



桂东南燕山早期岩浆岩年代学、地球化学特征及地质意义

申妍菲, 康志强, 杨 锋, 吴玲玲, 穆泊仲, 周 璐

桂林理工大学 地球科学学院/广西隐伏金属矿产勘查重点实验室, 广西 桂林 541006

摘 要: 对桂东南南渡、县容地区中基性岩浆岩展开岩相学、年代学、全岩地球化学和 Sr-Nd 同位素研究, 结果表明南渡、县容中基性岩浆岩主体分别为二长岩和霓辉正长岩, 锆石 U-Pb 年龄分别为 159.8 Ma 和 156.8 Ma, 均形成于晚侏罗世。南渡二长岩偏基性, 县容正长岩偏中性, 在 $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ 图上, 样品整体为钾玄岩系列。轻稀土元素明显富集于重稀土元素, 总体表现为轻稀土富集右倾型, 其中南渡样品还表现出明显 Ba 负异常, 县容样品表现出明显 Sr、Ti 负异常。同位素特征显示南渡样品的 I_{Eu} 值为 0.70554~0.70959, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -10.58~-0.75, 主要落在富集地幔且靠近全球硅酸盐地球区域; 县容样品的 I_{Eu} 值为 0.69033~0.69615, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为 0.36, 主要落在亏损地幔与富集地幔之间。综上所述, 研究区晚中生代处于古太平洋板块西向俯冲的弧后伸展构造背景。其中南渡二长岩样品应由富集地幔部分熔融形成, 幔源岩浆在上升过程中受到地壳物质的混染, 存在一定量的斜长石分离结晶作用; 而县容霓辉正长岩可能是在富集地幔部分熔融的影响下, 受热导致新生下地壳部分熔融形成。

关键词: 侏罗纪; 岩浆岩; 锆石 U-Pb 定年; 地球化学; 广西

Geochronology and geochemistry of the Early Yanshanian magmatic rocks in southeastern Guangxi: Geological implication

SHEN Yan-fei, KANG Zhi-qiang, YANG Feng, WU Ling-ling, MU Ji-zhong, ZHOU Lu

School of Earth Sciences/Guangxi Key Laboratory of Hidden Metal Mineral Exploration, Guilin University of Technology, Guilin 541006, Guangxi Autonomous Region, China

Abstract: The paper studies the petrography, geochronology, whole-rock geochemistry, and Sr-Nd isotope of the intermediate-basic magmatic rocks in Nandu and Tanrong areas of southeastern Guangxi. The results show that the main rock types of Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks are monzonite and aegirine-augite syenite, with the zircon U-Pb ages of 159.8 Ma and 156.8 Ma, respectively, indicating both formed during the Late Jurassic. The Nandu monzonite is more basic, while the Tanrong syenite is relatively intermediate. In the $\text{SiO}_2\text{-K}_2\text{O}$ diagram, all samples plot within the shoshonitic series. The LREEs are significantly enriched relative to HREEs, exhibiting an overall right-

收稿日期: 2024-01-27; 修回日期: 2024-03-06. 编辑: 李兰英.

基金项目: 国家重点研发计划项目“难熔元素和同位素分析技术的综合应用研究”(2020YFA0714804); 国家自然科学基金项目“特提斯喜马拉雅带中、东段镁铁质岩石成因及其对新特提斯洋早期演化历史的约束”(42173048); 广西硕士研究生创新项目“山东微山鄱山碱性杂岩体地球化学特征及其地质意义”(YCSW2022313).

作者简介: 申妍菲 (1998—), 女, 硕士研究生, 岩石地球化学研究方向, 通信地址 广西壮族自治区桂林市雁山区雁山街 319 号, E-mail//853168338@qq.com

通信作者: 康志强 (1979—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石地球化学研究, 通信地址 广西壮族自治区桂林市雁山区雁山街 319 号, E-mail//ZK99201@163.com

引用格式: 申妍菲, 康志强, 杨锋, 吴玲玲, 穆泊仲, 周璐. 桂东南燕山早期岩浆岩年代学、地球化学特征及地质意义[J]. 地质与资源, 2025, 34(3): 277-290.

Shen Y F, Kang Z Q, Yang F, Wu L L, Mu J Z, Zhou L. Geochronology and geochemistry of the Early Yanshanian magmatic rocks in southeastern Guangxi: Geological implication [J]. Geology and Resources, 2025, 34(3): 277-290.

dipping pattern. The Nandu samples show obvious negative Ba anomalies, while Tanrong samples distinct negative Sr and Ti anomalies. The isotope characteristics reveal that the I_{Sr} values of Nandu samples range from 0.70554 to 0.70959, with the $\varepsilon\text{Nd}(t)$ values from -10.58 to -0.75 , mostly falling within the enriched mantle and close to the Bulk Silicate Earth(BSE) area. The I_{Sr} values of Tanrong samples are 0.69033–0.69615, with the $\varepsilon\text{Nd}(t)$ value of 0.36, mainly plotting between depleted mantle and enriched mantle fields. In summary, the study area was in a back-arc extensional tectonic setting associated with the westward subduction of Paleo-Pacific Plate during the Late Mesozoic. The Nandu monzonite samples were likely formed by partial melting of enriched mantle material, with the mantle-derived magma contaminated by crustal material during ascent, accompanied by a certain degree of plagioclase fractional crystallization, while the Tanrong aegirine-augite syenite was probably generated by partial melting of newly formed lower crust, induced by heat under the influence of partial melting of enriched mantle.

Key words: Jurassic period; magmatic rock; Zircon U-Pb dating; geochemistry; southeastern Guangxi

0 引言

华南板块位于中国大陆的南部,是由扬子地块与华夏地块在新元古代晚期拼合形成^[1-2].自晚古生代起,华南大陆受到了特提斯构造域以及太平洋构造域的影响,具有复杂的地质构造及发展演化历史,广泛发

育构造-岩浆活动及大规模的成矿作用^[3-4].

桂东南地区位于华南板块南部内陆地区(图1),区内燕山期岩浆活动极为强烈,且具有多期次演化特征,反映出桂东南地区燕山期构造岩浆活动的复杂性.该区域对于认识华南地区大地构造环境及动力学机制

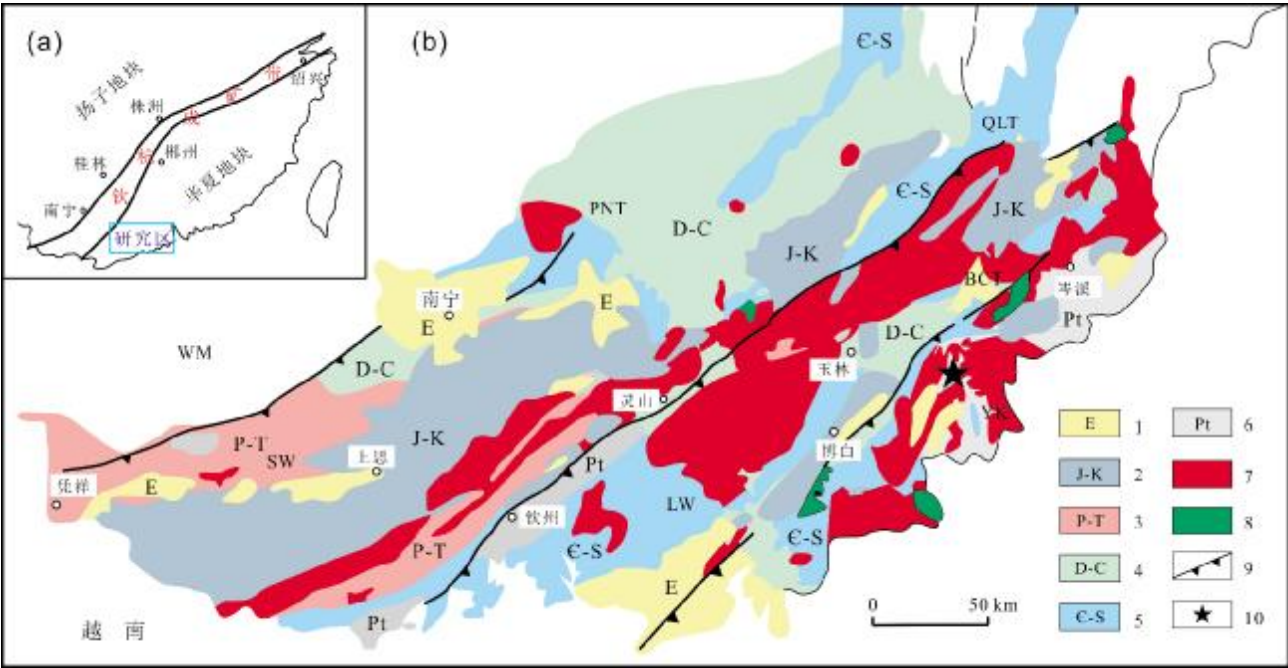


图1 桂东南区域地质简图
(据文献[5])

Fig. 1 Regional geological sketch map of southeastern Guangxi
(From Reference [5])

1—古近系(Paleogene); 2—侏罗-白垩系(Jurassic-Cretaceous); 3—二叠-三叠系(Permian-Triassic); 4—泥盆-石炭系(Devonian-Carboniferous); 5—寒武-志留系(Cambrian-Silurian); 6—元古宇(Proterozoic); 7—花岗岩(granite); 8—基性岩(basic rock); 9—冲断带(thrust fault belt); 10—采样点(sampling site); YK—云开造山带(Yunkai orogenic belt); LW—六万大山褶皱冲断带(Liuwandashan fold thrust zone); SW—十万大山盆地(Shiwandashan basin); WM—武鸣隆起(Wuming uplift); PNT—凭祥-东门断裂带(Pingxiang-Dongmen fault zone); QLT—防城-钦州-灵山断裂带(Fangcheng-Qinzhou-Lingshan fault zone); BCT—博白-岑溪断裂带(Bobai-Cenxi fault zone)

