

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.048>



沙捞越古晋地区伦杜基性岩的形成时代、地球化学特征及其地质意义

房旭东^{1,2}, 张爱梅^{1*}, 王岳军³, 胡祥云², 钱 鑫³, 何慧莹³, 陈 敏¹

1. 自然资源部第三海洋研究所,福建厦门 361005
2. 中国地质大学地球物理与空间信息学院,湖北武汉 430074
3. 中山大学地球科学与工程学院,广东广州 510275

摘要:加里曼丹岛作为南海南部最大的岛屿,处于印度—澳大利亚板块、欧亚板块和菲律宾海板块的汇聚带,具有复杂的构造演化史。西加里曼丹岛古晋地区晚白垩世岩浆作用强烈,虽然该期基性岩分布少,但其成因研究对探讨西加里曼丹晚白垩纪构造演化过程具有重要意义。对古晋地区伦杜基性岩开展了详细的岩石学、年代学和地球化学研究,结果表明,该地区基性岩的岩石组成主要为辉绿岩和含橄榄石辉长岩,其中辉绿岩锆石定年显示其结晶年龄为 83.4 ± 0.9 Ma,说明岩体侵位于晚白垩世。岩石具有较为均一的 SiO_2 (52.01%~52.38%),大部分样品具有较低的 TiO_2 含量(0.81%~0.92%), K_2O 含量(0.37%~0.53%)和较高的 Al_2O_3 (14.00%~14.54%)、 MgO (7.40%~7.86%)。微量元素分析结果显示具有较低的稀土元素总量($\Sigma\text{REE}=43.96 \times 10^{-6}$ ~ 48.19×10^{-6}),呈LREE轻度富集的平坦型配分模式,富集大离子亲石元素,亏损Nb、Ta和Ti等高场强元素。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i=0.705\ 1\sim0.705\ 3$, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)=2.1\sim3.3$ 。综合分析表明,伦杜基性岩来源于受到俯冲沉积物和板片流体交代改造影响的地幔源区,并结合前人数据推测伦杜基性侵入岩形成于古太平洋俯冲格局下的弧后盆地构造背景,可能与中国东南沿海—海南—越南构成一条俯冲带。

关键词:伦杜基性岩;锆石U-Pb定年;E-MORB;弧后盆地;古太平洋俯冲;岩石学。

中图分类号: P548

文章编号: 1000-2383(2021)06-2133-12

收稿日期: 2019-11-21

Geochronology and Geochemical Characteristics of Lundu Mafic Rocks in Kuching Area, Sarawak

Fang Xudong^{1,2}, Zhang Aimei^{1*}, Wang Yuejun³, Hu Xiangyun², Qian Xin³, He Huiying³, Chen Min¹

1. Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Xiamen 361005, China
2. Institute of Geophysics & Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Kalimantan Island is the largest island in the south of South China Sea that has undergone complex tectonic evolution, resulting from convergence of the Indian-Australian, Pacific and Philippine Sea plates. The Kuching area of Kalimantan Island has a series of Late Cretaceous magmatic rocks, but the distribution of basic rocks is less. The petrogenesis of basic rocks is significant to reveal the tectonic framework and evolution history in that period. In this study, it presents new petrographic, geochronological

基金项目:自然资源部第三海洋研究所基本科研业务费(No.海三科2018002);国家自然科学基金项目(No.41506050);广东省基础与应用基础研究基金(No.2019B1515120019)。

作者简介:房旭东(1983—),男,博士,主要从事地球物理研究。ORCID:0000-0003-1392-8054. E-mail:fangxudong@io.org.cn

*通讯作者:张爱梅,E-mail:zhangaimei@io.org.cn

引用格式:房旭东,张爱梅,王岳军,等,2021.沙捞越古晋地区伦杜基性岩的形成时代、地球化学特征及其地质意义.地球科学,46(6):2133—2144.

and geochemical data for the Lundu gabbroic pluton in the Kuching area. The basic rocks are predominantly made of dolerite and gabbro. Zircon U-Pb dating result shows that the crystallization age of the gabbro is 83.4 ± 0.9 Ma, suggesting that the basic rocks intruded in the Late Cretaceous. These samples have low SiO_2 ranging from 52.01% to 52.38%, K_2O from 0.37% to 0.53% and TiO_2 ranging from 0.81% to 0.92% with high Al_2O_3 of 14.00%–14.54% and MgO of 7.40%–7.86%. These samples are geochemically characterized by enrichment of light rare earth elements (LREE) and large-ion lithophile elements (LILE) and flat distribution of heavy rare earth elements (HREE) with light low REE abundance ($\Sigma \text{REE} = 43.96 \times 10^{-6}$ – 48.19×10^{-6}). The representative samples show low initial $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios (0.705 1 to 0.705 3) and positive $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ values (2.1 to 3.3). Combination of trace elemental and isotopic results suggest that the parental magmas were likely derived from the mantle source modified by subduction-related fluid and sediments in the back-arc basin tectonic setting in the response of the subduction of the Paleopacific plate, and may link with Southeast China, Hainan island and Vietnam.

Key words: Lundu mafic rock; LA-ICP-MS zircon U-Pb dating; E-MORB; back-arc basin; subduction of Paleopacific; petrology.

0 引言

加里曼丹岛(也称婆罗洲)作为南海南部最大的一个岛屿,北部有马来西亚的沙捞越州和沙巴州,两州之间为文莱,南部有印度尼西亚的东、南、中、西加里曼丹四省.该岛处于印度—澳大利亚、太

平洋和菲律宾海板块的汇聚带,长期被新生代的俯冲带包围,具有复杂的构造演化史(图1;李旭和杨牧,2002;Hutchison,2005;颜佳新,2005).加里曼丹岛由于其独特的地理位置使得该区域成为关注的焦点.关于加里曼丹的古地理位置一直存在争议.在早期古地理位置重建研究中一些学者将整个加

