b)中,明显亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素和 Ba、Sr 等亲石元素,相对富集 Th、U、Zr、Hf、Ce 等高场强元素和 Rb、K、Th 等亲石元素,显示弧火山岩地球化学特征。Sr、Eu 的负异常说明其源区残留了斜长石,或是岩浆分离结晶作用中有大量斜长石析出;P、Ti 负异常表明岩浆可能经历明显的含磷、含钛矿物的分离结晶作用。

3.4 锆石 Hf 同位素特征

在 U-Pb 定年分析的基础上,对下罗杏流纹岩样品(TW12-1161-2)中的 27 个锆石进行 Hf 同位素测试,其测试数据见表 5。其中四个继承锆石分析点(08、18、23、25)的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.282299~0.282325,对应的 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -9.00~-10.65,一阶段 Hf 模式年龄(T_{DM})分别为 1.31~1.36 Ga,二阶段 Hf 模式年龄($T_{2\text{DM}}$)为 1.91~1.98 Ga,这 4 个分析点的 $^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$ 值为 0.039717~0.065831, Yb 的含量不是很高,因此所获得的 Hf 同位素组成的测试结果应该是可靠的。其余 23 个分析点的 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 值变化于 0.282215~0.282436 之间, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 -14.50

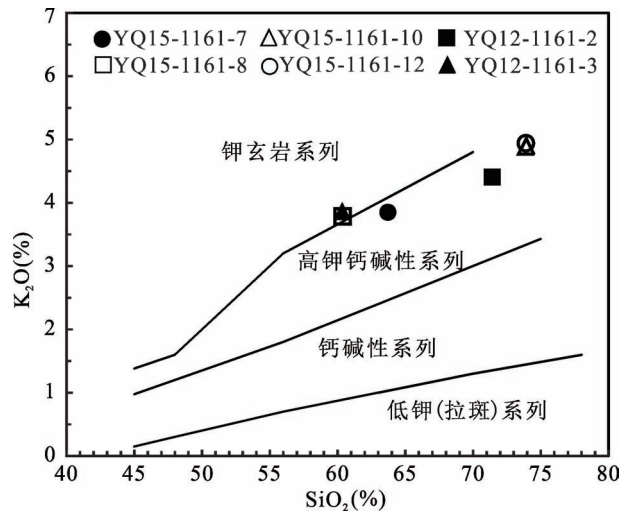


图 8 桂东南容县下罗杏火山岩 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图解
(据 Piccoli, 1989)

Fig. 8 $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ Diagram for the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi (after Piccoli, 1989)

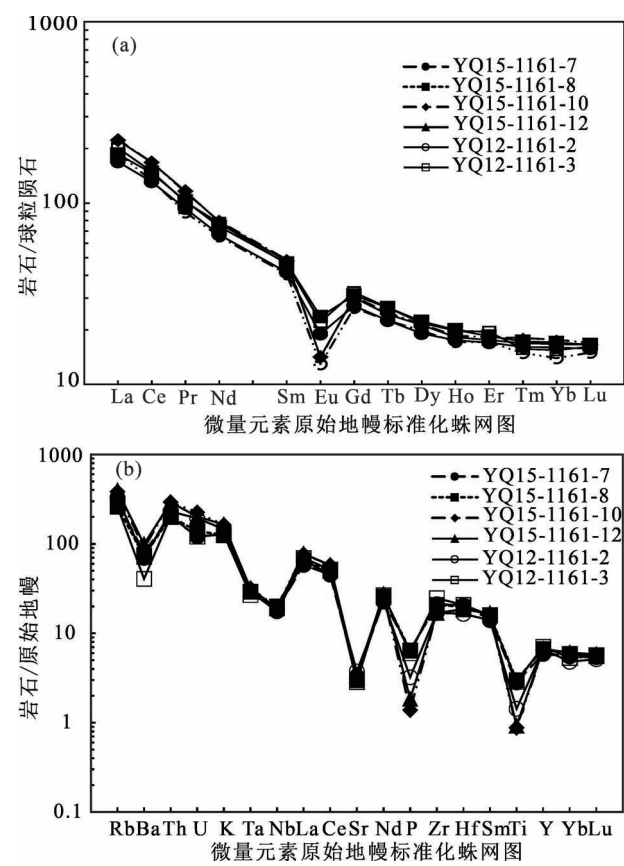


图9 桂东南容县下罗杏火山岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(a)和微量元素原始地幔标准化蛛网图(b)
(据(Sun and McDonough, 1989)
Fig. 9 Chondrite-normalized REE patterns (a) and primitive-mantle-normalized incompatible-element spidergrams (b) of the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi (after Sun and Mc Donough, 1989)

~ -6.61<0, 对应的单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM}) 为 1.17~1.49 Ga, 二阶段 Hf 模式年龄 (T_{2DM}) 为 1.70~2.20 Ga, 其二阶段 Hf 模式年龄远大于火山岩的形成年龄 249.9 ± 1.6 Ma, 表明岩浆源区为古老陆壳物质的部分熔融。

4 讨论

4.1 形成时代

1:25 万贵县幅区域地质调查将该套岩石厘定为石英斑岩,其形成时代被认为是晚白垩世,但并无年代学有关数据。本次研究获得了下罗杏流纹岩的喷发年龄为 249.9 ± 1.6 Ma, 属印支期岩浆活动产物,与大容山花岗岩年龄 (233~255 Ma, 项目组未刊数据) 一致。前人在桂西南十万大山中新生代盆地

