

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*

覃小锋^{1,2} 王宗起³ 宫江华³ 赵国英^{1,2} 石浩^{1,2} 詹俊彦^{1,2} 王震^{1,2}

QIN XiaoFeng^{1,2}, WANG ZongQi³, GONG JiangHua³, ZHAO GuoYing^{1,2}, SHI Hao^{1,2}, ZHAN JunYan^{1,2} and WANG Zhen^{1,2}

1. 桂林理工大学地球科学学院 桂林 541004

2. 桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室 桂林 541004

3. 中国地质科学院矿产资源研究所 北京 100037

1. College of Earth Science, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

2. Guangxi Key Laboratory of Hidden Metallic Ore Deposits Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

3. Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2016-05-30 收稿, 2016-10-30 改回.

Qin XF, Wang ZQ, Gong JH, Zhao GY, Shi H, Zhan JY and Wang Z. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 791–809

Abstract Because the later sedimentary cover and destruction of structure and magma intrusion, the residual paleo-oceanic crusts (ophiolite) were regarded as one of the most important indicators of joint belt that has not been identified in southwestern segment of joint belt between Yangtze and Cathaysia plates (so-called Qinzhou-Hangzhou joint belt), which led to serious differences in the boundary of joint belt, tectonic nature and temporal-spatial evolution and so on. Based on systematic field geological survey reveals that there outcrop a series of (metamorphic) intermediate-mafic volcanic rock blocks along both sides of the Cenxi-Wuzhou fault in Cenxi area, the northern margin of Yunkai block. Geochemical results suggest that these (metamorphic) intermediate-mafic volcanic rocks can be divided into three distinct types: (1) metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks from the Camellia tree farm in Nuodong town, which are characterized by slightly depleted in large-ion incompatible elements (LILEs) and LREEs and slightly enrichment in high field strength elements and HREEs with no obvious Nb, Ta, P and Ti negative anomaly. These geochemical features show that these metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks are N-MORB type tholeiites typical of those formed in mid-ocean ridge tectonic settings and a plagioclase actinolite rock sample yielded a zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia age of 443.7 ± 2.2 Ma; (2) metamorphic mafic volcanic rocks from the Dongwei region in Guiyi town, characterized by slightly enrichment in LILEs and flat-slightly enrichment in LREEs with only slight Nb-Ta, P and Ti depletions, which are analogous to those of E-MORB type tholeiites formed in back-arc basin tectonic settings and a plagioclase amphibolite sample yielded a zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia age of 441.3 ± 2.4 Ma; (3) intermediate-mafic volcanic (clastic) rocks from the Baiban-Dashuang region in Anping town, which are characterized by pronounced enrichment in LILEs and LREEs and relatively depletion in HFSEs and HREEs with pronounced Nb-Ta, P and Ti depletion in them. Such signatures display geochemical characteristics of typical subduction-related arc volcanic rocks and an andesitic crystal tuff sample yielded a zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia age of 442.2 ± 3.7 Ma. These results imply that there is an Early Paleozoic paleo-ocean basin in southwestern segment of joint belt between Yangtze and Cathaysia plates (Qinzhou-Hangzhou joint belt), and N-MORB, E-MORB and IAB type intermediate-mafic volcanic rocks in the region were most likely generated in a setting associated with this oceanic lithosphere continued southeastward subduction under the Cathaysian (Yunkai) Block during the Caledonian period.

Key words Intermediate-mafic volcanic rocks; Paleo-ocean basin; Early Paleozoic; Northern margin of Yunkai block; Southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt

* 本文受广西自然科学基金项目(2013GXNSFAA019272)、中国地质调查局地质调查项目(12120114039501、1212011085408、DD20160124)、桂林理工大学人才引进科研启动基金项目(002401003364)、广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人(2016)38号)和桂林市漓江学者基金项目(2013-5)联合资助。

第一作者简介: 覃小锋,男,1969年生,博士,教授,主要从事构造地质和岩石学研究, E-mail: qxf@glut.edu.cn

摘要 在扬子板块和华夏板块结合带(称之为钦-杭结合带)南西段,由于后期盖层覆盖和构造、岩浆侵入破坏,作为结合带标志的古洋壳残片(蛇绿岩)至今未被识别出来,从而导致了前人对该结合带的边界、大地构造性质及其时空演化等问题存在严重分歧。笔者通过系统的野外地质调查发现,在云开地块北缘的岑溪地区,沿着岑溪-梧州断裂带两侧出露有一系列呈岩片状产出的(变质)中-基性火山岩块。地球化学的研究结果表明,这些(变质)中-基性火山岩可分为性质截然不同的三大类:(1)糯垌镇油茶林场一带出露的变质中基性火山岩具有略亏损的大离子亲石元素和轻稀土元素,而高场强元素和重稀土元素轻微富集,且 Nb、Ta、P 和 Ti 的负异常不明显,显示出与 N-MORB 型火山岩相似的地球化学特征,获得其中斜长阳起石岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 谐和年龄为 443.7 ± 2.2 Ma; (2) 归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩则表现出轻微富集大离子亲石元素和具有平坦或略富集的轻稀土元素,并出现 Nb-Ta、P 和 Ti 的微弱亏损现象,显示出其与 E-MORB 型火山岩相似的地球化学特征,获得其中斜长角闪岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 谐和年龄为 441.3 ± 2.4 Ma; (3) 安平镇白板、大爽一带出露的中-基性火山(碎屑)岩总体上表现为明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素,而高场强元素和重稀土元素相对亏损,其间还出现 Nb-Ta、P 和 Ti 等高场强元素的明显亏损,显示出与俯冲带有关的岛弧型(IAB)火山岩相似的地球化学特征,获得其中安山质晶屑凝灰岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 谐和年龄为 442.2 ± 3.7 Ma。由此表明,扬子板块和华夏板块结合带(钦-杭结合带)南西段有早古生代古洋盆的存在,本区 N-MORB、E-MORB 和 IAB 型中基性火山岩可能是在加里东时期该洋盆岩石圈持续向南东俯冲消减至华夏板块(云开地块)之下的地球动力学背景下形成的产物。

关键词 中-基性火山岩; 古洋盆; 早古生代; 云开地块北缘; 钦-杭结合带南西段

中图法分类号 P542.4; P588.14; P597.3

1 引言

扬子板块和华夏板块结合带(称之为钦-杭结合带)的拼合造山过程及其相互关系问题对于揭示华南自新元古代以来的大地构造演化具有重要的科学意义,一直是国内外地质学家关注的焦点(周新民和朱云鹤,1993; 杨明桂和梅勇文,1997; 王剑,2000; 尹福光等,2003; 舒良树,2006; 王鹤年和周丽娅,2006; Yan *et al.*, 2006; Li *et al.*, 2012; 许效松等,2012)。然而,该结合带的地质结构因其年代老、晚古生代以来的地层盖层覆盖厚、出露少、隐伏深,且历遭多期构造叠覆与改造变位以及各时期岩浆侵入破坏,使得有关该结合带的许多重要地质问题一直存在严重分歧,尤其是在结合带南西段的广西境内,有关扬子板块和华夏板块的拼合位置、之间的盆地性质和闭合时间、碰撞造山的动力学机制和驱动力以及构造演化过程等关键地质问题一直未达成一致认识(杨明桂和梅勇文,1997; 金文山和孙大中,1997; 殷鸿福等,1999; 王剑,2000; 朱介寿等,2005; Yan *et al.*, 2006; 许效松等,2012; 周永章等,2012, 2015; 覃小锋等,2015)。近十多年来,随着基础地质调查研究工作的不断深入,对云开地块北缘的研究已取得了相当大的进展,在云开地块北缘的陆川县石窝-北流市清水口以及信宜市茶山和罗定市贵子一带发现了元古代洋中脊型(MORB)和岛弧型(IAB)两种变质基性火山岩(玄武岩),证明云开地块北缘可能存在有元古代的古洋壳残片——蛇绿岩(覃小锋等,2005, 2007, 2008; 彭松柏等,2006a); 同位素年代学和地球化学的研究结果表明,云开地区原认为形成于(中)新元古代的变质深成侵入岩(花岗质片麻岩)实际上为形成于早古生代(彭松柏等,2006b; Wang *et al.*, 2007; Wan *et al.*, 2010),它是洋陆俯冲-碰撞形成的产物(覃小锋等,2006, 2008, 2013)。上述新

发现和新认识为华南板块南西端元古代-早古生代的构造演化研究提供了重要证据。然而,直到目前,加里东期构造-岩浆活动十分显著的云开地块北缘还未发现有早古生代古洋壳残片(蛇绿岩)存在的报道,甚至是在该地区有没有早古生代的中基性火山岩出露,在公开出版的文献中也鲜见有报道。因此,钦-杭结合带南西段南华纪以前存在的大洋(古华南洋)是否一直持续到早古生代(称之为华南残余洋盆),最后通过加里东运动才最终关闭?还是早期的大洋随着 Grenville 造山而关闭,华南地区进入陆内发展阶段,并伴随 Rodinia 超大陆的裂解而形成华南裂谷盆地,不存在华南残余洋盆?目前仍然存在较大的争论。

近年来,笔者在该地区开展区域地质调查研究工作中发现,在云开地块北缘的岑溪地区,沿着岑溪-梧州断裂带两侧出露有一系列(变质)中基性火山岩块,这些岩块呈大小不一的岩片状混杂于早古生代复理石建造中,和围岩均呈构造接触关系。本文重点对这些(变质)中-基性火山岩进行岩石学、锆石 U-Pb 年代学和地球化学研究,进而探讨其形成的时代和构造背景。这些新资料对于解决上述存在的重大地质问题以及深入理解和认识扬子板块与华夏板块结合带南西段新元古代以来的地球动力学环境及其构造演化过程具有重要意义。

2 区域地质概况及火山岩岩石学特征

研究区位于华南板块西南端,华夏古陆与钦-杭结合带的交接部位(图 1a)。根据《广西壮族自治区区域地质志》(广西壮族自治区地质矿产局,1985)的划分,研究区则位于“钦州残余地槽”、“大瑶山凸起”和“云开台隆”三者的接合部位,呈北东-南西向展布的岑溪-梧州深大断裂从研究区的中部通过。区内出露的地层以下古生界为主,沿岑溪-梧州

断裂带和岑溪-筋竹断裂带两侧出露有少量上古生界,中-新生界主要分布于东南部的大业盆地和北西部的金鸡盆地以及一些较大的河流两侧。早古生代地层主要为一套浊积岩建造,由于已遭受了一定程度变形变质作用的改造,其岩性组合在空间上变化较大,形成时代也争议较大,其中沿着岑溪-梧州断裂带北西侧波塘-三堡一带分布的下古生界岩石变质程度较深,主要由片岩、片麻岩、变粒岩和石英岩等岩石组成,且岩石混合岩化作用十分强烈,早期的文献中一般将其时代定为中-晚奥陶世(广西区调队,1988^①),而最近完成的1:25万贵县幅区域地质调查报告中则将其与云开地区的地层进行对比,划分为中-新元古界云开岩群,时代定为青白口纪(广西地质勘查总院,2013^②);沿着岑溪-梧州断裂带南东侧新地-白板一带分布的下古生界变质程度很弱,主要由轻变质的砂、泥岩组成,根据岩石中所含笔石等化石,将其划分为奥陶系和志留系;而沿着研究区南部云开地块北缘归义-筋竹一带分布的下古生界,其岩石变质程度也较深,主要由矽线长石黑云石英片岩、石英岩和变粒岩等岩石组成,早期的文献中一般将其划分为志留系、奥陶系和寒武系,部分划分为泥盆系,而1:25万玉林市幅区域地质调查报告中则将其划分元古界(广西区域地质调查研究院,2004^③)。此外,研究区内尚分布有大量的早古生代-中生代花岗岩体(图1b),这些花岗岩体属于华南著名的北东向展布的大容山-十万大山海西-印支期巨型构造-岩浆带的重要部分。

本文所研究的中-基性火山岩分布于云开地块北缘的岑溪地区,主要沿着岑溪-梧州断裂带两侧出露,呈大小不一的岩片状混杂于早古生代变质岩系中(图1b)。野外地质调查表明,其主要出露于三个地方:①岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场-山塘一带出露的变质中基性火山岩:呈岩片状分布于变质较深的片岩、变粒岩和石英岩中,出露宽度最大处达400多米,主要由阳起石岩、斜长阳起石岩和阳起石化基性熔岩、辉绿玢岩等岩石组成。由于遭受了较强烈变形变质作用的改造,岩石中劈理构造发育,且岩石发生了不同程度的退变质现象。其中退变质相对较强的(斜长)阳起石岩具纤柱状变晶结构、变余斑状结构,主要由阳起石(55%~80%)、斜长石(5%~40%)及少量石英(1%~5%)、绿帘石-斜黧帘石(1%~5%)、透辉石(<2%)、黑云母(<2%)等矿物组成,副矿物有榍石、钛磁铁矿等(图2a,c)。矿物粒度粗细不一,在0.05~1.6mm之间,一些阳起石颗粒达1~2mm,且局部见有透辉石残余分布于其中,推测其可能为原岩的斑晶。阳起石呈纤柱状,常聚集成束状,其间不均匀分布着斜长石和石英;斜长石多为柱板状,少数斜长石和石英呈等轴状镶嵌集合;局部石英、钠长石组成的细脉交代岩石;②岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的细碧岩-角斑岩系:据1:5万新地圩幅、糯垌幅区调报告(广西区调队,1988)认为,其主要由细碧岩、角斑岩、枕状玄武岩、凝灰熔岩、火山角砾岩等岩石组成,其夹于下志留统中,二者呈整合接触关系,并根据距火山岩层顶界不远的地层中采获