具有重要的研究意义。尽管前人对华南大陆广泛分布的中生代岩浆岩开展了大量的研究工作,取得了丰硕的研究成果,但对其成因还是存在较大争议:1)认为华南中生代岩浆作用主要与古太平洋板块向欧亚大陆俯冲碰撞有关^[6-7];2)华南在侏罗-白垩纪为非造山的板内伸展环境,岩浆活动与岩石圈伸展、幔源岩浆的底侵作用有关^[4,8-10];3)岩浆作用与新特提斯洋脊向南海北缘俯冲有关^[11-12]。针对以上争议,本研究选取分布在桂东南岑溪南渡镇、县容镇中基性岩浆岩作为重点研究对象,通过野外地质调查及室内工作,进行年代学、岩石学、地球化学和 Sr-Nd 同位素研究,查明该岩石的源区性质和成因机制,以期为华南地区的岩石圈演化、大地构造体制和构造格局的研究提供新的依据。

1 地质背景及样品描述

研究区位于华夏地块与钦杭造山带交汇部位云开造山带的北缘(图 1a),区内构造主要由博白-岑溪深大断裂带、信宜-廉江断裂、黎村-文地断裂等多条北东向断裂控制(图 1b)。区域大断裂博白-岑溪断裂带是桂东南重要的骨架构造^[13],主要控制了区内中生代岩浆岩和盆地的展布,规模最大且地质影响最深,具有多期活动特征^[14-15]。区内燕山晚期侵入岩主要沿博白-岑溪断裂带分布,以花岗岩为主。桂东南地区广泛发育中酸性岩浆岩,基性岩与超基性岩比较少见,主要形成年代为加里东期、印支期和燕山期。而燕山早期侵入岩主要分布于马山、南渡等地,岩性主要为正长岩、二长岩、辉石岩等,属于钾玄质侵入岩,年龄为 157~192 Ma^[7,16]。本研究的中基性岩浆岩主要分布于岑溪市南渡、县容一带(图 2),岩体侵位于北东向侏罗纪花岗岩中,主要由 3 个东西向展布的基性岩脉组成,基性岩脉整体风化强烈,呈月牙状,单个岩脉宽 1~10 m,长度多在 10~50 m 之间。出露的主要地层为奥陶系、志留系、泥盆系、侏罗系、白垩系和第四系。

南渡地区 5 件样品(22°47′50.1″N, 110°47′56.7″E; 22°45′33.84″N, 110°44′23.18″E)和县容地区的 2 件样品(22°51′53.7″N, 110°46′44.3″E)均为晚侏罗世中基性岩浆岩,采样位置见图 2。对其中 17ND-02、17TL-01 进行了锆石 U-Pb 同位素定年。结合野外观察以及详细的镜下鉴定,得出南渡样品主体岩性为二长岩,县容样品为霓辉正长岩。

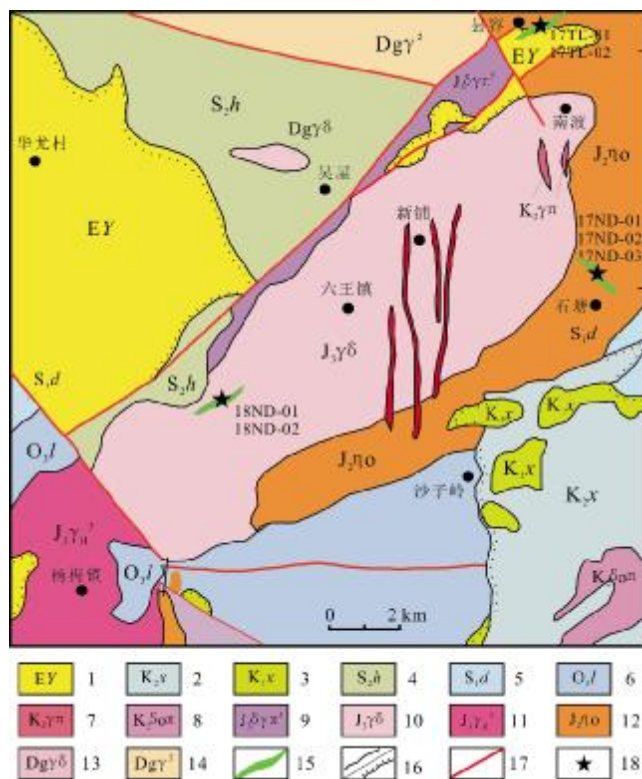


图 2 研究区地质图

(底图据文献[3, 17-18])

Fig. 2 Geological map of the study area

(Based on References [3, 17-18])

1—古近系邕宁群 (Paleogene Yongning gr.); 2—白垩系西桐组 (Cretaceous Xitong fm.); 3—白垩系新隆组 (Cretaceous Xinlong fm.); 4—志留系合浦组 (Silurian Hepu fm.); 5—志留系大岗顶组 (Silurian Dagangding fm.); 6—奥陶系兰瓮组 (Ordovician Lanweng fm.); 7—白垩纪花岗斑岩 (Cretaceous granite porphyry); 8—白垩纪细粒含角闪石英闪长斑岩 (Cretaceous fine-grained amphibolite quartz diorite porphyry); 9—侏罗纪多斑状二长花岗斑岩 (Jurassic monzonitic granite porphyry); 10—侏罗纪细中粒斑状花岗闪长岩 (Jurassic fine-medium-grained porphyritic granodiorite); 11—侏罗纪中细、细粒斑状角闪黑云二长花岗岩 (Jurassic fine-medium-grained porphyritic amphibolite biotite monzogranite); 12—侏罗纪细中粒石英二长岩 (Jurassic fine-medium-grained quartz monzonite); 13—泥盆纪片麻状细粒二长花岗岩 (Devonian gneissic fine-grained monzogranite); 14—泥盆纪(片麻状)细粒花岗二长岩 (Devonian fine-grained gneissic granitic monzonite); 15—基性岩脉 (mafic dike); 16—整合/不整合地质界线 (conformity/unconformity boundary); 17—区域性大断裂 (regional fault); 18—样品采集点 (sample collection point)

17ND-02 二长岩呈暗灰色—灰白色,具显微斑状结构(图 3a,b)。主要矿物为斜长石(约 40%),粒径为 1~1.5 mm;钾长石(约 30%),粒径为 0.5~1 mm;辉石(约 20%),粒径为 0.3~0.5 mm。斜长石呈半自形板状,聚片双晶明显,具轻微的绢云母化蚀变。辉石多为单斜辉石,未见斜方辉石。斜长石含量不超过钾长石的 2

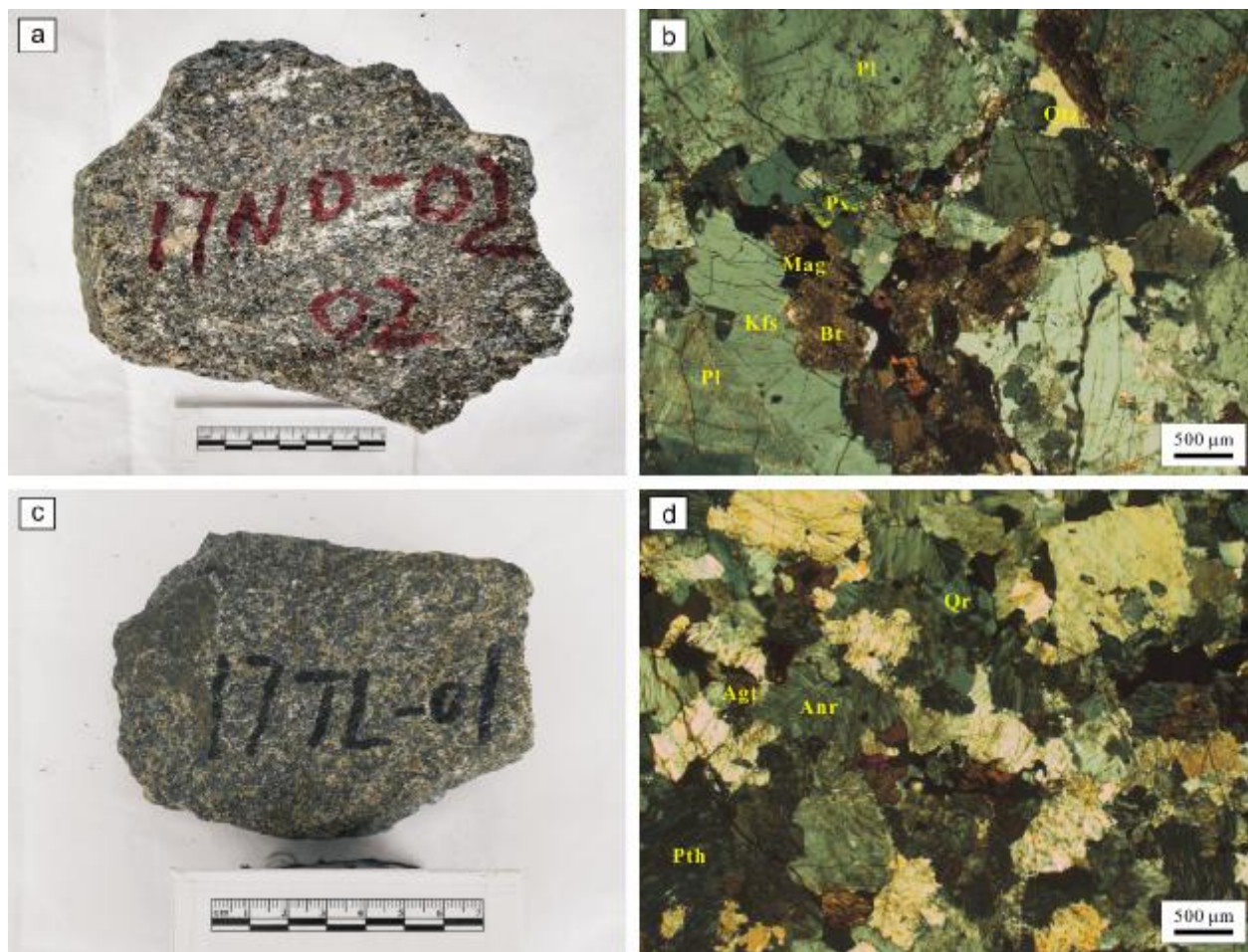


图3 南渡二长岩、县容正长岩手标本及镜下显微照片

Fig. 3 Hand specimens and microscopic photographs of Nandu monzonite and Tanrong syenite

