

赵慧, 杨经绥, 刘飞, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带萨嘎碱性玄武岩地球化学和年代学研究[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1242–1256.
Zhao Hui, Yang Jingsui, Liu Fei, et al. Geochemical and chronological studies of the alkaline basalt in Saga along the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1242–1256(in Chinese with English abstract).

西藏雅鲁藏布江缝合带萨嘎碱性玄武岩地球化学 和年代学研究

赵 慧^{1,2} 杨经绥^{1,2} 刘 飞² 熊发挥² 张 岚¹ 连东洋^{2,3}

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北武汉 430074)

摘要: 萨嘎蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)的中段, 主要由地幔橄榄岩、辉长岩、辉绿岩和玄武岩组成。在萨嘎蛇绿岩南侧分布一条熔岩带, 与萨嘎蛇绿岩呈断层接触。该熔岩带呈北西西向展布, 宽约 1~3 km, 长约 150 km。熔岩呈块状构造, 气孔和杏仁状构造发育, 斑状结构, 基质为间粒间隐结构。斑晶主要为斜长石(钠长石化, 含量 15%~20%), 及少量单斜辉石(约 5%), 单斜辉石(Wo = 44~48, En = 40~45, Fs = 10~12)为含钛透辉石(TiO₂ = 1.46%)。根据硅碱图(TAS)分类, 该套熔岩属于碱性玄武岩类, 整体表现为高钛、高铝和高钾, 富集 Rb、Ba、Th 等大离子亲石元素和 Zr、Hf 等高场强元素, 轻重稀土强烈分馏, (Ce/Yb)_n = 7.30~14.18, 平均值为 11。萨嘎玄武岩的地球化学特征与大陆裂谷火山岩一致, 可能形成于板内裂谷环境。本研究表明, 萨嘎碱性玄武岩的地幔源区具有石榴子石残余, 早期经历了橄榄石、单斜辉石等镁铁矿物的分离结晶。锆石 U–Pb 定年结果表明萨嘎碱性玄武岩中锆石年龄较分散, 产出的最年轻的一组锆石平均年龄为(54.2±1.4)Ma, 它们的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 介于 -11~+1.7 之间, 具有中元古代的 Hf 同位素二阶段模式年龄, 为壳源的捕获锆石, 表明该套碱性玄武岩形成时代不早于始新世早期。

关键词: 雅鲁藏布江缝合带; 萨嘎碱性玄武岩; 锆石 U–Pb 定年; 地球化学

中图分类号: P588.14'5; P595; P597 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2015)05–1242–15

Geochemical and chronological studies of the alkaline basalt in Saga along the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

ZHAO Hui^{1,2}, YANG Jing-sui^{1,2}, LIU Fei², XIONG Fa-hui², ZHANG Lan¹, LIAN Dong-yang^{2,3}

(1. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. CARMA, State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: Located in the central part of Yarlung Zangbo Suture Zone (YZSZ), the Saga ophiolite is mainly composed of peridotites,

收稿日期: 2015–06–24; 改回日期: 2015–08–18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40930313)、国家行业专项(SinoProbe–05–02)、中国地质调查局工作项目(1212011121263、1212011121272)和创新研究群体科学基金项目(40921001)联合资助。

作者简介: 赵慧, 女, 1992年生, 硕士, 岩石学专业; E-mail: 13717926721@163.com。

通讯作者: 杨经绥, 男, 1950年生, 研究员, 岩石学专业, 从事青藏高原和造山带的岩石大地构造研究, E-mail: yangjsui@163.com。

gabbro, diabase and lava. This paper reports a suite of alkaline basalts to the south of the Saga ophiolite, which extends in NWW direction and crops out 1~3km in width. This suite of basaltic lavas has vesicular/ amygdaloid structure and porphyric texture with phenocrysts of plagioclase (15 modal %–20 modal.% in content) and clinopyroxene (~5 modal % in content). The plagioclase is albite and the clinopyroxene is titaniferous diopside ($\text{TiO}_2=1.46\text{wt.}\%$). Based on the composition and TAS diagram, the authors hold that the lava belongs to alkaline basalt. The lava shows the characteristics of low SiO_2 , high TiO_2 , K_2O and Al_2O_3 content as well as enrichment of large ion lithophile elements (LILE) (Rb, Ba, Th) and high field strength elements (HFSE) (Zr, Hf, Nb, Ta). The rare earth elements (REE) content of the basalt is higher ($\sum \text{REE}=266.93 \times 10^{-6}$), with a strong fractionation between LREE and HREE ($(\text{Ce}/\text{Yb})_N=7.30-14.18$). The chemical characteristics are similar to features of continental rift volcanic rocks. This study shows that garnets exist as residual minerals in the source. In addition, at the early stage of magmatism, there existed crystallization fractionation of olivine, clinopyroxene and other mafic minerals. U–Pb dating of zircons by LA–ICP–MS yielded a wide range of ages. The youngest group has average age of $(54.2 \pm 1.4)\text{Ma}$, with $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ being -11 – $+1.7$, and has the Mesoproterozoic two-stage model age, indicating that these zircons were captured from the crust and the lava had not formed until early Eocene.

Key words: Yarlung Zangbo suture zone; Saga alkaline basalt; geochemistry; U–Pb dating of zircon

About the first author: ZHAO Hui, female, born in 1992, master candidate, majors in petrology; E–mail: 13717926721@163.com.

About the corresponding author: YANG Jing–sui, male, born in 1950, doctor, senior researcher, majors in petrology and tectonics; E–mail: yangjsui@163.com.

1 引言

青藏高原被誉为“世界第三极”,是研究大陆裂离、洋壳拉张、洋陆/陆陆俯冲和碰撞,探索地壳变质变形、大陆和大洋岩石圈演化、地幔深部过程等地球动力学的关键地区^[1-3]。

青藏高原是由多个地体和它们之间的缝合带拼合而成^[4-7]。已经确认的缝合带有西昆仑库地缝合带^[8]、北阿尔金—北祁连缝合带、南阿尔金—柴北缘缝合带、东昆仑南缘缝合带^[9-11]、金沙江缝合带、羌中缝合带^[12-13]、班公湖—怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带^[14-15]。雅鲁藏布缝合带(YZSZ)位于青藏高原南部,在中国境内延展近2000 km,被认为是印度板块与欧亚大陆的分界线,记录了新特提斯洋初始打开、扩张伸展、俯冲消减、碰撞拼合等形成演化的信息^[2,11-16]。

按蛇绿岩的空间分布,雅鲁藏布江缝合带大致可以分为东段(由曲水向东至米林一带,包括大拐弯地区)、中段(仁布—桑桑)和西段(萨嘎以西至中印边界)^[14]。萨嘎地区处于一个重要的枢纽位置,YZSZ西段自萨嘎向西分为两支,即北亚带(达机翁—萨嘎蛇绿岩带)和南亚带(达巴—休古嘎布蛇绿岩带),中间被仲巴—札达微陆块分割。因此,萨嘎地区的地质研究对于探讨南北亚带的成因关系以及特提斯洋的形成演化具有十分重要的意义。É.Bédard et al(2009)

对萨嘎蛇绿岩进行了详细的研究,表明萨嘎蛇绿岩不具有完整层序,主体为新鲜的或蛇纹石化的地幔橄辉岩。地幔橄辉岩主要为二辉橄辉岩和含单斜辉石的方辉橄辉岩, $\text{Cr}^\#$ 为0.1~0.2。洋壳单元主要为变辉长岩,变玄武岩,变安山岩,枕状玄武岩以及辉绿岩岩墙。其中,镁铁质岩石显示出N–MORB, BABB, IAT的地球化学特性。Bédard et al(2009)^[15]认为萨嘎蛇绿岩形成于洋内俯冲的弧后盆地。Carl Guilmette et al(2012)^[16]在萨嘎蛇绿岩体中发现了含石榴子石、单斜辉石的角闪岩,并强烈发育面理,被认为是一个变质晕,其达到峰期变质条件的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为132~127 Ma,代表了沿萨嘎一线新特提斯洋的俯冲年龄。

本文报道了在萨嘎蛇绿岩南侧发现的一套玄武质熔岩,在详细野外工作的基础上,对该套熔岩进行岩石学、地球化学以及锆石U–Pb年代学研究,探讨其形成的构造背景,为恢复新特提斯洋演化提供新信息。

2 地质背景与采样位置

雅鲁藏布缝合带(YZSZ)位于青藏高原南部(图1),主要由泥砂质、蛇绿质混杂岩以及蛇绿岩残片组成。其南侧是特提斯喜马拉雅构造单元,二者之间为大反向逆冲断层(GCT)^[17]。特提斯喜马拉雅主要由新元古代—早古生代沉积岩以及二叠纪—