的火山岩夹层中获得英安岩和流纹岩锆石 SHRIMP U-Pb 谐和年龄分别为 246 ± 2 Ma 和 250 ± 2 Ma (覃小锋等, 2011), 在湘南宜章县获得安山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 229.3 ± 7.6 Ma (刘勇等, 2012), 在桂中蓬莱滩剖面大隆组顶部获得 2 个凝灰质砂岩样品中 81% 的碎屑锆石 U-Pb 年龄集中在 $235 \pm 2.7 \sim 258 \pm 4.8$ Ma 之间 (王曼等, 2018)。上述年代学研究结果表明, 华南印支期存在火山活动。

4.2 岩石成因

从前述主量元素化学特征分析看出, 下罗杏火山岩 SiO_2 含量中等 (60.36%~73.93%), 相对富碱 ($ALK = 5.51\% \sim 6.73\%$), K_2O 含量较高 (3.79%~4.94%), TiO_2 含量较低 (0.19%~0.65%), K_2O/Na_2O 值 >1, 属高钾—钾质火山岩。在微量元素原始地幔标准化配分图解中, 明显亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素和 Ba、Sr 等亲石元素, 相对富集 Th、U、Zr、Hf、Ce 等高场强元素和 Rb、K、Th 等亲石元素, 在稀土元素配分图解中显示 Eu 弱负异常, 显示出大陆弧火山岩的特征。研究表明, 由地幔橄榄岩派生的岩石一般具有高 Cr ($500 \times 10^{-6} \sim 600 \times 10^{-6}$) 元素含量特征, 随橄榄石、尖晶石、单斜辉石的分离结晶作用使 Cr 丰度降低 (Wilson, 1989)。下罗杏火山岩具有较低的 Cr 元素含量特征, 表明其不是原始岩浆而类似于弧火山岩。相比于洋岛玄武岩 (OIB) ($Zr/Nb = 5.83$), 下罗杏火山岩具有高的 Zr/Nb 值 (13.43~19.30), 排除了来自软流圈地幔的可能性 (Zhao Junhong, 2007)。实验岩石学表明, $Mg^\#$ 值是判断岩浆熔体是壳源或幔源的有效参数, 地壳熔融所形成的岩石 $Mg^\#$ 值较低 (<40), 而 $Mg^\# > 45$ 的岩石则可能存在于地幔物质的加入 (Rapp and Watson, 1995; 何鹏等, 2021)。下罗杏火山岩 $Mg^\#$ 值较低 (27.36~36.83), 表明母岩浆未与幔源岩浆相互作用 (Sun and McDonough, 1989)。由于 Nb/Ta 值在地幔部分熔融和在岩浆结晶分异过程中的变化非常小, 其 Nb/Ta 值大的差异被解释为源区成分不同所致, 因此可通过 Nb/Ta 值研究岩浆的壳—幔作用和地幔演化过程 (Barth et al., 2000)。下罗杏火山岩的 Nb/Ta 值在 10.38~13.00, 低于原始地幔比值 ($Nb/Ta = 17.4 \pm 0.5$) 和亏损地幔比值 ($Nb/Ta = 15.5 \pm 1.0$) (Jochum et al., 1997), 与大陆地壳的比值 ($Nb/Ta = 11 \sim 12$) (Taylor and McLennan, 1985) 接近。从具有指示意义的微量元素比值上来看, 下罗杏火山岩 Nb/La、Nb/Ce、Nb/U、Ce/Pb 值分别为 0.27~0.33、0.13~0.16、2.96~5.63、0.001

表 5 桂东南容县下罗杏火山岩 LA-MC-ICP-MS 锆石 Lu—Hf 同位素分析结果

测点号样品 及分析点号	年龄 (Ma)	$n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$		$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$		T_{DM}	$T_{2\text{DM}}$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	(Ma)	(Ma)			
TW12-1161-2-01	248	0.056819	0.000627	0.001547	0.000013	0.282332	0.000009	1318	1933	-15.56	-10.37	-0.95
TW12-1161-2-02	244	0.062666	0.000277	0.001695	0.000008	0.282325	0.000009	1333	1953	-15.81	-10.73	-0.95
TW12-1161-2-03	248	0.035290	0.000469	0.000976	0.000012	0.282377	0.000009	1235	1826	-13.96	-8.68	-0.97
TW12-1161-2-04	251	0.054352	0.000296	0.001464	0.000004	0.282436	0.000009	1167	1697	-11.87	-6.61	-0.96
TW12-1161-2-05	251	0.043048	0.000598	0.001188	0.000013	0.282311	0.000012	1334	1974	-16.29	-10.98	-0.96
TW12-1161-2-06	247	0.059788	0.000199	0.001576	0.000006	0.282380	0.000010	1251	1826	-13.86	-8.69	-0.95
TW12-1161-2-07	252	0.048024	0.001107	0.001291	0.000025	0.282335	0.000009	1305	1921	-15.45	-10.13	-0.96
TW12-1161-2-08	343	0.065831	0.001566	0.001711	0.000033	0.282315	0.000010	1348	1918	-16.16	-9.00	-0.95
TW12-1161-2-09	253	0.053293	0.000617	0.001551	0.000024	0.282279	0.000013	1393	2048	-17.43	-12.14	-0.95
TW12-1161-2-10	251	0.061692	0.000787	0.001817	0.000030	0.282215	0.000019	1495	2195	-19.71	-14.50	-0.95
TW12-1161-2-11	253	0.049200	0.000481	0.001312	0.000009	0.282373	0.000012	1252	1836	-14.11	-8.78	-0.96
TW12-1161-2-12	255	0.032556	0.001332	0.000878	0.000030	0.282361	0.000010	1254	1856	-14.52	-9.07	-0.97
TW12-1161-2-13	252	0.057751	0.000172	0.001526	0.000007	0.282380	0.000010	1249	1823	-13.86	-8.59	-0.95
TW12-1161-2-14	254	0.051226	0.000440	0.001329	0.000007	0.282383	0.000011	1238	1813	-13.75	-8.39	-0.96
TW12-1161-2-15	251	0.053979	0.000473	0.001449	0.000011	0.282289	0.000011	1375	2026	-17.09	-11.81	-0.96
TW12-1161-2-16	252	0.049641	0.000516	0.001308	0.000009	0.282371	0.000010	1255	1841	-14.19	-8.87	-0.96
TW12-1161-2-17	248	0.051335	0.000253	0.001354	0.000003	0.282397	0.000010	1220	1786	-13.27	-8.04	-0.96
TW12-1161-2-18	289	0.053579	0.000502	0.001469	0.000009	0.282299	0.000010	1361	1981	-16.72	-10.65	-0.96
TW12-1161-2-19	256	0.073924	0.000586	0.001976	0.000011	0.282298	0.000009	1382	2009	-16.77	-11.49	-0.94
TW12-1161-2-20	246	0.047831	0.000873	0.001271	0.000018	0.282269	0.000012	1397	2073	-17.80	-12.61	-0.96
TW12-1161-2-21	255	0.052978	0.000556	0.001359	0.000010	0.282428	0.000010	1176	1713	-12.18	-6.80	-0.96
TW12-1161-2-22	244	0.056842	0.000164	0.001474	0.000007	0.282290	0.000009	1375	2029	-17.06	-11.93	-0.96
TW12-1161-2-23	305	0.039717	0.000538	0.001046	0.000014	0.282325	0.000010	1311	1910	-15.82	-9.32	-0.97
TW12-1161-2-24	245	0.054872	0.000507	0.001483	0.000015	0.282368	0.000010	1265	1854	-14.29	-9.14	-0.96
TW12-1161-2-25	288	0.041597	0.000228	0.001112	0.000006	0.282320	0.000011	1320	1932	-15.99	-9.88	-0.97
TW12-1161-2-26	247	0.052339	0.000391	0.001368	0.000009	0.282316	0.000009	1334	1968	-16.13	-10.94	-0.96
TW12-1161-2-27	250	0.039044	0.000667	0.000993	0.000015	0.282351	0.000009	1273	1885	-14.91	-9.59	-0.97