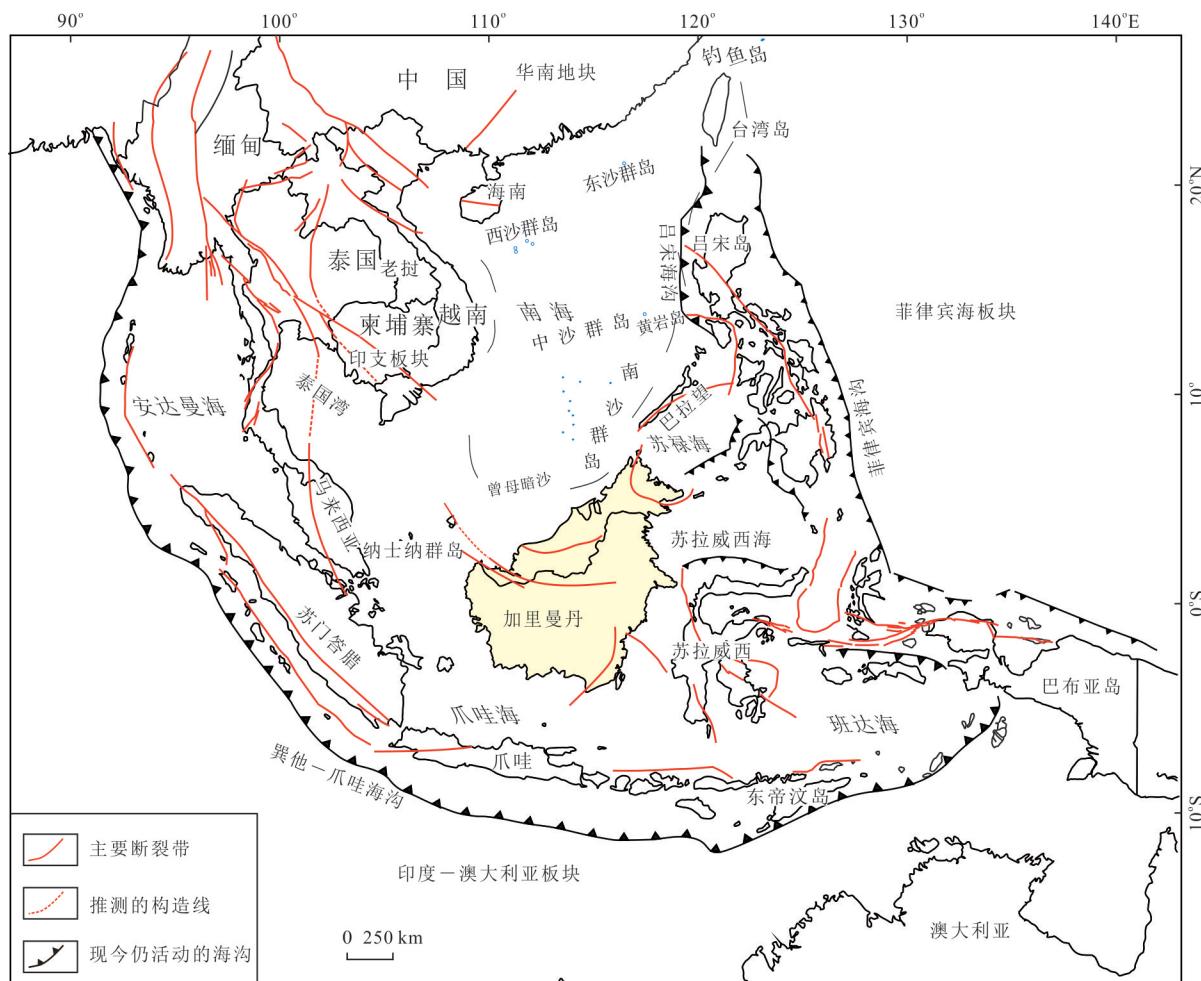


图1 加里曼丹岛所在地理位置图(改自 Hall, 2012)

Fig.1 Location of Kalimantan Island (modified from Hall, 2012)

里曼丹岛置于巽他陆块边缘(Ben-Avraham and Uyeda, 1973),而另一些学者则认为加里曼丹岛位于东南亚板块的核心位置,自早古生代从华夏陆块裂离(Metcalfe, 2009).现有研究表明,加里曼丹岛是由不同的微陆块组成,中生代至新生代期间不断向巽他大陆汇聚拼贴形成的不均一地壳块体(Metcalfe, 2009; Breitfeld *et al.*, 2017).加里曼丹岛各组成微陆块中演化历史较为复杂也最具争议的是加里曼丹岛古晋带,主要针对其中生代以来的俯冲机制和拼贴时限存在不同观点.一些学者认为是早中生代以来古太平洋向西不断俯冲,构造归属上与华南东南沿海、海南岛、印支地块相连(Breitfeld *et al.*, 2017; Hennig *et al.*, 2017);另一些学者则认为是早中生代起古特提斯洋向东俯冲,与马—泰锡带相连(Hutchison, 1975; Metcalfe, 2000; Hutchison and Tan, 2009).另外对古晋带何时拼贴到巽他大陆也有自古生代到晚中生代等不同认识(Ben-Avraham and Uyeda, 1973; Breitfeld *et al.*, 2017; Hennig *et al.*, 2017).古晋带位于马来西亚沙捞越州西部,北部以卢帕带为界,南部与晚白垩世的重要岩体Schwaner山为临(图2a).古晋带保存有至今发现加里曼丹岛内最老的泥盆纪一二叠纪地层,同时保存有良好的白垩纪花岗岩岩体露头,显示白垩纪花岗岩侵入在晚古生代变质岩中(Carter *et al.*, 2001).前人对这些花岗岩体的年代学进行了详细的研究,并对研究区的构造背景进行了制约(Breitfeld *et al.*, 2017; Hen-

nig *et al.*, 2017),但对同时期基性侵入岩的精细年代学和岩石成因未见有报道,这必将在一定程度上制约对该地区白垩纪岩浆岩成因、构造背景以及地幔源区性质及演化等科学问题的讨论和全面认识.

因此,针对古晋带内基性岩开展详细的研究,对于讨论该地区白垩纪岩浆演化及构造背景具有重要的地质意义.因此本文选择古晋伦杜地区出露的基性岩为研究对象,通过对该基性岩进行锆石U-Pb定年、岩石地球化学分析,以期更好地约束该基性岩的形成年龄、岩石成因和构造背景,为进一步研究古晋带的构造演化提供新的科学依据.

1 地质背景和岩石学

西加里曼丹传统上从北至南被划分为米里带、诗巫带和古晋带(图2a; Hutchison, 2005).“古晋带”呈近东西向从西沙捞越向中加里曼丹延伸,北边以卢帕尔断裂带为界,南边以Pinoh变质岩和加里曼丹Schwaner花岗岩为界(图2b, 2c).古晋带内主要保存有古生代到中生代的沉积岩和变质岩,被未变形的厚层晚白垩纪至新生代地层覆盖(Tan, 1993).长期以来,Tuang组变质岩被认为是研究区最老的前石炭纪基底岩石(Hutchison, 2005; Metcalfe, 2009).但近年来研究发现Tuang组中有些变质岩形成于晚三叠纪或早白垩纪,并不能代表该地区的老基底(Breitfeld *et al.*, 2017),此外研究区还出露有晚

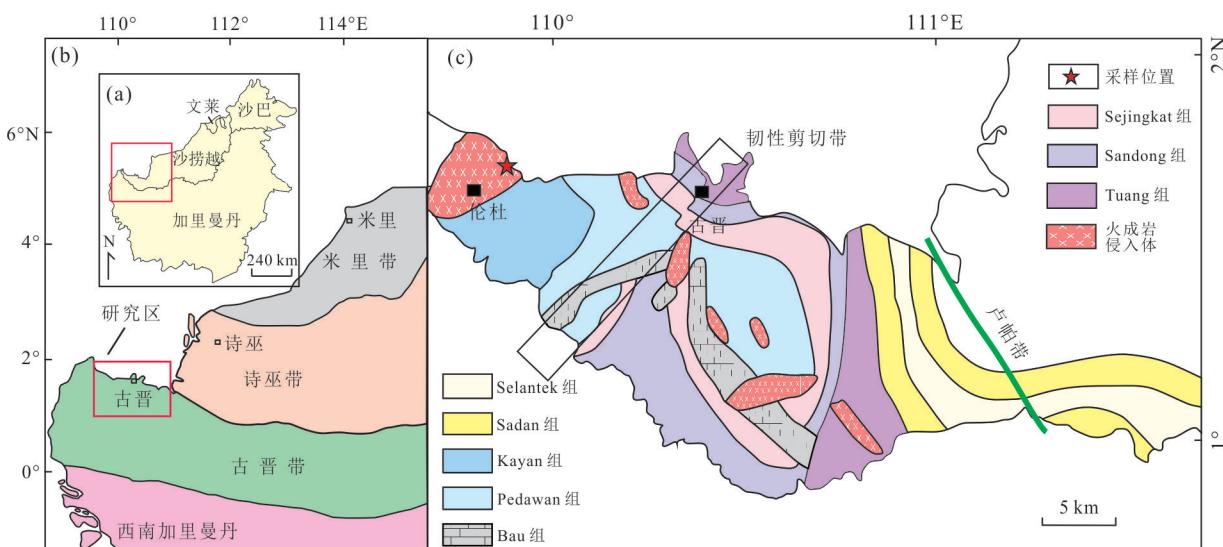


图2 (a)加里曼丹岛图;(b)西加里曼丹岛大地构造简图;(c)古晋地区概况及采样点位置

Fig.2 Simplified map of Kalimantan (a), simplified geological map in West Sarawak (b), geological map of Kuching area showing the sampling locations (c)

a.改自Breitfeld *et al.*, 2017;b.改自Hennig *et al.*, 2017;c.改自Aftab *et al.*, 2017

中生代变质岩(Sejingkat 组). 研究区主要出露三叠纪—新生代沉积地层, 其中三叠纪地层主要是 Sa-dong 组、Kuching 组和 Tuang 组, 其岩性包括泥岩、粉砂岩、砂岩、页岩和砾岩(Breitfeld *et al.*, 2017); 侏罗纪—白垩纪的地层主要为上侏罗统一下白垩统的 Kedadom、Bau 和 Pedawan 组, 岩性主要为钙质的沉积物和石灰岩(Tan, 1993; 颜佳新, 2005); 盖层为白垩纪—始新世的 Rajang 组(Tan, 1993). 研究区岩浆岩主要为三叠纪的西连(Serian)火山岩、Jagoi 花岗岩及大量的白垩纪岩浆岩. 目前研究区已有报道的白垩纪岩浆岩主要有 Pueh 岩体(77 Ma)和 Gading 岩体(80 Ma), 其地球化学结果显示具有火山弧到板内花岗岩特征, 指示可能处于后碰撞构造背景(Hennig *et al.*, 2017), 而未见有同时期基性岩浆的报道.

