

·专题研究·

北羌塘北缘玉树三叠纪火山岩的成因机制 及其构造意义

刘 彬^{1,2}, 马昌前^{2,3}, 黄 坚⁴, 熊富浩⁵, 张 鑫³, 郭宇衡³

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国地质大学 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 4. 江西科技学院, 江西 南昌 330098; 5. 成都理工大学 地球科学学院, 四川 成都 610059)

摘 要: 位于北羌塘地体北缘玉树隆宝地区三叠纪火山岩主要以英安岩为主。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示这些火山岩的形成年龄约为 230 ± 2 Ma (MSWD=0.5)。岩石样品在成分上富硅和铝, 并且相对于原始地幔富集大离子亲石元素 (LILEs: Rb、Ba、Th 和 U 等) 和轻稀土元素, 亏损高场强元素 (HFSEs: Nb、Ta 和 Ti 等), 其总体分布样式与典型弧火山岩的化学特征类似。样品均具有相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-0.91 \sim -0.53$)、低的 I_{Sr} 值 (0.707) 以及正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值 ($+3.81 \sim +7.61$), 表明其源区应以新生地壳组分为主。与现已报道的其他三叠纪火山岩资料进行系统对比, 发现中晚三叠世火山岩具有明显的分带性, 分别集中出露在北羌塘地体的北缘和南缘。另外, 与北缘火山岩相比, 南缘火山岩在岩石组合上具有双峰式的特点, 并且其中的长英质组分具有更低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值 ($-8.79 \sim -1.77$)、相对高的 I_{Sr} 值 (0.706~0.714) 以及南缘三叠纪 S 型花岗岩基本一致 Hf 同位素组成 [$\epsilon_{\text{Hf}}(t) = -15.3 \sim -10.1$], 反映了其源区应以古老陆壳物质为主。综合区域最新研究资料可以判断, 北羌塘地体南缘中晚三叠世火山岩的形成应与南、北羌塘地体碰撞阶段的板片断离有关, 而北缘中晚三叠世火山岩的形成则与甘孜-理塘古特提斯洋盆向南俯冲有关。

关键词: 火山岩; 岩石成因; 古特提斯; 三叠纪; 北羌塘地体

中图分类号: P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2016)01-0001-15

Petrogenetic mechanism and tectonic significance of Triassic Yushu volcanic rocks in the northern part of the North Qiangtang Terrane

LIU Bin^{1,2}, MA Chang-qian^{2,3}, HUANG Jian⁴, XIONG Fu-hao⁵, ZHANG Xin³ and GUO Yu-heng³

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China; 2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 4. Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China; 5. College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Triassic Yushu volcanic rocks are mainly composed of dacites and distributed in the northern part of the North Qiangtang (NQ) terrane. Zircon LA-ICP-MS U-Pb ages of 230 ± 2 Ma (MSWD=0.5) could be interpreted as the formation time of these volcanic rocks. Most samples from the Yushu volcanic rocks are characterized by high SiO_2 and Al_2O_3 , obvious enrichment of large ion lithophile elements (LILEs: Rb, Ba, Th and U) and strong depletion of high field strength elements (HFSEs, such as Nb, Ta and Ti) relative to the primitive mantle. They exhibit high $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ ($-0.91 \sim -0.53$), low I_{Sr} (0.707) and positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($+3.81 \sim +7.61$), suggesting that they probably originated from partial melting of a juvenile crustal component.

收稿日期: 2015-09-21; 接受日期: 2015-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41502050, 41272079); 长江大学长江青年基金项目 (2015cqn29); 中国地质调查局项目 (12120115026901, 12120114057501)

作者简介: 刘 彬 (1987-), 男, 讲师, 矿物学、岩石学、矿床学专业, E-mail: liubincug@foxmail.com。

Compared with the other reported Triassic volcanic rocks of the (NQ), it could be found that most of the Middle to Late Triassic volcanic rocks (MLTV) are concentrated in the northern part or the southern part of the NQ. The Middle-Lower Triassic Yushu volcanic rocks from the south part of the NQ exhibit lower $\epsilon\text{Nd}(t)$ ($-8.79 \sim -1.77$), higher $I_{\text{Sr}}(0.706 \sim 0.714)$ and negative $\epsilon\text{Hf}(t)$ ($-15.3 \sim -10.1$), implying these rocks might be derived from partial melting of the old crustal materials. Combined with the other new available observations, the authors hold that the Middle-Lower Triassic Yushu volcanic rocks in the southern part of the NQ were genetically related to the slab break-off during the collision between South Qiangtang terrane and NQ, whereas the southward subduction of the Ganzi-Litang Paleo-Tethyan ocean resulted in the generation of the Middle-Lower Triassic Yushu volcanic rocks from the northern part of the NQ.