注:① 样品点号与年龄表中编号一致;② $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 、 T_{DM1} 和 T_{DM2} 值依据每个测点的锆石 U-Pb 年龄计算而得,具体计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\text{DM1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} - \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}} \right\};$$
$$T_{\text{DM2}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \cdot \frac{f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}}{f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}}; f_{\text{Lu/Hf}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1; \quad \text{其中:} \lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a} \text{ (Söderlund et al., 2004)};$$

$\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}}$ 和 $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{S}}$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} = 0.0332$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} = 0.282772$ (Blichert-Toft et al., 1997);

$\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.0384$, $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}} = 0.28325$ (Griffin et al., 2000); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}} = 0.015$;

$$f_{\text{CC}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{平均地壳}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1; \quad f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}; f_{\text{DM}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1; \quad t \text{ 为锆石结晶年龄。}$$

~0.985,远低于原始地幔($\text{Nb}/\text{La} \approx 1.02$ 、 $\text{Nb}/\text{Ce} \approx 0.4$ 、 $\text{Nb}/\text{U} = 47 \pm 10$ 、 $\text{Ce}/\text{Pb} = 25 \pm 5$) (Hoffman et al., 1986; Daley, 2000),与大陆地壳值($\text{Nb}/\text{La} \approx 0.69$ 、 $\text{Nb}/\text{Ce} \approx 0.33$ 、 $\text{Nb}/\text{U} = 7 \sim 10$ 、 $\text{Ce}/\text{Pb} = 4$) (Wedepohl, 1995) 相对较近。此外,下罗杏火山岩 La/Sm 、 Rb/Sr 值分别为 6.19~7.20、2.65~3.67,位

于壳源岩浆的 ($\text{La}/\text{Sm} > 4.5$ (Lassiter and Depaolo, 2013), $\text{Rb}/\text{Sr} > 0.5$ (Wilson, 1989; 张永明等, 2019) 范围内, 指示岩浆来源于地壳。花岗质岩浆的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值取决于其原岩的组分 (Jung and Pf Nder, 2007), 当原岩成分为富长石的碎屑岩时, $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值一般大于 0.3。下罗杏火山样品的 $\text{CaO}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.70~2.18, 表明其源区可能为富长石的碎屑岩。在 $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ 源区判别图解上 (图 10), 样品主体落入变砂岩和基性岩范围内, 表明岩浆主要源自于地壳变质杂砂岩和基性岩的部分熔融。

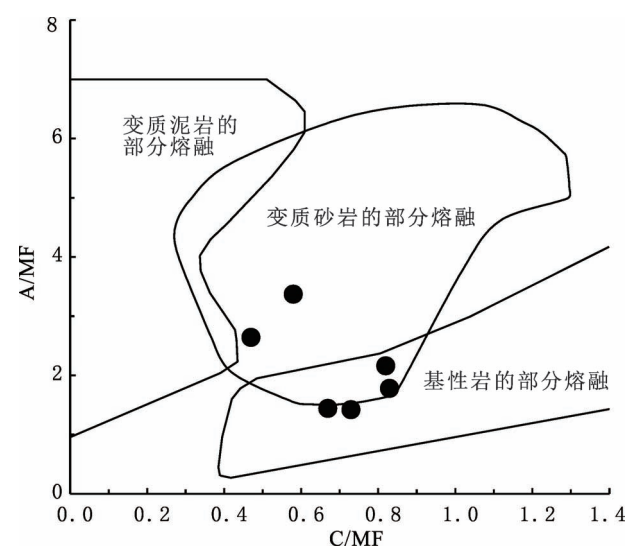


图 10 桂东南容县下罗杏火山岩 $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ 图解
(据 Altherr et al., 2000)