本次野外考察发现该研究区基性岩体呈 NW-SE 向展布, 沿海岸线分布, 东西长约 500 m, 南北宽约 50 m, 出露面积约 0.25 km². 该套基性侵入体主体岩性为辉绿岩, 少量含橄榄石辉长岩. 含橄榄石辉长岩和辉绿岩之间无明显接触界线, 为渐变过渡接

触关系. 岩体野外特征未显示明显变形. 部分基性岩体与闪长岩—花岗岩呈相互侵入关系, 部分岩石混合岩化(图 3a).

辉绿岩: 手标本呈灰绿色(图 3b), 中细粒辉绿结构, 矿物主体粒径为 1~3 mm, 块状构造, 蚀变较弱. 其主要组成矿物包括: 斜长石(40%~45%)、辉石(40%~45%)和角闪石(3%~5%), 黑云母较少(2%~4%), 副矿物为磁铁矿. 斜长石呈半自形板状, 多发育聚片双晶和卡钠复合双晶, 矿物粒径在 0.20~0.75 mm(图 3c); 辉石主要为单斜辉石和少量斜方辉石, 均呈半自形短柱状, 局部被黑云母或纤维状角闪石交代, 多具交代残余, 矿物粒径在 0.20~0.75 mm; 另外含有少量角闪石, 呈半自形柱状, 局部被黑云母交代.

含橄榄石辉长岩: 岩石新鲜面呈灰黑色, 中细粒辉长结构, 块状构造, 主要矿物粒径为 1~3 mm(图 3d). 其主要矿物组成为斜长石(>50%), 具有明显聚片双晶和卡钠复合双晶; 其次为单斜辉石(20%~25%), 主要为半自形短柱状. 斜方辉石和橄榄石含量较低, 斜方辉石含量约为 5%, 橄榄石含量



图 3 伦杜基性岩体野外及镜下特征照片

Fig.3 Field photographs and photomicrographs from the Lundu mafic rocks, Sarawak

a. 闪长岩脉侵入基性岩体;b. 辉绿岩手标本;c. 辉绿岩显微照片;d. 含橄榄石辉长岩显微照片;Ol. 橄榄石;Cpx. 单斜辉石;Pl. 斜长石

约为5%~10%.橄榄石呈粒状、轻微蚀变呈网状结构(图3d);此外还有少量的角闪石(<30%).

2 分析方法

2.1 锆石LA-ICP-MS U-Pb定年分析方法

锆石挑选在河北省欣航测绘院岩矿实验室测试中心完成.利用重磁法对新鲜样品中的单颗粒锆石进行筛选,并在双目镜下挑选晶形完好、透明度和色泽度好的锆石制备锆石靶.在原位分析之前,通过进行透射光和反射光和阴极发光(CL)图像确定锆石晶体形貌和内部结构,以选择锆石微量元素分析的最佳点和用于锆石成因的分析.锆石CL拍摄在武汉上谱分析科技有限责任公司完成.仪器为高真空扫描电子显微镜(JSM-IT100),配备有GATAN MINICL系统,工作电场电压为10.0~13.0 kV.最后根据阴极发光照射结果选择典型的锆石进行LA-ICP-MS测年分析.在本文实验中挑选的锆石均为透明一半透明柱状形态,锆石内部具有清晰的振荡环带,结合Th/U比值分析选择判定为岩浆成因锆石进行年代学的测试,代表性锆石的CL阴极发光图像如图4a所示.本次锆石LA-ICP-MS微量元素和U-Pb定年在武汉上谱分析科技有限责任公司分析完成,实验室使用Agilent 7700e ICP-MS装置,在实验中采用He气作为剥蚀物质的载气,相关分析方法见Zong *et al.*(2010).本次分析的激光束斑和频率分别为32 μm和5 Hz.U-Pb同位素定年和微量元素含量处理中采用91500标准锆石和玻璃标准物质NIST 610作外标分别进行同位素和微量元素分馏校正,每隔5个测试点插入两个91500标准锆石样品进行校正.实验过程中应用标准锆石91500进行同位素分馏校正.数据处理利用软件ICPMsDataCal(Liu *et al.*, 2010)完成,锆石加权平均年龄计算及谐和图绘制利用Isoplot 4.11软件(Ludwig, 2003)完成.

2.2 主量、微量元素地球化学测试

用于主量、微量元素测试的样品均为200目以下的粉末样,全岩主量和微量元素组成分析均在武汉上谱分析科技有限责任公司完成.主量元素采用X荧光光谱仪测定(XRF),流程如下:称取~1.0 g烘干样品,在1 000 °C马弗炉中灼烧2 h,冷却后称重计算烧失量;分别称取6.0 g Li₂B₄O₇-LiBO₂固体助熔剂、0.6 g 样品和0.3 g 氧化剂(NH₄NO₃)置于铂金坩埚中,在1 150 °C熔样炉中熔融14 min;熔融物倒出后

置于扁平玻璃片上,用XRF荧光光谱分析,精度优于5%.详细的实验流程及数据处理方法见Zong *et al.*(2017).微量元素采用Agilent 7700e ICP-MS测定分析,流程如下:取样品50 mg置于Teflon溶样弹中,加入1 mL HNO₃和1 mL HF;将Teflon溶样弹放入钢套,拧紧后置于190 °C烘箱中加热24 h以上;待溶样弹冷却,开盖后置于140 °C电热板上蒸干,然后加入1 mL HNO₃并再次蒸干;加入1 mL高纯HNO₃、1 mL MQ水和1 mL内标In(浓度为1×10⁻⁶),再次将Teflon溶样弹放入钢套,拧紧后置于190 °C烘箱中加热12 h以上;将溶液转入聚乙烯料瓶中,并用2% HNO₃稀释至100 g以备ICP-MS测试.样品的处理过程、分析精密度和准确度见Liu *et al.*(2008).

2.3 Sr-Nd同位素分析

全岩Sr-Nd同位素在武汉上谱分析科技有限责任公司完成.Sr和Nd的化学分离分别使用HF+HClO₄+HNO₃溶解样品,再利用常规的两阶段离子交换树脂进行化学分离,分离后溶液在多接收热电离质谱仪(Neptune Plus)上测定.在实验测试过程中,利用国际标准物质NBS-987(Sr)和JNd(Nd)来监测仪器的状态,BCR-2来监测测试结果的准确度.NBS-987的Sr同位素标准以⁸⁶Sr/⁸⁷Sr=0.119 4为标准化值,测得⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.710 244;JNd的Nd同位素标准化值采用¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.721 9,测得¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 116(Li *et al.*, 2012);国际标准样品BCR-2的实测Sr、Nd同位素比值分别为⁸⁷Sr/⁸⁶Sr=0.705 010和¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd=0.512 627.详细的Rb-Sr、Sm-Nd化学制备,质谱测定方法以及各类标准样品测定结果见Li *et al.*(2012).