Pl—斜长石(plagioclase); Px—辉石(pyroxene); Qtz—石英(quartz); Mag—磁铁矿(magnetite); Kfs—钾长石(K-feldspar); Bt—黑云母(biotite); Pth—条纹长石(perthite); Agt—霓辉石(aegirine-augite); Anr—歪长石(anorthoclase); Qr—正长石(orthoclase)

倍. 次要矿物为少量石英(<5%)、黑云母(<5%), 副矿物为磷灰石、磁铁矿和锆石等. 定名为二长岩.

17TL-01 正长岩呈浅灰色, 具半自形中—粗粒结构(图 3c,d). 主要矿物为碱性的条纹长石(>50%), 粒径为 1~1.5 mm; 霓辉石(>30%), 粒径为 0.2~0.5 mm. 含少量正长石(<10%)和歪长石(<10%). 副矿物为锆石、磷灰石、钦铁矿, 极少量黝帘石和榍石. 条纹长石具条纹结构, 暗色矿物为不含水的碱性霓辉石. 霓辉石高正突起, 边部绿色的多色性比较明显, 并具有负延性, 横切面在镜下显示对称消光, 纵切面近平行消光^[19]. 定名为霓辉正长岩.

2 测试方法

本研究选取南渡地区 17ND-02、18ND-02 二长岩

和县容地区 17TL-01 正长岩进行 U-Pb 定年分析. 样品锆石分选和制靶由河北省廊坊市尚艺岩矿检测有限公司完成, 锆石靶的 CL 阴极发光图、锆石透-反射照片的拍摄由重庆宇劲科技有限公司完成. 在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行了 LA-ICP-MS 锆石微区原位定点 U-Pb 定年测试, 采用配有 193 nm ArF 准分子激光的 GeoLas HD 激光剥蚀系统, 联用的 ICP-MS 型号为 Agilent7500. 最终数据通过 ICPMSDataCal7.2^[20] 软件进行数据处理, 普通 Pb 用 Andersen 方法校正^[21], 采用国际标准程序 Isoplot4.15 绘制锆石样品的 U-Pb 年龄协和图并计算平均年龄权重^[22]. 分析结果如表 1、2(扫描首页 OSID 二维码可见).

所有样品的主、微量元素实验均在桂林理工大学

广西隐伏金属矿产勘查重点实验室进行,用碱熔玻璃片 XRF 法进行主量元素实验,分析测试仪器为日本理学 ZSX Primus II X 射线荧光光谱仪。烧失量则在马弗炉中 1 000 °C 温度条件下灼烧后获得。稀土微量元素的粉末样品利用王水进行消解,蒸至近干后用稀盐酸溶解定容,用 Agilent 7500cx 多接收电感耦合等离子质谱仪进行分析,分析精度好于 5%,分析结果如表 3 (扫描首页 OSID 二维码可见)。

样品的 Sr、Nd 同位素测试在桂林理工大学广西隐伏金属矿产勘查重点实验室完成。分离获取 Sr 和稀土元素主要采用阳离子树脂,分离获取 Nd 在上步基础上采用 HDEHP 树脂。在激光剥蚀等离子体质谱仪实验室上机进行测试,采用 Micromass Isoprobe 型多接收

器等离子质谱仪。 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 比值校正见文献[12, 23],详细的分析方法见文献[24],分析结果如表 4(扫描首页 OSID 二维码可见)。

3 分析结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

选取南渡地区 17ND-02 样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析。在样品中选取 30 颗呈短柱状-长柱状、长度为 150~300 μm 、宽 100~200 μm 锆石颗粒,在 CL 图中都显示典型的韵律震荡环带且结晶完好。Th/U 比值均大于 0.4,显示典型的岩浆锆石特点^[25]。剔除掉谐和度小于 90%的分析点后,剩下 24 个分析点的年龄在谐和线附近(图 4a)。运用 Isoplot 宏软件计算

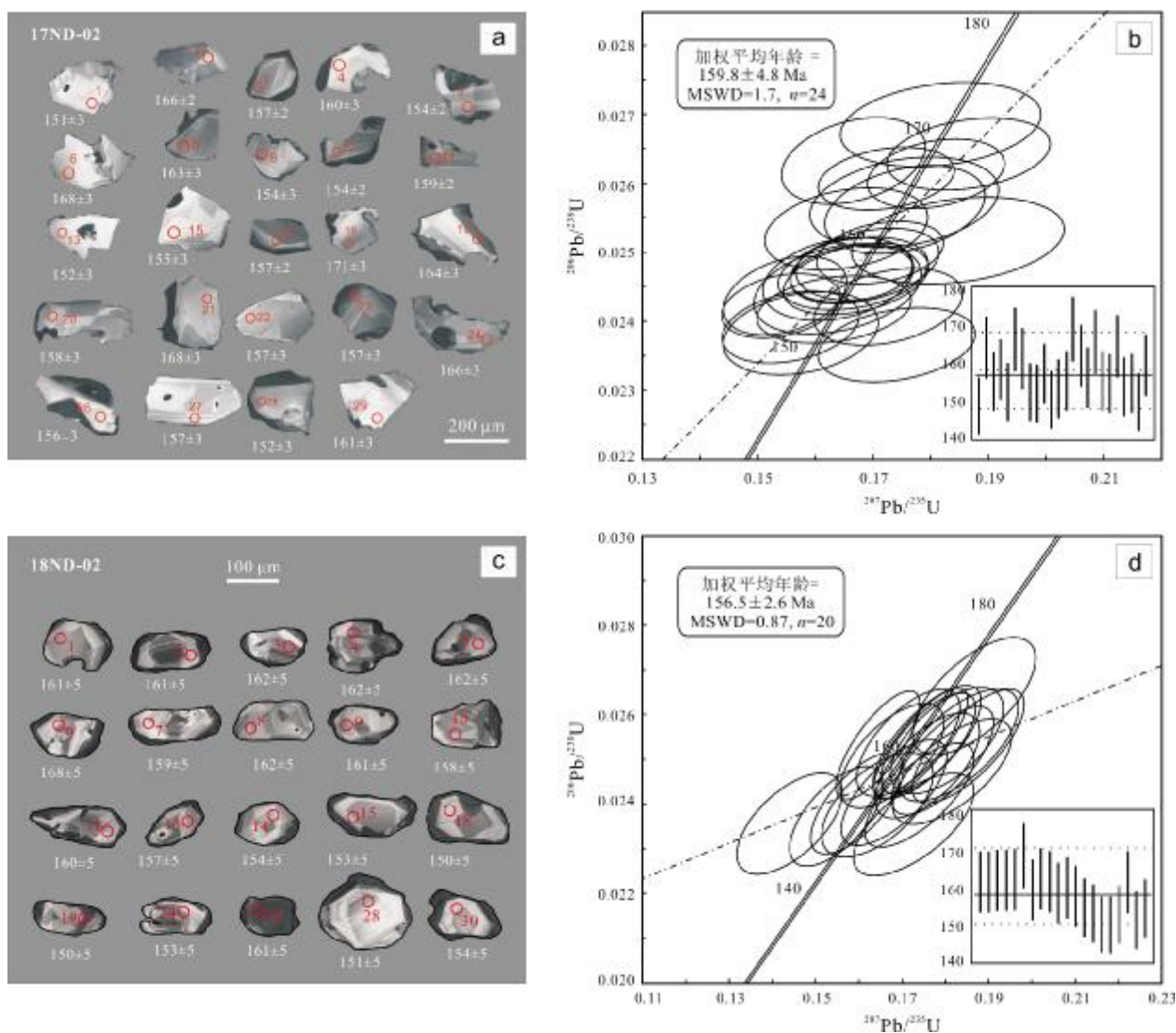


图4 南渡二长岩锆石 CL 图及锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 4 CL images and U-Pb concordia diagrams of selected zircons from Nandu monzonite

得出样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 159.8 ± 4.8 Ma (图 4b), 表明其为晚侏罗世岩浆活动产物。

选取南渡地区 18ND-02 样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析。在样品中选取 30 颗呈短柱状-长柱状、长度为 $100 \sim 200 \mu\text{m}$ 、宽 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 锆石颗粒, 在 CL 图中都显示典型的韵律震荡环带且结晶完好。Th/U 比值均大于 0.4, 显示典型的岩浆锆石特点^[25]。剔除谐和度小于 90% 的分析点后, 剩下 20 个分析点的年龄在谐和线附近(图 4c)。运用 Isoplot 宏软件计算得出样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 156.5 ± 2.6 Ma (图 4d), 表明其为晚侏罗世岩浆活动产物。