Fig. 10 $\text{C}/\text{MF}-\text{A}/\text{MF}$ Diagram for the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi (after Altherr et al., 2000)

实验岩石学资料表明,若锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t) > 0$, 岩浆源区为亏损地幔或新生地壳, 反之则为古老地壳物质或富集地幔为主体 (Vervoort and Patchett, 1996); 若锆石 Hf 两阶段模式年龄远大于锆石结晶年龄, 则岩浆受到地壳混染或来源于富集地幔 (吴福元等, 2007; 王嘉玮等, 2021)。本次测试表明下罗杏火山 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 主体小于 0, 在 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-t$ 图解 (图 11) 中, 下罗杏火山岩样品位于球粒陨石与平均地壳的 Hf 同位素演化线之间, 其二阶段 Hf 模式年龄 ($T_{2\text{DM}} = 1.70 \sim 2.20 \text{ Ga}$) 远高于岩体的形成年龄 ($249.9 \pm 1.6 \text{ Ma}$), 表明其源区可能来自古元古代地壳物质。

下罗杏火山岩样品普遍具有较低的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ 值 (15.2~40.77), 表明其是在较高的温度下 ($> 875^\circ\text{C}$) 部分熔融形成的 (Sylvester, 1998)。样品均具有较高的 Zr 含量 ($188 \times 10^{-6} \sim 276 \times 10^{-6}$), 根据公

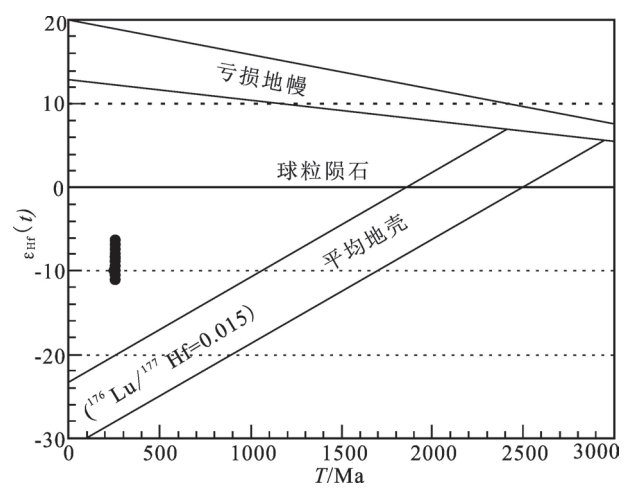


图 11 桂东南容县下罗杏火山岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)-T$ 图解
(据 Zhou et al., 2013)

Fig. 11 Zircon Hf isotopic features for the Xialuoxing volcanic rocks in southeastern Guangxi (after Zhou Jie et al., 2013)

式 (Watson and Harrison, 1983) 计算, 得到岩石的 Zr 饱和温度 $> 800^\circ\text{C}$, 且在 $\text{Q}-\text{Ab}-\text{Or}$ 图解中 (略), 样品落入相对高温低压范围内, 说明其形成于相对高温低压的环境, 暗示由幔源岩浆提供主要热源。

综上, 本文认为下罗杏火山岩岩浆源区可能是以古元古代的地壳物质为主, 由于地幔或软流圈物质上涌, 诱发地壳物质熔融作用的结果。

4.3 构造背景

目前对华南内陆早中生代构造环境背景及其演化过程的认识仍然存在重大的分歧, 归纳主要有以下几种观点: ① 推覆构造引起陆壳加厚发生重熔; ② 印支—华南板块相互作用 (王德滋等, 2003; 孙涛等, 2003; 周新民, 2003; Wang Yuejun et al., 2007); ③ 受到峨眉山地幔柱的热影响 (Chen Chenghong et al., 2011); ④ 古太平洋板块的西向平板俯冲 (钟玉芳等, 2011);

笔者通过对印支期断裂带进行绢云母 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 测年, 获得该期褶皱和逆冲推覆构造变形年龄为 230~235 Ma (项目组未刊数据); 另外, 陈泽超等通过对野外地层及出露的不同时期岩体变形特征、U-Pb 年代学数据的综合研究, 将越南东北部 Song Chay 构造带上这期褶皱与逆冲推覆变形时间厘定为 237~228 Ma (陈泽超等, 2013), 与项目组获得的未刊数据一致, 说明研究区印支期花岗岩和火山岩的形成时间应早于该期褶皱和逆冲推覆构造变形时间, 因此研究区印支期花岗岩和火山岩不是由推覆

构造引起陆壳加厚发生重熔而形成。

调查发现与下罗杏火山岩几乎同期的大容山—十万大山花岗岩带(大容山 233~255 Ma)呈 NE—SW 向展布,与标志华南—印支地块碰撞造山作用的 NW—SE 走向松马碰撞缝合带近垂直,暗示下罗杏火山岩和大容山—十万大山花岗岩带的形成与华南—印支地块碰撞作用无必然联系。因此,华南印支期的变质、变形和构造—岩浆热事件不可能由印支—华南板块相互作用的构造背景下形成。

峨眉山玄武岩火山活动结束于约 257~263 Ma (He Bin et al., 2007),比下罗杏火山岩及大容山花岗岩形成时代(约 255~235 Ma)早约 10 Ma,且下罗杏火山岩和大容山花岗岩带距峨眉山玄武岩中心位置(永仁县)约 850 km,而与外带的最近距离约 500 km,大容山—十万大山构造带内并未发育同期大规模基性岩浆活动,因此下罗杏火山岩和大容山花岗岩不太可能由峨眉山地幔柱的热影响而形成。