3 分析结果

3.1 锆石LA-ICP-MS U-Pb定年结果

古晋地区伦杜辉绿岩的锆石CL图像和²⁰⁶Pb/²³⁸U-²⁰⁷Pb/²³⁵U谐和图如图4a所示,LA-ICP-MS锆石U-Pb年代学测定结果和锆石的稀土元素含量分别见附表1和附表2.样品17SA-47A1的锆石光学显微镜下颜色呈无色透明,晶形为自形一半自形柱状晶体,少数为不规则的他形或者椭圆形,大部分锆石具有较为典型的岩浆振荡韵律环带(图4a),锆石的Th/U比值为0.25~1.73(整体大于0.4),属于岩浆结晶的产物(Hoskin and Schaltegger, 2003).本次测试获得的锆石定年结果和锆石稀

土元素数据见附表 1 和附表 2。在样品 17SA-47A1 的 19 个测点中, 分析点都具有明显的左倾特点, 具有明显的 Ce 正异常和 Eu 负异常(图 4b)。样品锆石年代学结果显示, 19 个分析测试点中有 8 个分析点显示出 132~2 473 Ma 较老的表观年龄, 可能是来自围岩的捕掳锆石, 而未参与加权平均年龄的计算。剩余 11 个分析点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 83.4 ± 0.9 Ma (MSWD=1.2; 图 4a), 因此 83.4 ± 0.9 Ma 可以代表该岩体的侵位年龄。

3.2 全岩地球化学特征

本文测试了 6 件岩石样品, 其地球化学分析结果见附表 3。样品的 SiO_2 含量为 52.01%~52.38%; 具有较低的 TiO_2 (0.81%~0.92%) 和 K_2O (0.37%~0.53%) 含量, 较高的 Al_2O_3 (14.00%~14.54%)、 MgO (7.40%~7.86%)、 $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{t}$ (10.28%~11.16%) 和 CaO (10.36%~11.2%) 含量。此外, 样品的全碱

含量($\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$)变化于 2.22%~2.61%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值为 0.20~0.26。在 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ 图解中(图 5a), 样品落于辉长岩—辉长闪长岩区域内。样品在 Zr-Y 图解中落入拉斑质岩石的范围内(图 5b), 不同于晚白垩世同一时期(~ 80 Ma)华南陆块的东南沿海和内陆出露的钙碱性基性岩脉(葛小月等, 2003; Wang *et al.*, 2003; Xie *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008)。

伦杜含橄榄石辉长岩和辉绿岩样品稀土元素总量较低, 为 43.96×10^{-6} ~ 48.19×10^{-6} 。在球粒陨石标准化图解(图 6a)上, 稀土元素配分曲线显示为 LREE 轻度富集的平坦型配分模式, 类似于富集洋中脊玄武岩(E-MORB)配分曲线。样品轻、重稀土分异不明显, $(\text{La/Yb})_N=1.23 \sim 1.49$, $(\text{Gd/Yb})_N=0.91 \sim 0.99$, Eu 异常不明显($\delta\text{Eu}=0.87 \sim 0.90$)。在微量元素蛛网图上(图 6b), 伦杜地区基性岩显示出明

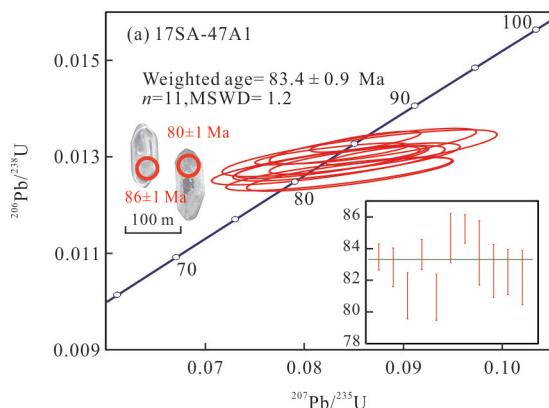


图 4 (a)沙捞越伦杜辉绿岩(17SA-47A1)锆石 U-Pb 谱和图和(b)锆石稀土元素球粒陨石配分模式图

Fig.4 Concordia diagram of zircons U-Pb dating from the Lundu mafic rocks (17SA-47A) (a) and chondrite-normalized REE patterns from the Lundu mafic rocks, Kuching (b)

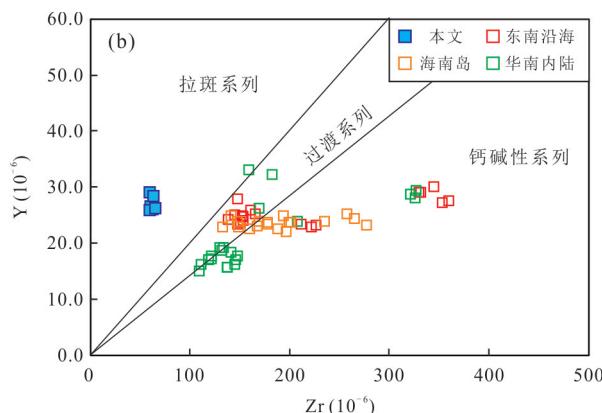
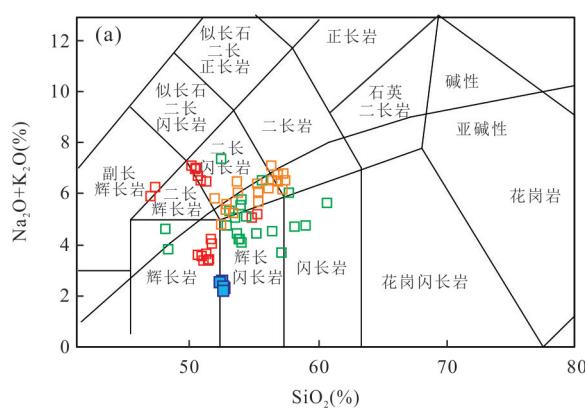
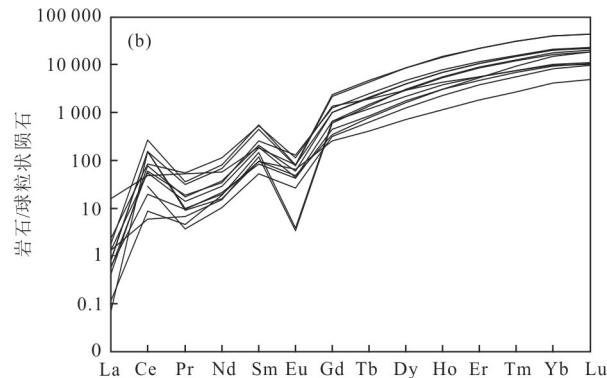


图 5 伦杜基性岩 $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ (a) 和 Zr-Y 判别(b)图解

Fig.5 Rock classification TAS $\text{SiO}_2-\text{K}_2\text{O}+\text{Na}_2\text{O}$ diagrams (a) and Zr-Y diagram of the Lundu mafic rocks, Kuching (b)
a据 Le Bas *et al.*(1986); b据 Barrett *et al.*(1994); 华南内陆基性岩数据来自 Wang *et al.*(2003); 海南岛基性岩数据来自葛小月等(2003);
东南沿海基性岩来自 Xie *et al.*(2006) 和 Chen *et al.*(2008)

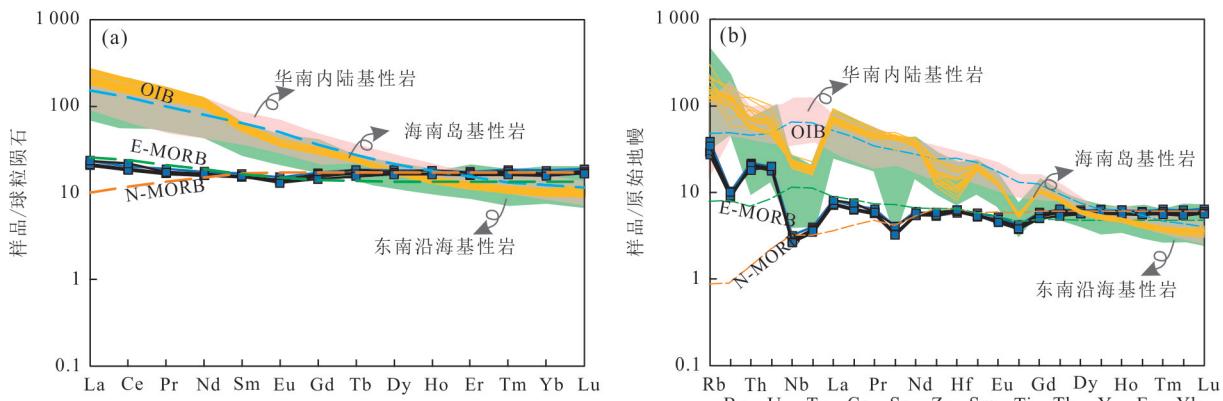


图6 伦杜基性岩的球粒陨石标准化稀土元素配分图(a)和原始地幔标准化微量元素蛛网图(b)