Key words: volcanic rocks; petrogenesis; Paleo-Tethys; Triassic; North Qiangtang terrane

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41502050, 41272079); Yangtze Youth Fund (2015cqpn29); China Geological Survey Project (12120115026901, 12120114057501)

青藏高原是现今全球范围内最高最大最年轻的高原,经历了相当完整的特提斯构造演化过程(包括原特提斯、古特提斯和新特提斯),被公认为世界上研究大陆动力学和板块构造演化最好的天然实验室(莫宣学,2010)。其中,青藏高原中部地区出露了大量的晚古生代-早中生代岩浆岩,并且涉及到多条缝合带(或蛇绿混杂岩带)、条带状地体群、岛弧群、高压变质带、增生楔系列组合以及大量的多金属矿产,是认识青藏高原乃至全球古特提斯域构造演化与成矿作用的关键位置(Yin and Harrison, 2000; Pan *et al.*, 2012; Metcalfe, 2013; 许志琴等, 2013)。在过去几十年的时间里,国内外学者对古特提斯构造-岩浆演化的研究多集中在其东南部“三江”地区,但对其西北部地区(包括北羌塘地体)的研究一直非常薄弱。对该区岩浆作用的时空框架与成因机理、有关地球动力学背景演化等一系列基本问题还缺少深入的认识,例如二叠纪-三叠纪时期该区是否经历了与其东南部“三江”地区相同的构造演化历史(李善平等, 2007; Roger *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2012, 2014; 许志琴等, 2013)? 近年来的研究显示,伴随着古特提斯洋盆的演化以及相关地体拼合过程,北羌塘地体内部发育了大量的三叠纪火山岩。对这些火山岩开展详细的研究能够为反演该区三叠纪构造演化历史提供非常重要的年代学与岩石学证据。然而,目前对于这些三叠纪火山岩的成因机制与构造背景的认识还存在很大的争论,涉及到金沙江或甘孜-理塘古特提斯洋盆的向南俯冲、龙木错-双湖洋盆的向北俯冲以及陆内裂谷等多种演化模型(Wang *et al.*, 2008; Fu *et al.*, 2010; Zhang *et al.*, 2011; Zhai *et al.*, 2013a; Peng *et al.*, 2014)。

因此,本研究选取北羌塘地体北缘玉树地区隆宝三叠纪火山岩为具体的研究对象,开展详细的锆石 U-Pb 年代学、岩石地球化学以及 Sr-Nd-Hf 同位素研究,深入剖析其成因机制,在此基础上与前人报道的其他地区三叠纪火山岩进行系统的对比,进而分析与探讨北羌塘地体三叠纪岩浆作用的机理及有关地球动力学演化过程。

1 地质背景与样品采集

青藏高原中部地区涉及 3 条主要的古特提斯缝合带,包括龙木错-双湖缝合带、金沙江缝合带和甘孜-理塘缝合带。以这些缝合带为界,可将青藏高原中部大致分为南羌塘地体、北羌塘地体、义敦岛弧地体以及巴颜喀拉-松潘甘孜地体。其中,北羌塘地体主要位于龙木错-双湖缝合带和金沙江缝合带西段或甘孜-理塘缝合带之间。该地块主要由前石炭纪浅变沉积岩系、石炭纪-二叠纪陆缘碎屑岩-火山岩以及三叠纪火山岩-陆缘碎屑岩-碳酸盐岩 3 个地层单元组成,并且还发育有少量的第三系-第四系山间盆地沉积物。Kapp 等(2003)的研究结果显示部分变质岩中存在着大量年龄老于 500 Ma 的碎屑锆石,指示该地块可能存在前寒武纪的基底。