下罗杏火山岩具有较低的 TiO_2 含量、较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值、明显亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素和 Ba、Sr 等亲石元素,相对富集 Th、U、Zr、Hf、Ce 等高场强元素和 Rb、K、Th 等亲石元素、Eu 负异常等,显示出弧火山岩的特征,可能与古太平洋向华南板块的俯冲有关。越来越多的地质资料也表明华南印支期(早中生代以来)的构造—岩浆热事件可能与古太平洋向华南板块的俯冲有关。如华南地区发现了形成于伸展环境的印支早期的碱性岩、钾玄岩 (Wang Qiang et al., 2005),以及 I-型岛弧花岗岩 (Li Xianhua et al., 2006),这些花岗岩类岩石的形成于岛弧岩浆或流体/熔体有关(钟玉芳等, 2011)。结合区域地质资料,认为华南印支期的构造—岩浆热事件的动力应该来源于古太平洋向华南板块的俯冲。其俯冲到一定程度,可能是由于板块的折断和反转,或者是强大俯冲作用朝华南内陆的应力传递,扰动破坏了华南深部岩浆的平衡,导致幔源岩浆沿构造窗上涌,诱发古元古代地壳物质部分熔融,其沿着 NE 向的断裂侵位,形成了该区呈 NE 向分布的地壳重熔型的过铝质花岗岩,部分岩浆沿着断裂上升至地表,形成下罗杏火山岩。

5 结论

(1)下罗杏火山通道的岩性主要为隐爆角砾岩、流纹岩、粗面安山玢岩、霏细斑岩等,柱状节理发育,主要为超浅成相—溢流相。

(2)岩石具有钾玄岩—高钾钙碱性系列,较低

的 TiO_2 含量、较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值、明显亏损 Ta、Nb、P、Ti 等高场强元素,显示出弧火山岩的特征。

(3)获得了下罗杏流纹岩的锆石 U-Pb 年龄为 249.9 ± 1.6 Ma,属早三叠世火山岩。锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为 $-14.50 \sim -6.61$,对应单阶段 Hf 模式年龄 (T_{DM}) 为 $1.17 \sim 1.49$ Ga,二阶段 Hf 模式年龄 ($T_{2\text{DM}}$) 为 $1.70 \sim 2.20$ Ga,表明由古元古界地壳物质部分形成。

(4)综合地球化学、锆石 Hf 同位素组成特征及区域地质资料,认为下罗杏火山岩岩浆源区以古元古代的地壳物质为主,由于地幔或软流圈物质上涌,诱发地壳物质熔融作用的结果,其可能与古太平洋向华南板块俯冲有关。

参 考 文 献 / References

- (The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)
- 曹明轩,褚平利,段政,余明刚,陈荣,范飞鹏,邢光福. 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.
- 陈泽超,林伟, Faure M, Lepvrier C, 褚杨,王清晨. 2013. 越南东北部早中生代构造事件的年代学约束. 岩石学报, 29(5): 1825~1840.
- 丁兴,陈培荣,陈卫锋,黄宏业,周新民. 2005. 湖南沅山花岗岩中锆石 LA-ICPMS U-Pb 定年:成岩启示和意义. 中国科学(D 辑:地球科学), 35(7): 606~616.
- 何鹏,杨睿娜,陈培伟,张焕,芦西战,贺晓天,翁红波,裴玉华,杨毅明. 2021. 阿尔金北缘尧勒萨依片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质论评, 67(3): 803~815.
- 李伟,刘翠辉,谭友,陈伟,鲁捷,尹积扬,陈再威. 2021. 赣南柯树岭岩体锆石 U-Pb 年龄、岩石地球化学及成矿作用特征. 地质论评, 67(5): 1309~1320.
- 刘勇,李廷栋,肖庆辉,耿树方,王涛,陈必河. 2012. 湘南宜章地区辉绿岩、花岗岩斑岩、安山岩的形成时代和成因——锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 地质通报, 31(9): 1363~1378.
- 宋美佳. 2017. 华南早古生代与早中生代陆内构造演化. 导师:舒良树,王良书. 南京:南京大学地球科学与工程学院博士学位论文, 1~154.
- 孙涛,周新民,陈培荣,李惠民,周红英,王志成,沈渭洲. 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), 33(12): 1209~1218.
- 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. 岩石学报, 27(3): 794~808.
- 王德滋,沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209~220.
- 王嘉玮,王刚,王宗起,武昱东,王东升,王坤明. 2021. 南秦岭武当山十堰地区中生代镁铁质岩石成因与构造意义—岩石地球化学、锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素制约. 地质论评, 67(4): 869~885.
- 王磊,龙文国,周岱,徐旺春,金鑫鏢. 2016. 桂东南大容山晚二叠世花岗岩锆石 U-Pb 年龄和 Sr—Nd—Hf 同位素特征及其地质意