Fig.6 Chondrite-normalized REE pattern (a) and PM-normalized incompatible element spiderdiagram (b) for the Lundu mafic rocks, Kuching

用于标准化的球粒陨石和原始地幔数据分别引自 Taylor and McLennan (1995) 和 Sun and McDonough (1989)

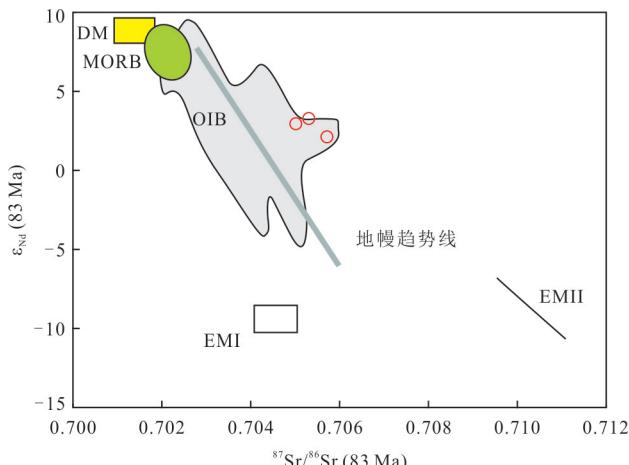
图7 伦杜基性岩($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图(改自张云等,2019)

Fig.7 ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$)_i- $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagram of the Lundu mafic rocks (modified from Zhang *et al.*, 2019)

显的高场强元素 Nb 和 Ta 的亏损和轻微的 Ti 亏损, 同时富集 Th、U 和 Rb 等元素, 有别于同时期华南内陆的 OIB 型基性岩和东南沿海具有岛弧特征玄武岩的配分特征。样品的 Sr 负异常结合轻度的 Eu 异常, 表明样品有一定程度的斜长石分离结晶作用。Zr/Nb 比值介于 26.39~35.26, Nb/La 比值介于 0.34~0.41。

本次共对 3 件样品进行了 Sr-Nd 同位素分析, 数据结果见附表 3。分析结果显示, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 介于 0.705 993~0.706 627, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 介于 0.512 742~0.512 806。对测定的锆石 U-Pb 加权年龄进行计算后得出, 岩体整体具有较为均一的 Sr-Nd 同位素组成, $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 比值介于 0.705 1~0.705 6, 具有亏损

的 Nd 同位素组成, $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i$ 范围为 0.512 640~0.512 700, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为正值 (+2.1~+3.3)(图 7)。

4 讨论

4.1 岩石成因

地球化学数据显示, 伦杜基性岩均属于拉斑系列。测试样品的烧失量低 (<0.61%), 表明样品未经过明显的低温蚀变作用。样品的 Ba 含量为 69.93×10^{-6} ~ 71.41×10^{-6} , Sr 的含量为 67.49×10^{-6} ~ 86.44×10^{-6} , 两者的含量近乎一致, 表明在岩浆分离的过程中 Ba-Sr 的总分配系数 KD 接近于 1, 说明虽有岩浆的结晶分异作用, 但在此次分析元素变化的行为中不占主导作用。

样品 Sr-Nd 同位素显示其 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ (0.705 1~0.705 6) 以及 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 (+2.1~+3.3) 变化范围较小, 且 MgO 与 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 和 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值之间不具有相关性, 暗示岩浆上升过程中没有受到明显的地壳物质混染。此外样品的 Nb/La 比值很低, 介于 0.34~0.41, 类似于未被地壳混染的 MORB 值 (Sun and McDonough, 1989), 而远低于大陆地壳的 Nb/La 比值 (0.7); 样品具有较高的 MgO 含量和 Mg[#], 这些地化特征都说明岩浆在上升过程中受到地壳混染的可能性较小。

伦杜基性岩样品的 REE 配分模式呈 LREE 略富集的平缓右倾型 (图 6a), 样品微量元素蛛网图 (图 6b) 显示总体为类似于 E-MORB 的配分模型, 但亏损高场强元素 Nb、Ta 和 Ti, 类似于岛弧火山岩的配分特征。样品的 TiO₂ 含量较低 (0.81%~0.93%)、

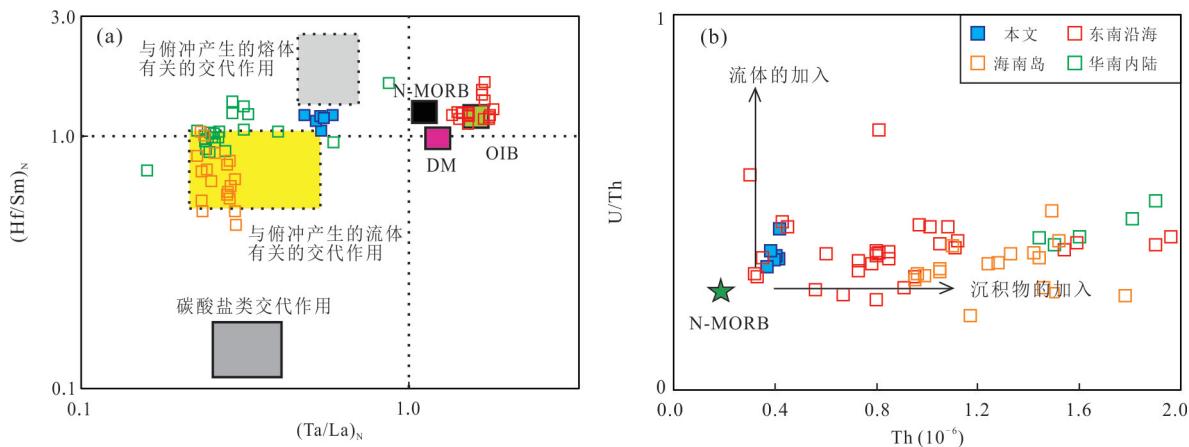
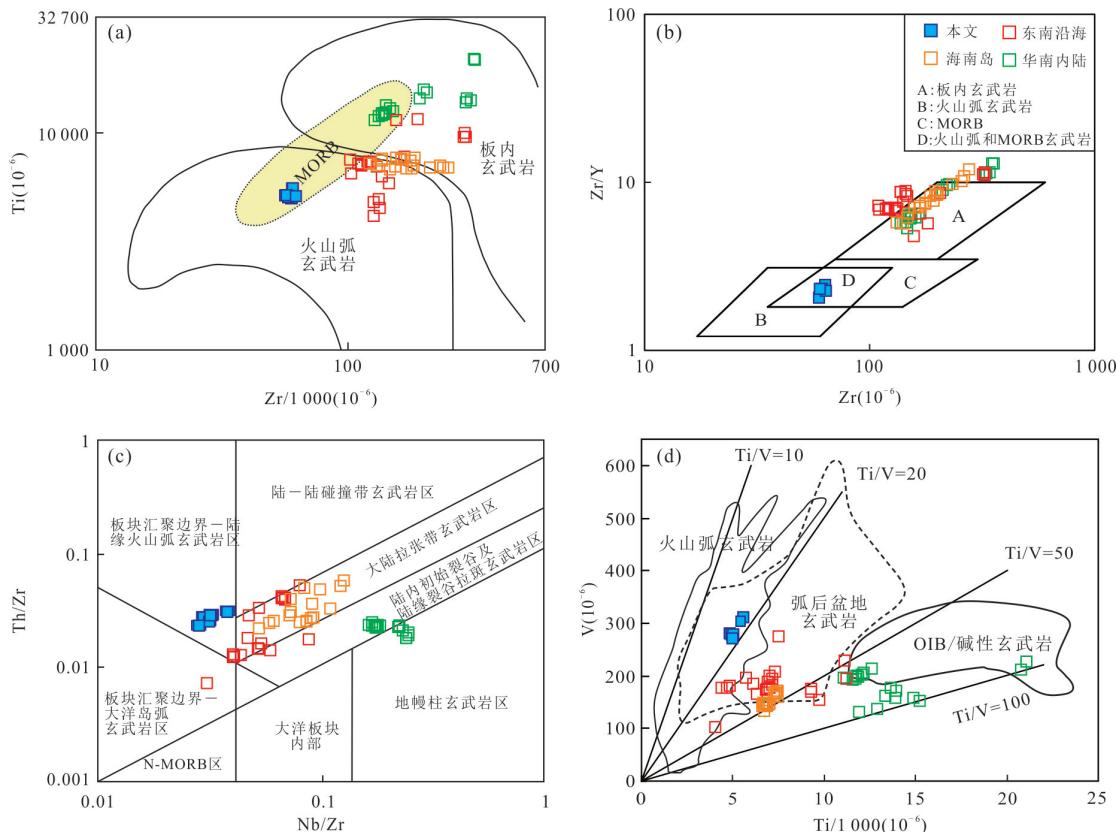
图 8 古晋伦杜地区基性岩的 $(\text{Ta}/\text{La})_N$ — $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ (a)和U/Th—Th判别图解(b)Fig.8 Plots of $(\text{Ta}/\text{La})_N$ — $(\text{Hf}/\text{Sm})_N$ (a) and U/Th—Th (b) from Lundu mafic samples, Kuching