本文研究的玉树地区隆宝三叠纪火山岩,位于北羌塘地体北缘,行政上隶属于青海省玉树藏族自治州隆宝乡(GPS 坐标为 $\text{N}33^{\circ}11.351'$, $\text{E}96^{\circ}28.151'$)。研究区内出露三叠纪巴塘群地层。该套地层主要为一套碳酸盐岩夹火山岩-碳酸盐岩-碎屑岩建造,其中的火山岩夹层由英安岩、安山岩和凝灰质岩石等组成,可能代表了陆缘火山弧沉积序列。本

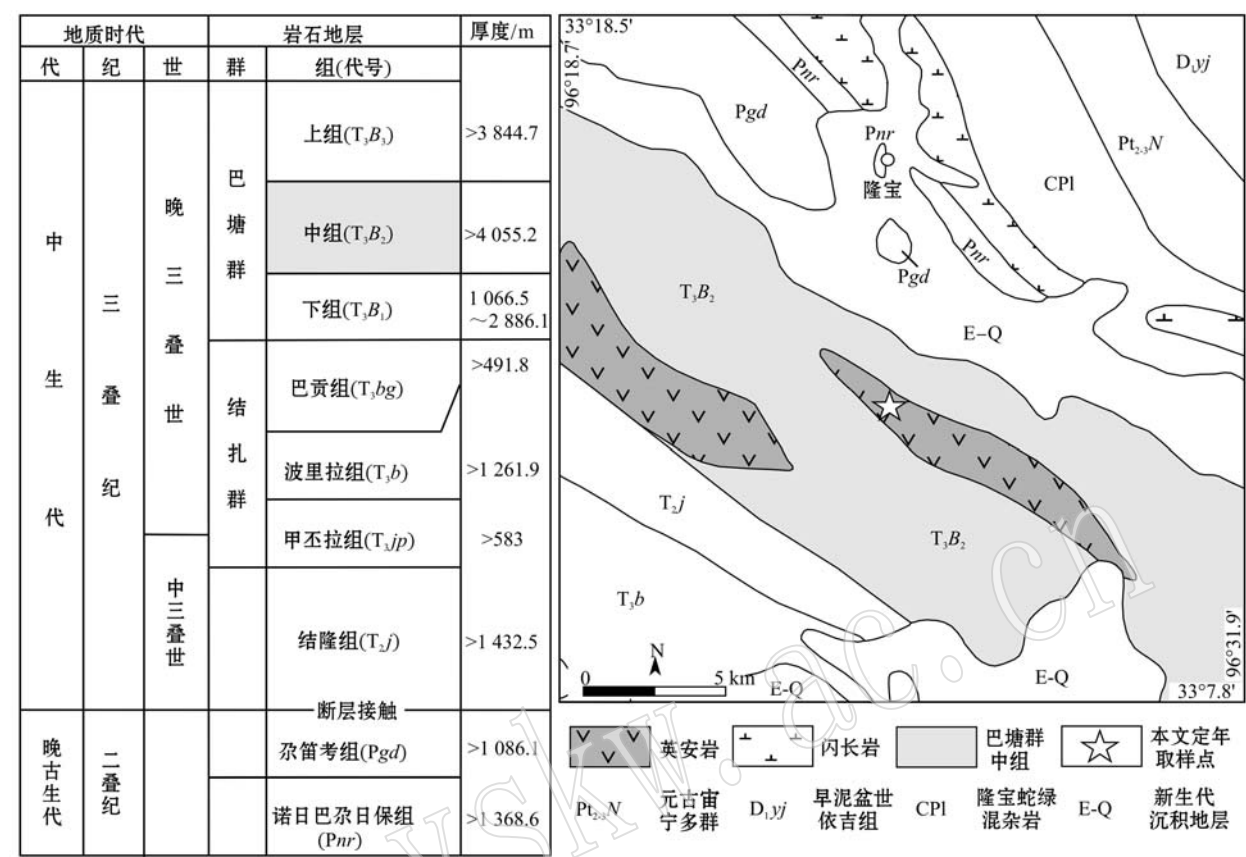


图 1 研究区二叠纪-三叠纪地层序列图及地质简图(底图据文献^①修改)
Fig. 1 Stratigraphic section and geological map of the study area(after Geological Map of Yushu Region^①)