选取县容地区 17TL-01 样品进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年分析。在样品中选取 30 颗呈短柱状-长柱状、长度为 $100 \sim 350 \mu\text{m}$ 、宽 $50 \sim 200 \mu\text{m}$ 锆石颗粒, 在 CL 图中总体有变质锆石特征。Th/U 比值大部分大于 0.4, 显示典型的岩浆锆石特点^[25]。剔除谐和度小于 90% 的分析点后, 剩下 20 个分析点的年龄在谐和线附近(图 5a)。运用 Isoplot 宏软件计算得出样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 156.8 ± 8.1 Ma (图 5b), 表明其为晚侏罗世岩浆活动产物。

3.2 主量元素

南渡二长岩的 SiO_2 含量为 $44.82\% \sim 61.02\%$, 平均值为 53.05% ; Al_2O_3 含量为 $11.5\% \sim 18.02\%$, 平均值为 16.03% ; $\text{Mg}^\#$ 为 $18.41 \sim 62.71$, TiO_2 $0.33 \sim 2.44$, 铝饱和度较低($\text{A}/\text{CNK} = 0.42 \sim 1.05$, 平均值 0.73); 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 平均含量为 5.38% 。在岩石分类图解上, 结合前人的数

据投图后, 样品均落在碱性系列范围内(图 6a), 与镜下鉴定结果一致。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图上, 样品投点整体主体落入钾玄质系列岩石范围(图 6b)。

县容正长岩的 SiO_2 含量为 $59.67\% \sim 60.73\%$, 平均值为 60.2% ; Al_2O_3 含量为 $18.91\% \sim 20.07\%$, 平均值为 19.49% ; $\text{Mg}^\#$ 为 $21.78 \sim 32.26$, TiO_2 $0.46 \sim 0.50$, 铝饱和度较高($\text{A}/\text{CNK} = 0.97 \sim 1.07$, 平均值 1.02); 全碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) 平均含量为 12.39% 。在岩石分类图解上, 结合前人的数据投图后, 样品均落在碱性系列范围内(图 6a), 与镜下鉴定结果一致。在 $\text{SiO}_2 - \text{K}_2\text{O}$ 图上, 样品整体为钾玄岩系列(图 6b)。

3.3 微量元素

南渡二长岩轻稀土元素(LREE)明显较重稀土元素(HREE)富集(图 7a), 总体表现轻稀土富集右倾型。稀土元素总量($\sum \text{REE}$)为 $162.13 \times 10^{-6} \sim 346.68 \times 10^{-6}$, 平均值为 258.66×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $7.97 \sim 21.36$, 平均值为 14.59 , 表明轻重稀土分异程度较高; δEu 值为 $0.29 \sim 1.04$, 平均值 0.73 , Eu 整体表现为弱的负异常, 表明在岩浆演化过程中存在斜长石的分离结晶^[33]。县容正长岩在球粒陨石标准化 REE 分布模式图(图 7a)上也表现轻稀土富集右倾型, 稀土元素总量为 $122.07 \times 10^{-6} \sim 128.8 \times 10^{-6}$, 平均值为 125.44×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 为 $6.37 \sim 6.64$, 平均值为 6.51 ; δEu 值为 $1.36 \sim 1.38$, 平均值 1.37 , Eu 整体表现轻微的正异常。在微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 7b)中, 曲线呈现右倾分布模式。南渡和县容中基性岩浆岩总体上均富集大离子亲石元素 Rb、

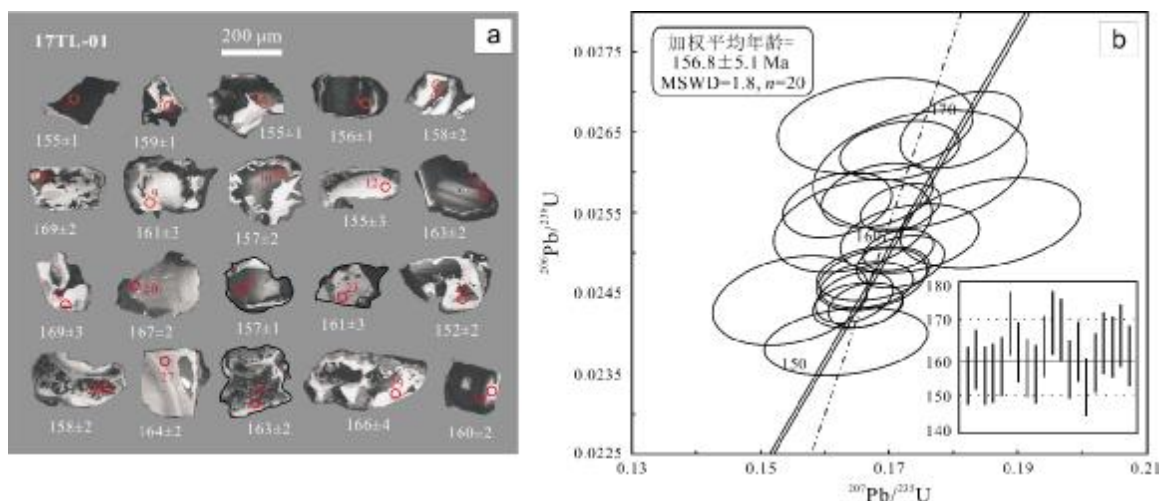


图 5 县容正长岩锆石 CL 图及锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 5 CL images and U-Pb concordia diagrams of selected zircons from Tanrong syenite

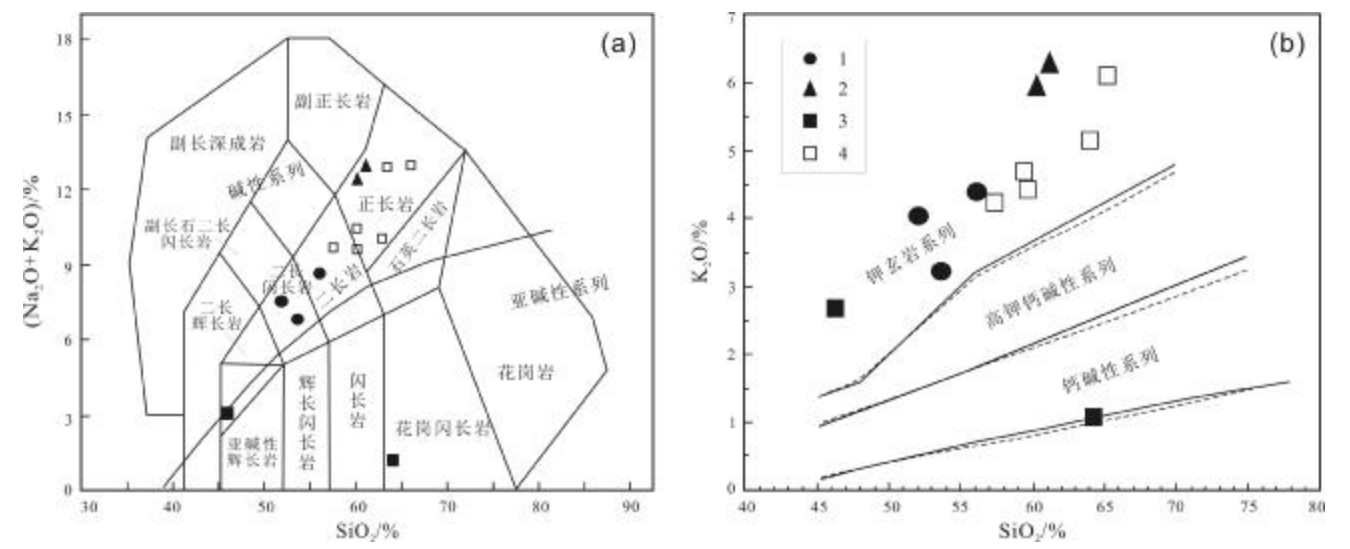


图 6 南渡、县容中基性岩浆岩分类判别图解

Fig. 6 The classification and discrimination diagrams for Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks
a—TAS 分类图(据文献[26]) (TAS classification diagram, after Reference [26]); b—SiO₂-K₂O 判别图(据文献[27]) (SiO₂-K₂O discrimination diagram, after Reference [27]); 1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18); 4—周鹏程样品(Zhou's sample)

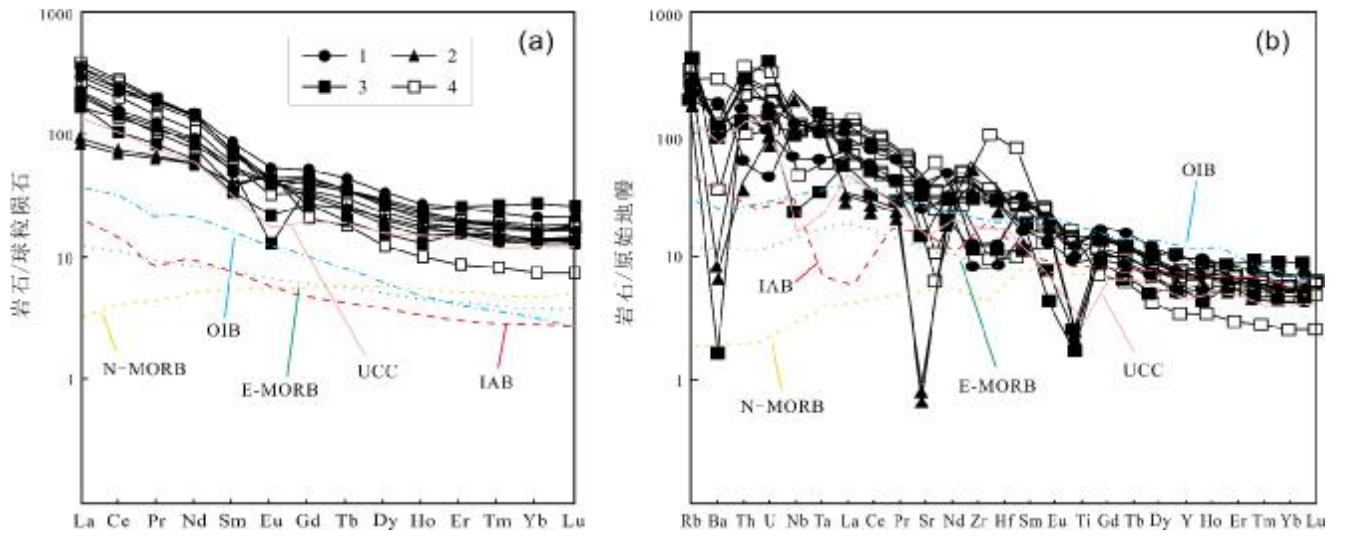


图 7 南渡、县容中基性岩浆岩稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解
(标准化值数据据文献[28-32])