图 9 (a)沙捞越伦杜基性岩 Ti—Zr 判别图解、(b)Zr/Y—Y 判别图解、(c)Th/Zr—Nb/Zr 和(d)V—Ti/1 000 判别图解

Fig.9 Ti—Zr (a), Zr/Y—Y (b), Th/Zr—Nb/Zr (c), V—Ti/1 000 (d) for the Lundu mafic rocks, Kuching

数据来源同图 3

Al_2O_3 含量较高 (14.17%~14.63%)，表明其源区可能有弧组分的参与。 La/Nb (2.43~2.95) 和 Ba/Nb (30.9~37.25) 远高于 E-MORB 的 La/Nb (0.76) 和 Ba/Nb (6.9) 比值，而接近于大陆陆壳的 La/Nb (2.2) 和 Ba/Nb (54) 比值 (Sun and McDonough, 1989)，也暗示岩浆源区混合有壳源物质。它们的 Th 含量虽

然较低 (1.55~1.86)，但有着高的 Th/Ce 比值 (0.12~0.20) 和 Th/La (0.28~0.36) 比值，类似大陆地壳的 Th/Ce (~0.15) 与 Th/La (~0.30) 比值 (Taylor and McLennan, 1995; Plank, 2005)。如前所述，研究区这种弧型微量元素特征跟地壳混染的关系不大，而应该是源区受到俯冲板片熔体或者流体

交代富集作用的影响(冯光英等,2018).样品的Nb/U(4.50~5.48)比值远低于典型未被地壳混染的MORB(Nb/U=47±10)(Hoffmann *et al.*, 1986; Sun and McDonough, 1989),结合(Ta/La)_N—(Hf/Sm)_N图解上(图8a)显示该样品的地球化学特征与俯冲产生的流体或者熔体的交代作用有关,反映样品可能受到俯冲带来的物质影响,是由俯冲组分改造的富集地幔楔部分熔融的产物.在U/Th-Th的判别图解中(图8b),样品的U/Th比值有升高的趋势,表明基性岩的源区有俯冲流体加入的趋势.大部分样品的Th含量略高于N-MORB,也表明源区受到了再循环沉积物的改造.因此推测伦杜地区基性岩的源区来自受俯冲流体和沉积物改造的富集型MORB源区.

4.2 岩体时代及其大地构造意义

本次研究对古晋伦杜地区辉绿岩进行了锆石U-Pb测年,获得其²⁰⁶Pb/²³⁸U加权平均年龄为83.4±0.9 Ma,结合其锆石内部明显振荡环带特征

及Th/U比值(>0.4),表明该侵入岩体的侵位时代为晚白垩世,代表了晚中生代的一期构造热事件.

目前针对研究区白垩纪时期受古太平洋俯冲影响的观点被学者们普遍接受,具有争议的地方在于俯冲拼贴的终止时间.Hutchison(2010)根据研究区古近纪后期未发现有与俯冲相关的弧岩浆记录,因此认为俯冲在60 Ma结束;Hall(2012)则认为俯冲结束时间为90~80 Ma;另一些学者通过研究进一步认为俯冲作用在90 Ma左右趋近停止,并进入碰撞后的构造松弛阶段(Metcalfe, 2009; Hennig *et al.*, 2017).然而,如前所述,我们的研究表明,伦杜地区基性岩为晚白垩世拉斑质基性侵入岩,其地球化学特征类似于E-MORB.E-MORB型的基性岩形成的构造背景较为复杂,一般认为在大洋中脊、弧前盆地和弧后盆地等均有可能形成(王金荣等,2017).研究样品在Zr-Ti图解中落在火山弧玄武岩和MORB的交汇地带而非板内玄武岩(图9a);Zr-Zr/Y判别图中进一步说明其地球化学特征不同于

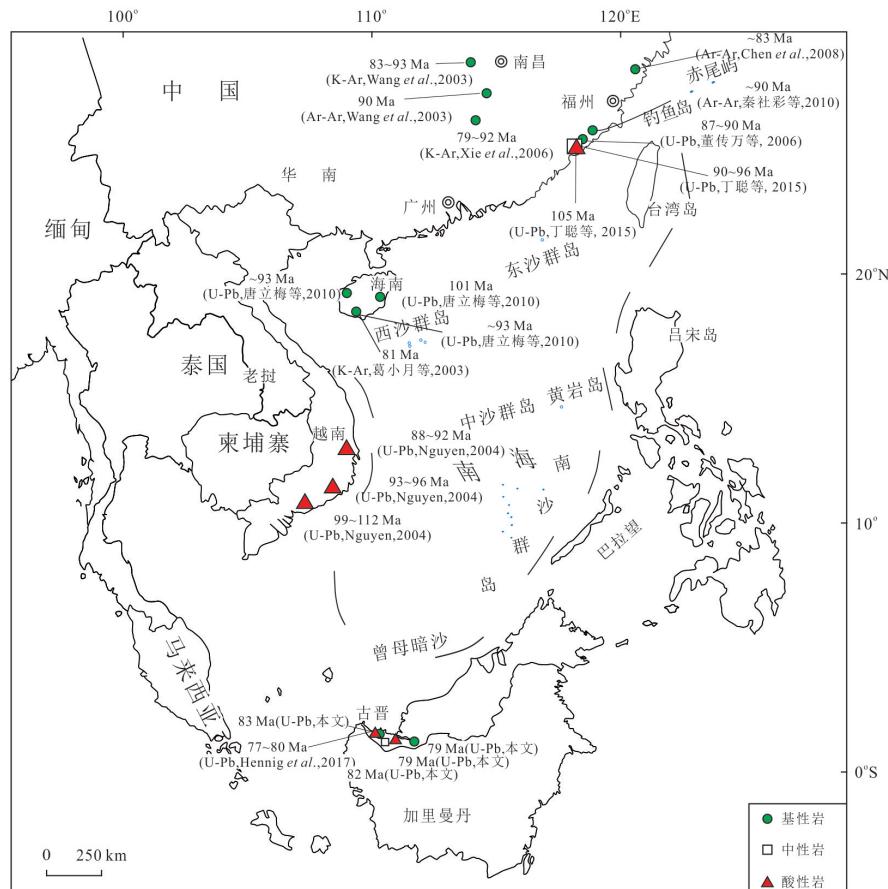


图10 研究区及邻近区域晚白垩世岩浆岩出露分布

Fig.10 Simplified map showing the distribution of Late Cretaceous magmatism rock locations in the study area and adjacent areas