- 义. 地质通报, 35(8): 1291~1303.
- 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. 岩石学报, 34(1): 36~48.
- 王岳军, 范蔚茗, 梁新权, 彭头平, 石玉若. 2005. 湖南印支期花岗岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其成因启示. 科学通报, 50(12): 1259~1266.
- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185~220.
- 许靖华, 孙枢, 李继亮. 1987. 是华南造山带而不是华南地台. 中国科学(B辑), 10: 1107~1115.
- 张永明, 裴先治, 李佐臣, 李瑞保, 刘成军, 裴磊, 陈有炘, 王盟. 2019. 青海南山地区加里东期强过铝质花岗岩锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义. 地质通报, 38(5): 742~756.
- 钟玉芳, 马昌前, 余振兵, 续海金, 王世明, 王连训. 2011. 赣西北蒙山岩体的锆石 U—Pb—Hf、地球化学特征及成因. 地球科学(中国地质大学学报), 36(4): 703~720.
- 周新民. 2003. 对华南花岗岩研究的若干思考. 高校地质学报, 9(4): 556~565.
- Altherr R, Holl A, Hegner E, Langer C, Kreuzer H. 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). Lithos, 50:50~73.
- Barth M G, McDonough W F, Rudnick R L. 2000. Tracking the budget of Nb and Ta in the continental crust. Chemical Geology, 165(3): 197~213.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N I. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contributions To Mineralogy and Petrology, 143(5): 602~622.
- Cao Mingxuan, Chu Pingli, Duan Zheng, Yu Minggang, Chen Rong, Fan Feipeng, Xing Guangfu. 2020. Spatial—temporal evolution and controversy of the Mesozoic volcanism in south China. Geological Review, 66(4): 795~812.
- Carter A, Peter D, Clift. 2008. Was the Indosinian orogeny a Triassic mountain building or a thermotectonic reactivation event? Comptes Rendus—Géoscience, 340(2~3): 83~93.
- Carter, Andrew, Roques, Delphine, Bristow, Charles, Kinny, Peter. 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia; Significance of Triassic thermotectonism. Geology, 29(29): 211~214.
- Chen Chenghong, Hsieh P S, Lee C Y, Zhou Hanwen. 2011. Two episodes of the Indosinian thermal event on the South China Block; Constraints from LA-ICPMS U-Pb zircon and electron microprobe monazite ages of the Darongshan S-type granitic suite. Gondwana Research, 19(4): 1008~1023.
- Chen F, Hegner E, Todt W. 2000. Zircon ages and Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany; evidence for a Cambrian magmatic arc. International Journal of Earth Sciences, 88(4): 791~802.
- Chen Zechao, Lin Wei, Faure M, Lepvrier C, Chu Yang, Wang Qingchen. 2013. Geochronological constraint of Early Mesozoic tectonic event at Northeast Vietnam. Acta Petrologica Sinica, 29(5): 1825~1840.
- Compston W, Williams I S, Kirschvink J L, Zichao Z, Guogan M A. 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time-scale. Journal of the Geological Society, 149(2): 171~184.
- Daley D, Daley E E. 2000. Neodymium isotopes in basalts of the southwest basin and range and lithospheric thinning during continental extension. Chemical Geology, 169(1): 157~185.
- De Barros C E, Nardi L, Dillenburg S R, Ayup R, Jarvis K, Baitelli R. 2010. Detrital Minerals of Modern Beach Sediments in Southern Brazil: A Provenance Study Based on the Chemistry of Zircon. Journal of Coastal Research, 26(1): 80~93.
- Ding Xing, Chen Peirong, Chen Weifeng, Huang Hongye, Zhou Xinmin. 2005. Single zircon LA-ICPMS U-Pb dating of Weishan granite (Hunan, South China) and its petrogenetic significance. Science in China (Series D), 35(7): 606~616.
- He Bin, Xu Yigang, Huang Xiaolong, Luo Zhenyu, Shi Yurao, Yang Qijun, Yu Songyue. 2007. Age and duration of the Emeishan flood volcanism, SW China: Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb dating of silicic ignimbrites, post-volcanic Xuanwei Formation and clay tuff at the Chaotian section. Earth & Planetary Science Letters, 255(3): 306~323.
- He Peng, Yang Ruina, Chen Peiwei, Zhang Huan, Lu Xizhan, he Xiaotian, Weng Hongbo, Pei Yuhua, Yang Yiming. 2021. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages, geochemical features and their geological implications of Yaolesayi gneiss in north Altyn Tagh. Geological Review, 67(3): 803~815.
- He Zhenyu, Xu Xisheng, Niu Yaoling. 2010. Petrogenesis and tectonic significance of a Mesozoic granite—syenite—gabbro association from inland South China. Lithos, 119(3~4): 621~641.
- Hoffman A W, Jochum K P, Seufert M. 1986. Nd and Pb in oceanic basalts: new constraints on mantle evolution. Earth and Planetary Science Letters, 79: 33~45.
- Hsü K J, Shu S, Jiliang L. 1989. Mesozoic Suturing in the Huanan Alps and the Tectonic Assembly of South China. Springer Netherlands: 551~565.
- Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, Xiao Shaoquan, Zhao Laishi, Günther D, Li Ming, Zhang Wen, Zong Keqing. 2012. A “wire” signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis. Spectrochimica Acta Part B Atomic Spectroscopy, 78(78): 50~57.
- Jochum K P, Pfander J, Snow J E. 1997. Nb/Ta in mantle and crust. Eos Transactions American Geophysical Union, 78.
- Jung S, Pfander J R A. 2007. Source composition and melting temperatures of orogenic granitoids: constraints from CaO/Na₂O, Al₂O₃/TiO₂ and accessory mineral saturation thermometry. Northwest Medical Education, 19(6): 859~870.
- Lassiter J C, Depaolo D J. 2013. Plume/lithosphere interaction in the generation of continental and oceanic flood basalts: Chemical and isotopic constraints. American Geophysical Union (AGU).
- Lepvrier C, Maluski H, Tich V V, Leyreloup A, Thi P T, Vuong N V. 2004. The Early Triassic Indosinian orogeny in Vietnam (Truong Son Belt and Kontum Massif); implications for the geodynamic evolution of Indochina. Tectonophysics, 393(1~4): 87~118.
- Li Wei, Liu Cuihui, Tan you, Chen Wei, Lu Jie, Yin Jiyang, Chen Zaiwei. 2021. Zircon U-Pb age, petro-geochemical and mineralization characteristics of Keshuling granites in southern Jiangxi Province. Geological Review, 67(5): 1309~1320.
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Li Wuxian, Wang Yuejun. 2006. Initiation of the Indosinian Orogeny in South China; Evidence for a Permian Magmatic Arc on Hainan Island. Journal of Geology, 114(3): 341~353.
- Li Zhengxiang, Li Xianhua. 2007. Formation of the 1300-km-wide intracontinental orogen and postorogenic magmatic province in Mesozoic South China: A flat-slab subduction model. Geology, 35(2): 179~182.
- Lin Jie, Liu Yongsheng, Yang Yueheng, Hu Zhaochu. 2016.