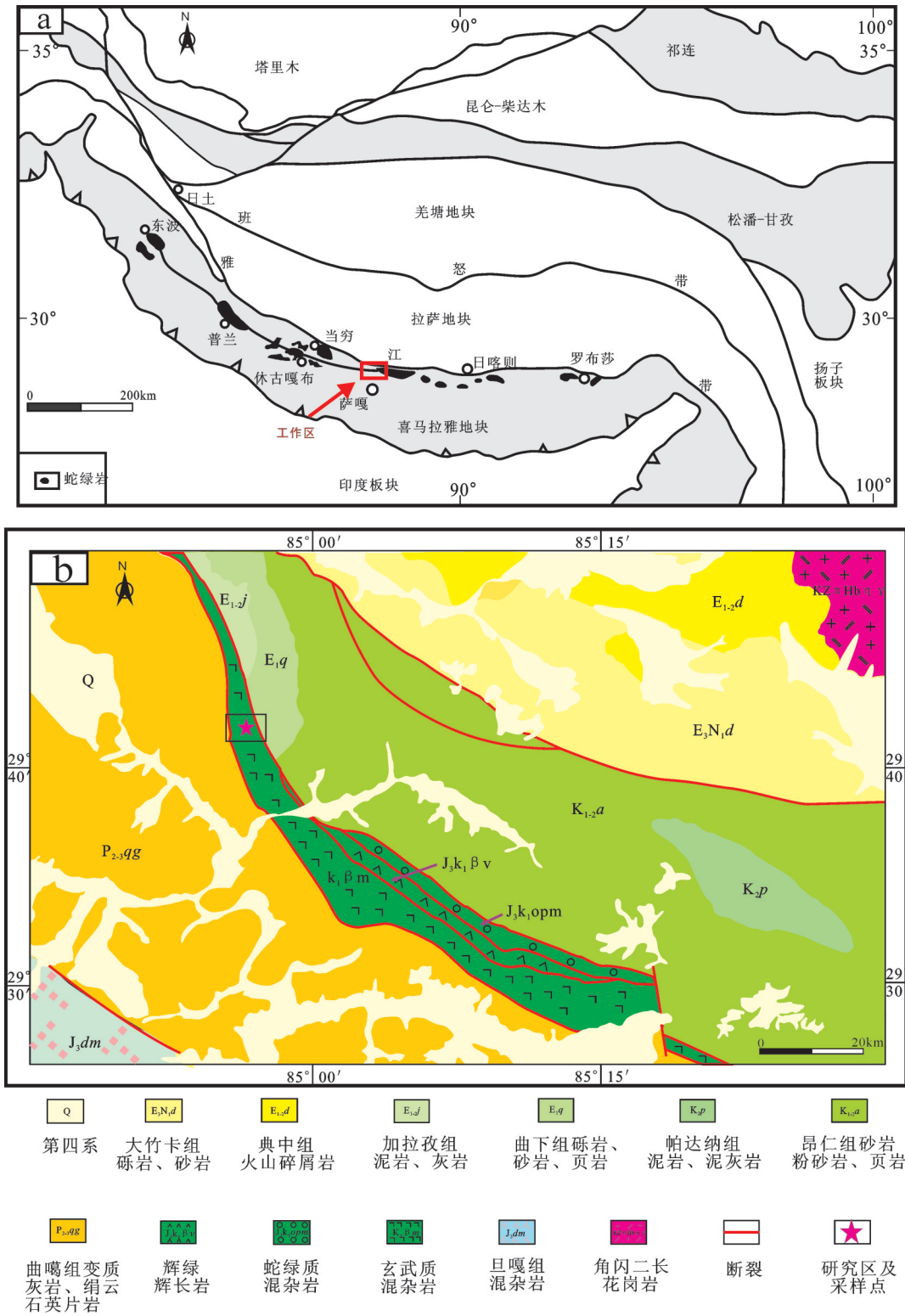


图1 青藏高原地质简图(a据文献[25])和雅鲁藏布缝合带萨嘎地质简图(b据河北省地质调查院,2005^①修编)
Fig. 1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau (Fig. a after reference [25]) and detailed geological map of Saga in the YZSZ (Fig. b after Hebei Institute of Geological Survey, 2005^①)

①河北省地质调查院. 1:25万萨嘎县幅地质图,2005.

白垩纪被动大陆边缘沉积序列组成^[17]。它又可分为南北两个亚带,北亚带为晚三叠世—古新世大陆斜坡沉积,岩石主要为硅质碎屑岩、砂岩、页岩和灰岩等,由于缺少大化石,且对放射虫化石动物群的研究不够,地层时代限制较差,缺少横向对比,地层厚度不明^[17-21];南亚带为晚三叠世—古新世大西洋型稳定大陆边缘陆棚沉积,以碳酸盐岩和碎屑岩为主,中生代沉积厚度约为5 km^[19,22]。雅鲁藏布缝合带北侧是拉萨地体,二者之间为冈底斯逆冲断层^[20]。随着大洋岩石圈北向俯冲,在拉萨地体南缘产生了大量的岩浆活动,形成了白垩纪—古近纪的冈底斯岩浆弧^[18],并在冈底斯弧南侧发育有白垩纪—始新世的日喀则弧前盆地沉积^[23-24]。萨嘎地区位于西藏南部,采样点位于萨嘎县城西北,距县城约40 km,地理坐标为84°53'49.8"E,29°44'21.1"N。该套玄武岩呈北西西向断续延展约150 km,宽1~3

km。其北与蛇绿混杂岩呈断层接触,南与侏罗纪修康群泥砂质混杂岩以及二叠纪曲噶组绢云石英片岩呈断层接触(图2)。

3 岩相学特征

玄武岩为块状构造,露头上呈灰绿色,发育气孔构造和杏仁构造。杏仁体粒径为0.1~2 mm,被绿泥石、方解石等充填,有定向排列,为熔岩流动所致(图3-c)。岩石具斑状结构,斑晶主要为斜长石(15%~20%)和少量单斜辉石(约5%)(图3-a、b)。斜长石斑晶为长柱状,呈自形—半自形结构,部分具有中空骸晶结构,粒径为0.5~2 mm,钠长石化、碳酸盐化以及绿帘石化较强烈。单斜辉石斑晶为短柱状,呈半自形—他形结构,粒径为0.5 mm左右,发生了强烈的绿泥石化以及阳起石化,但部分仍保留有单斜辉石的晶体形态。电子探针分析结果表明,单

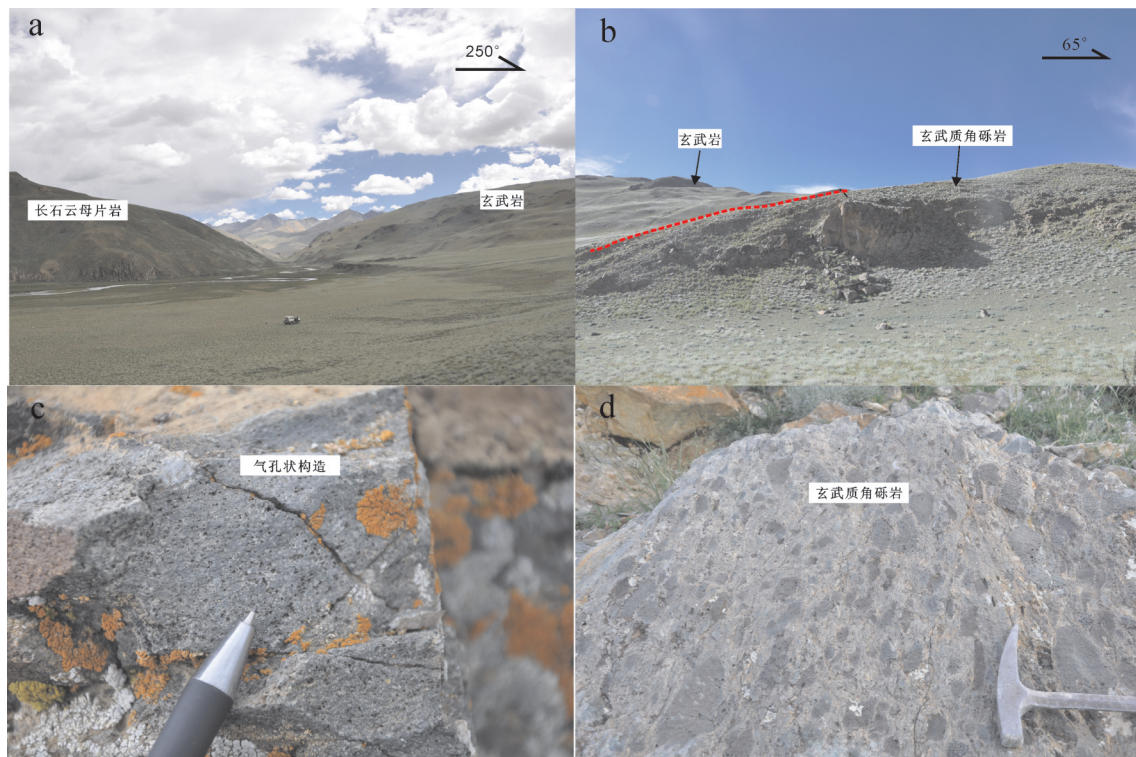


图2 萨嘎玄武岩的野外产出特征

a—萨嘎玄武岩与围岩野外产状;b—萨嘎玄武岩与围岩绢云石英片岩断层接触,接触部位露出一套玄武质角砾岩;
c—萨嘎玄武岩气孔状构造;d—玄武质角砾岩

Fig. 2 Outcrops of the Saga basalt

a—Field attitude of Saga basalt and the country rock; b—Saga basalt in contact with the country rock (quartz—mica schist) by fault with a suite of basaltic breccias in the contact zone; c—Saga basalt with vesicular structure; d—Basaltic breccia