板内玄武岩(图 9b),这些地球化学特征暗示其可能形成于俯冲背景下弧后盆地的构造背景,而非碰撞后的构造背景。样品的 Th/Zr 和 Nb/Zr 的比值指示其形成于汇聚边界(图 9c),靠近陆缘火山弧的区域,而非大洋内部或大洋岛弧区域,也不同于同时期形成于华南内陆拉张作用下的陆内裂谷型基性岩(Wang *et al.*, 2003; Chen *et al.*, 2008)。这一结果在 Ti-V 的构造判别图(图 9d)中得到进一步证实,样品均分布于弧后盆地与岛弧玄武岩的交界区域。这些特征通常被认为同弧前或弧后的构造环境直接相关(冯光英等,2018)。不同的是,俯冲带弧前环境形成的岩浆岩通常显示变化范围较大的主量元素特征,并形成玻安岩—高镁安山岩—安山岩—长英质岩浆岩系列(Wang *et al.*, 2007),而目前在研究区尚未有该类型岩石的报道,主要的岩浆岩类型为岛弧型火山岩和花岗岩,同时伦杜基性岩具有较为均一的主量元素组成,因此其形成环境不可能为弧前环境,应该为弧后环境。

根据已有的地球物理、钻探资料以及年代学资料分析表明在华南、东南沿海、海南岛、南海海区以及越南均有大规模的晚白垩世基性岩墙出露(图 10; 葛小月等, 2003; Wang *et al.*, 2003; 周蒂等, 2005; 董传万等, 2006; Xie *et al.*, 2006; Chen *et al.*, 2008; 秦社彩等, 2010; 唐立梅等, 2010; 丁聰等, 2015)。对比本文基性岩的年代学和地球化学数据,东南沿海,如福建永泰(ca.82 Ma; Chen *et al.*, 2008)和江西等地(ca.80 Ma; Xie *et al.*, 2006),钙碱性基性岩同样拥有 Nb-Ta 和 Ti 负异常,但拥有较高的轻稀土元素和大离子亲石元素(图 6a 和 6b),其地球化学特征显示兼具板内玄武岩和岛弧玄武岩的特征(图 9a, 9b);从古晋地区—海南岛—东南沿海—华南内陆,总体自海沟向陆地方向依次分布为拉斑系列岩石、钙碱性系列岩石和碱性系列的岩石(图 5b),符合俯冲极性,暗示太平洋俯冲在白垩纪晚期依然对华南—海南岛—古晋地区有持续的影响。结合本次研究发现的 83 Ma E-MORB 基性岩浆记录,进一步确定了古太平洋俯冲在此时期依然处于主导作用,中国东南沿海—海南—越南—西加里曼丹地区可能共同组成一个白垩纪的俯冲带。另外根据已有的数据显示具有碰撞后岩浆地球化学特征的花岗岩大多形成于 80 Ma 之后(Hennig *et al.*, 2017 和作者未刊数据),由此推测,研究区俯冲结束时间应该晚于 83 Ma。

5 结论

(1) 研究区发育有 83.4±0.9 Ma 的拉斑质基性侵入岩。该岩石显示出类似 E-MORB 的稀土和微量元素配分模式,源自晚白垩世 E-MORB 型地幔源区,同时受到俯冲带来的流体和沉积物的影响。

(2) 综合主微量和同位素特征,推测古晋地区伦杜基性岩形成于弧后盆地构造背景,可能与中国东南沿海—海南—越南构成一条俯冲带,受控于古太平洋的俯冲影响。

致谢:野外考察得到中国地质大学(武汉)冯庆来教授的指导,样品采集得到李海东和沙巴大学 Junaidi Asis 讲师的帮助,在此表示衷心的感谢。两位审稿人及主编提出的问题和建议为本文质量的提升起到至关重要的作用,在此深表感谢。

附表见本刊官网(<http://www.earth-science.net>)。

References

- Aftab, A.K., Wan, H.A., Meor, H.H., et al., 2017. Tectonics and Sedimentation of SW Sarawak Basin, Malaysia, NW Borneo. *Journal of the Geological Society of India*, 89(2): 197–208. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0584-0>
- Barrett, T.J., MacLean, W.H., 1994. Chemostratigraphy and Hydrothermal Alteration in Exploration for VHMS Deposits in Greenstones and Younger Volcanic Rocks. In: Lentz, D.R., ed., Alteration and Alteration Processes Associated with Ore-Forming Systems. *Short Course Notes*, 11:433–467.
- Ben-Avraham, Z., Uyeda, S., 1973. The Evolution of the China Basin and the Mesozoic Paleogeography of Borneo. *Earth and Planetary Science Letters*, 18(2): 365–376. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(73\)90077-0](https://doi.org/10.1016/0012-821x(73)90077-0)
- Breitfeld, H.T., Hall, R., Galin, T., et al., 2017. A Triassic to Cretaceous Sundaland-Pacific Subduction Margin in West Sarawak, Borneo. *Tectonophysics*, 694: 35–56. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.11.034>
- Carter, A., Roques, D., Bristow, C., et al., 2001. Understanding Mesozoic Accretion in Southeast Asia: Significance of Triassic Thermotectonism (Indosinian Orogeny) in Vietnam. *Geology*, 29(3):211–214.
- Chen, C.H., Lee, C.Y., Lu, H.Y., et al., 2008. Generation of Late Cretaceous Silicic Rocks in SE China: Age, Major Element and Numerical Simulation Constraints. *Journal of Asian Earth Sciences*, 31(4–6):479–498. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2007.08.002>
- Ding, C., Zhao, Z.D., Yang, J.B., et al., 2015. Geochronology,