Streotigratoys becki 等早志留世笔石化石认为,火山岩喷发时代应在早志留世。而我们对其进行详细的野外地质调查表明,该套细碧-角斑岩系呈岩片状分布于早古生代浊积岩建造中,其与围岩呈构造接触关系,岩石组合上除细碧岩、角斑岩、玄武岩和火山角砾岩外,还存在有较多的中(-基)性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)类,细碧岩(玄武岩)中局部夹有硅质岩,且其围岩中含有丰富的早志留世笔石化石。其中细碧岩(玄武岩)具块状构造或枕状构造,斑状结构,基质具间隐结构或交织结构,主要由更长-钠长石(钠长石化斜长石?)、绿泥石和少量方解石、阳起石、绿帘石等矿物组成,更长-钠长石微晶呈细板条状略具定向分布,构成交织结构(图2b,d)。此外,岩石中往往发育有气孔和杏仁构造,野外还见其发育有枕状构造,枕状体大小为5~30cm,枕间有火山凝灰物质和铁质、钙质、玉髓质等沉积物充填。角斑岩一般具块状构造,多发育杏仁状构造,具交织结构,主要由钠长石($An=4\sim7$)和一定量绿泥石组成,其中钠长石往往呈长条状大致平行排列,空隙间不均匀地分布着绿泥石等脱玻化产物。中-基性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)类的碎屑物主要由辉石和钠长石晶屑为主(图2e),还见有少量安山质岩屑;基质为微晶质结构,主要由斜长石(钠长石)、绿泥石和少量方解石、铁质、绢云母等矿物组成;③岑溪-梧州断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩:其主要呈岩片状夹于深变质的矽线长石黑云石英片岩、石英岩和变粒岩等岩石中,最大厚度达100多米。主要岩性为斜长角闪岩类(图2f),还见有少量的辉石岩和角闪岩类,岩石具片麻状构造,细粒柱粒状变晶结构,主要矿物为斜长石(25%~45%)、角闪石(40%~75%)、石英(0~12%)和少量黑云母、绿帘石、绿泥石等矿物组成。普通角闪石柱体多呈他形-半自形柱状,大小多在0.3~1.0mm,其集合体分布具定向性,有时见角闪石边部具纤闪石化或绿泥石化现象;斜长石呈半自形板柱状-他形粒状,不均匀地分布于角闪石颗粒间,广泛发育聚片双晶,常见其蚀变为绢云母及绿帘石等矿物,粒径多在0.2~0.8mm;石英呈他形粒状集合体充填于斜长石和角闪石间隙中,粒度大小多在0.1~0.4mm。

3 样品采集及分析方法

本次研究对岑溪地区三个地方出露的(变质)中-基性火山岩均进行了系统的样品采集,并对其进行详细的显微镜下观察鉴定的基础上,在糯垌镇油茶林场一带的样品中挑选出

① 广西区调队. 1988. 1:5万新地圩幅、糯垌圩幅报告(内部资料)

② 广西地质勘查总院. 2013. 1:25万贵县幅区域地质调查报告(内部资料)

③ 广西区域地质调查研究院. 2004. 1:25万玉林市幅区域地质调查报告(内部资料)

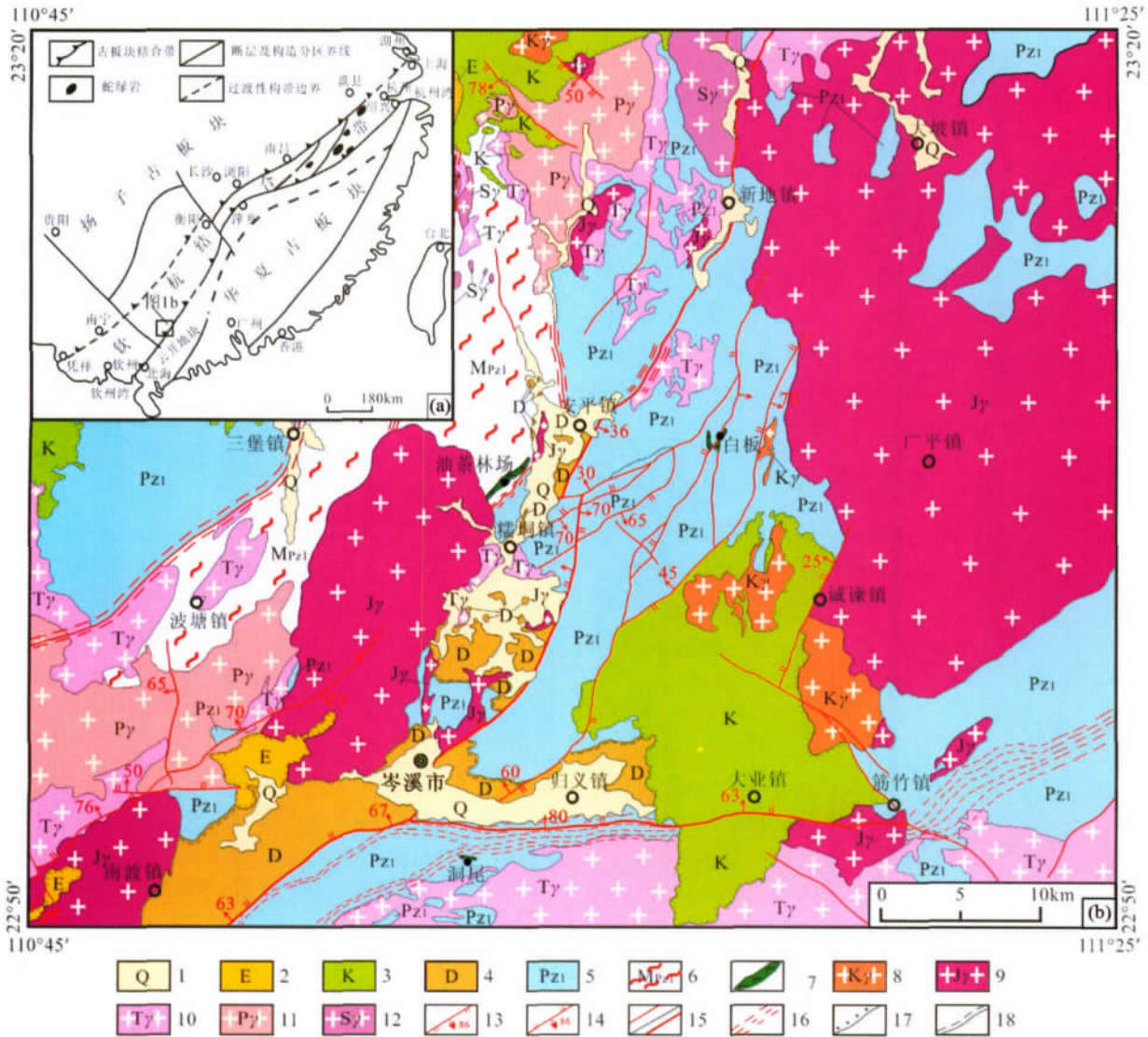


图1 云开地块北缘岑溪地区地质略图(a, 据杨明桂和梅勇文修改, 1997; b 据广西地质调查研究院, 2002^①修改)

1-第四系;2-古近系;3-白垩系;4-泥盆系;5-下古生界;6-早古生代混合岩;7-(变质)中基性火山岩;8-白垩纪花岗岩;9-侏罗纪花岗岩;10-三叠纪花岗岩;11-二叠纪花岗岩;12-志留纪花岗岩;13-正断层及其产状;14-逆断层及其产状;15-性质不明断层/区域性断层;16-韧性剪切带;17-角度不整合面;18-平行不整合面

Fig.1 Sketch map showing the geology in Cenxi area , northern margin of Yunkai block (a , modified after Yang and Mei , 1997)

4 个斜长阳起石岩、在安平镇白板-大爽一带的样品中挑选出 2 个中性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)和 8 个玄武岩、在归义镇洞尾一带的样品中挑选出 8 个斜长角闪岩新鲜样品进行全岩主量、微量和稀土元素分析。这些样品首先用手工除去风化表皮后在破碎机中碎成直径为 1~10mm 的碎片,然后在玛瑙磨样机中磨成 200 目以下的岩石粉末。其中,糯垌镇油茶林场和归义镇洞尾一带样品的主量、微量和稀土元素测定由核工业北京地质研究院分析测试研究中心完成,而安平镇白板-大爽一带样品的主量、微量和稀土元素测定由中国地质科学院国家地质实验测试中心完成。主量元素

采用 X 荧光光谱仪测试,检测方法依据 GB/T14506.28—1993 标准,分析精度优于 2%;微量元素和稀土元素在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上分析,检测方法依据 DZ/T0223—2001 标准,其中含量大于 10×10^{-6} 的元素测试精度为 5%,而小于 10×10^{-6} 的元素精度为 10%。分析结果及一些参数见表 1。

本次研究还分别选择糯垌镇油茶林场一带的斜长阳起石岩(10YC1-1)、安平镇白板一带的中性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)(10DS1-1)和归义镇洞尾一带的斜长角闪岩(10DW1-1)3 个样品进行激光多接收等离子体质谱(LA-MC-

① 广西地质调查研究院. 2002. 1:5 万区域地质调查云开片区总结(内部资料)

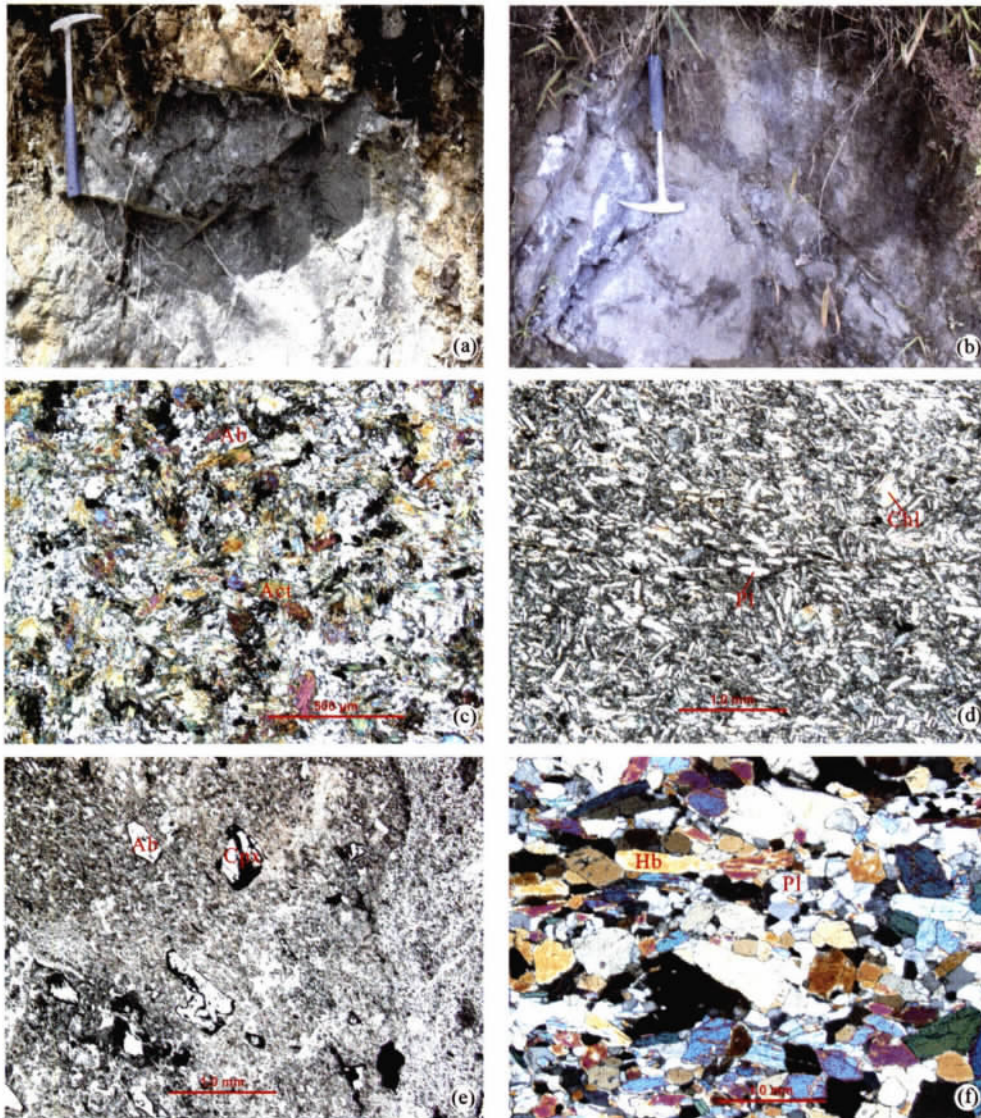


图2 (变质)中基性火山岩的野外露头 and 显微镜下照片

(a,c) 糯垌镇油茶林场一带出露的斜长阳起岩; (b,d) 安平镇白板一带出露的细碧岩; (e) 安平镇白板一带出露的晶屑凝灰岩; (f) 归义镇洞尾一带出露的斜长角闪岩。Pl-斜长石; Ab-钠长石; Act-阳起石; Chl-绿泥石; Hb-角闪石; Cpx-单斜辉石

Fig. 2 Photos of metamorphic intermediate- mafic volcanic rocks in outcrop and microscope

ICP-MS) 锆石 U-Pb 定年。锆石分选在广西区域地质调查研究院进行, 每个样品采集 15kg 新鲜岩石经机械破碎至 60 目后用常规重磁法分选其中的锆石单矿物, 通过双目显微镜手工挑选出晶形和透明度较好的锆石颗粒, 然后将选出的锆石送中国地质科学院地质研究所(北京离子探针中心)进行锆石样品靶的制备和阴极发光(CL)成像观察, 以确定锆石颗粒的内部结构及适合分析的锆石颗粒与位置供 LA-MC-ICP-MS 测定。阴极发光图像研究在 HITACHI S3000-N 型扫描电子显微镜并配有 GATAN 公司 Chroma 阴极发光探头分析仪器上完成。激光多接收等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS) 锆石 U-Pb 年龄测试在中国地质科学院矿产资源研究所引进的 Thermo Finnigan Neptune 型多接收等离子质谱上进行, 详细的分析流程和原理见侯可军等(2009), 有关年龄数据处理和

谐和图的绘制使用美国 Berkeley 地质年代中心 Kenneth R. Ludwig 编制的计算程序 Isoplot (3.0 版) (Ludwig, 2003) 进行。分析结果见表 2。

4 分析结果

4.1 主量元素

从表 1 中可以看出, 岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带和断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质(中)基性火山岩 SiO_2 含量变化不大, 分别在 49.05% ~ 53.38% 和 50.10% ~ 51.39% 之间, 其 TiO_2 (含量分别在 1.05% ~ 1.30% 和 1.03% ~ 1.69%) 和 P_2O_5 (含量分

表1 (变质)中基性火山岩的主量元素(wt%)、微量元素和稀土元素($\times 10^{-6}$)分析结果Table 1 Major (wt%) and trace element ($\times 10^{-6}$) compositions of metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks

样品号	10YC1-1	10YC1-2	10YC1-3	10YC1-4	10DW1-1	10DW1-2	10DW1-3	10DW1-4	10DW1-5	10DW1-6	10DW1-7	10DW1-8
位置	糯垌镇油茶林场				归义镇洞尾							
岩石类型	斜长阳起石岩				斜长角闪岩							
SiO ₂	50.26	52.65	49.05	53.38	50.10	51.39	50.13	51.39	50.81	50.59	50.22	50.47
TiO ₂	1.18	1.05	1.18	1.30	1.09	1.18	1.14	1.17	1.03	1.69	1.31	1.17
Al ₂ O ₃	13.02	12.83	13.15	12.54	14.56	13.47	11.51	13.34	14.72	13.26	13.65	10.92
Fe ₂ O ₃	13.22	12.41	12.94	12.04	11.57	11.59	12.23	12.19	11.14	14.00	12.28	13.01
FeO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	9.86	8.99	9.38	8.53	10.39	9.14	10.32	8.56	9.73	8.50	8.86	10.63
MgO	7.82	7.28	7.29	7.35	6.88	7.82	8.84	7.83	6.68	6.54	8.03	9.50
MnO	0.19	0.18	0.18	0.18	0.21	0.22	0.24	0.20	0.21	0.22	0.20	0.24
K ₂ O	0.09	0.09	0.11	0.08	0.28	0.18	0.24	0.14	0.24	0.24	0.19	0.20
Na ₂ O	2.90	3.37	2.94	3.41	3.15	3.77	2.83	3.76	3.56	3.68	3.50	2.47
P ₂ O ₅	0.10	0.12	0.10	0.05	0.14	0.10	0.12	0.08	0.13	0.14	0.06	0.10
LOI	0.89	0.95	3.11	1.03	1.16	1.07	1.91	1.26	1.28	1.09	1.21	1.20
Total	99.53	99.92	99.43	99.89	99.53	99.93	99.51	99.92	99.53	99.95	99.51	99.91
Sc	43.4	39.8	43.6	46.9	43.9	47.1	57.2	50.4	42.7	40.8	59.7	57.9
V	336	294	333	275	293	301	352	342	298	375	331	360
Cr	130	123	138	193	223	192	295	199	215	33	259	296
Co	49.8	44.6	46.4	48.2	37.0	39.0	46.1	37.5	38.4	27.1	40.1	46.6
Ni	59	54	48	67	67	55	59	50	64	17	74	63
Cu	40.9	45.3	61.6	38.0	18.5	18.9	6.56	81.0	75.3	46.3	16.3	4.83
Zn	82.7	90.2	99.5	82.0	99.0	87.8	83.6	98.5	95.2	108	94.4	80.2
Ga	16.8	13.8	17.4	12.4	19.5	15.6	15.8	16.3	18.4	19.7	15.7	15.8
Rb	1.09	1.23	0.96	0.87	9.74	3.70	11.80	4.22	6.01	2.70	7.46	7.62
Sr	85.5	78.5	83.6	79.8	283	256.0	174	188	315	197	200	174.0
Zr	51.3	52.4	35.8	46.4	45.0	47.7	45.5	65.2	53.1	65.4	62.3	42.8
Nb	2.45	2.33	2.42	1.71	2.93	2.20	2.52	2.46	2.55	3.65	2.42	2.47
Ta	0.17	0.17	0.17	0.13	0.19	0.16	0.17	0.17	0.18	0.25	0.17	0.16
Ba	23.9	25.2	22.3	36.6	44.1	35.9	47.9	43.2	45.8	52.8	54.9	39.5
Hf	1.66	1.60	1.31	1.49	1.73	1.81	1.87	2.13	1.96	2.21	2.09	1.94
Pb	1.12	1.19	1.12	1.43	5.07	6.11	3.76	4.83	6.59	5.66	5.84	3.03
Th	0.59	0.57	0.56	0.42	0.66	0.48	0.48	0.50	0.50	0.59	0.46	0.49
U	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.21	0.18	0.20	0.23	0.17	0.20
Cs	0.08	0.15	0.07	0.08	1.67	0.44	1.61	0.59	1.19	0.85	0.85	1.18
La	3.66	3.49	3.79	3.02	4.24	3.33	3.42	3.71	4.08	5.13	5.65	3.75
Ce	8.58	8.35	8.44	7.44	10.30	8.24	8.58	8.78	10.10	12.80	12.20	8.74
Pr	1.41	1.39	1.51	1.34	1.62	1.35	1.40	1.41	1.59	1.99	1.81	1.40
Nd	7.48	7.25	7.89	7.13	8.83	6.95	7.66	7.76	8.68	10.80	9.08	7.83
Sm	2.67	2.51	2.60	2.64	2.99	2.34	2.71	2.74	3.02	3.61	3.08	2.79
Eu	0.90	0.77	0.94	0.71	1.13	0.89	1.01	1.06	1.06	1.22	1.12	0.88
Gd	3.36	3.31	3.70	3.45	4.06	3.23	3.46	3.76	3.79	4.50	4.01	3.54
Tb	0.76	0.72	0.80	0.76	0.86	0.69	0.78	0.83	0.86	1.02	0.87	0.79
Dy	5.12	4.88	5.44	5.25	5.81	4.74	5.21	5.68	5.70	6.70	5.76	5.47
Ho	1.10	1.06	1.16	1.12	1.18	1.04	1.10	1.21	1.23	1.43	1.20	1.16
Er	3.36	3.19	3.52	3.31	3.75	3.29	3.51	3.65	3.73	4.32	3.69	3.53
Tm	0.55	0.52	0.57	0.54	0.59	0.51	0.55	0.58	0.60	0.70	0.58	0.56
Yb	3.35	3.14	3.31	3.24	3.81	3.17	3.48	3.71	3.63	4.31	3.68	3.41
Lu	0.53	0.49	0.52	0.46	0.59	0.52	0.54	0.60	0.61	0.69	0.59	0.55
Y	29.9	28.5	30.8	29.5	33.5	27.9	29.7	31.5	32.4	36.5	33.7	30.9
ΣREE	42.83	41.07	44.19	40.41	49.76	40.29	43.41	45.48	48.67	59.22	53.32	44.40
ΣLREE/ ΣHREE	1.36	1.37	1.32	1.23	1.41	1.34	1.33	1.27	1.42	1.50	1.62	1.34
(La/Yb) _N	0.78	0.80	0.82	0.67	0.80	0.75	0.70	0.72	0.81	0.85	1.10	0.79
(La/Sm) _N	0.88	0.90	0.94	0.74	0.92	0.92	0.81	0.87	0.87	0.92	1.18	0.87
δEu	0.92	0.82	0.93	0.72	0.99	0.99	1.01	1.01	0.96	0.92	0.97	0.86
δCe	0.93	0.93	0.87	0.91	0.96	0.95	0.96	0.94	0.97	0.98	0.93	0.93

续表 1

Continued Table 1

样品号	10DS1-1	10DS1-2	10DS2-3	10DS2-4	10DS2-1	10DS2-2	10DS3-1	10DS3-2	10DS3-3	10DS3-5
位置	安平镇白板、大爽									
岩石类型	安山质晶屑凝灰岩					玄武岩				
SiO ₂	53.61	55.09	49.52	50.53	51.14	50.36	50.83	50.88	46.20	45.57
TiO ₂	0.5	0.51	0.58	0.6	0.54	0.54	0.56	0.54	0.54	0.54
Al ₂ O ₃	14.78	14.71	17.12	16.71	15.67	15.85	15.06	15.15	14.95	14.58
Fe ₂ O ₃	5.33	6.13	1.66	1.73	2.16	2.08	10.84	10.72	11.49	10.31
FeO	2.82	2.64	6.02	5.82	6.11	5.64	1.92	1.83	1.67	1.92
CaO	4.86	3.88	3.93	4.26	4.44	4.95	1.64	1.55	4.21	5.61
MgO	8.11	7.35	11.1	10.9	10.51	10.99	9.36	9.08	8.26	7.78
MnO	0.13	0.11	0.27	0.27	0.25	0.27	0.11	0.12	0.12	0.12
K ₂ O	1.99	1.58	0.74	0.54	0.55	0.63	0.06	0.07	0.06	0.06
Na ₂ O	4.64	4.9	4.43	4.64	4.57	4.31	6.08	6.15	5.81	5.83
P ₂ O ₅	0.12	0.16	0.14	0.14	0.13	0.12	0.08	0.2	0.11	0.06
LOI	3.15	2.74	3.96	3.66	3.37	3.39	3.44	3.51	6.3	7.27
Total	100.04	99.80	99.47	99.80	99.44	99.13	99.98	99.80	99.72	99.65
Sc	36.2	34.1	41.8	41.4	38.5	35.4	43.2	36.2	38.9	41.7
V	180	197	252	241	247	229	219	192	229	203
Cr	639	625	781	760	730	713	793	684	743	772
Co	44.3	41.9	57	52.8	49	49.2	55.5	46.8	52.3	50.8
Ni	179	170	220	216	213	204	211	183	184	181
Cu	4.55	4.39	8.24	5.2	4.65	12.9	3.85	2.71	2.97	3.36
Zn	113	101	374	351	184	306	141	107	137	151
Ga	16.4	16.4	17.7	16.3	17.8	14.8	17.1	14.4	14.3	13.6
Rb	73.2	59.4	20.3	14.1	14.3	15.4	1.38	1.35	1.46	1.13
Sr	157	156	239	228	118	220	82.8	69.8	124	128
Zr	87.5	93.1	84.6	83.7	79	76.2	68.9	61.7	63.3	63.9
Nb	4.5	4.89	4.13	4	3.74	3.63	3.59	3.2	3.27	3.31
Ta	0.38	0.41	0.38	0.38	0.33	0.32	0.31	0.25	0.26	0.27
Ba	779	548	1277	840	637	1338	82.2	80.7	74.6	60.2
Hf	2.83	2.94	2.83	2.81	2.62	2.52	2.26	2.1	1.97	2.18
Pb	11.6	13.3	7.74	6.46	4.82	32.7	23.9	22.6	29.7	24.4
Th	10.5	11.3	15.2	13.9	13.1	13.4	9.31	8.29	8.66	8.6
U	1.73	1.98	3.52	2.98	2.7	3.94	1.61	1.61	1.72	1.5
Cs	4.3	3.47	1.13	0.88	0.84	1.05	0.42	0.44	0.49	0.53
La	16.5	21.2	13.4	14.9	15.6	14.7	10.8	10.1	11.6	11.7
Ce	30.8	40.7	29.3	31.7	31.4	29.1	21.9	21.3	22.3	21.9
Pr	3.53	4.55	3.45	3.72	3.5	3.18	2.6	2.61	2.73	2.58
Nd	13.3	16.5	13.1	13.8	12.7	12	9.84	11	10.4	9.95
Sm	2.72	3.29	2.86	2.93	2.75	2.59	2.3	2.69	2.32	2.44
Eu	0.74	0.78	0.57	0.63	0.78	0.73	0.68	0.64	0.65	0.75
Gd	2.9	3.05	2.9	3.03	2.76	2.6	2.25	2.53	2.63	2.56
Tb	0.49	0.49	0.5	0.49	0.48	0.42	0.42	0.45	0.43	0.4
Dy	2.94	2.95	3.05	3.28	2.91	2.69	2.68	2.92	2.6	2.45
Ho	0.62	0.66	0.67	0.68	0.63	0.64	0.57	0.6	0.57	0.5
Er	2.02	1.99	2.05	2.11	1.92	1.9	1.72	1.93	1.78	1.53
Tm	0.27	0.28	0.28	0.29	0.28	0.26	0.25	0.25	0.23	0.22
Yb	1.88	1.91	1.89	1.95	1.93	1.75	1.72	1.72	1.55	1.32
Lu	0.28	0.28	0.31	0.32	0.31	0.28	0.28	0.29	0.25	0.22
Y	21.8	20.7	21.1	20.3	19.7	19.1	17.6	18.6	20.9	18.6
ΣREE	78.99	98.63	74.33	79.83	77.95	72.84	58.01	59.03	60.04	58.52
ΣLREE/ ΣHREE	5.93	7.50	5.38	5.57	5.95	5.91	4.87	4.52	4.98	5.36
(La/Yb) _N	6.30	7.96	5.09	5.48	5.80	6.03	4.50	4.21	5.37	6.36
(La/Sm) _N	3.92	4.16	3.02	3.28	3.66	3.66	3.03	2.42	3.23	3.10
δEu	0.80	0.74	0.60	0.64	0.86	0.85	0.90	0.74	0.80	0.91
δCe	0.94	0.97	1.03	1.02	1.00	1.00	0.98	0.99	0.94	0.94

表2 (变质)中基性火山岩的锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果

Table 2 Zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb dating results of metamorphic intermediate-~~ma~~fic volcanic rocks