文研究的隆宝火山岩在岩性上以英安岩为主,赋存在三叠纪巴塘群地层中组(T_3B_2)中(图 1),其围岩以碳酸盐岩(例如灰岩)为主。岩石样品多呈浅灰绿色,斑状结构,斑晶矿物多为斜长石、石英和少量的碱性长石,基质由玻璃质和一些长英质微晶组成(图 2b)。岩石中气孔构造、杏仁状构造和流纹构造较发育(图 2a),并且部分岩石露头中可见一些不规则状的围岩捕虏体。

2 测试方法

在详细的岩相学分析基础上,选取典型的岩石样品进行锆石矿物分选和全岩碎样。锆石矿物分选按照标准程序进行,通过机械粉碎、重磁和电磁分选等步骤完成,接着在双目镜下手工提纯并且随机地选取晶形良好和纯净透明的锆石进行制靶,并且进行透射-反射光、阴极发光(CL)照相。锆石 U-Pb 定

年是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室使用 LA-ICP-MS 同时分析完成。其中,激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, ICP-MS 为 Agilent 7500a。详细的仪器操作条件和数据处理方法可见文献(Liu *et al.*, 2008a, 2008b; 2010a)。锆石 U-Pb 谐和图和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄主要采用 Ludwig(2000)编写的 ISOPLOT 程序(Ver3.23)完成。

全岩主量元素的测定是在湖北省地质实验研究所武汉综合岩矿测试中心完成,氧化物的测定采用 X 荧光光谱 α 系数测定法, H_2O 采用重量法测定, CO_2 则采用非水滴定法测定,分析精度均为 1%(但 H_2O 除外)。全岩稀土和微量元素的测定是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室完成,所采用的仪器为 Agilent 7500a ICP-MS (Musashinoshi, Nakacho, Tokyo, Japan)。详细的样品前处理、实验测定精度和准确度详见文献 (Liu *et*

① 西安地质矿产研究所. 2005. 1:250 000 玉树县幅地质图.