- Calibration and correction of LA-ICP-MS and LA-MC-ICP-MS analyses for element contents and isotopic ratios. *Solid Earth Sciences*, 1(1): 5~27.
- Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Gao Shan, Günther D, Xu Juan, Gao Changgui, Chen Haihong. 2008. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard. *Chemical Geology*, 257(1): 34~43.
- Liu Yong, Li Tingdong, Xiao Qinghui, Geng Shufang, Wang Tao. 2012#. Formation epoch and origin of the Yizhang andesite, diabase and granite-porphyry in Yizhang County, southern Hu'nan Province; Zircon U-Pb age and Hf isotopes. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1363~1378.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot, rev. 3.75. A geochronological toolkit for microsoft excel. 5: 1~75.
- Mao Jianren, Ye Haimin, Liu Kai, Li Zilong, Takahashi Y, Zhao Xilin, Kee W S. 2013. The Indosinian collision—extension event between the South China Block and the Palaeo-Pacific plate; Evidence from Indosinian alkaline granitic rocks in Dashuang, eastern Zhejiang, South China. *Lithos*, 172(Complete): 81~97.
- Peccerillo A, Taylor S R. 1976. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 58(1): 63~81.
- Piccoli P. 1989. Tectonic discrimination of granitoids. *GSA Bulletin*, 101(5): 635~643.
- 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. *Acta Petrologica Sinica*, 27(3): 794~808.
- Rapp R P, Watson E B. 1995. Dehydration Melting of Metabasalt at 8~32 kbar; Implications for Continental Growth and Crust—Mantle Recycling. *Journal of Petrology*, 36(4): 891~931.
- Rodgers J. 1989. Comments on Mesozoic overthrust tectonics in south China. *Geology*, 17(7): 671~672.
- Rowley, David, B., Ziegler, Alfred, M., Gyou, Nie, Fe H U, Kenneth. 1989. Comment and Reply on " Mesozoic overthrust tectonics in south China". *Geology*, 17(4): 384~387.
- Shu liangshu, Faure M, Wang Bo, Zhou Xinmin, Song Biao. 2008. Late Palaeozoic—Early Mesozoic geological features of South China; Response to the Indosinian collision events in Southeast Asia. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(2~3): 151~165.
- Song Meijia. 2017#. Early Paleozoic and early Mesozoic intracontinental tectonic evolution in South China. Dissertation Supervisor: Shu Liangshu, Wang Liangshu. Nanjing: Doctoral dissertation, School of Earth Sciences and engineering, Nanjing University; 1~154.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society Special Publication*, 42(1): 313~345.
- Sun Tao, Zhou Xinmin, Chen Peirong, Li Huimin, Zhou Hongying, Wang Zhicheng, Shen Weizhou. 2003#. Genesis and Geotectonic Significance of Mesozoic strong peraluminous granite in the eastern part of Nanling. *Science in China (Series D)*, 33(12): 1209~1218.
- Sylvester P J. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45(1): 29~44.
- Taylor S R, McLennan S M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution, An Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. *Journal of Geology*, 94(4): 632~633.
- Vervoort J D, Patchett P J. 1996. Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 60(19): 3717~3733.
- Wang Dezi, Shen Weizhou. 2003#. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 209~220.
- Wang Jiawei, Wang Gang, Wang zongqi, Wu Yudong, Wang Dongsheng, Wang Kunming. 2021#. Genesis and tectonic significance of Mesozoic mafic rocks in the Wudang Mountain—Shiyan Belt, South Qinling Orogen; Constraints from geochemistry and zircon U-Pb, Hf isotopes. *Geological Review*, 67(4): 869~885.
- Wang Lei, Long Wenguo G, Zhou Dai, Xu Wangchun, Jin Xinbiao. 2016#. Late Triassic zircon U-Pb ages and Sr—Nd—Hf isotopes of Darongshan granites in southeastern Guangxi and their geological implications. *Geological Bulletin of China*, 35(8): 1291~1303.
- 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. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 36~48.
- Wang Qiang, Li Jianwei, Jian Ping, Zhao Zhenhua, Xiong Xiaolin, Bao Zhiwei, Xu Jifeng, Li Chaofeng, Ma Jinlong. 2005. Alkaline syenites in eastern Cathaysia (South China): link to Permian—Triassic transtension. *Earth & Planetary Science Letters*, 230(3~4): 339~354.
- Wang Yuejun, Fan W M, Zhao G C, Ji S C, Peng T P. 2007. Zircon U-Pb geochronology of gneissic rocks in the Yunkai massif and its implications on the Caledonian event in the South China Block. *Gondwana Research*, 12(4): 404~416.
- Wang Yuejun, fan Weiming, Liang Xinquan, Peng Touping, Shi yurao. 2005#. Zircon SHRIMP U-Pb age of Indosinian granite in Hunan and its genetic enlightenment. *Scientific bulletin*, 50(12): 1259~1266.
- Watson E B, Harrison T M. 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters*, 64(2): 295~304.
- Wedepohl K H. 1995. The Composition of the Continental Crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7): 1217~1232.
- Wilson M B. 1989. Igneous petrogenesis: A global tectonic approach: London. *Mineralogical Magazine*, 53(372): 514~515.
- Wilson M. 1989. Review of igneous petrogenesis: aglobal tectonic approach. *Terra Nova*, 1(2): 218~222.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei, Gao Shan. 2007#. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in Petrology. *Acta petrologica sinica*, 23(2): 185~220.
- Xu Jinghua, Sun Shu, Li Jiliang. 1987#. South China orogenic belt rather than South China platform. *Chinese Science (Series B)*, 10: 1107~1115.
- Yu Xinqi, Hou Mingjin, Wang Deen. 2005. No evidence for a large Mesozoic overthrust in the Lantian area of Anhui Province, south China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(4): 601~609.
- Wang Yuejun, Fan Weiming, Lian Xinquan, Peng Touping, Shi Yurao. 2005. SHRIMP zircon U-Pb geochronology of Indosinian granites in Hunan Province and its petrogenetic implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(13): 1395~1403.
- Hu Zhaochu, Zhang Wen, Liu Yongsheng, Gao Shan, Li Ming, Zong Keqing, Chen Haihong, Hu Shenghong. 2015. A novel "wave" signal smoothing and mercury removing device for laser ablation quadrupole and multiple collector ICP-MS analysis: application to