测点号	Pb	U	Th	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U		²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U		²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ
10YCI-1 斜长阳起岩																
1.1	55.9	742.7	395.5	0.53	0.0556	0.0003	0.5452	0.0053	0.0712	0.0007	435.2	17.6	441.9	3.5	443.1	4.2
2.1	39.6	398.5	326.6	0.82	0.0549	0.0003	0.5463	0.0059	0.0722	0.0007	405.6	13.0	442.6	3.9	449.2	4.5
3.1	17.6	213.9	124.4	0.58	0.0551	0.0004	0.5377	0.0061	0.0709	0.0008	413.0	16.7	436.9	4.0	441.5	4.7
4.1	48.0	518.2	172.6	0.33	0.0604	0.0003	0.9002	0.0089	0.1079	0.0010	620.4	13.0	651.9	4.8	660.7	6.1
5.1	25.5	171.5	74.0	0.43	0.0686	0.0004	1.4470	0.0152	0.1529	0.0016	887.0	13.0	908.6	6.3	917.0	8.9
5.2	52.5	659.1	378.4	0.57	0.0554	0.0003	0.5432	0.0061	0.0711	0.0008	427.8	13.0	440.5	4.0	442.6	4.8
6.1	36.6	308.4	331.2	1.07	0.0548	0.0004	0.5451	0.0070	0.0721	0.0009	466.7	14.8	441.8	4.6	448.7	5.2
7.1	259.0	337.1	392.2	1.16	0.1602	0.0009	8.2514	0.0972	0.3730	0.0042	2457.7	13.9	2259.0	10.7	2043.4	19.7
8.1	38.8	521.2	273.7	0.53	0.0554	0.0004	0.5439	0.0069	0.0710	0.0008	431.5	13.0	441.0	4.5	442.3	4.9
9.1	44.3	484.0	366.3	0.76	0.0551	0.0003	0.5386	0.0059	0.0709	0.0008	416.7	-17.6	437.5	3.9	441.4	4.6
9.2	13.4	177.0	94.2	0.53	0.0544	0.0004	0.5357	0.0055	0.0715	0.0007	387.1	49.1	435.6	3.6	445.1	4.0
10.1	59.0	275.4	148.8	0.54	0.0762	0.0004	2.0015	0.0199	0.1903	0.0018	1099.1	11.9	1116.0	6.7	1123.2	9.5
11.1	68.6	307.3	174.6	0.57	0.0787	0.0004	2.1078	0.0216	0.1942	0.0020	1164.8	11.1	1151.3	7.1	1144.1	10.9
12.1	27.7	316.4	182.3	0.58	0.0554	0.0004	0.5419	0.0073	0.0709	0.0009	427.8	21.3	439.7	4.8	441.5	5.3
13.1	32.2	318.9	266.8	0.84	0.0586	0.0006	0.5748	0.0101	0.0707	0.0008	550.0	24.1	461.1	6.5	440.6	4.7
10DW1-1 斜长角闪岩																
1.1	249.8	319.4	212.1	0.49	0.2043	0.0011	13.514	0.1494	0.4789	0.0049	2861.4	8.2	2716.3	10.5	2522.6	21.4
1.2	25.9	317.8	214.8	0.48	0.0606	0.0007	0.5700	0.0100	0.0676	0.0006	627.8	19.4	458.0	6.4	421.9	3.8
2.1	22.3	248.3	194.8	0.44	0.0546	0.0003	0.5328	0.0054	0.0708	0.0007	394.5	10.2	433.7	3.6	441.1	4.1
3.1	24.0	283.2	226.1	0.41	0.0553	0.0004	0.5168	0.0052	0.0677	0.0006	433.4	18.5	423.0	3.5	422.5	3.5
4.1	22.6	303.8	173.7	0.56	0.0549	0.0005	0.5125	0.0074	0.0677	0.0008	409.3	20.4	420.2	4.9	422.0	4.5
5.1	23.5	256.3	208.2	0.39	0.0552	0.0003	0.5352	0.0054	0.0704	0.0007	416.7	13.0	435.3	3.5	438.4	4.1
5.2	10.8	152.4	71.0	0.74	0.0565	0.0004	0.5512	0.0057	0.0707	0.0007	472.3	14.8	445.8	3.8	440.6	4.1
6.1	15.2	179.9	125.3	0.46	0.0547	0.0004	0.5361	0.0061	0.0711	0.0008	466.7	14.8	435.8	4.0	442.5	4.7
7.1	13.8	174.9	90.0	0.62	0.0613	0.0005	0.5992	0.0087	0.0706	0.0007	647.9	52.8	476.7	5.5	439.8	4.3
7.2	9.8	124.7	73.2	0.53	0.0556	0.0004	0.5440	0.0051	0.0710	0.0007	438.9	10.2	441.1	3.4	442.1	4.1
8.1	13.0	159.9	100.1	0.48	0.0549	0.0004	0.5357	0.0053	0.0708	0.0006	409.3	19.4	435.6	3.5	440.7	3.8
9.1	11.0	147.3	82.5	0.53	0.0598	0.0004	0.5862	0.0055	0.0712	0.0007	598.2	14.8	468.5	3.5	443.6	4.4
10.1	22.7	292.1	175.5	0.48	0.0553	0.0003	0.5394	0.0065	0.0708	0.0009	433.4	14.8	438.0	4.3	440.7	5.2
10.2	8.2	115.3	65.2	0.50	0.0556	0.0004	0.5451	0.0057	0.0711	0.0007	438.9	16.7	441.7	3.8	442.7	4.1
11.1	13.5	171.8	109.4	0.43	0.0553	0.0004	0.5371	0.0059	0.0705	0.0007	433.4	16.7	436.5	3.9	439.0	4.1
12.1	37.8	539.8	283.3	0.46	0.0591	0.0004	0.5789	0.0077	0.0709	0.0008	568.6	8.3	463.7	5.0	441.3	4.8
12.2	18.0	215.2	120.5	0.46	0.0562	0.0004	0.5536	0.0061	0.0715	0.0007	457.5	8.3	447.3	4.0	444.9	4.5
13.1	22.1	123.6	82.3	0.37	0.0690	0.0004	1.4977	0.0175	0.1573	0.0018	899.7	17.6	929.5	7.1	941.9	10.1
14.1	312.5	217.9	61.5	0.86	0.4134	0.0033	42.036	0.3806	0.7383	0.0062	3958.4	11.8	3819.9	9.0	3564.2	23.0
10DS1-1 中性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)																
1.1	170.8	91.9	109.8	0.84	0.0695	0.0005	1.4219	0.0222	0.1482	0.0019	914.5	13.0	898.1	9.3	890.6	10.5
2.1	161.2	63.5	101.7	0.62	0.0699	0.0006	1.4256	0.0226	0.1479	0.0023	927.8	16.7	899.7	9.4	889.0	12.7
3.1	42.1	41.2	169.5	0.24	0.0625	0.0008	0.8555	0.0333	0.0991	0.0034	700.0	27.8	627.6	18.2	609.3	20.2
4.1	92.7	48.6	138.1	0.35	0.0611	0.0003	0.8324	0.0095	0.0987	0.0010	642.6	11.1	614.9	5.2	606.9	5.7
5.1	77.4	50.7	78.6	0.64	0.0563	0.0006	0.5517	0.0090	0.0711	0.0010	464.9	22.2	446.1	5.9	442.7	5.9
6.1	45.0	23.2	40.8	0.57	0.0608	0.0006	0.8268	0.0111	0.0987	0.0009	631.5	22.2	611.8	6.2	606.8	5.6
7.1	149.5	66.4	83.9	0.79	0.0608	0.0007	0.8269	0.0143	0.0987	0.0016	635.2	24.1	611.9	7.9	606.8	9.6
8.1	106.7	51.2	66.3	0.77	0.0556	0.0005	0.5441	0.0075	0.0710	0.0007	435.2	20.4	441.1	4.9	442.0	4.2
9.1	185.9	46.2	22.8	2.03	0.0739	0.0006	1.5045	0.0169	0.1479	0.0013	1038.9	16.7	932.2	6.9	889.3	7.4
10.1	107.4	90.9	32.4	2.80	0.0629	0.0032	0.6119	0.0396	0.0707	0.0039	705.6	109.2	484.7	25.0	440.5	23.4
11.1	187.6	83.2	170.8	0.49	0.0562	0.0008	0.5494	0.0148	0.0709	0.0013	457.5	36.1	444.6	9.7	441.4	7.7
12.1	15.7	28.0	38.0	0.74	0.0746	0.0020	0.7291	0.0247	0.0711	0.0021	1057.4	49.8	556.0	14.5	442.6	12.6
13.1	56.7	17.2	73.8	0.23	0.0614	0.0004	0.8969	0.0098	0.1060	0.0010	653.7	13.7	650.0	5.2	649.7	6.0
14.1	84.4	57.8	34.7	1.67	0.0596	0.0012	0.7014	0.0148	0.0856	0.0011	590.8	46.3	539.7	8.8	529.5	6.5

续表 2

Continued Table 2

测点号	Pb ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
					比值	1σ	比值	1σ	比值	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ	Ma	1σ
15.1	87.5	28.0	64.8	0.43	0.0721	0.0003	1.6019	0.0135	0.1612	0.0012	990.7	4.6	971.0	5.3	963.3	6.6
16.1	169.8	115.3	225.3	0.51	0.0553	0.0003	0.5412	0.0050	0.0710	0.0006	433.4	11.1	439.2	3.3	442.2	3.6
17.1	106.2	20.1	50.1	0.40	0.0707	0.0006	1.4406	0.0168	0.1479	0.0016	950.0	15.9	906.0	7.0	889.0	8.9
18.1	52.8	49.8	112.3	0.44	0.0560	0.0007	0.5483	0.0107	0.0710	0.0010	453.8	25.0	443.9	7.0	442.2	6.2
19.1	260.9	34.9	43.1	0.81	0.1201	0.0035	4.9898	0.1712	0.2940	0.0024	1957.1	51.9	1817.6	29.0	1661.3	11.9
20.1	235.3	200.4	393.0	0.51	0.0555	0.0002	0.5438	0.0051	0.0710	0.0006	431.5	4.6	440.9	3.3	442.4	3.6
21.1	110.6	28.9	206.7	0.14	0.0753	0.0002	1.7584	0.0147	0.1693	0.0013	1076.9	5.6	1030.3	5.4	1008.4	7.3
22.1	113.3	55.2	100.7	0.55	0.0721	0.0004	1.4712	0.0137	0.1479	0.0012	990.7	11.1	918.6	5.6	889.2	6.5
23.1	756.6	74.1	60.3	1.23	0.1631	0.0006	9.7834	0.1045	0.4353	0.0048	2488.0	5.4	2414.6	9.8	2329.5	21.6
24.1	38.8	13.9	17.2	0.80	0.0764	0.0007	1.8119	0.0244	0.1722	0.0019	1105.6	18.5	1049.8	8.8	1024.2	10.3
25.1	356.2	142.0	113.2	1.25	0.0769	0.0003	1.9166	0.0207	0.1809	0.0018	1117.6	8.2	1086.9	7.2	1071.7	9.8
26.1	206.9	146.5	84.2	1.74	0.0609	0.0004	0.7584	0.0079	0.0904	0.0008	635.2	14.8	573.1	4.6	557.8	4.5
27.1	101.0	33.4	72.3	0.46	0.0762	0.0004	1.8250	0.0200	0.1737	0.0016	1099.7	11.4	1054.5	7.2	1032.7	8.7
28.1	84.5	52.1	68.8	0.76	0.0618	0.0005	0.8405	0.0100	0.0987	0.0009	733.3	16.7	619.4	5.5	606.9	5.6
29.1	72.2	60.7	98.1	0.62	0.0606	0.0014	0.8026	0.0276	0.0960	0.0019	633.4	48.1	598.3	15.6	591.1	11.5
30.1	238.5	68.9	66.3	1.04	0.1112	0.0008	4.0501	0.0799	0.2640	0.0046	1820.4	12.3	1644.3	16.1	1510.4	23.6

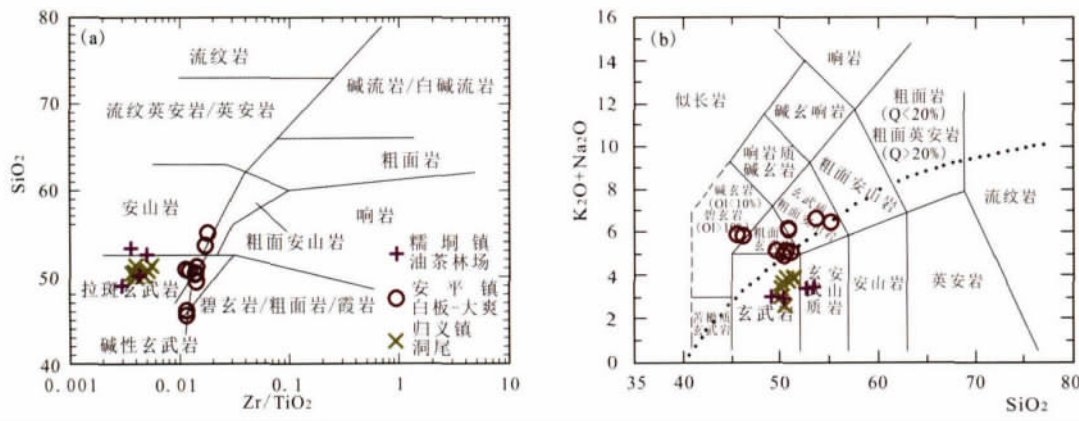


图3 (变质)中基性火山岩 Zr/TiO_2 - SiO_2 分类图解 (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ - SiO_2 分类图解 (b, 据 Le Maitre *et al.*, 2002)

碱性与亚碱性系列分界线来自 Irvine and Baragar (1971). 图5、图7和图8图例同此图

Fig. 3 Zr/TiO_2 vs. SiO_2 (a, after Winchester and Floyd, 1977) and $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ vs. SiO_2 (b, after Le Maitre *et al.*, 2002) diagrams of metamorphic intermediate- to mafic volcanic rocks

别在 0.05% ~ 0.12% 和 0.06% ~ 0.14% 的含量都较低, Al_2O_3 含量分别在 12.54% ~ 13.15% 和 10.92% ~ 14.72%, 与世界上洋中脊型拉斑玄武岩的含量相似 (Melson *et al.*, 1976); 二者的全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量也相对较低, 在 2.67% ~ 3.95% 之间, 且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ 。而岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的中-基性火山(碎屑)岩(细碧-角斑岩系) SiO_2 含量变化较大, 在 45.57% ~ 55.09% 之间, 但其 TiO_2 (在 0.50% ~ 0.60%) 的含量明显低于 MORB 的含量, P_2O_5 (0.06% ~ 0.20%) 的含量相对较高, Al_2O_3 含量变化较大, 在 14.58% ~ 17.12%, 其与世界上岛弧型拉斑玄武岩的含量相似 (Jakeš and White, 1972; Pearce, 1984);

与糯垌镇油茶林场和归义镇洞尾一带的变质(中)基性火山岩相比, 其全碱 ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 含量明显较高, 在 4.94% ~ 6.63% 之间, 且 $\text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$, 其富碱可能是由于与海水发生水岩作用而造成强烈钠化的结果。在 Zr/TiO_2 - SiO_2 分类图解(图3a)和 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ - SiO_2 分类图解(图3b)中, 岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带和断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质(中)基性火山岩大部分落入拉斑玄武岩区, 部分落入安山岩(或玄武质安山岩)区, 表明其原岩主要为玄武岩类, 部分为安山岩类; 而岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的中-基性火山(碎屑)岩较复杂, 在 Zr/TiO_2 - SiO_2 分类图解中

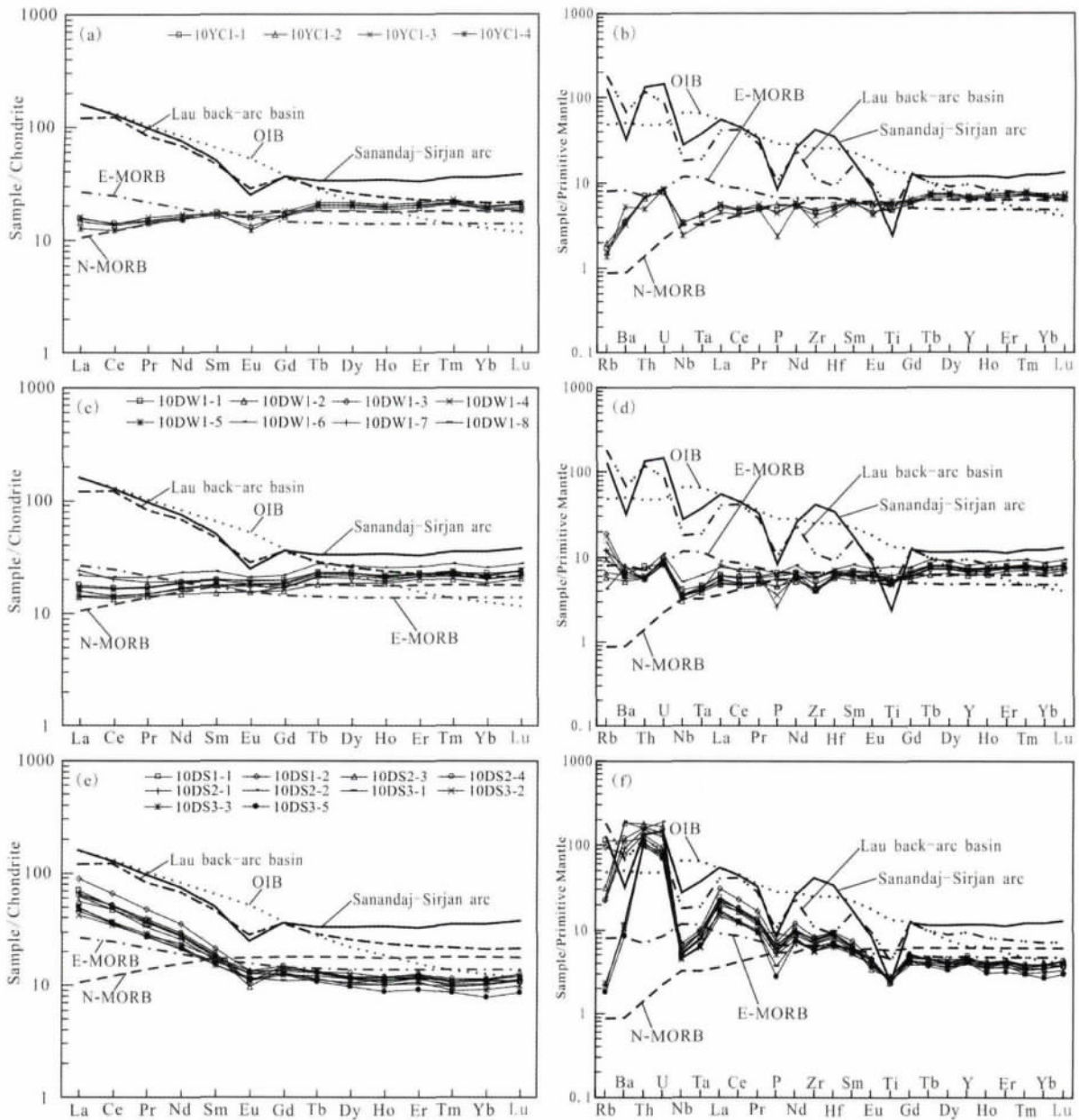


图4 (变质)中基性火山岩球粒陨石标准化稀土元素配分模式图(a,c,e)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b,d,f)(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Sanandaj-Sirjan 岛弧型火山岩数据来自 Omrani *et al.* (2008); Lau 弧后盆地火山岩数据来自 Ewart *et al.* (1998); N-MORB、E-MORB 和 OIB 数据来自 Sun and McDonough (1989)