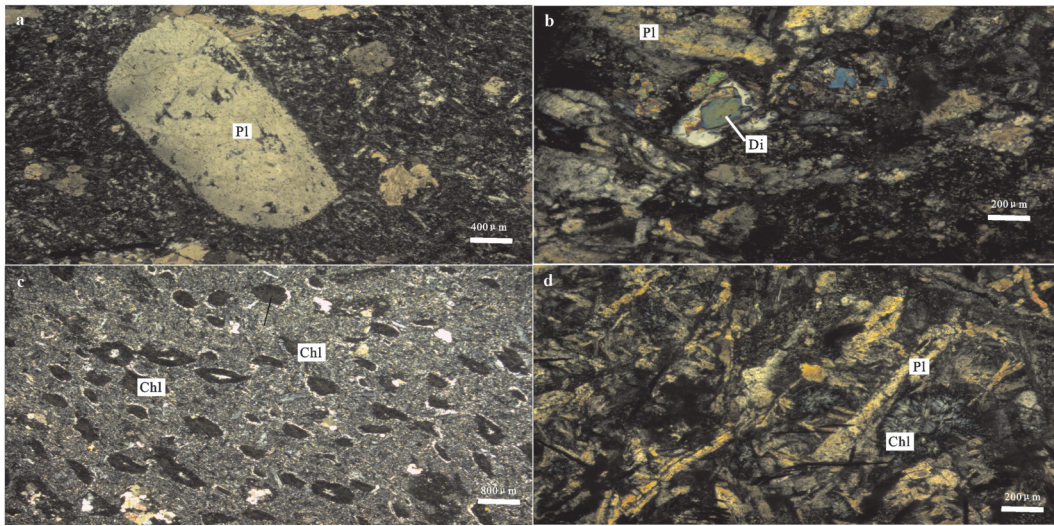


图3 萨嘎玄武岩光学显微镜下照片

a—斜长石斑晶(Pl),具有溶蚀麻点结构,基质黑褐色的火山玻璃中杂乱的分布有一些斜长石微晶,构成了玻基辉绿结构(样品号:13YL-94-1);b—间隐间粒结构,斜长石具有中空骸晶结构,其搭成的格架中分布有粒状的透辉石(Di)和褐色的玻璃质,透辉石绿泥石化强烈(样品号:13YL-94-4);c—被绿泥石充填的气孔呈定向排列(样品号:13YL-94-11);d—间隐间粒结构,单斜辉石绿泥石化强烈(墨水蓝异常干涉色)(样品号:13YL-94-4);Pl—斜长石;Di—透辉石;Chl—绿泥石

Fig. 3 Photomicrographs of Saga basalt

The phenocryst is plagioclase with dissolution texture. The matrix is mainly blackish brown volcanic glass in which some micro plagioclases are distributed disorderly (Sample number: 13YL-94-1); b—The matrix is tholeiitic texture. The plagioclases have hollow skeletal texture and constitute the framework which is filled with diopsides and brown volcanic glass. Most diopsides are chloritized (Sample number: 13YL-94-4. c—The vesicles filled with chlorite are directionally arranged (Sample number: 13YL-94-11); d—The matrix has tholeiitic texture. Most clinopyroxenes are chloritized (abnormal interference color of ink blue) with pseudomorph of granular clinopyroxene (Sample number: 13YL-94-4); Pl—Plagioclase; Di—Diopside; Chl—Chlorite

斜辉石斑晶大部分为含钛透辉石(TiO_2 平均为1.46%,表1)。基质为间粒间隐结构、玻基辉绿结构。基质中斜长石为长条状、自形-半自形结构,粒径为0.1 mm左右,聚片双晶发育,不规则排列的斜长石微晶之间充填辉石、磁铁矿、褐色的火山玻璃以及脱玻化形成的绿泥石。副矿物包括磁铁矿、钛铁矿和榍石以及少量磷灰石。

4 分析测试方法

全岩样品的测试分析在国土资源部国家地质实验测试中心完成,测试之前先用酸溶对样品进行了预处理。主量元素用熔片X-射线荧光光谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测,二价铁采用滴定法,分析精度0.01%。微量元素中的V、Cr、Co、Ni、Sr、Zr、Nb、Ta、Hf、Ba、Th、U等元素用熔片XRF和酸溶等离子质谱(ICP-MS)法测定,稀土元素用ICP-MS法测定,其中的Nb、

Ta、Zr、Hf是用碱溶法、沉淀酸提取、用等离子质谱法测定,同时分析2个国家标准样(GSR3和GSR5)和3个平行样品,以保证分析质量,分析精度优于5%,具体分析方法见文献[26]。

锆石分选是在河北省廊坊市宇能岩石矿物分选技术服务有限公司完成,主要步骤有:粉碎至80~120目、水淘洗、磁选、重液分离、实体双目镜挑选出锆石。锆石样品制靶工作以及透、反射照片和阴极发光(CL)图像的拍摄在中国地质科学院大陆构造与动力学国家重点实验室完成。样品的制备按以下步骤完成:挑选单矿物粘在双面胶上(双目镜下)—固定在环氧树脂靶上—待固化后,磨制、抛光,直至暴露出锆石的内部—照相(显微镜下,透反射光)—镀膜—拍摄阴极(CL)发光图像。

锆石U-Pb同位素定年是在中国科学技术大学激光剥蚀电感耦合等离子体质谱(LA-ICP-MS)实验室完成。ICP-MS为Agilent7500。剥蚀系统为

表1 萨嘎玄武岩斑晶斜长石和斑晶辉石电子探针分析结果(%)
Table1 Electron microprobe analyses of phenocrysts from Saga basalt(%)

测点号	样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Ab
94-81	辉石	51.734	1.134	2.818	0.027	5.8284	0.139	16.022	22.131	0.225	-	100.729	
94-87	辉石	48.687	1.793	5.17	0.05	6.3801	0.111	13.929	23.11	0.297	-	100.236	
94-43	长石	68.829	0.031	19.274	-	0.299	0.025	0.13	0.013	11.424	0.319	100.365	98.14
94-51	长石	67.918	0.466	19.013	0.018	0.470	-	0.168	0.394	11.074	0.592	100.113	94.80
94-76	长石	67.989	0.013	19.811	-	0.215	0.011	0.097	0.165	11.146	0.678	100.261	95.4
94-77	长石	68.164	-	19.343	-	0.185	0.022	0.051	0.095	11.31	0.051	99.223	99.26
94-89	长石	66.503	0.009	20.196	0.005	0.462	0.026	0.177	0.152	10.896	0.873	99.302	94.3
94-100	长石	67.522	-	19.627	-	0.150	0.004	-	0.413	11.197	0.116	99.029	97.35

注: 电子探针分析在中国地质科学院大陆构造与动力学国家重点实验室完成,“-”表示该项未测出或低于仪器检测限。

Geolas2005 激光剥蚀系统,激光器为 193 nmArF 准分子激光器。在激光剥蚀的过程中采用 He 作为载气,激光剥蚀束斑直径为 32 μm ,剥蚀深度为 20~40 μm 。锆石年龄计算采用国际标准锆石 91500 作为外标,元素含量采用美国国家标准物质局人工合成硅酸盐玻璃 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标元素进行校正。U/Pb 比值数据处理使用软件 LaDating@ Zrn,对普通 Pb 同位素进行校正使用软件 ComPbcorr#3-18^[27],校正后的数据使用美国 Berkeley 地质年代学中心编制的 ISOPLOT^[28]程序进行处理。

原位微区锆石 Hf 同位素比值测试在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)利用激光剥蚀多接收杯等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005 (Lambda Physik, 德国), MC-ICP-MS 为 Neptune Plus (Thermo Fisher Scientific, 德国)。该系统配备了本实验室自主研发的信号平滑装置。采用该装置即使激光脉冲频率降到 1 Hz,还可以获得平稳的信号^[29]。对于 193 nm 的激光,在给定的仪器条件下,使用氦气作为载气比使用氩气的信号灵敏度提高了 2 倍^[30]。研究表明,少量氮气的引入还可进一步提升大部分元素的灵敏度^[31]。相对于 Neptune Plus 的标准锥组合,新设计的 X 截取锥和 Jet 采样锥组合在少量氮气加入的条件下能分别提高 Hf、Yb 和 Lu 的灵敏度 5.3 倍、4.0 倍和 2.4 倍。激光输出能量可以调节,实际输出能量密度为 5.3 J/cm²。采

用单点剥蚀模式,斑束固定为 44 μm 。详细仪器操作条件和分析方法可参照 Hu et al. (2012)^[32]。

5 分析结果

5.1 岩石地球化学特征

5.1.1 主量元素

萨嘎玄武岩蚀变较强,12 个样品的烧失量(LOI)与 K₂O、Na₂O 含量进行相关性分析之后发现,当 LOI<8%时,K₂O、Na₂O 含量并不随着 LOI 的增加发生改变,而当 LOI \geq 8%时,K₂O、Na₂O 含量便随着 LOI 的增加而递减,因此在下文的讨论中,不考虑 LOI \geq 8%的 3 个样品。

剩余 9 个样品的烧失量(LOI)为 4%左右(表 2),扣除挥发分归一化处理后,在硅碱图(TAS)上,大部分样品点均分布在碱性玄武岩系列中的碱玄岩/碧玄岩与粗面玄武岩范围内(图 4)。1 个样品点落到了亚碱性与碱性系列分界线上,1 个样品点落到了亚碱性系列中,推测这可能与蚀变作用有关。样品的 TiO₂ 含量较高(2.47%~3.47%),平均含量为 2.96%,与洋岛玄武岩(TiO₂=2.87%)^[33]和肯尼亚裂谷玄武岩(TiO₂=1.89%~4.85%)^[34]的含量接近。Al₂O₃ 和 K₂O 含量较高,平均含量分别为 17%和 2.08%,高于洋岛玄武岩(Al₂O₃=13%~16%,K₂O=0.34%~1.7%)^[33],然而与肯尼亚裂谷玄武岩的含量(Al₂O₃~16%,K₂O=1.2%~2.2%)^[34]接近。MgO 含量较低(4.96%~7.95%),Mg[#]为 54.90~65.08,低于原生岩浆的 Mg[#]值(68~72)^[35],表明该玄武质岩浆经历了橄榄

表2 萨嘎玄武岩主量元素(%)与微量元素(10^{-6})分析测试结果
Table 2 Analytical results of major (%) and trace elements (10^{-6}) for the basalt in Saga