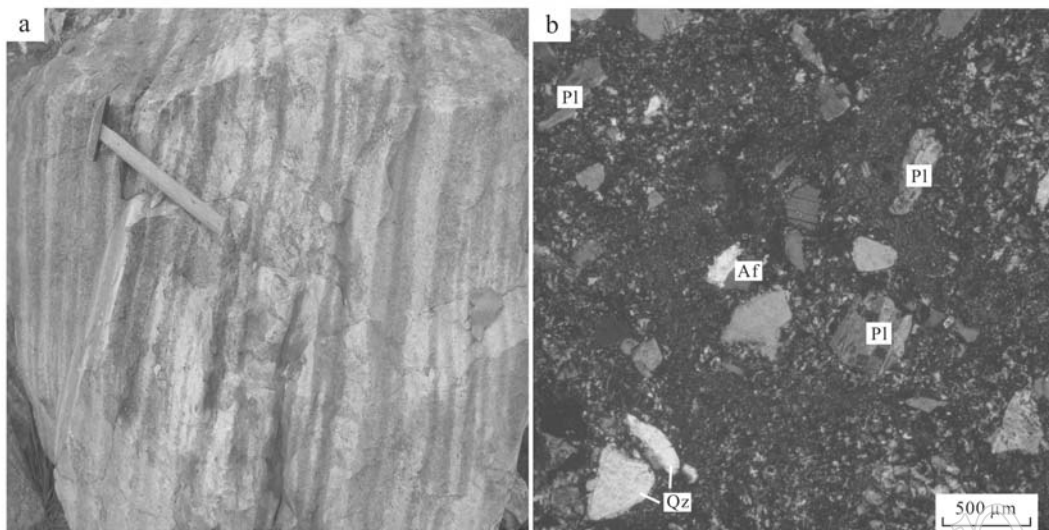


图 2 隆宝火山岩野外露头 and 典型样品正交偏光镜下照片

Fig. 2 Field photographs and photomicrographs of the dacites in the Longbao area

Af—碱性长石; Pl—斜长石; Qz—石英

Af—alkali feldspar; Pl—plagioclase; Qz—quartz

al., 2008b)。全岩 Sr-Nd 同位素测定主要是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室采用热电离同位素质谱仪(TIMS, Triton T1)完成。仪器的准确度通过标样 NBS987 和 La Jolla 进行监测。详细的测试方法和具体的实验流程等详见文献(Gao *et al.*, 2004)。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 LA-MC-ICP-MS 完成。激光剥蚀系统为 GeoLas 2005, MC-ICP-MS 为 Neptune Plus。详细仪器操作条件和分析方法可参照文献(Hu *et al.*, 2012)。

此外,本文中主量、微量元素以及同位素等相关图解的绘制均采用 GEOKIT 软件完成(路远发, 2004)。

3 测试结果

3.1 锆石 U-Pb 年龄

本研究利用 LA-ICP-MS 对英安岩样品(LB12-1)进行锆石 U-Pb 同位素定年,共测定 20 颗锆石和 20 个数据点。其具体的测试结果及相关参数计算可见表 1。该样品中的锆石均为无色或浅黄色,透明,多为半自形-自形柱状晶,粒径大小约在 50~160 μm 之间。阴极发光(CL)图像显示多数锆石具有明显的岩浆振荡环带,部分具有继承核的特征(图 3)。18

个岩浆环带测试点的 Th/U 比值大多在 0.4~0.5 之间,与典型岩浆锆石的特征类似(Belousova *et al.*, 2002)。这些测点给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄集中分布在 225~234 Ma 之间,对其进行加权平均计算获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 230 ± 2 Ma (MSWD=0.5),这一年龄应代表了流纹岩的结晶年龄。另外 2 个锆石测点分别给出了 250 Ma 和 258 Ma,并且在锆石 U-Pb 谐和图上明显偏离谐和曲线(图 3),这些年龄可能代表了来自围岩中的继承锆石的年龄。

3.2 全岩主量与微量元素

全岩主量和微量元素成分测试结果以及计算得到的相关参数可见表 2。岩石样品的 SiO_2 含量较高,变化在 70.54%~77.96% 之间。样品均具有相对低的 FeO 、 TiO_2 含量(分别为 1.27%~3.21% 和 0.14%~0.33%)以及中等程度的 MgO 含量和 $\text{Mg}^\#$ 值(分别为 0.60%~1.77% 和 42~50)。多数岩石样品具有相对高的 Na_2O 含量(1.95%~5.96%),并且 Na_2O 大于 K_2O ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.07\sim6.21$)。但是有一个样品(LB12-3)具有相对高的 K_2O 含量($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=0.53$)。根据手标本和岩石薄片镜下观察结果,笔者认为该样品的高钾特征可能与较多碱性长石捕掳晶的存在有关。岩石样品相对富铝, Al_2O_3 含量为 11.37%~13.68%,铝饱和指数 $[A/\text{CNK}=\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})]$ 为 0.97~1.23,多数样品显示准铝质-弱过铝质的特征。样品

表 1 隆宝火山岩样品的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating results for the Longbao volcanic rocks