Fig. 4 Chondrite-normalized REE patterns (a, c, e) and primitive mantle-normalized spider diagrams (b, d, f) of metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

落在碱性玄武岩、拉斑玄武岩和安山岩区都有,在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 分类图解中则落入碱玄武岩、粗面玄武岩和粗面安山岩区,表明其原岩除基性火山岩外,还有部分为中性火山岩类。

4.2 稀土元素

从稀土元素分析结果(表1)和配分模式图(图4)中可

以看出,研究区的(变质)中-基性火山岩可分为两大类:①一类为亏损-平坦型的稀土配分模式,包括岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带和断裂带南东侧云开地块北缘归义镇一带出露的变质(中)基性火山岩(图4a,c),其稀土配分模式曲线与 Condie (1981)划分的太古代 Th_1 型拉斑玄武岩的模式曲线相类似(即 DAT,类似于现代洋中脊拉斑玄武岩)。但二者亦存在一定的差异,其中糯垌镇油茶林场一带变质中基性火山岩的稀土配分模式曲线与 N-MORB 的曲线

基本一致(图 4a); 而岑溪归义镇一带的稀土配分模式曲线介于 N-MORB 和 E-MORB 之间, 但更相似于 E-MORB 的曲线(图 4c)。该类岩石的稀土总量($REE = 40.29 \times 10^{-6} \sim 59.22 \times 10^{-6}$)、 $LREE/HREE (= 1.23 \sim 1.62)$ 、 $(La/Yb)_N (= 0.67 \sim 1.10)$ 和 $(La/Sm)_N (= 0.74 \sim 1.18)$ 均较低, Eu 和 Ce 异常不明显或具弱的负异常($\delta Eu = 0.72 \sim 1.01$, $\delta Ce = 0.87 \sim 0.98$); ②另一类为富集型的稀土配分模式, 包括岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的中基性火山(碎屑)岩(细碧-角斑岩系), 该类岩石的稀土配分模式曲线与 Sanandaj-Sirjan 岛弧型火山岩(Omrani *et al.*, 2008)的曲线较为相似(图 4e), 且其稀土总量相对比前一类高($\Sigma REE = 58.01 \times 10^{-6} \sim 98.63 \times 10^{-6}$), 轻稀土富集($LREE/HREE = 4.52 \sim 7.50$), $(La/Yb)_N (= 4.21 \sim 7.96)$ 和 $(La/Sm)_N (= 2.42 \sim 4.16)$ 也较高, 具弱的 Eu 负异常(0.60 ~ 0.91)。

4.3 微量元素及形成的构造环境判别

微量元素比值蛛网图能够深刻地揭示岩浆成因、演化及其构造背景。在本区变质(中)基性火山岩的微量元素比值蛛网图(图 4)上可以看出, 岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带出露的变质中基性火山岩的微量元素配分型式与 N-MORB 的曲线较相似, 且 Nb、Ta、P 和 Ti 的负异常不明显(图 4b); 岑溪-梧州断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩的微量元素配分型式与 E-MORB 的曲线较相似, 其间出现 Nb-Ta、P 和 Ti 的微弱亏损现象(图 4d); 而岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的中基性火山(碎屑)岩(细碧-角斑岩系)的微量元素配分模式曲线均表现为富集大离子亲石元素(LILE, 如 Ba、Th 和 U), 而 Nb-Ta、P 和 Ti 等高场强元素明显亏损, 反映其源区可能有较多的壳源物质加入, 其曲线与 Sanandaj-Sirjan 岛弧型火山岩(Omrani *et al.*, 2008)的曲线较为相似(图 4f)。

在各类微量元素的构造环境判别图解(图 5)中可以看出, 在 $Ti/50-V/5 \times Sm$ 图(图 5a)解和 $Ti/50-V/5 \times Sc$ 图解(图 5b)上, 糯垌镇油茶林场和归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩的投点主要落入洋中脊玄武岩区(MORB)或洋中脊玄武岩(MORB)和岛弧玄武岩(IAT)分界线两侧, 而安平镇一带出露的基性火山(碎屑)岩(细碧-角斑岩系)的投点均落入岛弧玄武岩区(IAT); 在 $Y/15-La/10-Nb/8$ 图解(图 5c)上, 糯垌镇油茶林场一带出露的变质基性火山岩的投点落入正常型洋中脊玄武岩区(N-MORB), 归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩主要落入正常型洋中脊玄武岩(N-MORB)和弧后盆地玄武岩分界线两侧, 而安平镇一带出露的基性火山(碎屑)岩均落入火山弧玄武岩区; 在 $2Nb-Zr/4-Y$ 图解(图 5d)上, 三类(变质)基性火山岩的投点均主要落入洋中脊玄武岩区(N-MORB)和火山弧玄武岩(VAB)重叠区。Pearce (2014)认为, Th/Yb 比值对于鉴别形成于俯冲带和非俯冲带的玄武岩(蛇绿岩)是十分灵敏的, 在 $Nb/Yb-Th/Yb$ 图解(图 5e)上可以看出, 三类(变质)基性火山岩的投点均

落在形成于俯冲带(SSZ)的火山岩区, 其中糯垌镇油茶林场和归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩主要落入大洋弧火山岩区及其附近, 而安平镇一带出露的基性火山(碎屑)岩则落在靠近大陆弧附近。由此表明, 本区的基性火山岩均为在俯冲-消减带不同构造部位形成的产物。而 $Ti/1000-V$ 图解可以很好地区分形成于俯冲带中不同类型的火山岩(Pearce, 2014), 在该图(图 5f)中可以看出, 安平镇一带出露的基性火山(碎屑)岩均落在岛弧拉斑玄武岩(IAT)和靠近俯冲板片的弧后盆地玄武岩及弧前玄武岩(FAB)的重叠区, 糯垌镇油茶林场一带出露的变质基性火山岩落入洋中脊玄武岩(MORB)和远离俯冲板片的弧后盆地玄武岩及弧前玄武岩(FAB)的重叠区, 而归义镇洞尾一带出露的变质基性火山岩主要落入洋中脊玄武岩(MORB)区, 部分落在洋中脊玄武岩(MORB)和岛弧拉斑玄武岩(IAT)分界线两侧。

综合上述主量元素、稀土和微量元素特征表明, 三类(变质)基性火山岩均形成于俯冲-消减带环境, 其中岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带出露的变质中基性火山岩属于 N-MORB 型, 可能形成于弧前大洋盆地环境; 岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇一带出露的细碧-角斑岩和中基性火山碎屑岩属于 IAT 型, 可能形成于岛弧环境; 而岑溪-梧州断裂带南东侧云开地块北缘归义镇一带出露的变质基性火山岩属于 E-MORB 型, 可能形成于弧后洋盆环境。

4.4 锆石特征及 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果

云开地块北缘岑溪地区各种(变质)中基性火山岩的锆石 CL 图像和 $^{206}Pb/^{238}U-^{207}Pb/^{235}U$ 谐和图见图 6。

4.4.1 糯垌镇油茶林场斜长阳起石岩

该斜长阳起石岩(10YCl-1)中的锆石在光学显微镜下多呈无色透明状, 锆石形态类型可分为两种: 一种为棱柱状晶体, 宽多在 $60 \sim 130 \mu m$ 之间, 长宽比大约为 $1.5 : 1 \sim 3 : 1$, 这些锆石颗粒结晶程度较好, 晶面整洁光滑, 锆石阴极发光图像显示其内部具有明显的韵律环带结构, 环带排列规则, 一些颗粒内部还保留有继承性锆石残核(图 6a 中的 5.1)或包裹有深色矿物包裹体(图 6a 中的 1.1、3.1 和 9.1), 表明其应为岩浆成因; 另一种锆石为不规则它形状或晶面发生磨圆(图 6a 中的 4.1、7.1、10.1 和 11.1), 内部没有明显的韵律环带结构或环带不规则, 表明其应为捕获古老沉积物的锆石。本次研究共对该样品的 13 颗锆石 15 个分析点进行了年龄测定, 分析数据见表 2。这些分析点的 Th/U 比值在 $0.33 \sim 1.16$ 区间变化, 其中分析点 5.1 为继承性锆石残核, 4.1、7.1、10.1 和 11.1 为捕获的锆石, 它们的 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄相差较大, 在 $660.7 \sim 2043.4 Ma$ 之间; 其余 10 个分析点为环带结构清楚的岩浆锆石, 其 $^{206}Pb/^{238}U$ 表面年龄相差较小, 在 $440.6 \sim 449.2 Ma$ 之间变化, 获得其加权平均年龄值为 $443.7 \pm 2.2 Ma$ (MSWD = 1.7)(图 6b), 该年龄代表了岩浆结晶年龄。

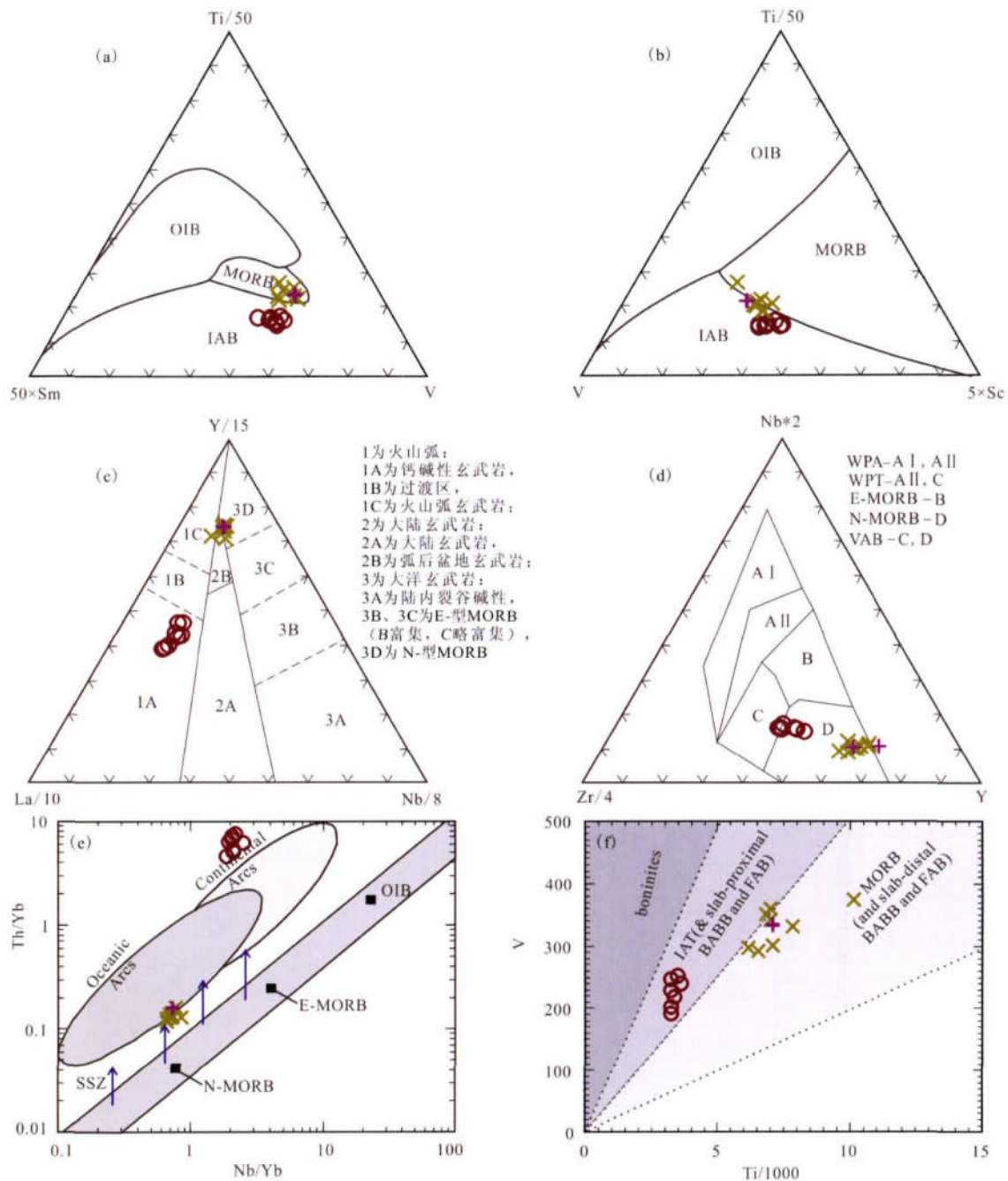


图5 (变质)中基性火山岩的构造环境判别图解

(a) Ti/50-V-50×Sm 图解 (Vermeesch, 2006); (b) Ti/50-V-5×Sc 图解 (Vermeesch, 2006); (c) Y/15-La/10-Nb/8 图解 (Cabanis and Lecolle, 1989); (d) 2Nb-Zr/4-Y 图解 (Meschede, 1986); (e) Nb/Yb-Th/Yb 图解 (Pearce, 2014); (f) Ti/1000-V 图解 (Pearce, 2014). IAB-岛弧玄武岩; IAT-岛弧拉斑玄武岩; VAB-火山弧玄武岩; MORB-洋中脊玄武岩 (E-MORB-富集型; N-MORB-正常型); OIB-洋岛玄武岩; WPA-板内碱性玄武岩; WPT-板内拉斑玄武岩; BABB-弧后盆地玄武岩; FAB-弧前玄武岩; SSZ-形成于俯冲带