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace element spidergram of Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks
(Normalized data from References [28-32])

IAB—岛弧玄武岩(island arc basalt); OIB—洋岛玄武岩(ocean island basalt); N-MORB—正常型洋中脊玄武岩(normal mid-ocean ridge basalt); M-MORB—富集型洋中脊玄武岩(enriched mid-ocean ridge basalt); UCC—上大陆地壳(upper continental crust); 1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18); 4—周鹏程样品(Zhou's sample)

Th、U 等, 亏损高场强元素 Th、Zr 和 Ti. 其中南渡二长岩还表现出明显 Ba 负异常, 县容正长岩表现出明显 Sr、Ti 负异常.

3.4 Sr-Nd 元素

南渡、县容地区所采样品的 Sr-Nd 同位素分析结果显示, 所有样品整体的 I_{Sr} 值较高, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 值较低.

5 件南渡样品的 I_{Sr} 值为 0.70554~0.70959, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 -0.75~-10.58, 样品均显示出富集特征; 2 件县容样品的 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 值为 0.69033~0.69615, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值均为 0.36, 与南渡样品相比, 具有更加亏损的特征。 t - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 8a)中, 样品均落入球粒陨石与壳源范围之间; 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 8b)中, 县容样品点主要落在亏损地幔(DM)与富集地幔(EMI)之间, 南渡样品主要落在富集地幔且靠近全球硅酸盐地球(BSE)区域。

4 讨论

4.1 岩浆源区及成因

研究区南渡样品 SiO_2 含量为 44.82%~61.04%, $\text{Mg}^\#$ 值除 1 个样品外其余均较高(42.91~62.71), 明显低于原始岩浆的 $\text{Mg}^\#$ 值(66~75), 岩石总体富碱($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ 1.08%~8.58%), 具有较高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 比值(0.9~14.43), Al_2O_3 为 11.5%~18.02%, 为典型的钾玄质岩石。 基于前人的研究成果, 钾玄质岩石大致成因归纳为以下 4 种: 1) 石榴石橄榄岩地幔部分熔融或其分离结晶的产物^[36]; 2) 幔源岩浆或与壳源岩浆混合的结果^[37]; 3) 幔源熔体纵向分带富集^[38]; 4) 含金云母的富集地幔橄榄岩高压下部分熔融形成^[39]。

南渡二长岩 Sr/Y 值(6.18~26.53)和 La/Yb 值(11.11~29.76)较低、HREE 含量($\text{Y}=23.76 \times 10^{-6}$ ~ $47.18 \times$

10^{-6} , $\text{Yb}=2.15 \times 10^{-6}$ ~ 4.56×10^{-6})较高, 反映其岩浆的起源是相对浅部的尖晶石相地幔源区^[40]; 南渡样品 $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-0.75~-10.58)较为富集和 I_{Sr} 值(0.70554~0.70959)较高。 在 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 图解(图 8b)中, 南渡样品主要落在富集地幔且靠近全球硅酸盐地球区域, 南渡二长岩与 E-MORB 曲线相似, 具有富集地幔特征, 同时在稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解(图 7)中, 南渡二长岩也比较符合富集地幔源区。 此外样品 Nb/La 比值(0.41~1.37, 平均值为 0.96)和 Nb/Ta 比值(12.04~19.97, 平均值为 15.93)介于原始地幔(分别为 1.02、17.7)与平均地壳(分别为 0.69、11)之间, Rb/Sr 值(0.16~0.41, 平均值 0.3)介于上地幔值(0.034)与地壳值(0.35)之间, 且大部分岩石的 MgO 含量不高(只有 0.91%~4.21%), $\text{Mg}^\#$ 相对于原始地幔较低(为 18.5~62.7), 指示有壳源组分的参与^[41]。 可能是幔源岩浆在上升过程中受到地壳物质的混染。 除此之外, 过渡族元素 Cr(5.02×10^{-6} ~ 26.64×10^{-6})、Ni(4.94×10^{-6} ~ 40.57×10^{-6})含量远低于典型的原始基性岩浆(Cr 300×10^{-6} ~ 500×10^{-6} ; Ni 300×10^{-6} ~ 400×10^{-6}), 说明岩浆经历了不同程度的分离结晶作用; 样品具有明显负 Eu 异常, 也说明岩浆源区存在一定量的斜长石分离结晶^[40]。 同时南渡二长岩富集大离子亲石元素 Rb、Th、U 等, 亏损高场强元素 Th、Zr 和 Ti 通常表明与俯冲作用有成因联系^[42]。 在 Th/Yb-Ta/Yb

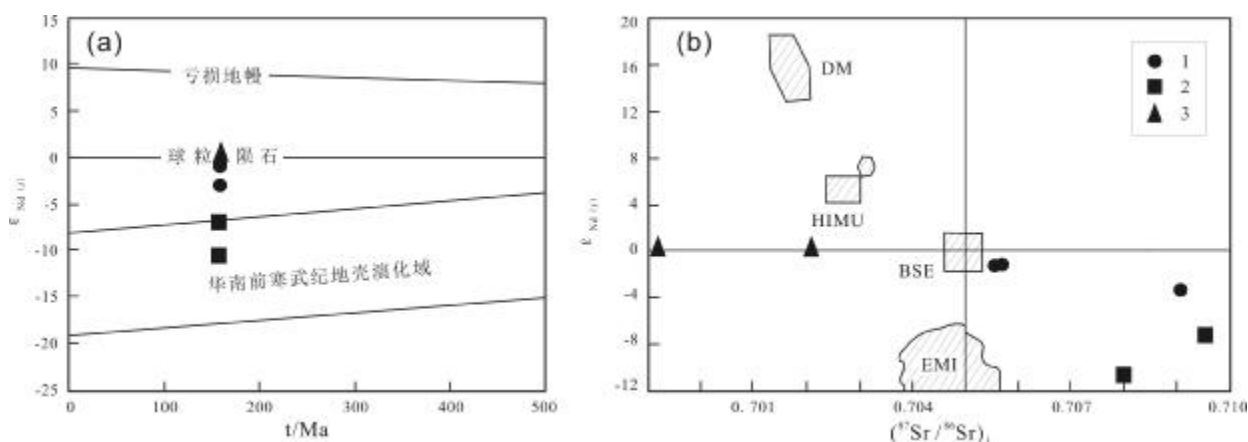


图 8 南渡、县容中基性岩浆岩 t - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图和 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 关系图

(据文献[34-35])

Fig. 8 The t - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ and $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ - $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ diagrams for Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks

(After References [34-35])

DM—亏损地幔(depleted mantle); HIMU—高 U 地幔(high U mantle); BSE—全球硅酸盐地球(bulk silicate earth); EMI—富集地幔(enriched mantle);

1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18)

图解(图 9a)中样品多数落入活动大陆边缘区域及附近,极有可能为俯冲背景下的幔源岩浆活动产物。

县容正长岩的 SiO_2 为 59.67%~60.73%, $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 为 12.12%~12.66%, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 为 0.95~0.98, Al_2O_3 为 18.91%~20.07%, $\varepsilon\text{Nd}(t)$ 均值为 0.36。样品的 SiO_2 含量较高, MgO 含量(0.53%~0.87%)和 $\text{Mg}^\#$ 值(21.78~32.26)较低, Cr 和 Ni 含量也较低,排除富集地幔部分熔融成因,也排除壳幔混合成因。在微量元素原始地幔标准化蛛网图中(图 7b),样品表现为富集大离子亲石元素 Rb 、 Th 、 U 等,亏损高场强元素 Th 、 Zr 和 Ti 的特征,反映了地壳源区特点^[45]。样品 La/Sm 比值与 La 成正相关关系(图 9b),符合部分熔融趋势,说明主导岩浆作用过程的因素主要是部分熔融作用,更有可能来源于壳源物质的部分熔融。低 $\text{Mg}^\#$ 霓辉正长岩样品具有不同程度的 Eu 异常,指示其可能来源于以石榴子石作为主要残留相的新生下地壳部分熔融^[46]。同时在稀土元素球粒陨石标准化图解和微量元素原始地幔标准化图解(图 7)中,县容正长岩也比较符合壳源成因。综上,县容正长岩很可能是在富集地幔部分熔融的影响下,新生下地壳受热导致部分熔融而形成。