编号	97-12	97-14	97-15	97-16	94-2	94-3	94-5	94-6	94-7	94-11	94-14	94-17
SiO ₂	41.38	48.37	46.15	49.77	40.57	42.08	41.42	41.34	41.59	46.06	42.92	41.84
Al ₂ O ₃	11.31	15.59	14.07	17.29	17.28	17.20	16.99	16.62	17.35	14.68	17.15	18.44
CaO	8.02	2.94	5.46	3.40	3.27	3.10	2.44	4.46	2.54	5.95	2.97	1.97
Fe ₂ O ₃	3.95	5.41	3.85	3.23	7.01	6.71	8.65	6.74	7.25	4.47	6.55	6.26
FeO	5.05	4.76	4.08	6.92	10.33	9.57	9.83	9.14	10.04	6.74	9.57	10.69
K ₂ O	2.63	3.67	3.51	2.59	2.03	2.07	1.84	2.28	2.07	1.91	1.74	2.22
MgO	9.27	6.20	7.38	4.68	7.43	7.09	6.93	6.56	7.21	6.98	6.87	7.55
MnO	0.12	0.05	0.09	0.12	0.14	0.13	0.12	0.15	0.13	0.13	0.13	0.12
Na ₂ O	0.11	0.68	0.71	3.18	2.52	2.74	2.91	2.56	2.70	2.50	3.25	2.76
P ₂ O ₅	0.21	0.33	0.58	0.47	0.42	0.35	0.24	0.60	0.25	0.56	0.42	0.23
TiO ₂	2.08	3.16	2.85	2.70	2.80	2.90	2.79	2.76	2.83	2.42	2.64	2.93
CO ₂	11.14	3.43	6.77	1.11	0.69	0.60	0.17	1.37	0.17	2.66	0.51	0.26
H ₂ O ⁺	4.44	4.58	4.18	4.06	5.46	5.26	5.12	4.74	5.24	4.22	5.02	4.98
LOI	15.41	8.10	11.01	5.03	5.49	5.16	4.82	5.81	5.01	6.70	4.91	5.05
Ta	4.08	6.19	5.56	7.10	7.35	7.42	7.25	6.85	7.35	5.85	6.70	7.93
Th	6.99	7.58	8.98	11.9	10.6	9.93	12.0	11.7	13.3	10.0	10.7	10.2
U	1.14	1.78	1.24	2.43	1.83	1.81	2.04	1.71	1.91	1.17	1.82	1.95
Ga	16.5	20.2	19.1	25.3	21.3	20.7	20.1	20.2	21.5	17.2	20.3	22.4
Pb	3.58	3.58	3.71	4.88	3.84	3.68	5.14	4.22	4.04	3.86	3.52	3.24
Sr	148	92.2	127	216	111	103	81.8	168	81.7	355	115	65.3
V	209	265	228	308	351	330	337	362	340	302	324	366
Ge	1.54	2.33	1.72	2.34	2.25	2.32	2.27	2.29	2.22	1.57	2.31	2.28
Rb	47.6	40.1	55.7	61.7	37.1	52.6	50.9	41.4	56.7	51.1	47.7	60.4
Nb	70.1	106	95.2	120	126	131	126	123	125	95.1	120	137
Ba	752	574	903	798	643	798	768	706	821	577	670	858
Zr	180	262	217	320	278	280	273	270	284	202	264	296
Hf	4.24	5.86	5.39	6.87	6.60	6.51	6.38	6.08	6.67	5.22	5.85	6.83
Cr	412	483	429	259	303	281	310	276	270	357	260	318
Ni	111	154	115	86.2	89.4	103	110	77.9	91.2	137	97.2	115
La	53.9	75.9	92.1	55.7	46.2	23.6	38.4	62.5	69.8	47.0	42.5	30.6
Ce	97.0	122	143	105	101	63.8	88.5	116	125	101	91.5	71.8
Pr	10.4	14.0	16.8	11.3	11.1	8.52	11.0	14.1	16.0	12.3	10.6	8.36
Nd	37.4	49.7	59.6	42.0	41.1	36.0	43.3	51.3	56.5	47.7	41.4	33.5
Sm	5.54	6.64	9.09	7.57	7.04	7.52	7.67	7.90	8.26	8.43	7.54	6.59
Eu	1.66	1.86	2.83	2.94	2.22	2.50	2.52	2.53	2.50	2.60	2.51	2.21
Gd	5.27	6.13	8.65	7.61	6.86	7.34	7.41	8.15	7.78	8.10	7.55	6.51
Tb	0.63	0.68	0.99	1.05	0.90	0.98	0.98	1.02	0.98	1.04	1.00	0.90
Dy	3.43	3.79	4.95	5.65	5.04	5.58	5.37	5.55	5.46	5.68	5.39	5.08
Ho	0.64	0.73	0.87	1.05	0.95	1.01	0.96	1.01	1.00	1.02	1.02	0.99
Er	1.93	2.14	2.49	2.95	2.71	2.90	2.84	2.89	2.88	2.90	2.91	2.79
Tm	0.24	0.27	0.29	0.37	0.33	0.35	0.36	0.35	0.35	0.36	0.35	0.35
Yb	1.53	1.70	1.81	2.32	2.18	2.26	2.28	2.17	2.28	2.25	2.24	2.25
Lu	0.22	0.24	0.26	0.33	0.30	0.32	0.33	0.33	0.32	0.32	0.29	0.30
Y	17.0	18.8	23.3	28.7	25.3	26.6	25.5	27.4	25.9	26.7	29.3	26.3
S	0.007	0.006	0.007	0.005	0.006	0.007	0.006	0.008	0.005	0.005	0.005	0.005
La/Sm	6.12	7.19	6.37	4.63	4.13	1.97	3.15	4.98	5.32	3.51	3.55	2.92
Ce/Yb	16.4	18.56	20.44	11.71	11.98	7.3	10.04	13.83	14.18	11.61	10.57	8.25
Mg [#]	76.77	70.1	76.5	54.9	56.42	57.15	55.93	56.37	56.38	65.08	56.37	55.97

注: $Mg^{\#} = 100 \times Mg^{2+} / (Mg^{2+} + Fe^{2+})$ 。

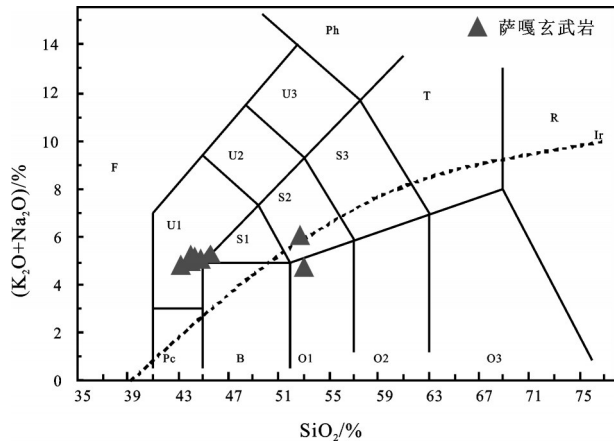


图4 萨嘎玄武岩的TAS分类图解(据文献[36])

Pc—苦橄玄武岩;B—玄武岩;O1—玄武安山岩;O2—安山岩;
O3—英安岩;R—流纹岩;S1—粗面玄武岩;S2—玄武质粗面安山
岩;S3—粗面安山岩;T—粗面岩、粗面英安岩;F—副长石岩;
U1—碱玄武岩、碧玄武岩;U2—响岩质碱玄武岩;U3—碱玄质响岩;
Ph—响岩;Ir—Irvine 分界线,上方为碱性,下方为亚碱性

Fig. 4 TAS discrimination diagram of basalt in Saga (after reference [36])

Pc—Picobasalt;B—Basalt;O1—Basaltic andesite;O2—Andesite;
O3—Dacite;R—Rhyolite;S1—Trachybasalt;S2—Basaltic
trachyandesite;S3—Trachyandesite;T—Trachyte/trachydacite;
F—Foidite;U1—Basanite/tephrite;U2—Phonotephrite;
U3—Tephriphonolite;Ph—Phonolite; Ir—Irvine

石、单斜辉石等镁铁矿物的分离结晶作用。CaO 含量较低,平均值为3.3%,推测这是由后期蚀变作用造成的。

5.1.2 微量元素

萨嘎玄武岩稀土元素总量为 198.53×10^{-6} ~ 367.03×10^{-6} ,平均含量为 266.93×10^{-6} ,其稀土元素配分型式与洋岛玄武岩^[33]、肯尼亚裂谷玄武岩相似^[34](图5-a),轻重稀土强烈分馏, $LREE/HREE=3\sim 7.83$, $(La/Yb)_N=7.04\sim 20.64$,平均值为13.6, $(La/Sm)_N=1.97\sim 5.32$,平均值为3.70。无Eu异常, $\delta Eu=0.95\sim 1.03$ ($\delta Eu=Eu_N/[(Sm_N+Gd_N)\times 1/2]$)。

微量元素原始地幔标准化图解(图5-b)中可以看出,样品强烈富集不相容元素Rb、Ba、Th、Nb,含量均高于洋岛玄武岩^[33],与肯尼亚裂谷玄武岩相近^[34]。其中,高场强元素Nb具有显著正异常, $\delta Nb=2.02\sim 3.78$ 。大离子亲石元素Th为正异常, $\delta Th=1.18\sim 1.73$ 。Sr为中等—强烈亏损, $\delta Sr=0.07\sim 0.15$,推测Sr的亏损是由于在后期蚀变作用过程中Sr伴随Ca发生了迁移。