Fig. 5 Discrimination diagrams illustrating tectonic setting of metamorphic intermediate- mafic volcanic rocks

4.4.2 归义镇洞尾斜长角闪岩

该斜长角闪岩 (10DW1-1) 中的锆石特征与斜长阳起岩的特征相似, 其中大部分锆石以柱状自形晶为主, 宽多在 75~140 μm 之间, 长宽比大约为 1.3:1~2.5:1, CL 图像显示锆石内部韵律环带发育, 表明其应为岩浆成因的锆石; 少

量晶面发生磨圆的锆石 (图 6c 中的 13.1 和 14.1), 可能为捕获古老沉积物的锆石。此外, 还存在少数颗粒内保留有深色继承性锆石残核, 但其晶面发生一定程度圆化的锆石 (图 6c 中的 1.1、3.1 和 4.1), 其可能属于变质成因的锆石。14 颗锆石 19 个分析点的 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年分析结果见表

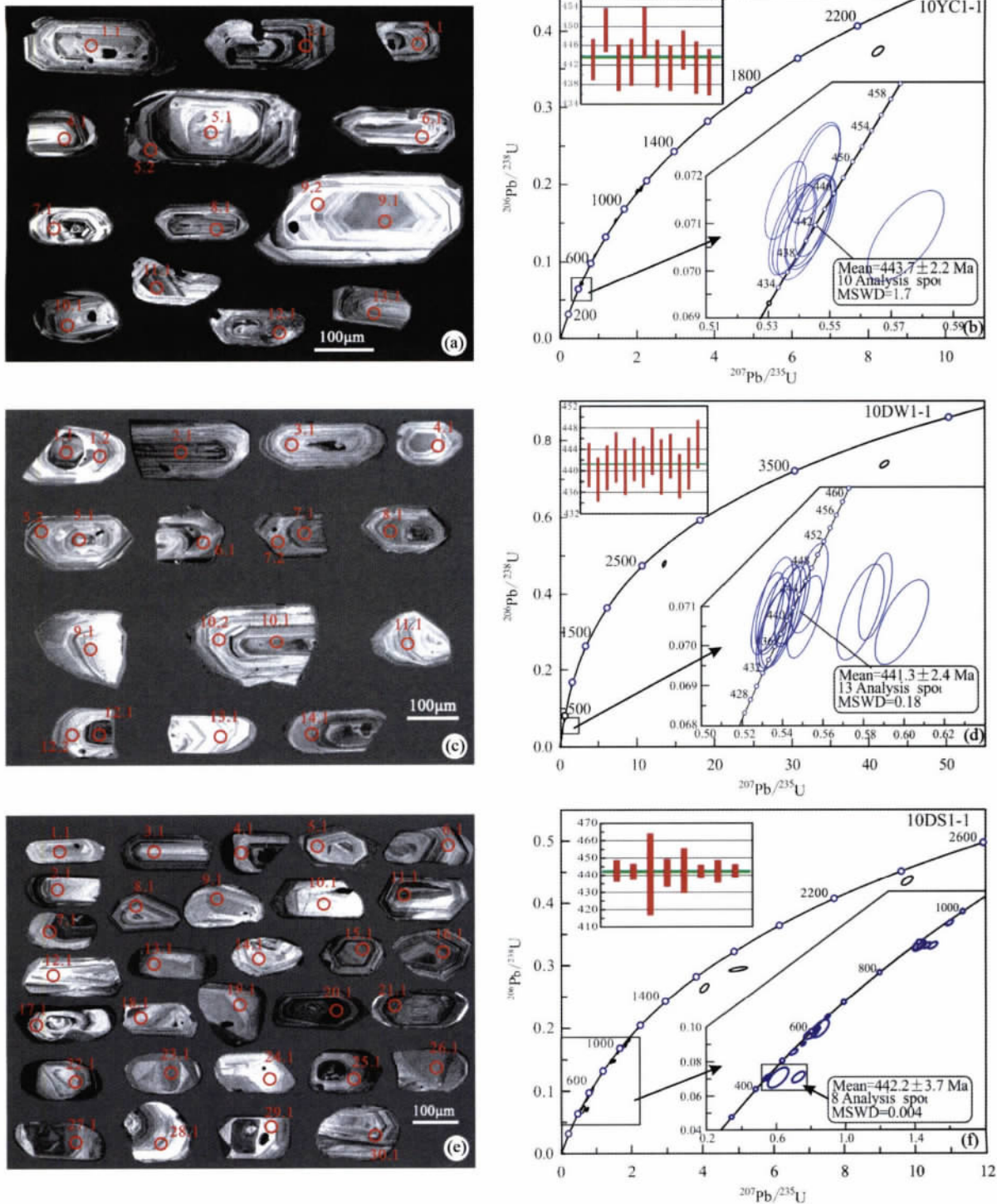


图6 (变质)中基性火山岩的锆石阴极发光图像和锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Cathodoluminescence images and zircon LA-MC-ICP-MS U-Pb concordia diagrams of metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks

1 这些分析点的 Th/U 比值在 0.37 ~ 0.86 区间变化,其中 2 颗捕获锆石和 1 颗继承性锆石残核的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在 941.9 ~ 3564.2Ma 之间,表明该地区的基底中可能存在有太古代地层;3 颗存在深色继承性锆石残核的锆石(图 6c 中的 1.1、3.1 和 4.1),其边部的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在 421.9 ~

422.5Ma 之间,这些锆石可能为变质作用形成的,代表变质年龄;而其它环带结构清楚的岩浆锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄相差较小,在 438.4 ~ 444.9Ma 之间变化,计算得到 13 个点的加权平均年龄值为 $441.3 \pm 2.4\text{Ma}$ (MSWD = 0.18) (图 6d),该年龄值应为火山岩浆形成的年龄。

4.4.3 安平镇白板中性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)

该中性火山碎屑岩(安山质晶屑凝灰岩)(10DS1-1)的锆石颗粒相对较细小,宽多在45~120 μm 之间,形态类型较为复杂,短柱状、长柱状和不规则形状、浑圆状、椭球状均有,有的锆石颗粒内部可见细小的包裹体。选出30颗锆石进行测年分析,分析数据见表2。其中呈不规则状的继承锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在963.3~2329.5Ma之间。而环带结构清楚的柱状锆石可分为三个年龄段:①5颗呈长柱状但边部发生圆化的锆石(图6e中的1.1、2.1、9.1、17.1和22.1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在889.0~890.6Ma之间,计算得到其加权平均年龄值为 $889.4 \pm 7.4\text{Ma}$ (MSWD=0.0045);②6颗呈柱状但边部发生圆化的锆石(图6e中的3.1、4.1、6.1、7.1、13.1和28.1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在591.1~609.3Ma之间,计算得到其加权平均年龄值为 $605.9 \pm 5.7\text{Ma}$ (MSWD=0.36);③8颗韵律环带结构十分清晰且晶形完好的棱柱状锆石(图6e中的5.1、8.1、10.1、11.1、12.1、16.1、18.1和20.1),其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄在440.5~442.7Ma之间,计算得到其加权平均年龄值为 $442.2 \pm 3.7\text{Ma}$ (MSWD=0.004)(图6f),该年龄值应为火山岩浆形成的年龄。从上述锆石特征看,其中①和②应为捕获的岩浆锆石,表明该地区深部存在 $605.9 \pm 5.7\text{Ma}$ 和 $889.4 \pm 7.4\text{Ma}$ 的岩浆岩,而 $442.2 \pm 3.7\text{Ma}$ 应为其火山岩浆形成的年龄。

5 讨论

5.1 (变质)中基性火山岩形成的时代

沿云开地块北缘岑溪-梧州断裂带两侧出露的变质岩系,由于缺乏可靠的同位素年龄资料,目前对其形成的时代争议较大。其中分布于岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌-波塘-三堡一带的变质岩系变质程度较深,并发生较强烈混合岩化作用,在早期的文献中一般将其时代定为中-晚奥陶世(广西区调队,1988),最近完成的1:25万贵县幅区域地质调查报告中则将其与云开地区的地层进行对比,将其划分为中-新元古界云开岩群,时代定为青白口纪(广西地质勘查总院,2013);而前述同位素年代学测试结果表明,糯垌镇油茶林场一带呈岩片状夹于该变质岩系中的斜长阳起石岩(10YC1-1)的岩浆锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb谐和年龄为 $443.7 \pm 2.2\text{Ma}$ 。沿着岑溪-梧州断裂带南东侧新地-白板一带分布的浅变质浊积岩建造,1:5万糯垌幅区调报告(广西区调队,1988)根据地层中采获的*Streptogratoys becki*等早志留世笔石化石而认为其时代为早志留世,但张伯友等(1997)获得夹于其中的枕状玄武岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法等时线年龄为 $261.36 \pm 5.23\text{Ma}$,则认为其喷发时代应为二叠纪;而前述同位素年代学测试结果表明,安平镇白板一带呈岩片状夹于浅变质浊积岩建造中的安山质晶屑凝灰岩(10DS1-1)的岩浆锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb谐和年龄为 $442.2 \pm 3.7\text{Ma}$ 。沿着研究区南部云开地块北缘归义-筋竹一带分布的中深变质岩系,早期

的文献中一般将其划分为志留系、奥陶系和寒武系,部分划分为泥盆系,近年来完成的1:25万玉林市幅区域地质调查报告中则将其划分元古界(广西区域地质调查研究院,2004);而前述同位素年代学测试结果表明,归义镇洞尾一带呈岩片状夹于该变质岩系中的斜长角闪岩(10DW1-1)的岩浆锆石LA-MC-ICP-MS U-Pb谐和年龄为 $441.3 \pm 2.4\text{Ma}$ 。精确的同位素年龄测试结果表明,上述三个地方出露的中-基性火山岩均属于早古生代(早志留世)时期形成的岩浆岩。由此表明,在钦-杭结合带南西段云开地块北缘的岑溪地区存在有加里东期中-基性火山岩。

5.2 岩石成因

前述地球化学的研究结果表明,岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带和断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质(中)基性火山岩具有较高的 TiO_2 (1.05%~1.69%)和较低的 P_2O_5 (0.05%~0.14%),与世界大洋中脊型拉斑玄武岩的含量相似。在微量元素比值蛛网图和稀土配分模式图(图4)上,前者具有略亏损的大离子亲石元素(LILE,如Ba、Th等)和轻稀土元素,而高场强元素和重稀土元素轻微富集,且Nb、Ta、P和Ti的负异常不明显,配分型式曲线与N-MORB的曲线较相似(图4a,b),在各类构造环境判别图解(图5)中,投点主要落入大洋中脊玄武岩区(MORB);而后者则表现出轻微富集大离子亲石元素(LILE,如Ba、Th、U等)和具有平坦或略富集的轻稀土元素,其配分型式曲线与E-MORB的曲线较相似,其间还出现Nb-Ta、P和Ti的微弱亏损现象(图4c,d),在各类构造环境判别图解(图5)中投点亦主要落入大洋中脊玄武岩区(MORB)。与前二者相比,岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的(变质)中基性火山(碎屑)岩则具有较低的 TiO_2 (0.50%~0.60%)和相对较高的 P_2O_5 (0.06%~0.20%),与世界大洋中脊型拉斑玄武岩的含量较相似;在微量元素比值蛛网图和稀土配分模式图(图4e,f)上,表现为明显富集大离子亲石元素和轻稀土元素,而高场强元素和重稀土元素相对亏损,其间还出现Nb-Ta、P和Ti等高场强元素的明显亏损,显示出与俯冲带有关的岛弧岩浆岩相似的地球化学特征;在各类构造环境判别图解(图5)中,其投点主要落入岛弧玄武岩区。在Ba/La-La/Yb图解(图7a)上看,岑溪-梧州断裂带北西侧糯垌镇油茶林场一带和断裂带南东侧云开地块北缘归义镇洞尾一带出露的变质(中)基性火山岩样品基本落在MORB附近,而岑溪-梧州断裂带南东侧安平镇白板、大爽一带出露的(变质)中基性火山(碎屑)岩则有由亏损地幔向来自俯冲沉积物区靠近的趋势,暗示其与消减沉积物组分的加入有密切的关系,很可能是在俯冲消减过程中遭受了消减沉积物流体的混染。

Condie(1999)认为玄武岩的La/Nb比值对于鉴别不同构造环境岩浆演化特征是十分灵敏的,一般认为MORB和OIB的 $\text{La}/\text{Nb} < 1.4$,而岛弧型玄武岩(IAB)的 $\text{La}/\text{Nb} > 1.4$ 。

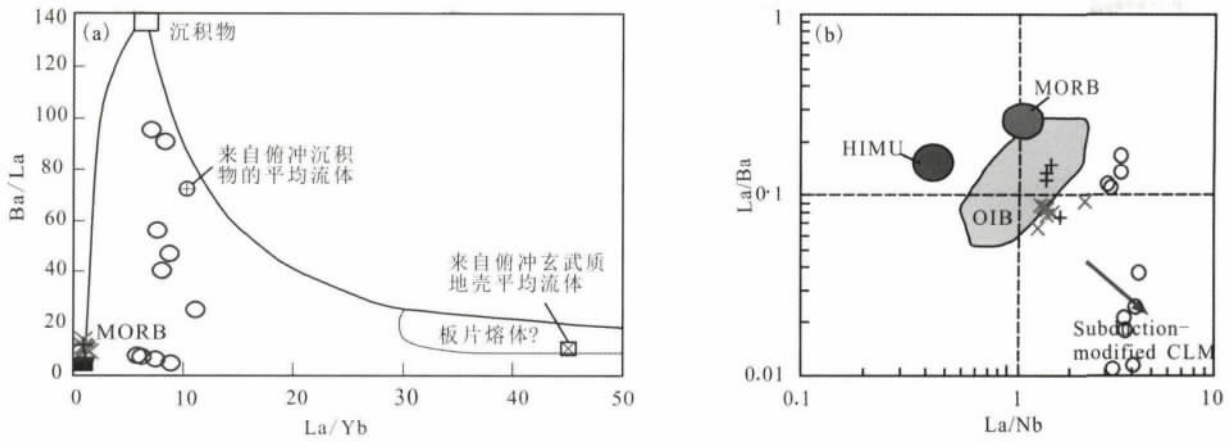


图7 (变质)中基性火山岩的 Ba/La-La/Yb 图解(a, 据 Saunders *et al.*, 1992)和 La/Nb-La/Ba 图解(b)

图 a 中: 沉积物和板片熔体成分据 Yogodzinski *et al.* (1995); 消减沉积物流体平均成分据 Aizawa *et al.* (1999); 消减玄武质地壳流体平均成分据 Kogiso *et al.* (1997); N-MORB 值据 Sun and McDonough (1989)