- Geochemistry of the Cretaceous Granitoids and Mafic to Intermediate Dykes in Shishi Area, Coastal Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 31(5): 1433—1447(in Chinese with English abstract).
- Dong, C.W., Zhang, D.R., Xu, X.S., et al., 2006. SHRIMP U-Pb Dating and Lithogeochemistry of Basic-Intermediate Dike Swarms from Jinjiang, Fujian Province. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1696—1702(in Chinese with English abstract).
- Feng, G.Y., Liu, S., Niu, X.L., et al., 2018. Geochronology, Geochemistry and Petrogenesis of Early-Middle Permian Mafic Intrusion in Zhangguangcai Range, China. *Earth Science*, 43(4): 1293—1306(in Chinese with English abstract).
- Ge, X.Y., Li, X.H., Zhou, H.W., 2003. Geochronologic, Geochemistry and Sr Nd Isotopes of the Late Cretaceous Mafic Dike Swarms in Southern Hainan Island. *Geochimica*, 32(1): 11—20(in Chinese with English abstract).
- Hall, R., 2012. Late Jurassic-Cenozoic Reconstructions of the Indonesian Region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570—571: 1—41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>
- Hennig, J., Breitfeld, H.T., Hall, R., et al., 2017. The Mesozoic Tectono-Magmatic Evolution at the Paleo-Pacific Subduction Zone in West Borneo. *Gondwana Research*, 48: 292—310. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.05.001>
- Hofmann, A.W., Jochum, K.P., Seufert, M., et al., 1986. Nb and Pb in Oceanic Basalts: New Constraints on Mantle Evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(1—2): 33—45. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(86\)90038-5](https://doi.org/10.1016/0012-821x(86)90038-5)
- Hoskin, P.W.O., Schaltegger, U., 2003. The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. In: Hanchar, J.M., Hoskin, P.W.O., eds., *Zircon*. De Gruyter, Boston, 27—62.
- Hutchison, C.S., 1975. Ophiolite in Southeast Asia. *Geological Society of America Bulletin*, 86(6): 797—806.
- Hutchison, C.S., 2005. Geology of North-West Borneo. Elsevier, Amsterdam, 421.
- Hutchison, C.S., 2010. Oroclines and Paleomagnetism in Borneo and South-East Asia. *Tectonophysics*, 496(1—4): 53—67. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2010.10.008>
- Hutchison, C.S., Tan, D.N.K., 2009. Geology of Peninsular Malaysia. University of Malaya, Kuala Lumpur.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., et al., 1986. A Chemical Classification of Volcanic Rocks Based on the Total Alkali-Silica Diagram. *Journal of Petrology*, 27(3): 745—750. <https://doi.org/10.1093/petrology/27.3.745>
- Li, C.F., Li, X.H., Li, Q.L., et al., 2012. Rapid and Precise Determination of Sr and Nd Isotopic Ratios in Geological Samples from the Same Filament Loading by Thermal Ionization Mass Spectrometry Employing a Single-Step Separation Scheme. *Analytica Chimica Acta*, 727: 54—60. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.03.040>
- Li, X., Yang, M., 2002. Movement and Evolution of Crustobody in Kalimantan and Adjacent Areas. *Geotectonica et Metallogenesis*, 26(3): 235—239(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y.S., Hu, Z.C., Gao, S., et al., 2008. In Situ Analysis of Major and Trace Elements of Anhydrous Minerals by LA-ICP-MS without Applying an Internal Standard. *Chemical Geology*, 257: 34—43.
- Liu, Y.S., Gao, S., Hu, Z.C., et al., 2010. Continental and Oceanic Crust Recycling-Induced Melt-Peridotite Interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb Dating, Hf Isotopes and Trace Elements in Zircons from Mantle Xenoliths. *Journal of Petrology*, 51(1—2): 537—571. <https://doi.org/10.1093/petrology/egp082>
- Ludwig, K.R., 2003. Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, Berkeley.
- Metcalfe, I., 2000. The Bentong-Raub Suture Zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18(6): 691—712. [https://doi.org/10.1016/s1367-9120\(00\)00043-2](https://doi.org/10.1016/s1367-9120(00)00043-2)
- Metcalfe, I., 2009. Late Palaeozoic and Mesozoic Tectonic and Palaeogeographical Evolution of SE Asia. *Geological Society, London, Special Publications*, 315(1): 7—23. <https://doi.org/10.1144/sp315.2>
- Nguyen, T.T.B., Satir, M., Siebel, W., et al., 2004. Granitoids in the Dalat Zone, Southern Vietnam: Age Constraints on Magmatism and Regional Geological Implications. *International Journal of Earth Sciences*, 93(3): 329—340. <https://doi.org/10.1007/s00531-004-0387-6>
- Plank, T., 2005. Constraints from Thorium/Lanthanum on Sediment Recycling at Subduction Zones and the Evolution of the Continents. *Journal of Petrology*, 46(5): 921—944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>
- Qin, S.C., Fan, W.M., Guo, F., et al., 2010. Petrogenesis of Late Mesozoic Diabase Dikes in Zhejiang-Fujian Provinces: Constraints from Ar-Ar Dating and Geochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26(11): 3295—3306(in Chinese with English abstract).
- Sun, S.S., McDonough, W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313—345. <https://doi.org/>

- 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Tan, D. N. K., 1993. Geology of the Kuching Area, West Sarawak, Malaysia. Geological Survey of Malaysia, Report, 16, Kuching.
- Tang, L. M., Chen, H. L., Dong, C. W., et al., 2010. Late Mesozoic Tectonic Extension in SE China: Evidence from the Basic Dike Swarms in Hainan Island, China. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4): 1204—1216(in Chinese with English abstract).
- Taylor, S. R., McLennan, S. M., 1995. The Geochemical Evolution of the Continental Crust. *Reviews of Geophysics*, 33 (2): 241—265. <https://doi.org/10.1029/95rg00262>
- Wang, J. R., Chen, W. F., Zhang, Q., et al., 2017. Preliminary Research on Data Mining of N-MORB and E-MORB: Discussion on Method of the Basalt Discrimination Diagrams and the Character of MORB's Mantle Source. *Acta Petrologica Sinica*, 33(3): 993—1005(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Guo, F., 2003. Geochemistry of Early Mesozoic Potassium-Rich Diorites - Granodiorites in Southeastern Hunan Province, South China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *Geochemical Journal*, 37(4): 427—448. <http://doi.org/10.2343/geochemj.37.427>
- Wang, Y. J., Zhao, G. C., Fan, W. M., et al., 2007. LA-ICP-MS U-Pb Zircon Geochronology and Geochemistry of Paleoproterozoic Mafic Dykes from Western Shandong Province: Implications for Back-Arc Basin Magmatism in the Eastern Block, North China Craton. *Precambrian Research*, 154(1—2): 107—124. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.12.010>
- Xie, G. Q., Hu, R. Z., Mao, J. W., et al., 2006. K-Ar Dating, Geochemical, and Sr-Nd-Pb Isotopic Systematics of Late Mesozoic Mafic Dikes, Southern Jiangxi Province, Southeast China: Petrogenesis and Tectonic Implications. *International Geology Review*, 48(11): 1023—1051. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.48.11.1023>
- Yan, J. X., 2005. Tectonic Implications of Marine Mesozoic Deposits from Kalimantan and Malay Peninsula. *Journal of Tropical Oceanography*, 24(2): 26—32(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Sun, L. X., Zhang, T. F., et al., 2019. Geochronology, Geochemistry and Its Tectonic Significance of the Early Paleozoic Magmatic Rocks in Northern Langshan, Inner Mongolia. *Earth Science*, 44(1): 179—192(in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Liu, H. L., Chen, H. Z., 2005. Mesozoic-Cenozoic Magmatism in Southern South China Sea and Its Surrounding Areas and Its Implications to Tectonics. *Geotectonica et Metallogenesis*, 29(3): 354—363(in Chinese with English abstract).
- Zong, K. Q., Liu, Y. S., Gao, C. G., et al., 2010. In Situ U-Pb Dating and Trace Element Analysis of Zircons in Thin Sections of Eclogite: Refining Constraints on the Ultra High-Pressure Metamorphism of the Sulu Terrane, China. *Chemical Geology*, 269(3—4): 237—251. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.09.021>
- Zong, K. Q., Klemd, R., Yuan, Y., et al., 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.
- ### 附中文参考文献
- 丁聰,赵志丹,杨金豹,等,2015.福建石狮白垩纪花岗岩与中基性脉岩的年代学与地球化学. *岩石学报*, 31(5): 1433—1447.
- 董传万,张登荣,徐夕生,等,2006.福建晋江中—基性岩墙群的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学. *岩石学报*, 22(6): 1696—1702.
- 冯光英,刘燊,牛晓露,等,2018.张广才岭地块早—中二叠世镁铁质侵入岩体的年代学、地球化学及岩石成因. *地球科学*, 43(4): 1293—1306.
- 葛小月,李献华,周汉文,2003.琼南晚白垩世基性岩墙群的年代学、元素地球化学和 Sr-Nd 同位素研究. *地球化学*, 32(1): 11—20.
- 李旭,杨牧,2002.加里曼丹及邻区壳体的运动与演化. *大地构造与成矿学*, 26(3): 235—239.
- 秦社彩,范蔚茗,郭峰,等,2010.浙闽晚中生代辉绿岩脉的岩石成因:年代学与地球化学制约. *岩石学报*, 26(11): 3295—3306.
- 唐立梅,陈汉林,董传万,等,2010.中国东南部晚中生代构造伸展作用:来自海南岛基性岩墙群的证据. *岩石学报*, 26 (4): 1204—1216.
- 王金荣,陈万峰,张旗,等,2017.N-MORB 和 E-MORB 数据挖掘:玄武岩判别图及洋中脊源区地幔性质的讨论. *岩石学报*, 33(3): 993—1005.
- 颜佳新,2005.加里曼丹岛和马来半岛中生代岩相古地理特征及其构造意义. *热带海洋学报*, 24(2): 26—32.
- 张云,孙立新,张天福,等,2019.内蒙古狼山北部早古生代岩浆岩年代学、地球化学特征及构造意义. *地球科学*, 44 (1): 179—192.
- 周蒂,刘海龄,陈汉宗,2005.南沙海区及其周缘中—新生代岩浆活动及构造意义. *大地构造与成矿学*, 29(3): 354—363.