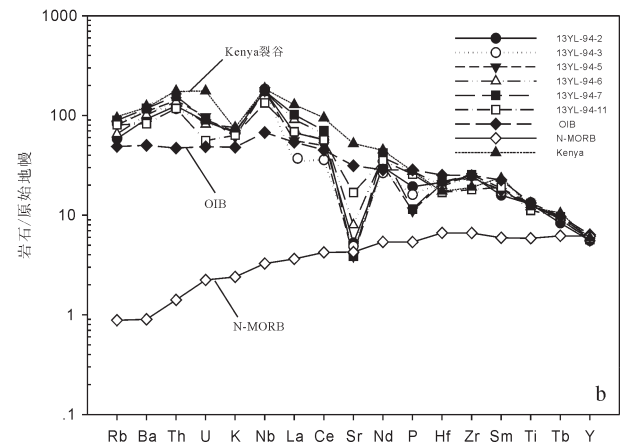
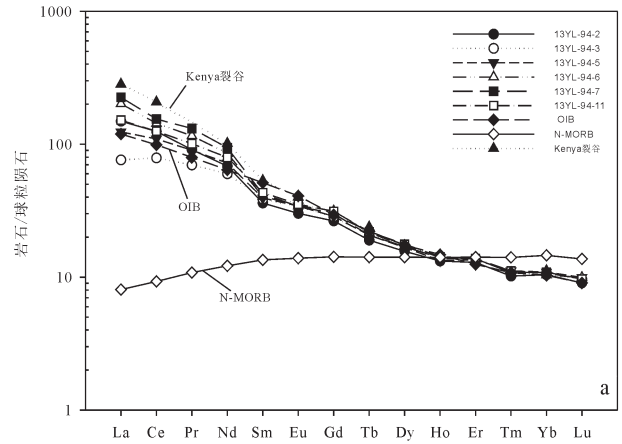


图5 a—萨嘎玄武岩稀土元素球粒陨石标准化图解;b—微量元素原始地幔标准化图解

(球粒陨石、原始地幔、OIB、N-MORB值据文献[36])

Fig. 5 a—Chondrite-normalized REE patterns; b—Primitive mantle-normalized trace elements patterns for the basalt in Saga (chondrite, primitive mantle, OIB, N-MORB value after reference [36])

5.2 锆石U-Pb年代学

从样品13YL-94-10中挑选出52颗锆石,锆石大致分两类:一类为变质重结晶作用形成的变质锆石^[37-38],主要特征为主:黄褐色、半透明、他形、不规则状,内部无分带或斑杂状分带,局部残留有岩浆锆石的震荡环带,阴极发光明亮,部分存在白色蚀变边, Th/U 比值平均为0.12;另外一类锆石为典型岩浆锆石^[37-38](图6),其特征为无色透明,自形,短柱状,粒径为80~100 μm ,长宽比大约为2:1,阴极发光明亮,具有明显的震荡环带,部分具有扇形分带, Th/U 比值为0.55~1.67。

选出30粒锆石进行LA-ICP-MS原位微区U-

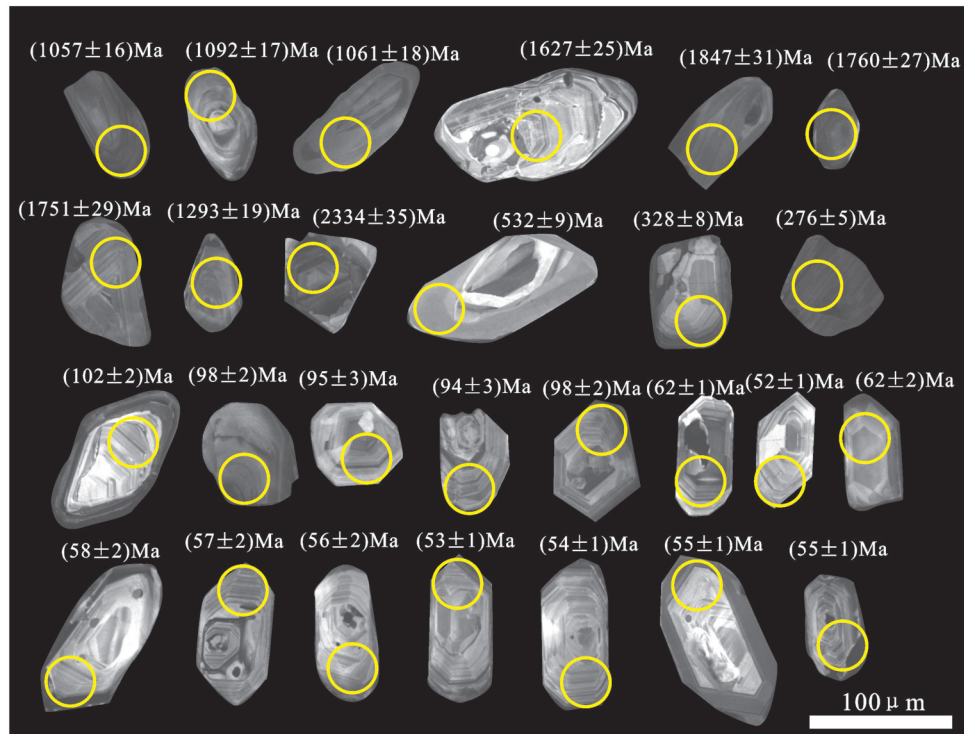


图6 萨嘎玄武岩中锆石的CL图像(13YL-94-10)
Fig.6 CL images of zircons from basalt in Saga(13YL-94-10)

Pb定年分析(表3),结果表明,该碱性玄武岩中锆石年龄跨度大, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 集中分布在两个年龄阶段:52~62 Ma($n=10$),94~102 Ma($n=5$)。其中52~62 Ma锆石为岩浆锆石,平均年龄为 (54.2 ± 1.4) Ma (MSWD=2)(图7)。

5.3 锆石Hf同位素组成

由于锆石具有较高的Hf含量,但Lu的含量又极低,从而导致其 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 具有非常低的比值。因此,锆石在形成后基本没有明显的放射性成因Hf的积累,所测定的 $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$ 比值基本代表了其形成时体系的Hf同位素组成^[39]。本文对最年轻的一组锆石(55~63 Ma)进行了Hf同位素测定。10颗岩浆锆石 $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ 比值介于0.282439~0.282783 ($\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -11 \sim +1.7$),其两阶段Hf模式年龄介于1582~904 Ma(表4,图8)。

6 讨论

6.1 岩浆作用过程

尽管部分熔融作用与分离结晶作用很难区分,但是使用不相容元素—相容元素协变图解可以对

这两个作用过程进行区分^[40]。在 SiO_2 -Th和 SiO_2 -Ni协变图解上,萨嘎碱性玄武岩总体呈现出随着岩浆 SiO_2 含量的升高,Th含量逐渐降低,Ni含量逐渐升高的演化趋势,可能代表了同一幔源不同程度部分熔融作用(图9)。

玄武质岩浆生成后,在向上运移以至喷出地表的过程中,通常会发生分离结晶作用或同化混染作用,或者两种作用兼而有之(即AFC过程)。样品MgO和Ni含量较低($\text{Mg}^\#$ 为54.90~65.08, $\text{Cr} = 80 \times 10^{-6} \sim 154 \times 10^{-6}$),明显低于原生岩浆($\text{Mg}^\# = 68 \sim 72$, $\text{NiO} > 0.03\%$)^[35],可能在岩浆演化的早期阶段发生了橄榄石、单斜辉石等镁铁矿物的结晶分离。

6.2 源区特征

通常地壳 TiO_2 含量低(平均仅0.72%),来自软流圈的 TiO_2 岩浆含量在1.27%左右^[41],而与深部地幔物质活动有关的岩浆, TiO_2 含量常大于2.0%。萨嘎玄武岩 TiO_2 含量较高(2.47%~3.47%),平均含量为2.96%,表明萨嘎玄武岩岩浆起源较深。La/Sm和Sm/Yb比值受分离结晶作用影响较小,用这两个比值可以了解岩浆源区的性质和部分熔融程度^[24]。

表3 萨嘎玄武岩锆石La-ICP-MS U-Pb同位素定年结果
Table 3 Zircon U-Pb data of the basalts from Saga by La-ICP-MS

测点号	含量/ 10^{-6}			同位素比值							年龄/Ma		
	Th ²³²	U ²³⁸	Pb*	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1 σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1 σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1 σ
1	260.83	608.11	119.11	0.43	0.079	0.00248	1.92688	0.07403	0.17822	0.00299	0.10913	1057	16
2	535.15	562.69	6.13	0.95	0.05016	0.00515	0.05454	0.00628	0.00803	0.00019	0.00592	52	1
3	256.03	489.57	9.13	0.52	0.04155	0.00309	0.08522	0.00721	0.0153	0.00031	0.01109	98	2
4	523.75	989.76	10.55	0.53	0.05395	0.0058	0.06346	0.00765	0.00834	0.00021	0.00791	54	1
5	382.44	1131.62	10.92	0.34	0.06275	0.00544	0.07244	0.00718	0.00823	0.0002	0.01244	53	1
6	276.25	356.58	6.70	0.77	0.03577	0.00566	0.0737	0.01279	0.01465	0.00041	0.01004	94	3
7	61.20	722.41	144.52	0.08	0.07512	0.00265	1.90823	0.0816	0.18462	0.00311	0.11797	1092	17
8	191.14	426.74	92.47	0.45	0.07526	0.00293	1.70725	0.08095	0.16551	0.0033	0.12383	1061	18
9	104.44	140.77	9.23	0.74	0.06497	0.0059	0.41619	0.04307	0.05212	0.00129	0.03594	328	8
10	368.37	434.73	5.32	0.85	0.06002	0.01288	0.06466	-0.01251	0.00871	0.00028	0.00695	56	2
12	66.90	598.74	56.16	0.11	0.06261	0.0026	0.74015	0.03664	0.08608	0.00146	0.05833	532	9
14	275.00	454.32	9.08	0.61	0.04814	0.00493	0.10423	0.01198	0.01588	0.00038	0.0122	102	2
15	136.49	209.91	2.66	0.65	0.06159	0.01293	0.06207	0.01415	0.00961	0.00032	0.00721	62	2
16	1602.74	982.34	66.48	1.63	0.05141	0.00256	0.30908	0.01804	0.04371	0.00079	0.03097	276	5
17	279.53	433.95	158.70	0.64	0.10314	0.00308	4.08296	0.15043	0.287	0.00497	0.18553	1627	25
18	507.06	681.12	192.42	0.74	0.07653	0.00234	2.3469	0.08786	0.22219	0.00361	0.14372	1293	19
19	158.21	160.85	69.05	0.98	0.1003	0.00376	4.34819	0.19709	0.31392	0.00555	0.1976	1760	27
20	87.71	110.22	47.07	0.80	0.09113	0.00398	4.16867	0.21859	0.33187	0.00636	0.21163	1847	31
21	509.79	623.00	12.05	0.82	0.03712	0.00383	0.083	0.00952	0.01538	0.00033	0.01083	98	2
22	438.39	454.26	8.85	0.97	0.04328	0.00509	0.08732	0.01151	0.01482	0.0004	0.00957	95	3
23	1469.96	912.20	13.54	1.61	0.04337	0.00457	0.05574	0.00658	0.00973	0.00023	0.0066	62	1
24	991.97	1071.94	12.19	0.93	0.05191	0.00434	0.06629	0.00644	0.0089	0.00024	0.00691	57	2
25	64.73	124.43	44.64	0.52	0.1004	0.00414	4.41508	0.21969	0.31209	0.00596	0.22462	1751	29
26	415.69	461.54	5.20	0.90	0.02903	0.00553	0.03439	0.00709	0.00905	0.00026	0.00584	58	2
27	190.57	183.01	107.72	1.04	0.1248	0.00404	7.59607	0.30181	0.43622	0.0077	0.27379	2334	35
28	344.49	643.32	6.70	0.54	0.05559	0.00629	0.06823	0.00864	0.00858	0.00022	0.00649	55	1
29	565.97	933.86	9.69	0.61	0.04205	0.00502	0.04732	0.00626	0.00862	0.00021	0.00651	55	1