Fig. 7 Ba/La vs. La/Yb (a, after Saunders *et al.*, 1992) and La/Nb vs. La/Ba (b) diagrams of metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks

因此, La/Nb 比值常被作为判别不同构造环境玄武岩分离结晶历史的可靠指标。然而, 从本区(变质)中-基性火山岩的 La/Nb 比值看, 其中安平镇白板、大爽一带的(变质)中-基性火山(碎屑)岩具有较高的 La/Nb 比值(在 3.0 ~ 4.3), 展示出岛弧玄武岩的地球化学属性; 但糯垌镇油茶林场和归义镇洞尾一带 MORB 型变质(中)基性火山岩与安平镇白板、大爽一带的相比, 虽然具有相对较低的 La/Nb 比值(多数在 1.4 ~ 1.8 之间), 但亦显示出带有俯冲带有关的地球化学烙印。Condie (1999) 认为蛇绿岩中玄武岩的 La/Nb 比值特征是复杂的, 它是显示出 MORB 还是 IAB 的范围特征主要取决于其与俯冲消减带的关系, 如果为弧后盆地中与俯冲消减带有关的洋脊玄武岩, 或者是靠近俯冲消减带的洋脊玄武岩, 其往往显示出俯冲带有关的地球化学烙印 (Condie, 1999; Zheng *et al.*, 2007)。因此, 我们认为糯垌镇油茶林场一带 N-MORB 型变质(中)基性火山岩、安平镇白板-大爽一带岛弧型 (IAT) (变质) 中基性火山(碎屑)岩和归义镇洞尾一带 E-MORB 型变质基性火山岩可能分别属于由起源于受俯冲消减改造的岩石圈地幔, 并经历了部分结晶和消减沉积物流体混染的岩浆形成的弧前大洋中脊、岛弧和弧后扩张洋盆的岩浆岩系列。这种解释在 La/Nb-La/Ba 图解(图 7b)的投影中也得到证明: 大部分中基性火山岩样品具有相对比 OIB 稍高的 La/Nb 比值, 表明这些岩石可能存在岩石圈混染和俯冲消减流体的影响 (Saunders *et al.*, 1992)。

5.3 构造演化及其意义探讨

前面已提及, 由于扬子板块与华夏板块结合带(称之为钦-杭结合带)南西段的云开地块北缘至今未发现早古生代古洋壳残片(蛇绿岩)存在的证据, 有关两板块之间南华纪以前存在的大洋(古华南洋)是否一直持续到古生代(称之为

为华南残余洋盆), 最后通过加里东运动才最终关闭? 还是早期的大洋随着 Grenville 造山而关闭, 华南地区进入陆内发展阶段, 并伴随 Rodinia 超大陆的裂解而形成华南裂谷盆地, 不存在华南残余洋盆等问题一直存在严重分歧。概括起来, 有关扬子板块与华夏板块结合带(称之为钦-杭结合带)的构造演化问题, 目前有三种不同的观点: 1) 存在古-中元古代的古华南海洋, 该洋盆关闭, 扬子和华夏两板块发生碰撞是在中元古代末(王剑, 2000), 或青白口纪早期 (Li *et al.*, 2003; 舒良树, 2006; 李献华等, 2008), 或仅局部发育残留洋盆(许效松等, 1996)。两陆块聚合不久, 受成冰纪 Rodinia 超大陆裂解事件的影响, 华南大陆发生大规模裂解, 形成华南陆间裂谷带或海槽(杨明桂和梅勇文, 1997; 舒良树, 2006;

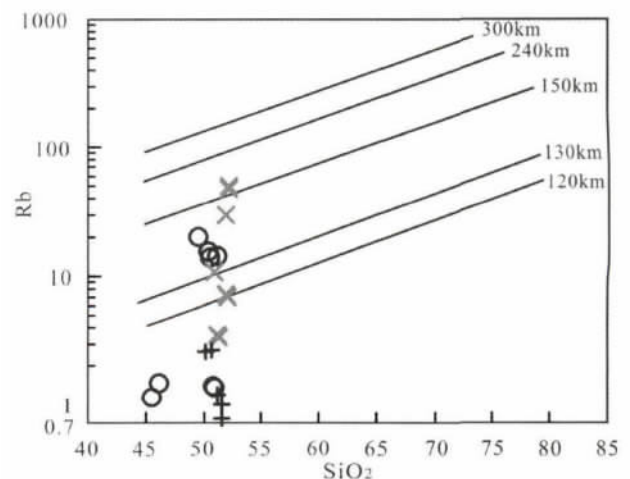


图8 (变质)中基性火山岩的 Rb-SiO₂ 图解(据 Ninkovich and Donn, 1976)

Fig. 8 Rb vs. SiO₂ diagram of metamorphic intermediate-mafic volcanic rocks (after Ninkovich and Donn, 1976)

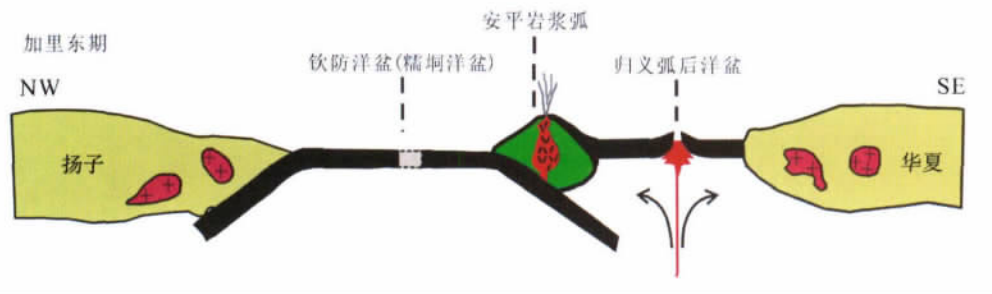


图9 钦-杭结合带南西段加里东期构造演化示意图

Fig. 9 Caledonian tectonic evolution in southwestern segment of Qinzhong-Hangzhou joint belt

于津海等, 2006); 2) 存在早古生代的古洋盆(古特提斯洋或华南小洋盆), 该洋盆在中-晚志留世扬子板块和华夏古陆发生碰撞而闭合(周永章等, 2012, 2015; 覃小锋, 2013, 2015; 彭松柏等, 2016), 其西南部(钦州-防城一带)可能一直到中三叠世的印支期才最终关闭(殷鸿福等, 1999; Yan *et al.*, 2006); 3) 扬子板块与华夏板块(华南板块)在晚古生代-中生代早期被深海大洋盆地(称之为板溪大洋、南盘江大洋或右江大洋)相隔离(Hsü *et al.*, 1988; Rowley *et al.*, 1989; 李继亮等, 1989; 吴浩若等, 1994, 1997; 赵崇贺等, 1996; 何科昭等, 1996), 钦-杭结合带是两板块在印支期发生碰撞形成的中生代造山带(Hsü *et al.*, 1988; Rowley *et al.*, 1989; 李继亮等, 1989; 赵崇贺等, 1996)。而云开地块北缘岑溪地区呈岩片状产出的 N-MORB、E-MORB 和 IAB 三种类型(变质)中-基性火山岩的厘定, 反映出钦-杭结合带南西存在有一个洋中脊-岛弧-弧后洋盆系统的发展演化。LA-MC-ICP-MS U-Pb 测年结果显示, 这些(变质)中-基性火山岩分别形成于 443.7 ± 2.2 Ma、 441.3 ± 2.4 Ma 和 442.2 ± 3.7 Ma, 表明它们属于早古生代(早志留世)洋陆俯冲-消减过程的地质记录。一般认为, 俯冲带的俯冲极性可以通过俯冲作用有关的火山岩浆与消减带的距离来判断, 而火山岩浆与消减带的距离可以通过火山岩的 Rb、SiO₂ 含量估算出来(Ninkovich and Donn, 1976)。从 Rb-SiO₂ 图解(图 8)中可以看出, 从糯垌洋中脊型(N-MORB 型)火山岩→安平岛弧型(IAB 型)火山岩→归义弧后盆地型(E-MORB 型)火山岩, 其与俯冲带的距离具逐渐增大趋势, 这种从北西向南东的云开地块(华夏板块)方向, 其与俯冲带距离逐渐增大的趋势, 指示了其俯冲极性是向南东的。

由此表明, 扬子板块和华夏板块结合带南西段有早古生代古洋盆的存在, 云开地块北缘岑溪地区呈岩片状产出的 N-MORB、E-MORB 和 IAB 三种类型中-基性火山岩可能是在加里东时期该洋盆岩石圈持续向南东俯冲消减至华夏板块(云开地块)之下的地球动力学背景下形成的产物(图 9)。

6 结论

通过以上对云开地块北缘岑溪地区(变质)中-基性火山

岩的岩石学、年代学以及地球化学的研究, 我们得出以下几点初步认识。

(1) 通过系统的野外区域地质调查, 在云开地块北缘岑溪地区识别出一系列(变质)中-基性火山岩块。锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 定年结果显示, 糯垌镇油茶林场一带斜长阳起石岩、归义镇洞尾一带斜长角闪岩和安平镇白板一带安山质晶屑凝灰岩的岩浆锆石 LA-MC-ICP-MS U-Pb 谱和年龄分别为 443.7 ± 2.2 Ma、 441.3 ± 2.4 Ma 和 442.2 ± 3.7 Ma, 表明其均为加里东期(早志留世)岩浆活动的产物。

(2) 地球化学的研究结果表明, 本区(变质)中-基性火山岩可区分为性质截然不同的三大类: 其中糯垌镇油茶林场一带中-基性火山岩显示与 N-MORB 型火山岩相似的地球化学特征; 归义镇洞尾一带基性火山岩则显示出其与 E-MORB 型火山岩相似的地球化学特征; 而安平镇白板、大爽一带中-基性火山(碎屑)岩显示与俯冲带有关的岛弧型(IAB)火山岩相似的地球化学特征。反映出云开地块北缘岑溪地区存在有 N-MORB、E-MORB 和 IAB 三种类型(变质)中-基性火山岩, 其可能分别形成于大洋中脊、弧后洋盆和岛弧环境, 是早古生代(早志留世)洋陆俯冲-消减过程的地质记录。

(3) 根据(变质)中-基性火山岩的研究资料, 并结合区域上其它一些研究成果认为, 扬子板块和华夏板块结合带(称之为钦-杭结合带)南西段有早古生代的古洋盆, 云开地块北缘岑溪地区呈岩片状产出的 N-MORB、E-MORB 和 IAB 型中-基性火山岩是在加里东时期该洋盆岩石圈持续向南东俯冲-消减至华夏板块(云开地块)之下的地球动力学背景下形成的产物。

致谢 野外工作中得到许华高工、胡贵昂高工和黄炳诚高工的帮助; 在 LA-MC-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年和数据分析过程中得到中国地质科学院矿产资源研究所侯可军博士的热心指导和帮助; 两位评审专家提出宝贵修改意见; 在此一并致以衷心的感谢!

References

Aizawa Y, Tatsumi Y and Yamada H. 1999. Element transport by dehydration of subducted sediments: Implication for arc and ocean

- island magmatism. *Island Arc*, 8(1): 38–46
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Guangxi Zhuang Autonomous Region. 1985. *Regional Geology of Guangxi Zhuang Autonomous Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1–853 (in Chinese)
- Cabanis B and Lecolle M. 1989. Le diagramme La/10-Y/15-Nb/8: Unoutil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de mélange et/ou de contamination crustale. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series II*, 309: 2023–2029
- Condie KC. 1981. *Archaean Greenstone Belts*. Amsterdam: Elsevier, 381
- Condie KC. 1999. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust. *Lithos*, 46(1): 95–101
- Ewart A, Collerson KD, Regelous M, Wendt JI and Niu Y. 1998. Geochemical evolution within the Tonga-Kermadec-Lau arc-back arc systems: The role of varying mantle wedge composition in space and time. *Journal of Petrology*, 39(3): 331–368
- He KZ, Zhao CH, Tai DQ, Nie ZT, Le CS, Zhou ZG and Ye MD. 1996. Discovery of Late Palaeozoic radiolarian silicolite in many places in northeastern Jiangxi ophiolitic melange belt. *Geoscience*, 10(3): 303–307 (in Chinese with English abstract)
- Hou KJ, Li YH and Tian YY. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28(4): 481–492 (in Chinese with English abstract)
- Hsü KJ, Sun S, Li JL, Chen HH, Pen HP and Sengor AMC. 1988. Mesozoic overthrust tectonics in South China. *Geology*, 16(5): 418–421
- Irvine TN and Baragar WRA. 1971. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 8(5): 523–548
- Jakeš P and White AJR. 1972. Major and trace element abundances in volcanic rocks of orogenic areas. *Geological Society of America Bulletin*, 83(1): 29–40
- Jin WS and Sun DZ. 1997. *Deep Seated Crustal Structure and Its Evolution of the South China Continent*. Beijing: Geological Publishing House, 1–175 (in Chinese)
- Kogiso T, Tatsumi Y and Nakano S. 1997. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: I. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, 148(1–2): 193–205
- Le Maitre RW, Streckeisen A, Zanettin B, Le Bas MJ, Bonin B, Bateman P, Bellieni G, Dudek A, Efremova S, Keller J, Lamere J, Sabine PA, Schmid R, Sørensen H and Woolley AR. 2002. *Igneous rocks: A Classification and Glossary of Terms: Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks*. Cambridge: Cambridge University Press, 236
- Li JL, Sun S, Hsü KJ, Chen HH, Pen HP and Wang QC. 1989. New evidences about the evolution of the South Cathay orogenic belt. *Scientia Geologica Sinica*, (3): 217–225 (in Chinese with English abstract)
- Li SZ, Santosh M, Zhao GC, Zhang GW and Jin C. 2012. Intracontinental deformation in a frontier of super-convergence: A perspective on the tectonic milieu of the South China Block. *Journal of Asian Earth Sciences*, 49: 313–329
- Li XH, Wang XC, Li WX and Li ZX. 2008. Petrogenesis and tectonic significance of Neoproterozoic basaltic rocks in South China: From orogenesis to intracontinental rifting. *Geochimica*, 37(4): 382–398 (in Chinese with English abstract)
- Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precambrian Research*, 122(1–4): 85–109
- Ludwig KR. 2003. *User's manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 4: 1–70
- Melson WG, Vallier TL, Wright TL, Byerly G and Nelen J. 1976. Chemical diversity of abyssal volcanic glass erupted along Pacific, Atlantic, and Indian Ocean sea-floor spreading centers. In: Sutton GH, Manghni MH, Moberly R and McAfee EU (eds.). *The Geophysics of the Pacific Ocean Basin and Its Margin*. Washington DC: American Geophysical Union, 351–367
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56(3–4): 207–218
- Ninkovich D and Donn WL. 1976. Explosive Cenozoic volcanism and climatic implications. *Science*, 194(4268): 899–906
- Omrani J, Agard P, Whitechurch H, Benoit M, Prouteau G and Jolivet L. 2008. Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: A new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398
- Pearce JA. 1984. A “users guide” to basalt discrimination diagrams. *Overseas Geology*, (4): 1–13
- Pearce JA. 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 10(2): 101–108
- Peng SB, Jin ZM, Fu JM, He LQ, Cai MH and Liu YH. 2006a. The geochemical evidences and tectonic significance of Neoproterozoic ophiolite in Yunkai area, western Guangdong Province, China. *Acta Geologica Sinica*, 80(6): 814–825 (in Chinese with English abstract)
- Peng SB, Jin ZM, Liu YH, Fu JM, He LQ, Cai MH and Wang YB. 2006b. Petrochemistry, chronology and tectonic setting of strong peraluminous anatectic granitoids in Yunkai orogenic belt, western Guangdong Province, China. *Earth Science*, 31(1): 110–120 (in Chinese with English abstract)
- Peng SB, Liu SF, Lin MS, Wu CF and Han QS. 2016. Early Paleozoic subduction in Cathaysia (I): New evidence from Nuodong ophiolite. *Earth Science*, 41(5): 765–778 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Zhou FS, Hu GA, Li GN, Xie LF, Zhou KH, Huang XQ and Pan YW. 2005. First discovery of MORB volcanic rock and its tectonic significance on the northern margin of the Yunkai block, southeastern Guangxi. *Geological Science and Technology Information*, 24(3): 20–24 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Pan YM, Li J, Li RS, Zhou FS, Hu GA and Zhong FY. 2006. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of the Yunkai metamorphic complex in southeastern Guangxi, China. *Geological Bulletin of China*, 25(5): 553–559 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Pan YM, Xia B, Li RS, Zhou FS, Hu GA and Lu GB. 2007. Geochemical characteristics and tectonic significance of metabasic volcanic rocks in tectonic belt of northern margin of Yunkai block, southeastern Guangxi. *Geochimica*, 36(3): 311–322 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Li J, Li RS, Zhou KH, Hu GA, Zhou FS, Li GN, Xie LF and Pan YW. 2008. *Geological Evolution of Bobai-Cenxi Orogenic Belt in the North Margin of Yunkai Block, Southeastern Guangxi*. Beijing: China Land Press, 1–152 (in Chinese)
- Qin XF, Wang ZQ, Hu GA, Cao J and Feng ZH. 2013. Geochronology and geochemistry of Hudong gneissic composite pluton in the junction of Guangdong and Guangxi provinces: Implications for Early Paleozoic tectono-magmatism along the northern margin of Yunkai massif. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3115–3130 (in Chinese with English abstract)
- Qin XF, Wang ZQ, Wang T, Xiong B, Feng ZH, Yang W, Zhu AH, Song J and Huang J. 2015. The reconfirmation of age and tectonic setting of the volcanic rocks of Yingyanguan Group in the eastern Guangxi: Constraints on the structural pattern of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou joint belt. *Acta Geoscientia Sinica*, 36(3): 283–292 (in Chinese with English abstract)
- Rowley DB, Ziegler AM, Gyou N, Hsü KJ, Sun S, Li JL, Chen HH, Pen HP and Sengor AMC. 1989. Comment and reply on “Mesozoic overthrust tectonics in South China”. *Geology*, 17(4): 384–387
- Saunders AD, Storey M, Kent RW and Norry MJ. 1992. Consequences of plume-lithosphere interactions. In: Storey BC, Alabaster T and