- lead isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 87(2): 1152~1157.
- Zhang Yongming, Pei Xianzhi, Li Zuochen, Li Ruibao, Liu Chengjun, Pei Lei, Chen Youxin, Wang Meng. 2019. Zircon U-Pb age, geochemical characteristics and geological significance of the Caledonian strongly peraluminous granites in the Nanshan area, Qinghai Province. *Geological Bulletin of China*, 38(5): 742~756.
- Zhao Jjunhong, Zhou Meifu. 2007. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precambrian Research*, 152(1~2): 27~47.
- Zhong Yufang, Ma Changqian, She Zhenbing, Xu Haijin, Wang Shiming, Wang Lianxun. 2011. U—Pb—Hf Isotope of Zircons, Geochemistry and Genesis of Mengshan Granitoids in Northwestern Jiangxi Province. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(4): 703~720.
- Zhou Jie, Jiang Yaohui, Xing Guangfu, Zeng Yong, Ge Weiya. 2013. Geochronology and petrogenesis of Cretaceous A-type granites from the NE Jiangnan Orogen, SE China. *International Geology Review*, 55(11): 1359~1383.
- Zhou Xinmin, Sun Tao, Shen Weizhou, Shu Liangshu, Niu Yaoling. 2006. Petrogenesis of Mesozoic granitoids and volcanic rocks in South China: A response to tectonic evolution. *Episodes*, 29(1): 26~33.
- Zhou Xinmin. 2003. My Thinking about Granite Geneses of South China. *Geological Journal of China Universities*, 9(4): 556~565.
- Zong Keqing, Klemm R, Yuan Y, He Zhenyu, Guo Jingliang, Shi Xiaoli, Liu Yongsheng, Hu Zhaochu, Zhang Zeming. 2017. The assembly of Rodinia: The correlation of early Neoproterozoic (ca. 900 Ma) high-grade metamorphism and continental arc formation in the southern Beishan Orogen, southern Central Asian Orogenic Belt (CAOB). *Precambrian Research*, 290: 32~48.

The discovery and petrogenesis of Early Triassic volcanic vent in Southeastern Guangxi

NONG Junnian¹⁾, SUN Minghang²⁾, GUO Shangyu³⁾, LI Changming¹⁾, WEI Shoudong¹⁾,
QIN Chuli¹⁾, ZHAO Zining¹⁾, ZHOU Hui¹⁾, ZHANG Peng¹⁾

1) China—ASEAN Geological Cooperation Center, Nanning, 530023;

2) Guangxi Institute of Geological Survey, Nanning, 530023;

3) Guangxi Mineral Resources and Reserves Evaluation Centre, Nanning, 530023

Abstract: Located at southwestern convergence belt of Yangtze and Cathaysia Massifs near Xialuoxing village, Rongxian county, southeastern Guangxi Zhuang Autonomous Region, the Early Triassic volcanic vent (pipe) is highly significant in studying the Indosinian regional tectonic evolution of South China. The vent consists of a suite of cryptoexplosion breccia, rhyolite, trachyandesite porphyrite, felsites porphyry, with columnar joints, and shows characteristics of super-hypabyssal intrusion and effusive facies. The LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of rhyolite from the vent gives a weighted average age of (249.9 ± 1.6) Ma (MSWD = 1.9), which represents the eruption age of volcanic rocks and suggests the production of Early Triassic magmatism. Geochemically, the intrusive rocks belong to shoshonite to high potassium-calc alkaline series, with low TiO_2 content, high $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ ratio, obvious depletion of high field strength elements such as Ta, Nb, P, Ti, and are typical of the arc volcanic rocks. Zircons of these rocks have $\varepsilon\text{Hf}(t)$ values of -14.50 to -6.61 , with corresponding single-stage Hf mode age (T_{DM}) $1.17 \sim 1.49$ Ga and two-stage model age ($T_{2\text{DM}}$) ranged from 1.70 to 2.20 Ga. Comprehensive data analysis on the geochemistry, Hf isotopic characteristics of zircon and regional geology suggest that the Xialuoxing volcanic rocks were formed by melting of the Paleoproterozoic meta-sedimentary rocks in an extensional tectonic setting. Heat input associated with the upwelling of asthenosphere mantle might have played an important role in crustal melting and crystallization of the granitoids. Geodynamically, the formation of the Xialuoxing volcanic rocks were related to the subduction of the Paleo-Pacific plate.

Keywords: volcanic vent; Early Triassic; LA-ICP-MS; zircon U-Pb dating; Hf isotope; geochemistry

Acknowledgements: This study was supported by Chinese Geology Survey (No. DD20160035-11) and Guangxi science and Technology Department (No. AD20297091)

First author: NONG Junnian, male, master; Email: 175070721@qq.com

Manuscript received on: 2021-11-11; Accepted on: 2021-12-30; Network published on: 2022-01-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.01.056

Edited by: LIU Zhiqiang