对于尖晶石二辉橄榄岩,当其发生部分熔融时,Sm/Yb 比值变化不大,呈现较平坦的熔融趋势线;而对于含石榴子石地幔橄榄岩,当其发生小程度部分熔融时,轻重稀土会出现明显分馏,熔体的Sm/Yb 比值增加,形成比较陡的熔融趋势线。Zhu 等(2008)^[42]模拟了原始地幔和亏损地幔在非实比批式熔融过程中Sm/Yb 和La/Sm 比值的变化曲线。在Sm/Yb-La/Sm 图解上(图10),萨嘎碱性玄武岩的Sm/Yb 比值较高,接近石榴子石二辉橄榄岩的熔融曲线,表明萨嘎碱性玄武岩地幔源区可能存在石榴子石。

6.3 形成环境

在对板内玄武岩具有较好识别效果的Ti-Zr-Y 图解和Th-Hf-Ta 图解(图11-a,b)中,所有样品均分布在板内玄武岩区域内。由于Th、Ta、Hf 都是强不相容元素,其亲岩浆性的变化是同步的,Th/Hf 和Ta/Hf 比值在地幔部分熔融过程中只有很小的变化,在岩浆分离结晶过程中基本不变。因此,原生岩浆岩的Th/Hf 和Ta/Hf 比值,直接反映的是其源区的Th、Ta、Hf 分异特征,且大体等于其源区的值。因此,可用来恢复岩浆源区成分,进而判别岩石形成的大地构造环境^[43]。在Th/Hf-Ta/Hf 图解(图12)

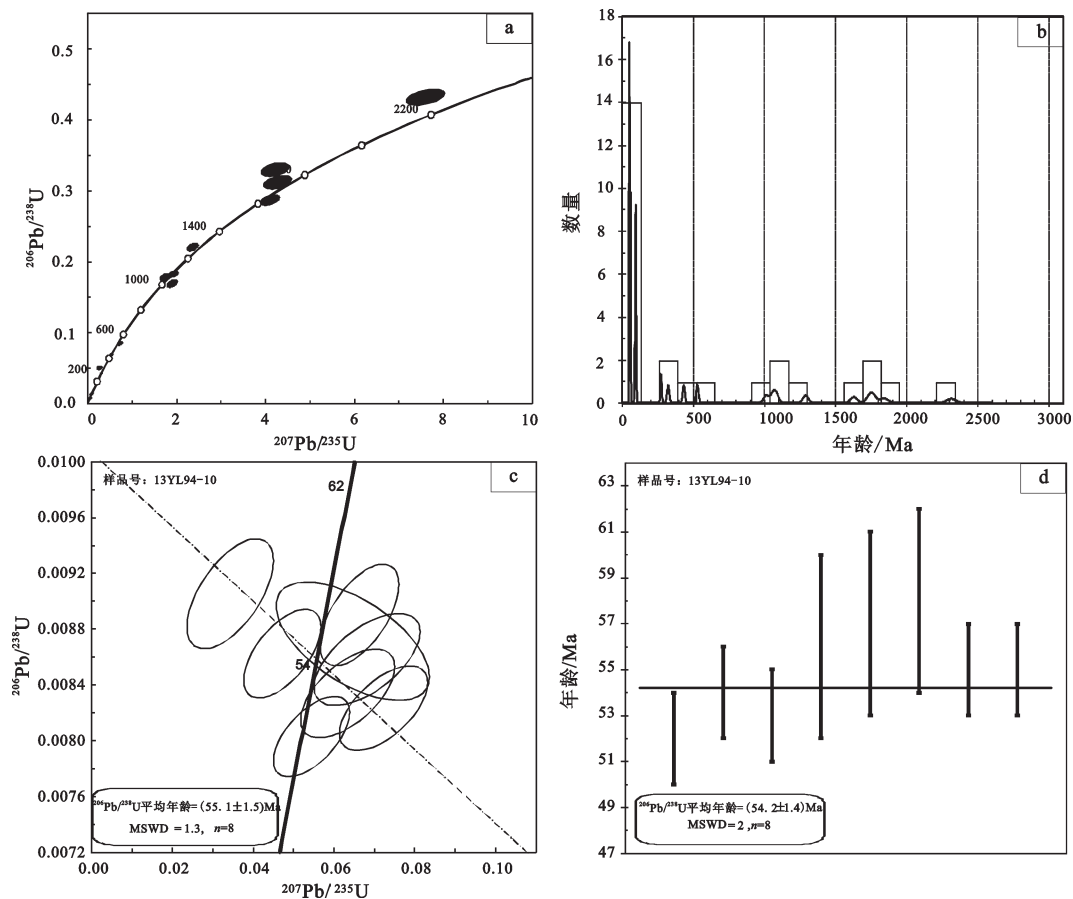


图7 a—萨嘎玄武岩中锆石的U-Pb年龄谐和图;b—萨嘎玄武岩中锆石的年龄分布概率图;
c,d—萨嘎玄武岩中52~62 Ma锆石的U-Pb年龄谐和图和年龄加权平均图

Fig. 7 a—U-Pb concordia diagram of the basalt in Saga; b—Relative probability and distribution plots of $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages for Saga basalt; c, d—U-Pb concordia and weighted average diagrams of the basalt in Saga with the ages ranging from 52 Ma to 62 Ma

表4 萨嘎玄武岩中55~63 Ma年龄段的锆石Hf同位素分析结果
Table 4 Hf isotopic analyses of the 55~63 Ma zircons in Saga basalt

年龄/Ma	$\pm 1\sigma$	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\sigma$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$\pm 1\sigma$	$\epsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\pm 1\sigma$	T_{DM1}	T_{DM2}
52	1	0.282324	0.000017	0.000310	0.000000	0.007980	0.000038	-4.7	1.2277837	908.87823	1248.9793
54	1	0.282015	0.000009	0.000250	0.000000	0.006256	0.000017	-6.1	1.772211135	112809.3343	1330.969341
53	1	0.282687	0.000018	0.001123	0.000009	0.029166	0.000424	-10.7	4.042735973	112877.1812	1582.514129
56	2	0.282439	0.000113	0.000749	0.000018	0.018841	0.000729	-5.0	2.34227168	116231.5248	1273.062039
62	2	0.284680	0.002833	0.001515	0.000166	0.073399	0.017220	1.7	2.658973778	111823.4968	904.3930262
57	2	0.282566	0.000090	0.000675	0.000030	0.017638	0.000953	-6.1	3.223535013	113052.4665	1331.418773

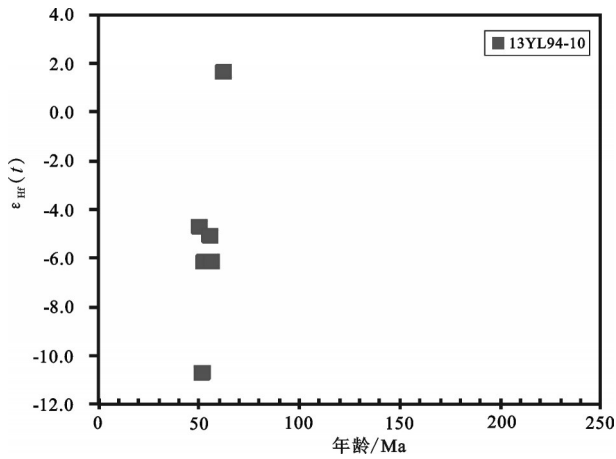


图8 萨嘎玄武岩中52~62 Ma 锆石的 $\epsilon_{Hf}(t)$ 和U-Pb年龄作图 (13YL-94-10)
Fig.8 Plot of $\epsilon_{Hf}(t)$ vs U-Pb ages for 52-62 Ma zircons in Saga basalt (13YL-94-10)