测点号	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$		Th/U	同位素比值				同位素年龄/Ma					
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$
11LB12-1-01	81	242	0.3	0.312 48	0.045 16	0.036 46	0.000 56	743	344	276	35	231	3
11LB12-1-02	150	294	0.5	0.265 06	0.013 29	0.036 40	0.000 55	346	114	239	11	231	3
11LB12-1-03	269	533	0.5	0.277 80	0.013 84	0.036 54	0.000 44	456	124	249	11	231	3
11LB12-1-04	112	244	0.5	0.320 77	0.019 39	0.036 33	0.000 54	722	119	282	15	230	3
11LB12-1-05	184	391	0.5	0.267 29	0.012 14	0.036 64	0.000 47	343	112	241	10	232	3
11LB12-1-06	330	604	0.5	0.280 76	0.012 40	0.036 54	0.000 51	439	104	251	10	231	3
11LB12-1-07	206	434	0.5	0.336 32	0.018 80	0.036 25	0.000 50	839	115	294	14	230	3
11LB12-1-08	160	359	0.4	0.267 52	0.020 76	0.036 54	0.000 52	391	207	241	17	231	3
11LB12-1-09	126	272	0.5	0.355 59	0.019 02	0.036 23	0.000 52	943	106	309	14	229	3
11LB12-1-10	91	218	0.4	0.248 00	0.014 15	0.035 52	0.000 54	220	135	225	12	225	3
11LB12-1-11	177	346	0.5	0.286 79	0.014 84	0.036 36	0.000 52	528	88	256	12	230	3
11LB12-1-12	118	274	0.4	0.264 92	0.015 56	0.035 67	0.000 50	383	141	239	12	226	3
11LB12-1-13	192	365	0.5	0.296 17	0.017 88	0.036 89	0.000 54	606	149	263	14	234	3
11LB12-1-14	131	290	0.5	0.301 63	0.013 72	0.035 69	0.000 50	643	102	268	11	226	3
11LB12-1-15	151	359	0.4	0.311 01	0.018 59	0.036 59	0.000 55	694	142	275	14	232	3
11LB12-1-16	93	219	0.4	0.537 74	0.034 21	0.040 79	0.000 70	1 498	115	437	23	258	4
11LB12-1-17	136	304	0.4	0.458 45	0.019 68	0.039 59	0.000 54	1 288	53	383	14	250	3
11LB12-1-18	127	276	0.5	0.305 24	0.014 42	0.036 22	0.000 63	687	113	270	11	229	4
11LB12-1-19	254	486	0.5	0.292 78	0.016 12	0.036 03	0.000 48	524	113	261	13	228	3
11LB12-1-20	92	258	0.4	0.266 97	0.015 09	0.036 13	0.000 62	398	131	240	12	229	4

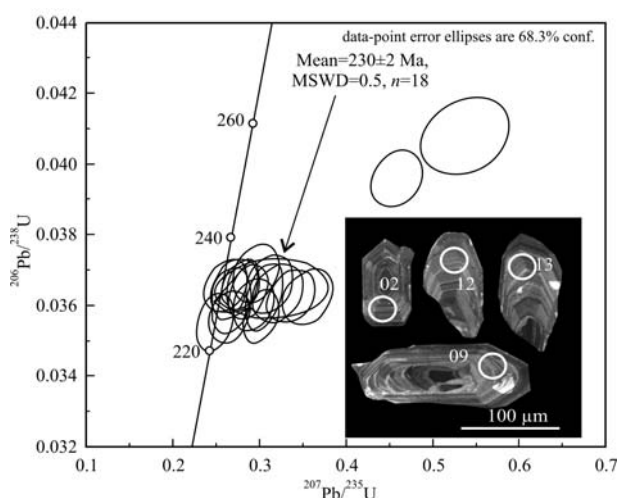


图 3 隆宝火山岩样品(LB12-1)典型锆石阴极发光图像和 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 3 LA-ICP-MS U-Pb concordant diagrams and CL images of zircon grains from the Longbao volcanic rocks

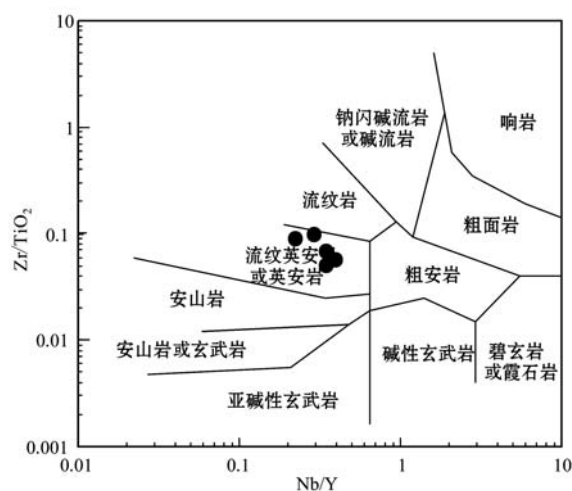


图 4 隆宝火山岩样品 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解[底图据 Winchester & Floyd (1977)修改]

Fig. 4 Plot of $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ (after Winchester & Floyd, 1977) for the Longbao volcanic rocks