4.2 构造环境

针对华南燕山期大地构造环境及动力学机制存在较多争议,最早观点认为地幔柱活动导致华南中生代

陆内岩石圈拉张^[47],而对于华南陆内是否存在晚中生代地幔柱,前人根据比华南岩浆岩的特征是否符合地幔柱在地表的基本标志^[48],从而否定此观点。其次有学者提出华南燕山期是由于地壳在拉张下产生的拆沉作用引起软流圈地幔上涌^[49],而李武显等^[50]认为华南燕山期主要为板内伸展造山的构造环境。近年来对于华南中生代的大地构造背景基本达成一致,认为是多板块汇集和多方向挤压-伸展造山^[51]。

目前,对华南大陆燕山早期岩浆岩的成岩构造背景主要有两种不同的观点:1)与古太平洋板块俯冲碰撞有关的活动大陆边缘有关,形成于与俯冲或岛弧有关的构造环境,具有典型的“岛弧地球化学”特征^[6, 52-53];2)板内非造山的伸展构造环境,形成于大陆和大洋内部,具有类似于洋岛玄武岩(OIB)的微量元素特征^[9, 54-56]。南渡、县容样品主要为桂东南燕山早期晚侏罗世样品,其成岩构造背景对约束华南大陆燕山早期构造背景具有一定意义。

在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图解(图 9a)中南渡二长岩多数落入活动大陆边缘区域及附近,极有可能为俯冲背景下的幔源岩浆活动产物^[57]。在 $\text{Zr}-\text{Zr}/\text{Y}$ 和 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ 判别图解(图 10)及与前人资料分析对比中,研究区内中基性岩浆岩多属于板内玄武岩区域范畴,说明其主要形成于板内拉张构造背景。中基性岩浆岩在 $\text{Th}/\text{Hf}-$

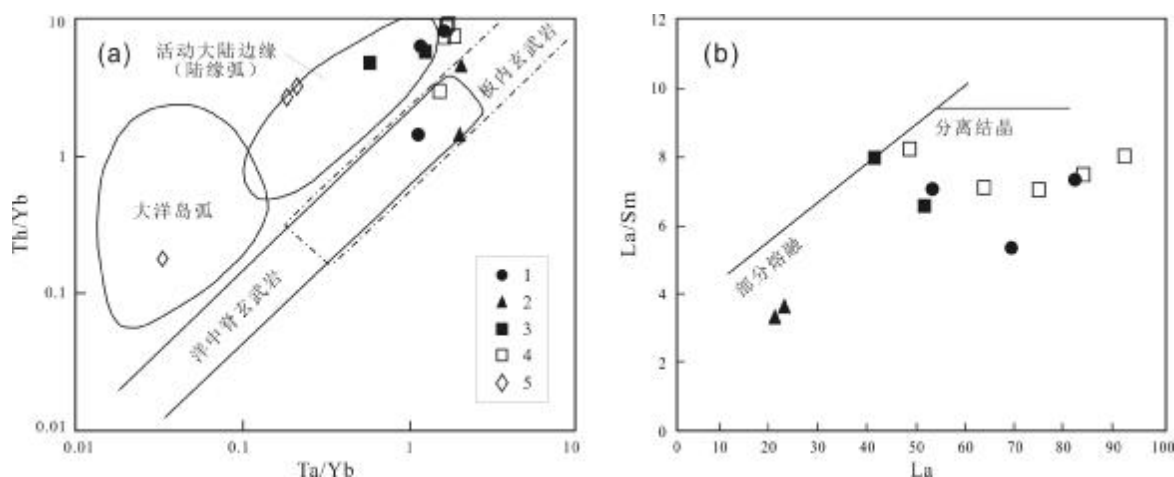


图9 南渡、县容中基性岩浆岩 $\text{La}-\text{La}/\text{Sm}$ 图解与 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ 图解

(据文献[43-44])

Fig. 9 The $\text{La}-\text{La}/\text{Sm}$ and $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Ta}/\text{Yb}$ diagrams for Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks

(After References [43-44])

1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18); 4—周鹏程样品(Zhou's sample); 5—梁任鑫样品(Liang's sample)

Ta/Hf 判别图解(图 11a)中,样品投影点多落于陆内拉张带(或初始裂谷)玄武岩区及其附近,显示其形成于大陆板内张性环境. 在 Hf/3–Th–Nb/6 三角图解(图 11b)中,南渡二长岩数据点均落在火山弧玄武岩区及其附近, 县容正长岩数据点均落在板内碱性玄武岩区附近, 表明研究区样品极有可能形成于与古太平洋板块俯冲碰撞有关的活动大陆边缘,受俯冲后伸展(弧后伸展)的构造环境,可能并非前人提出的晚侏罗世桂东南地区陆内拉张伸展的环境之下^[10, 39].

结合本文的研究结果, 主要推测华南大陆在晚中生代还是处于古太平洋板块俯冲弧后伸展的构造背景.

5 结论

1) 桂东南地区南渡二长岩、县容霓辉正长岩形成时代分别为 159.8 Ma 和 156.8 Ma, 二者时代一致,均属于晚侏罗世.

2) 研究区内样品属于典型的钾玄质系列岩石. 南渡二长岩样品为由富集地幔部分熔融形成, 幔源岩浆在上升过程中受到地壳物质的混染, 存在一定量的斜

长石分离结晶. 县容霓辉正长岩可能是富集地幔部分熔融的影响下, 新生下地壳受热导致部分熔融而形成.

3) 研究区岩石主要形成于晚中生代古太平洋板块俯冲弧后伸展的构造背景.

参考文献(References):

[1]毛景文, 谢桂青, 李晓峰, 等. 华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J]. 地学前缘, 2004, 11(1): 45–55.
Mao J W, Xie G Q, Li X F, et al. Mesozoic large scale mineralization and multiple lithospheric extension in South China[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(1): 45–55.
[2]王光杰, 滕吉文, 张中杰. 中国华南大陆及陆缘地带的大地构造基本格局[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(3): 25–44.
Wang G J, Teng J W, Zang Z J. The continental structure pattern of South China and its marginal regions[J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(3): 25–44.
[3]刘兴源. 桂东南地区晚中生代岩浆岩成因及其地球动力学意义[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
Liu X Y. Petrogenesis of Late Mesozoic granites in southeastern Guangxi and their geodynamic implications [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2022.
[4]李衣鑫, 康志强, 许继峰, 等. 桂东南早白垩世晚期火山岩年代学、

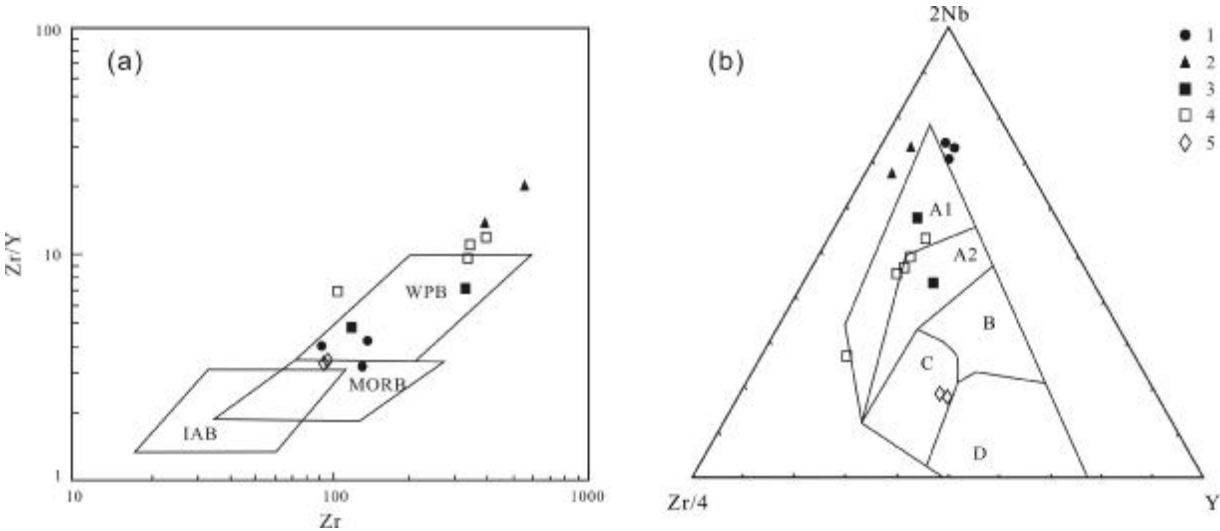


图 10 南渡、县容中基性岩浆岩 Zr–Zr/Y 图解和 2Nb–Zr/4–Y 判别图解
(据文献[4, 58])

Fig. 10 The Zr–Zr/Y and 2Nb–Zr/4–Y diagrams for Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks
(After References [4, 58])

IAB—岛弧玄武岩(island arc basalt); MORB—洋中脊玄武岩(mid-ocean ridge basalt); WPB—板内玄武岩(within-plate basalt); A1, A2—板内碱性玄武岩(WPAB, within-plate alkali basalt); A2, C—板内拉斑玄武岩(WPT, within-plate tholeiite); B—富集型洋中脊玄武岩(E-MORB, enriched mid-ocean ridge basalt); D—正常型洋中脊玄武岩(N-MORB, normal mid-ocean ridge basalt); C, D—火山弧玄武岩(VAB, volcanic arc basalt); 1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18); 4—周鹏程样品(Zhou’s sample); 5—梁任鑫样品(Liang’s sample)