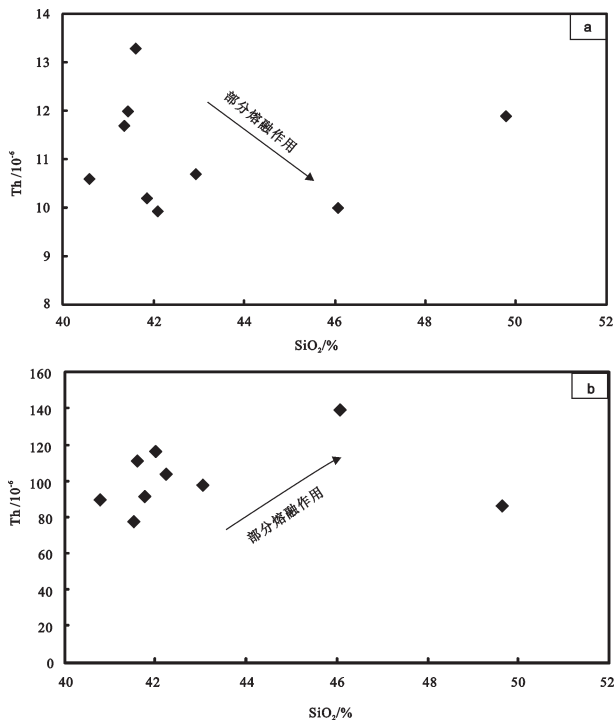


图9 高度不相容元素Th和相容元素Ni与SiO₂之间的协变图
Fig. 9 Highly incompatible and compatible element plots against SiO₂

上,萨嘎碱性玄武岩主要分布在陆内裂谷玄武岩区,部分落在了地幔热柱玄武岩区。因此,根据地球化学特征以及不相容元素比值,本文认为萨嘎碱性玄武岩形成于陆内裂谷环境。

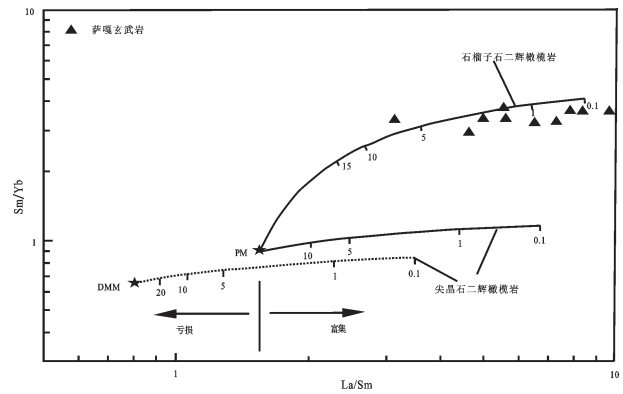


图10 Sm/Yb-La/Sm图解(DMM-亏损地幔;据文献[30])
Fig. 10 Sm/Yb-La/Sm diagram (DMM-Depleted mantle; after reference [30])

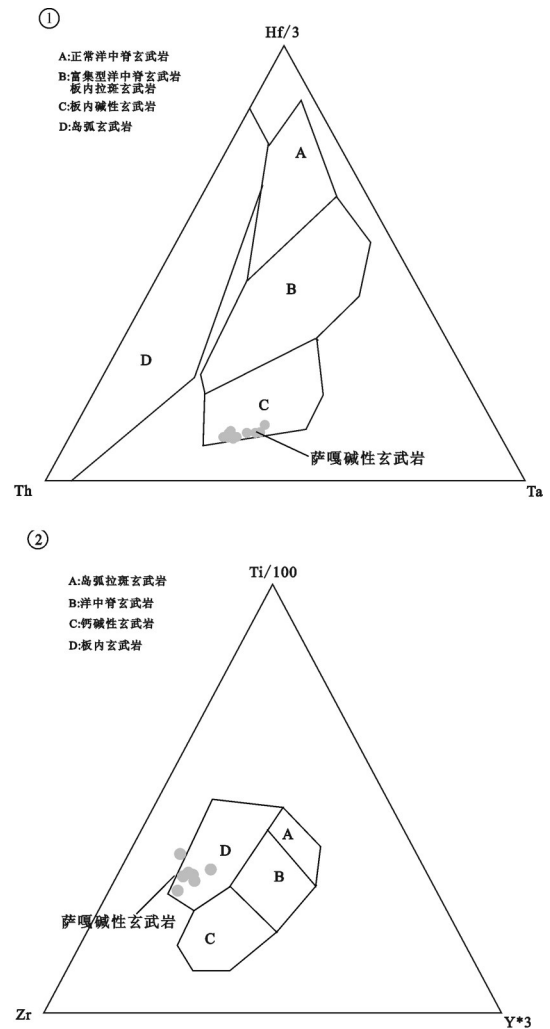
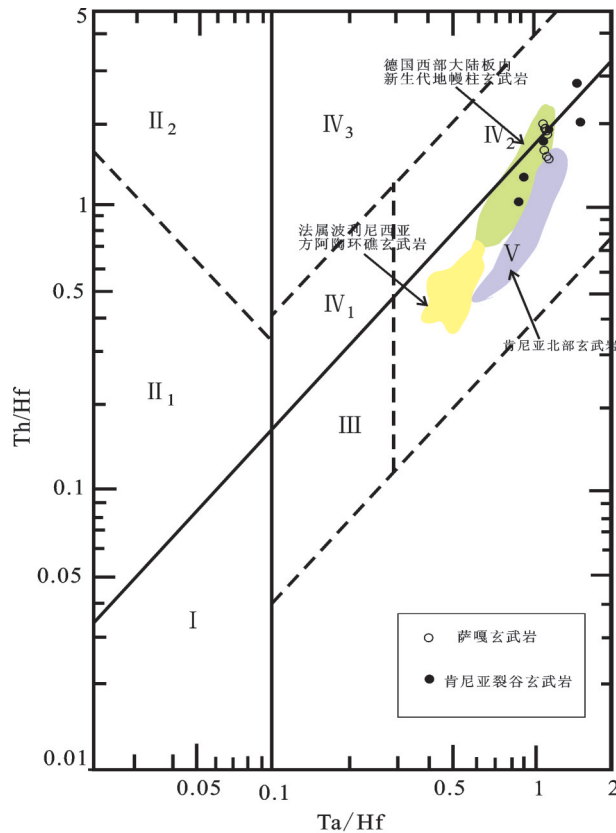


图11 萨嘎碱性玄武岩构造判别图解
a—引自文献[44];b—引自文献[45]
Fig. 11 Tectonic discrimination diagrams for alkaline basalt in Saga (a—after reference [44]; b—after reference [45])



I 板块发散边缘N-MORB区; II 板块汇聚边缘(II,大洋岛弧玄武岩区; II,陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区); III 大洋板内洋岛、海山玄武岩区及T-MORB、E-MORB区; IV 大陆板内(IV,陆内裂谷及陆缘裂谷拉斑玄武岩区; IV,陆内裂谷碱性玄武岩区; IV,大陆拉张带(或初始裂谷)玄武岩区); V 地幔热柱玄武岩
(底图以及德国西部大陆板内新生代地幔柱玄武岩、法属波利尼西亚阿陶环礁玄武岩、肯尼亚北部玄武岩分布区引自汪云亮, 2001)

图12 萨嘎碱性玄武岩Th/Hf-Ta/Hf构造判别图解
Fig. 12 Th/Hf-Ta/Hf discrimination diagram for alkaline basalt in Saga

在1:25万的萨嘎幅区调报告中,河北省地质调查研究院将该套碱性玄武岩命名为“玄武质混杂岩单元”,认为该套碱性玄武岩形成于洋岛环境,并推测其形成时代为白垩纪。然而,根据本文的地球化学和年代学研究,初步表明该套碱性玄武岩是陆内裂谷岩浆作用的产物,且其形成时代不早于始新世早期。但是,目前还有一系列的问题不甚明了,比如该套玄武岩的形成时代、成因机理、地质意义等,这还有待进一步的野外调查和室内研究工作。

7 结 论

(1)萨嘎碱性玄武岩的主量元素、微量元素地球化学研究表明具有陆内裂谷玄武岩的地球化学

特征,初步认为形成于陆内裂谷环境,还需进一步的调查研究。

(2)萨嘎碱性玄武岩的地幔源区具有石榴子石残余,该玄武岩岩浆演化过程可能经历了橄榄石、单斜辉石等镁铁质矿物的分离结晶。

(3)萨嘎碱性玄武岩形成时代不早于始新世早期。

致谢:李毅兵博士、田亚洲博士、周文达师兄、陈艳虹师姐、陈梅师姐给予了有益的建议和帮助;黄健、张利、杨艳参与了野外工作;在此表示诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] 潘裕生. 青藏高原的形成与隆升[J]. 地学前缘, 1999, 6(3): 153-163.
Pan Yusheng. Formation and uplifting of the Qinghai-Tibet plateau[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(3): 153-163(in Chinese with English abstract).
- [2] 莫宣学, 潘桂棠. 从特提斯到青藏高原形成: 构造-岩浆事件的约束[J]. 地学前缘, 2006, 13(6): 43-51.
Mo Xuanxue, Pan Guitang. From the Tethys to the formation of the Qinghai-Tibet Plateau: constrained by tectono-magmatic events[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6): 43-51(in Chinese with English abstract).
- [3] 肖序常, 万子益, 李光岑, 等. 雅鲁藏布江缝合带及其邻区构造演化[J]. 地质学报, 1983, 57(2): 203-212.
Xiao Xuchang, Wan Ziyi, Li Guangcen, et al. On the tectonic evolution of the Yarlung Zangbo (Tsangpo) suture zone and its adjacent areas[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(2): 203-212(in Chinese with English abstract).
- [4] 肖序常, 汤耀庆, 高延林. 再论青藏高原的板块构造[J]. 中国地质科学院院报, 1986(14):7-21.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Gao Yanlin. Preexposition on Plate of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1986(14):7-21(in Chinese with English abstract).
- [5] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合, 碰撞造山及高原隆升的深部驱动力 [J]. 中国地质, 2006, 33(2).
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. The Qinghai-Tibet plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and processes and mechanisms for the rise of the plateau [J]. Geology in China, 2006, 33(2) (in Chinese with English abstract).
- [6] 许志琴, 李海兵, 杨经绥. 造山的高原——青藏高原巨型造山拼贴体和造山类型[J]. 地学前缘, 2006, 13(4):001-017.
Xu Zhiqin, Li Haibing, Yang Jingsui. An orogenic plateau—the orogenic collage and orogenic types of the Qinghai-Tibet

- plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 001–017 (in Chinese with English abstract).
- [7] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 印度—亚洲碰撞大地构造[J]. *地质学报*, 2011, 85(1): 1–33.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. On the Tectonics of the India–Asia Collision[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(1): 1–33 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邓万明, 喀喇昆仑—西昆仑地区蛇绿岩的地质特征及其大地构造意义[J]. *岩石学报*, 1995, 11: 98–111.
Deng Wanming, Geological features of ophiolites and tectonic significance in the Karakoram–west Kunlun Mts[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1995, 11: 98–111 (in Chinese with English abstract).
- [9] 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义[J]. *地质学报*, 1978 (4): 281–295.
Xiao Xuchang, Chen Guoming, Zhu Zhizhi. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian mountain, northwest China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1978 (4): 281–295 (in Chinese with English abstract).
- [10] 刘良, 车自成, 王焰. 阿尔金高压变质带的特征及其构造意义[J]. *岩石学报*, 1999, 15(1): 57–64.
Liu Liang, Che Zicheng, Wang Yan. The petrological characters and geotectonic setting of high–pressure metamorphic rock belts in Altun Mountains[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 1999, 15(1): 57–64 (in Chinese with English abstract).
- [11] Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 1996, 258: 215–231.
- [12] 李才. 青藏高原龙木错—双湖—澜沧江板块缝合带研究二十年[J]. *地质论评*, 2008, 54(1): 105–119.
Li Cai. A Review on 20 Years' Study of the Longmu Co–Shuanghu–Lancang River Suture Zone in Qinghai–Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Geological Review*, 2008, 54(1): 105–119 (in Chinese with English abstract).
- [13] 李才, 翟庆国, 董永胜, 等. 青藏高原龙木错—双湖板块缝合带与羌塘古特提斯洋演化记录[J]. *地质通报*, 2007, 01: 13–21.
Li Cai, Zhai Qingguo, Dong Yongsheng et al. Lungmu Co–Shanghu plate suture in the Qinghai–Tibet Plateau and records of the evolution of the Paleo–Tethys Ocean in the Qiangtang area, Tibet, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2007, 01: 13–21 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张万平, 袁四化, 刘伟. 青藏高原南部雅鲁藏布江蛇绿岩带的时空分布特征及地质意义[J]. *西北地质*. 2011, 44(1): 1–9.
Zhang Wanping, Yuan Sihua, Liu Wei. Distribution and research significance of ophiolite in Brahmaputra Suture Zone, Southern Tibet[J]. *Northwestern Geology*, 2011, 44(1): 1–9.
- [15] É. Bédard, Hébert R, Wang C, et al. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 125(1): 347–367.
- [16] Carl Guilmette, Réjean Hébert, Jaroslav Dostal, et al. Discovery of a dismembered metamorphic sole in the Saga ophiolitic mélange, South Tibet: Assessing an Early Cretaceous disruption of the Neo–Tethyan supra–subduction zone and consequences on basin closing[J]. *Gondwana Research*. 2012, 22: 398–414.
- [17] Yin, Harrison. Geologic evolution of the Himalayan Tibetan orogen[J]. *Annu. Rev. Earth Planet.* 2000, 28: 211–80.
- [18] 莫宣学. 岩浆作用与青藏高原演化[J]. *高校地质学报*, 2011, 17 (3): 351–367.
Mo Xuanxue. Magmatism and evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(3): 351–367 (in Chinese with English abstract).
- [19] 丁林. 西藏雅鲁藏布江缝合带古新世深水沉积和放射虫动物群的发现及对前陆盆地演化的制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33 (1): 47–58.
Ding Lin. The discovery of Paleocene deep water sediments and radiolarian faunas in Yarlung Zangbo suture zone, constraints for the evolution of forearc basin[J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(1): 47–58 (in Chinese with English abstract).
- [20] Garzanti E, Sciunnach D, Gaetani M. Discussion on subsidence history of the north Indian continental margin, Zaskar–Ladakh Himalaya, NW India[J]. *Journal of the Geological Society*, London, 2005, 162: 889–892.
- [21] Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. When and where did India and Asia collide? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112: 1–19.
- [22] 万晓樵, 赵文金, 李国彪. 对西藏岗巴上白垩统的新认识[J]. *现代地质*, 2000, (14)3: 281–285.
Wan Xiaqiao, Zhao Wenjin, Li Guobiao. Restudy of the upper Cretaceous in Gamba, Tibet[J]. *Geoscience*, 2000, (14)3: 281–285 (in Chinese with English abstract).
- [23] 万晓樵, 丁林, 李建国, 等. 西藏仲巴地区白垩纪末期—始新世早期海相地层[J]. *地层学杂志*, 2001, (25)4: 267–272
Wan Xiaqiao, Ding Lin, Li Jianguo, et al. Latest Cretaceous to early Eocene marine strata in the Zhong Ba region, Tibet[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2001, (25)4: 267–272 (in Chinese with English abstract).
- [24] 王成善, 刘志飞, 李祥辉, 等. 日喀则弧前盆地和雅鲁藏布江缝合带[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 1–237.
Wang Chengshan, Liu Zhifei, Li Xianghui, et al. Xigaze Fore–arc Basin and Yarlung Zangbo Suture Zone[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999: 1–237 (in Chinese).
- [25] Liu C Z, Wu F Y, Wide S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. *Lithos*, 2010, 114(3/4): 413–422.
- [26] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP–MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*. 1996, 25 (6): 552–558.
Liu Ying, Liu Haichen, Li Xianhua. Simultaneous and precise determination of 40 trace elements in rock samples using ICP–

- MS [J]. *Geochemica*, 1996, 25 (6): 552–558(in Chinese with English abstract).
- [27] Andersen T. Correction of common Pb in U–Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192(1/2): 59–79
- [28] Ludwig K R. Isoplot/Ex version 2.49: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[C]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003, 1a: 1–56.
- [29] Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, et al. A “wire” signal smoothing device for laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry analysis[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2012, 78: 50–57.
- [30] Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, et al. A Local Aerosol Extraction Strategy for the Determination of the Aerosol Composition in Laser Ablation Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23: 1192–1203.
- [31] Hu Zhaochu, Gao Shan, Liu Yongsheng, et al. Signal Enhancement in Laser Ablation ICP–MS by Addition of Nitrogen in the Central Channel Gas[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2008, 23: 1093–1101.
- [32] Hu Zhaochu, Liu Yongsheng, Gao Shan, et al. Improved in situ Hf isotope ratio analysis of zircon using newly designed X skimmer cone and Jet sample cone in combination with the addition of nitrogen by laser ablation multiple collector ICP–MS[J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2012, 27: 1391–1399.
- [33] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes[C]//aunders AD and Norry MJ(eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Spec. Publ. Geol. Soc. Lond. 1989,42:313–345.
- [34] Macdonald R, Rogers N W, Fittion J G, et al. Plume–Lithosphere Interactions in the generation of the basalts of the Kenya Rift, east Africa[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42:877–900.
- [35] Frey F A , Green D H, Roy S D. Integrated models of basalt petrogenesis: a study of quartz tholeiites to olivine melilitites from South Eastern Australia utilizing geochemical and experimental petrological data[J]. *Journal of Petrology*, 1978, 19: 463–513.
- [36] Le Maitre (ed). *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms* (2nd edition)[M]. Cambridge University Press, 2002.
- [37] 周剑雄, 陈振宇. 电子探针下锆石阴极发光的研究[M]. 四川: 电子科技大学出版社, 2010:1–104.
- Zhou Jianxiong, Chen Zhenyu. Study on Cathodoluminescence of zircon by Electron Probe[M]. Sichuan: Electronic Science and Technology University Press, 2010: 1–104(in Chinese with English abstract).
- [38] 李长民. 锆石成因矿物学与锆石微区定年综述[J]. *地质调查与研究*, 2009, 33(3):161–174.
- Li Changmin. A review on the minerageny and situ microanalytical dating techniques of zircons[J]. *Geological Survey and Research*, 2009, 33(3):161–174(in Chinese with English abstract).
- [39] 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. Lu–Hf同位素体系及其岩石学应用[J]. *岩石学报*, 2007, 23(2):185–220.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei. Lu–Hf isotopic systematic and their applications in petrology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(2): 185–220(in Chinese with English abstract).
- [40] Alanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, et al. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post–collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 102: 67–95.
- [41] Rudnick and Gao. *The composition of the Continental Crust*[M]// *Treatise on Geochemistry*. Oxford, Elsevier, 2003:1–64.
- [42] Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Pan Guitang, et al. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous mafic rocks from the Cona area of the eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: Interaction between the incubating Kerguelen plume and the eastern Greater India lithosphere? [J]. *Lithos*, 2008, 100:147–173.
- [43] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf–Ta/Hf图解判别[J]. *岩石学报*, 17(3):413–421.
- Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf–Ta/Hf identification of tectonic setting of basalt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 17(3):413–421(in Chinese with English abstract).
- [44] Pearce Julian A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973,19:290–300.
- [45] Wood D. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 11–30.