- Pankhurst RJ (eds.). Magmatism and the Causes of Continental Break-Up. Geological Society, London, Special Publications, 68 (1): 41–60
- Shu LS. 2006. Predevonian tectonic evolution of South China: From Cathaysian block to Caledonian period folded orogenic belt. Geological Journal of China Universities, 12(4): 418–431 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Vermeesch P. 2006. Tectonic discrimination diagrams revisited. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 7(6): Q06017
- Wan YS, Liu DY, Wilde SA, Cao JJ, Chen B, Dong CY, Song B and Du LL. 2010. Evolution of the Yunkai Terrane, South China: Evidence from SHRIMP zircon U-Pb dating, geochemistry and Nd isotope. Journal of Asian Earth Sciences, 37(2): 140–153
- Wang HN and Zhou LY. 2006. A further understanding in geological structure of South China. Geological Journal of China Universities, 12(4): 457–465 (in Chinese with English abstract)
- Wang J. 2000. Neoproterozoic Rifting History of South China: Significance to Rodinia Breakup. Beijing: Geological Publishing House, 1–146 (in Chinese)
- Wang YJ, Fan WM, Zhao GC, Ji SC and Peng TP. 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
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. Chemical Geology, 20: 325–343
- Wu HR, Kuang GD, Xian XY, Li YJ and Wang ZC. 1994. The Late Paleozoic radiolarian cherts in southern Guangxi and preliminary exploration on Paleo-Tethys in Guangxi. Chinese Science Bulletin, 39(12): 1025–1029
- Wu HR, Kuang GD and Wang ZC. 1997. Preliminary study on Late Paleozoic tectonic sedimentary settings in Guangxi. Scientia Geologica Sinica, 32(1): 11–18 (in Chinese with English abstract)
- Xu XS, Xu Q, Pan GT and Liu QH. 1996. Evolution of the South China Continent Compared with the Global Paleogeographic. Beijing: Geological Publishing House, 1–161 (in Chinese)
- Xu XS, Lui W, Men YP and Zhang HQ. 2012. Probe into the tectonic nature of Neoproterozoic southern Hunan-northern Guangxi marine basin. Acta Geologica Sinica, 86(12): 1890–1904 (in Chinese with English abstract)
- Yan DP, Zhou MF, Wang CY and Xia B. 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW China. Journal of Asian Earth Sciences, 28(4–6): 332–353
- Yang MG and Mei YW. 1997. Characteristics of geology and metallization in the Qinzhou-Hangzhou paleoplate juncture. Geology and Mineral Resources of South China, (3): 52–59 (in Chinese with English abstract)
- Yin FG, Wan F and Chen M. 2003. The multi-arc basin system on the southeastern margin of the Pan-Cathaysian continental group. Journal of Chengdu university of Technology (Science & Technology edition), 30(2): 126–131 (in Chinese with English abstract)
- Yin HF, Wu SB, Du YS and Peng YQ. 1999. South China defined as part of Tethyan Archipelagic Ocean system. Earth Science, 24(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)
- Yogodzinski GM, Kay RW, Volynets ON, Koloskov AV and Kay SM. 1995. Magnesian andesite in the western Aleutian Komandorsky region: Implications for slab melting and processes in the mantle wedge. Geological Society of America Bulletin, 107(5): 505–519
- Yu JH, Wei ZY, Wang LJ, Shu LS and Sun T. 2006. Cathaysia Block: A young continent composed of ancient materials. Geological Journal of China Universities, 12(4): 440–447 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BY, Zhao ZH, Shi MQ, Yang SF and Chen HL. 1998. Discovery of Permian islandarc basalts in the Cenxi area and the tectonic significance: A piece of evidence for the paleo-Tethyan tectonic belt in western Guangdong and eastern Guangxi. Chinese Science Bulletin, 43(21): 1838–1842
- Zhao CH, He KZ, Zhou ZG, Le CS, Nie ZT, Tai DQ and Ye N. 1996. New understanding on geotectonic problem in South China block. Geoscience, 10(4): 512–517 (in Chinese with English abstract)
- Zheng JP, Sun M, Zhao GC, Robinson PT and Wang FZ. 2007. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of late Paleozoic volcanic rocks beneath the Junggar basin, NW China: Implications for the formation and evolution of the basin basement. Journal of Asian Earth Sciences, 29(5–6): 778–794
- Zhou XM and Zhu YH. 1993. Petrological evidence on the Neoproterozoic geosuture zone and collisional belt in the Southeast China. In: Li JL (ed.). The Continental Lithospheric Structure and Geological Evolution of the Southeast China. Beijing: Metallurgical Industry Press, 87–97 (in Chinese)
- Zhou YZ, Zeng CY, Li HZ, An YF, Liang J, Lü WC, Yang ZJ, He JG and Shen WJ. 2012. Geological evolution and ore-prospecting targets in southern segment of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay juncture orogenic belt, southern China. Geological Bulletin of China, 31(2–3): 486–491 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YZ, Zheng Y, Zeng CY and Liang J. 2015. On the understanding of Qinzhou Bay-Hangzhou Bay metallogenic belt, South China. Earth Science Frontiers, 22(2): 1–6 (in Chinese with English abstract)
- Zhu JS, Cai XL, Zhao FQ, Cao JM, Du YS, Gao DZ and Wang Y. 2005. Three Dimension Structure of Lithosphere and Its Evolution in South China. Beijing: Geological Publishing House, 1–308 (in Chinese)

附中文参考文献

- 广西壮族自治区地质矿产局. 1985. 广西壮族自治区区域地质志. 北京: 地质出版社, 1–853
- 何科昭, 赵崇贺, 郇道乾, 聂泽同, 乐昌硕, 周正国, 叶木丹. 1996. 赣东北蛇绿混杂岩带中多处发现含晚古生代放射虫硅质岩. 现代地质, 10(3): 303–307
- 侯可军, 李延河, 田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. 矿床地质, 28(4): 481–492
- 金文山, 孙大中. 1997. 华南大陆深部地壳结构及其演化. 北京: 地质出版社, 1–175
- 李继亮, 孙枢, 许靖华, 陈海泓, 彭海波, 王清晨. 1989. 南华夏造山带构造演化的新证据. 地质科学, (3): 217–225
- 李献华, 王选策, 李武显, 李正祥. 2008. 华南新元古代玄武质岩石成因与构造意义: 从造山运动到陆内裂谷. 地球化学, 37(4): 382–398
- 彭松柏, 金振民, 付建明, 何龙清, 蔡明海, 刘云华. 2006a. 云开地区新元古代蛇绿岩的地球化学证据及其构造意义. 地质学报, 80(6): 814–825
- 彭松柏, 金振民, 刘云华, 付建明, 何龙清, 蔡明海, 王彦斌. 2006b. 云开造山带强过铝深熔花岗岩地球化学、年代学及构造背景. 地球科学, 31(1): 110–120
- 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(1): 来自糯垌蛇绿岩的新证据. 地球科学, 41(5): 765–778
- 覃小锋, 周府生, 胡贵昂, 李广宁, 谢凌峰, 周开华, 黄锡强, 潘艺文. 2005. 云开地块北缘 MORB 型火山岩的首次发现及其大地

- 构造意义. 地质科技情报, 24(3): 20-24
- 覃小锋, 潘元明, 李江, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 钟锋运. 2006. 桂东南云开地区变质杂岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学. 地质通报, 25(5): 553-559
- 覃小锋, 潘元明, 夏斌, 李容森, 周府生, 胡贵昂, 陆国斌. 2007. 云开地块北缘构造带中变质基性火山岩的地球化学特征及其大地构造意义. 地球化学, 36(3): 311-322
- 覃小锋, 李江, 李容森, 周开华, 胡贵昂, 周府生, 李广宁, 谢凌锋, 潘艺文. 2008. 云开地块北缘博白-岑溪造山带的形成与演化. 北京: 中国大地出版社, 1-152
- 覃小锋, 王宗起, 胡贵昂, 曹洁, 冯佐海. 2013. 两广交界地区壶坳片麻状复式岩体的年代学和地球化学: 对云开地块北缘早古生代构造-岩浆作用的启示. 岩石学报, 29(9): 3115-3130
- 覃小锋, 王宗起, 王涛, 熊彬, 冯佐海, 杨文, 朱安汉, 宋炯, 黄杰. 2015. 桂东鹰扬关群火山岩时代和构造环境的重新厘定: 对钦杭结合带西南段构造格局的制约. 地球学报, 36(3): 283-292
- 舒良树. 2006. 华南前泥盆纪构造演化: 从华夏地块到加里东期造山带. 高校地质学报, 12(4): 418-431
- 王鹤年, 周丽娅. 2006. 华南地质构造的再认识. 高校地质学报, 12(4): 457-465
- 王剑. 2000. 华南新元古代裂谷盆地演化——兼论与 Rodinia 解体的关系. 北京: 地质出版社, 1-146
- 吴浩若, 邝国敦, 咸向阳, 李曰俊, 王忠诚. 1994. 桂南晚古生代放射虫硅质岩及广西古特提斯的初步探讨. 科学通报, 39(9): 809-812
- 吴浩若, 邝国敦, 王忠诚. 1997. 广西晚古生代构造沉积背景的初步研究. 地质科学, 32(1): 11-18
- 许效松, 徐强, 潘桂棠, 刘巧红. 1996. 中国南大陆演化与全球古地理对比. 北京: 地质出版社, 1-161
- 许效松, 刘伟, 门玉澎, 张海全. 2012. 对新元古代湘桂海盆及邻区构造属性的探讨. 地质学报, 86(12): 1890-1904
- 杨明桂, 梅勇文. 1997. 钦-杭古板块结合带与成矿带的主要特征. 华南地质与矿产, (3): 52-59
- 尹福光, 万方, 陈明. 2003. 泛华夏大陆群东南缘多岛弧盆系统. 成都理工大学学报(自然科学版), 30(2): 126-131
- 殷鸿福, 吴顺宝, 杜远生, 彭元桥. 1999. 华南是特提斯多岛洋体系的一部分. 地球科学, 24(1): 1-12
- 于津海, 魏震洋, 王丽娟, 舒良树, 孙涛. 2006. 华夏地块: 一个由古老物质组成的年轻陆块. 高校地质学报, 12(4): 440-447
- 张伯友, 赵振华, 石满全, 杨树锋, 陈汉林. 1997. 岑溪二叠纪岛弧型玄武岩的首次厘定及大地构造意义——两广交界古特提斯构造带的重要证据. 科学通报, 42(4): 413-417
- 赵崇贺, 何科昭, 周正国, 乐昌硕, 聂泽同, 邵道乾, 叶枏. 1996. 关于华南大地构造问题的再认识. 现代地质, 10(4): 512-517
- 周新民, 朱云鹤. 1993. 中国东南部晚元古代碰撞造山带与地缝合带的岩石学证据. 见: 李继亮编. 东南大陆岩石圈结构与地质演化. 北京: 冶金工业出版社, 87-97
- 周永章, 曾长育, 李红中, 安燕飞, 梁锦, 吕文超, 杨志军, 何俊国, 沈文杰. 2012. 钦州湾-杭州湾构造结合带(南段)地质演化和找矿方向. 地质通报, 31(2-3): 486-491
- 周永章, 郑义, 曾长育, 梁锦. 2015. 关于钦-杭成矿带的若干认识. 地学前缘, 22(2): 1-6
- 朱介寿, 蔡学林, 赵风清, 曹家敏, 杜杨松, 高德章, 汪洋. 2005. 中国华南及东海地区岩石圈三维结构及演化. 北京: 地质出版社, 1-308