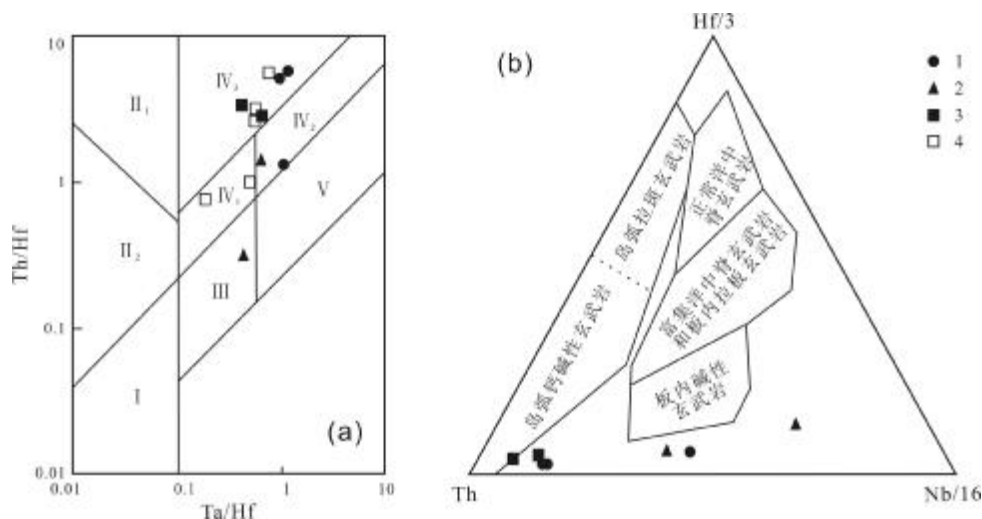


图 11 南渡、县容中基性岩浆岩构造环境判别图解

(据文献[4, 59])

Fig. 11 The tectonic setting discrimination diagrams for Nandu and Tanrong intermediate-basic magmatic rocks

(After References [4, 59])

I—板块发散边缘 N-MORB 区(N-MORB on plate divergence edge); II—板块汇聚边缘(plate convergence edge); II₁—大洋岛弧玄武岩区(ocean island arc basalt); II₂—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区(continental margin island arc and continental margin volcanic arc basalt); III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB、E-MORB 区(within-plate oceanic island, seamount basalt, T-MORB, E-MORB); IV—大陆板内(continental within-plate); IV₁—陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区(intracontinental rift and continental margin rift tholeiite); IV₂—陆内裂谷碱性玄武岩区(intracontinental rift alkaline basalt); IV₃—大陆拉张带或初始裂谷玄武岩区(continental extensional belt or incipient rift basalt); V—地幔热柱玄武岩区(mantle plume basalt); 1—南渡 17 样品(Nandu Sample 17); 2—县容 17 样品(Tanrong Sample 17); 3—南渡 18 样品(Nandu Sample 18); 4—周鹏程样品(Zhou's sample)

地球化学特征及地质意义[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 2872–2887.

Li Y X, Kang Z Q, Xu J F, et al. Chronological, geochemical characteristics and geological significance of volcanic rocks in the late Early Cretaceous in southeast Guangxi [J]. Earth Science, 2023, 48 (8): 2872–2887.

[5] 刘迪, 康志强, 许继峰, 等. 桂东南马山玄武岩年代学、地球化学特征及成因意义[J]. 桂林理工大学学报, 2019, 39(4): 806–816.

Liu D, Kang Z Q, Xu J F, et al. Chronology, geochemistry and genetic significance of Mashan basalt in southeast Guangxi [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2019, 39(4): 806–816.

[6] Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeastern China: Implications for lithosphere subduction and underplating of mafic magmas [J]. Tectonophysics, 2000, 326(3/4): 269–287.

[7] 李程. 广西岑溪市新塘火成杂岩体的演化及其地质意义[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2018.

Li C. The evolution and geological significance of complex rock mass in Xintang City, Cenxi City, Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2018.

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

Lao M J, Zou H P, Du X D, et al. Geochronology and geochemistry of

the Mashan Late Jurassic shoshonitic intrusives in Hengxian, Guangxi: With a discussion on Yanshanian tectonic settings of the southwestern segment of Qinzhou-Hangzhou metallogenic belt [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(2): 95–107.

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

Chen X Y, Wang Y J, Zhang Y Z, et al. Geochronology and geochemical characteristics of the Nandu syenite in SE Guangxi and its implications [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(2): 284–293.

[10] 周鹏程, 秦亚, 杨启军, 等. 桂东南云开地区南渡钾玄质侵入岩的年代学、地球化学及其地质意义[J]. 桂林理工大学学报, 2023, 43 (4): 535–546.

Zhou P C, Qin Y, Yang Q J, et al. Chronology, geochemistry and its geological significance of Nandu shoshonitic pluton in Yunkai area, southeastern Guangxi [J]. Journal of Guilin University of Technology, 2023, 43(4): 535–546.

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

Liu Y, Fang N Q, Qiang M L, et al. Geochronology, geochemistry, and tectonic significance of mid-Cretaceous andesites in Guangxi and Guangdong [J]. Geoscience, 2021, 35(4): 968–980.

[12] 强萌麟. 南海北部陆缘白垩纪安山岩基本特征及其与东南沿海安

- 山岩对比[D]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- Qiang M L. The basic characteristics of cretaceous andesites in the northern margin of South China Sea and its comparison with the andesites of southeast China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2016.
- [13] 张伯友, 石满全, 杨树锋, 等. 古特提斯造山带在华南两广交界地区的新证据[J]. 地质论评, 1995, 41(1): 1-6.
- Zhang B Y, Shi M Q, Yang S F, et al. New evidence of the paleotethyan orogenic belt on the Guangdong-Guangxi border region, south China [J]. Geological Review, 1995, 41(1): 1-6.
- [14] 覃小锋, 夏斌, 周府生, 等. 广西云开地区元古代不整合事件的确 定及其构造意义[J]. 现代地质, 2007, 21(1): 22-30.
- Qin X F, Xia B, Zhou F S, et al. Confirm of proterozoic unconformity event in the Yunkai area of Guangxi and its tectonic significance [J]. Geoscience, 2007, 21(1): 22-30.
- [15] 周永章, 张恩, 陈炳辉, 等. 华南云开变质地体基底与成矿[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 323-325.
- Zhou Y Z, Zhang E, Chen B H, et al. Basement and its mineralization of Yunkai metamorphic block, South China [J]. Mineral Deposits, 2002, 21(S1): 323-325.
- [16] 李献华. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义 [J]. 地球化学, 1999, 28(1): 1-9.
- Li X H. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance[J]. Geochimica, 1999, 28(1): 1-9.
- [17] 吕劲松, 张雪辉, 孙建东, 等. 钦杭成矿带东段燕山期中酸性岩浆 活动时空演化与成矿规律[J]. 岩石学报, 2017, 33(11): 3635-3658.
- Lv J S, Zhang X H, Sun J D, et al. Spatiotemporal evolution and metallogenic regularity of felsic rocks in the Yanshanian of the eastern segment Qinhang metallogenic belt, South China[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(11): 3635-3658.
- [18] 徐畅, 王岳军, 张玉芝, 等. 云开池垌志留纪辉长岩体的年代学、地 球化学特征及构造意义[J]. 地球科学, 2019, 44(4): 1202-1216.
- Xu C, Wang Y J, Zhang Y Z, et al. Geochronological and geochemical constraints of Chidong Silurian gabbroic pluton in Yunkai domain and its tectonic implications[J]. Earth Science, 2019, 44(4): 1202-1216.
- [19] 陈志刚, 李献华, 李武显, 等. 赣南全南正长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对华南燕山早期构造背景的制约[J]. 地球化学, 2003, 32(3): 223-229.
- Chen Z G, Li X H, Li W X, et al. SHRIMP U-Pb zircon age of the Quannan syenite, southern Jiangxi: Constraints on the early Yanshanian tectonic setting of SE China[J]. Geochimica, 2003, 32(3): 223-229.
- [20] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. 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[J]. Journal of Petrology, 2010, 51(1/2): 537-571.
- [21] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [22] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.6: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[R]. Berkeley Geochronology Center, 2003.
- [23] 李岱鲜, 康志强, 刘迪, 等. 桂东南云开地区回龙岩体的年代学、地 球化学特征及其地质意义[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 1015-1027.
- Li D X, Kang Z Q, Liu D, et al. Geochronological, geochemical and geological significance of Huilong gabbroic pluton in southeastern Guangxi[J]. Geoscience, 2020, 34(5): 1015-1027.
- [24] 梁细荣, 韦刚健, 李献华, 等. 利用 MC-ICPMS 精确测定 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 和 Sm/Nd 比值[J]. 地球化学, 2003, 32(1): 91-96.
- Liang X R, Wei G J, Li X H, et al. Precise measurement of $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ and Sm/Nd ratios using multiple-collectors inductively coupled plasma-mass spectrometer (MC-ICPMS) [J]. Geochimica, 2003, 32(1): 91-96.
- [25] Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2000, 18(4): 423-439.
- [26] Le Maitre R W. A proposal by the IUGS Subcommission on the systematics of igneous rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram [J]. Australian Journal of Earth Sciences, 1984, 31(2): 243-255.
- [27] Miyashiro A. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins[J]. American Journal of Science, 1974, 274(4): 321-355.
- [28] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42: 313-345.
- [29] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: Its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985.
- [30] 王金荣, 陈万峰, 张旗, 等. 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[J]. 岩石学报, 2017, 33(3): 993-1005.
- Wang J R, Chen W F, Zhang Q, et al. 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 [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(3): 993-1005.
- [31] 陈万峰, 王金荣, 张旗, 等. 洋岛和洋底高原玄武岩数据挖掘: 地 球化学特征及其与 MORB 的对比[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2443-2455.
- Chen W F, Wang J R, Zhang Q, et al. Data mining of ocean island basalt and ocean plateau basalt: Geochemical characteristics and comparison with MORB [J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(11): 2443-2455.
- [32] 杨婧, 王金荣, 张旗, 等. 弧后盆地玄武岩(BABB)数据挖掘: 与 MORB 及 IAB 的对比[J]. 地球科学进展, 2016, 31(1): 66-77.
- Yang J, Wang J R, Zhang Q, et al. Back-arc basin basalt (BABB) data mining: Comparison with MORB and IAB [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 66-77.

- [33]王鲲鹏,樊双虎,彭小华.新疆乌什塔拉地区晚泥盆世火山岩地球化学特征及构造意义[J].西北地质,2014,47(2):23-29.
Wang K P, Fan S H, Peng X H. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Late Devonian volcanics in Wushentara area, Xinjiang[J]. Northwestern Geology, 2014, 47(2): 23-29.
- [34]孙涛,周新民.中国东南部晚中生代伸展应力体制的岩石学标志[J].南京大学学报(自然科学),2002,38(6):737-746.
Sun T, Zhou X M. Late Mesozoic extension in Southeast China: Petrologic symbols[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2002, 38(6): 737-746.
- [35]Xie W, Song X Y, Deng Y F, et al. Geochemistry and petrogenetic implications of a Late Devonian mafic-ultramafic intrusion at the southern margin of the Central Asian Orogenic Belt[J]. Lithos, 2012, 144-145: 209-230.
- [36]O'Hara M J, Yoder H S Jr. Formation and fractionation of basic magmas at high pressures[J]. Scottish Journal of Geology, 1967, 3(1): 67-117.
- [37]Hébert R, Guilmette C, Dostal J, et al. Miocene post-collisional shoshonites and their crustal xenoliths, Yarlung Zangbo Suture Zone southern Tibet: Geodynamic implications[J]. Gondwana Research, 2014, 25(3): 1263-1271.
- [38]Harris P G, Middlemost E A K. The evolution of kimberlites[J]. Lithos, 1970, 3(1): 77-88.
- [39]甘成势,王岳军,蔡永丰,等.南岭地区温公岩体的岩石成因及其构造指示[J].地球科学,2016,41(1):17-34.
Gan C S, Wang Y J, Cai Y F, et al. The petrogenesis and tectonic implication of Wengong intrusion in the Nanling Range[J]. Earth Science, 2016, 41(1): 17-34.
- [40]张靖祎,彭头平,范蔚茗,等.缅甸密支那早白垩世钾玄质岩石成因及其大地构造意义[J].大地构造与成矿学,2021,45(3):553-569.
Zhang J Y, Peng T P, Fan W M, et al. Petrogenesis of the Early Cretaceous shoshonitic rocks in Myitkina of Myanmar and its tectonic implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2021, 45(3): 553-569.
- [41]潘荣,朱筱敏,苏春乾,等.黑龙江伊春市北部白垩系美丰组钾玄岩系列的厘定及地球化学特征[J].高校地质学报,2013,19(2):316-326.
Pan R, Zhu X M, Su C Q, et al. Redefinition and geochemical characteristics of the Mesozoic shoshonite rock series of the Meifeng Formation in northern Yichun City, Heilongjiang Province[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(2): 316-326.
- [42]朱强,施珂,吴礼彬,等.扬子板块新元古代中期的持续俯冲作用:来自南华纪岛弧火山岩年代学和岩石地球化学新证据[J].地学前缘,2020,27(4):17-32.
Zhu Q, Shi K, Wu L B, et al. Continued subduction of the Yangtze Plate in the Middle Neoproterozoic: New evidence based on the geochronology and petro-geochemistry of island arc volcanic rocks in the Nanhua Period[J]. Earth Science Frontiers, 2020, 27(4): 17-32.
- [43]赵振华.关于岩石微量元素构造环境判别图解使用的有关问题[J].大地构造与成矿学,2007,31(1):92-103.
Zhao Z H. How to use the trace element diagrams to discriminate tectonic settings[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2007, 31(1): 92-103.
- [44]Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [M]//Thorpe R S. Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks. New York: John Wiley and Sons, 1982: 528-548.
- [45]McKenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere[J]. Journal of Petrology, 1988, 29(3): 625-679.
- [46]秦涛.大兴安岭中段晚中生代火山岩地球化学与岩石成因研究[D].长春:吉林大学,2022.
Qin T. The geochemical and petrogenetic studies on Late Mesozoic volcanic rocks in the central segment of Great Xing'an Range [D]. Changchun: Jilin University, 2022.
- [47]Jiang Y H, Jiang S Y, Dai B Z, et al. Middle to Late Jurassic felsic and mafic magmatism in southern Hunan Province, southeast China: Implications for a continental arc to rifting[J]. Lithos, 2009, 107(3/4): 185-204.
- [48]舒良树.华南构造演化的基本特征[J].地质通报,2012,31(7):1035-1053.
Shu L S. An analysis of principal features of tectonic evolution in South China Block[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035-1053.
- [49]张旗,金惟俊,李承东,等.中国东部燕山期大规模岩浆活动与岩石圈减薄:与大火成岩省的关系[J].地学前缘,2009,16(2):21-51.
Zhang Q, Jin W J, Li C D, et al. Yanshanian large-scale magmatism and lithosphere thinning in eastern China: Relation to large igneous province[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(2): 21-51.
- [50]李武显,周新民.古太平洋岩石圈消减与中国东南部晚中生代火成岩成因——岩石圈消减与玄武岩底侵相结合模式的补充证据[J].大地构造与成矿学,2001,25(1):55-63.
Li W X, Zhou X M. Subduction of the Paleo-Pacific Plate and origin of Late Mesozoic igneous rocks in southeastern China: Some supplement evidences for the model of lithosphere subduction and underplating of mafic magma[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2001, 25(1): 55-63.
- [51]刘凯,厉子龙,徐维光,等.华南中生代岩浆岩时空分布和迁移与古太平洋板块俯冲过程[J].矿物岩石地球化学通报,2016,35(6):1141-1155.
Liu K, Li Z L, Xu W G, et al. The spatial-temporal distributions and migrations of mesozoic magmatism in South China and subduction process of the Paleo-Pacific Plate[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(6): 1141-1155.
- [52]Charvet J, Lapierre H, Yu Y W. Geodynamic significance of the

- Mesozoic volcanism of southeastern China [J]. *Journal of Southeast Asian Earth Sciences*, 1994, 9(4): 387–396.
- [53] 周新民, 李武显. 中国东南部晚中生代火成岩成因: 岩石圈消减和玄武岩底侵相结合的模式 [J]. *自然科学进展*, 2000, 10(3): 240–247.
- Zhou X M, Li W X. Origin of Late Mesozoic igneous rocks in Southeast China: A model combining lithospheric reduction and basalt bottom intrusion [J]. *Progress in Natural Science*, 2000, 10(3): 240–247. (in Chinese)
- [54] Gilder S A, Gill J, Coe R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of South China [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1996, 101 (B7): 16137–16154.
- [55] 李献华, 周汉文, 刘颖, 等. 桂东南钾玄质侵入岩带及其岩石学和地球化学特征 [J]. *科学通报*, 1999, 44(18): 1992–1998.
- Li X H, Zhou H W, Liu Y, et al. Shoshonitic intrusive suite in SE Guangxi: Petrology and geochemistry [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(7): 653–659.
- [56] 陈志刚, 李献华, 李武显. 全南正长岩的地球化学特征及成因 [J]. *地质论评*, 2002, 48(S1): 77–83.
- Chen Z G, Li X H, Li W X. Geochemical characteristics and origin of the Quannan syenite [J]. *Geological Review*, 2002, 48(S1): 77–83.
- [57] 王文东, 刘涛, 周传芳, 等. 黑龙江富源沟晚三叠世中-基性火山岩的厘定及地质意义 [J]. *地质与资源*, 2023, 32(6): 670–680.
- Wang W D, Liu T, Zhou C F, et al. Identification of the Late Triassic Fuyuangou intermediate-basic volcanic rocks in Heilongjiang Province: Geological implication [J]. *Geology and Resources*, 2023, 32 (6): 670–680.
- [58] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram [J]. *Chemical Geology*, 1986, 56(3/4): 207–218.
- [59] 李强, 程学芹, 王艳凯, 等. 大兴安岭北段盘古河上游早古生代中基性杂岩体 U-Pb 年龄、地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2024, 70(1): 155–174.
- Li Q, Cheng X Q, Wang Y K, et al. U-Pb age, geochemical characteristics of the Early Paleozoic intermediate-basic complex in the upper reaches of Pangu River, northern Great Hinggan Mountains and their geological implications [J]. *Geological Review*, 2024, 70(1): 155–174.

(上接第 276 页/Continued from Page 276)

- [32] Tomurtogoo O, Windley B F, Kröner A, et al. Zircon age and occurrence of the Adaatsag ophiolite and Muro shear zone, central Mongolia: Constraints on the evolution of the Mongol-Okhotsk Ocean, suture and orogen [J]. *Journal of the Geological Society*, 2005, 162 (1): 125–134.
- [33] 徐美君, 许文良, 王枫, 等. 小兴安岭中部早侏罗世花岗质岩石的年代学与地球化学及其构造意义 [J]. *岩石学报*, 2013, 29(2): 354–368.
- Xu M J, Xu W L, Wang F, et al. Geochronology and geochemistry of the Early Jurassic granitoids in the central Lesser Xing'an Range, NE China and its tectonic implications [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(2): 354–368.
- [34] Xu W L, Pei F P, Wang F, et al. Spatial-temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: Constraints on tectonic overprinting and transformations between multiple tectonic regimes [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 167–193.
- [35] Maruyama S, Send T. Orogeny and relative plate motions: Example of the Japanese Islands [J]. *Tectonophysics*, 1986, 127(3/4): 305–329.