均具有相对低的 Nb/Y 比值(0.22~0.39), 在 $Zr/TiO_2 - Nb/Y$ 图解中投影基本落在英安岩或流纹英安岩的成分范围内(图 4)。岩石样品具有中等程度的稀土元素含量, ΣREE 为 $105.16 \times 10^{-6} \sim 143.81 \times 10^{-6}$ 。稀土元素球粒陨石标准化图解显示, 所有的岩石样品轻重稀土元素分异较强, 其中轻稀土元素相对于重稀土元素明显富集 [$LREE/HREE = 6.02 \sim 7.73$, $(La/Yb)_N = 5.70 \sim 8.79$, 图 5a]。另外样品均具有明显的 Eu 负异常(图 5a), δEu 为 0.43~0.71, 结合样品相对于原始地幔具有明显的 Sr 异常

的特点(图 5b), 可以推断其岩浆源区可能有一定数量的斜长石矿物残余。所有的样品相对于原始地幔明显富集大离子亲石元素(LILEs: Rb、Ba、Th 和 U 等), 明显亏损高场强元素(HFSEs: Nb、Ta 和 Ti 等), 其总体分布样式与典型弧火山岩的化学特征类似(图 5b)。

3.2 Sr-Nd-Hf 同位素

本次研究共测定全岩 Sr-Nd 同位素样品 2 件, 锆石 Lu-Hf 同位素分析点 12 个。相应的测试结果及计算的相关参数可见表 2 和表 3。结果显示, 岩石样品的 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始比值(I_{Sr})相对集中, 均为 0.707,

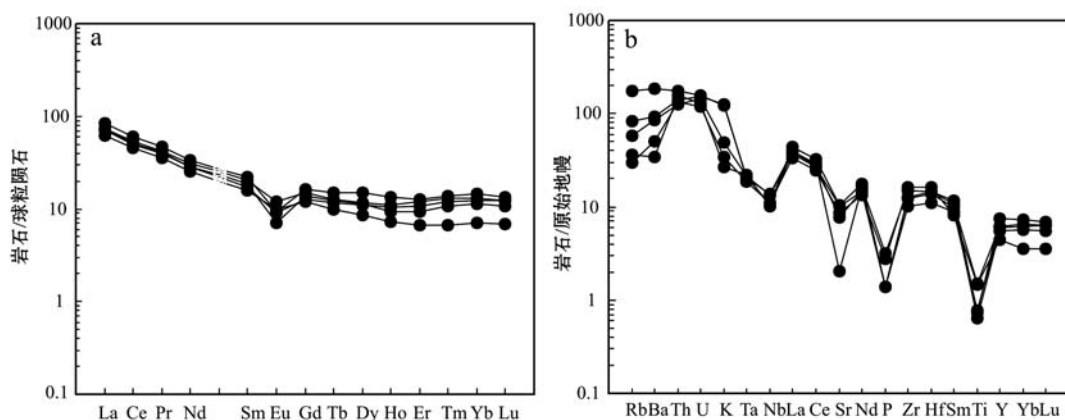


图 5 隆宝火山岩样品的稀土元素球粒陨石标准化分布图和微量元素原始地幔标准化蛛网图

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and N-MORB normalized trace element diagrams (b) for the Longbao volcanic rocks

球粒陨石和原始地幔标准化值分别据 Taylor & McLennan (1985) 和 Sun & McDonough (1989)

Chondrite and N-MORB values after Taylor & McLennan (1985) and Sun & McDonough (1989), respectively

表 2 隆宝火山岩样品的全岩主量元素 ($w_B/\%$)、微量元素 ($w_B/10^{-6}$) 以及 Sr-Nd 同位素组成

Table 2 Whole rock major ($w_B/\%$), trace element ($w_B/10^{-6}$) and Sr-Nd isotopic compositions of the Longbao volcanic rocks

样品号	LB12-2	LB12-3	LB13-1	LB12-5	HX07-3
SiO ₂	70.54	75.29	76.25	77.96	71.14
TiO ₂	0.32	0.16	0.17	0.14	0.33
Al ₂ O ₃	13.68	12.93	11.37	11.61	13.44
Fe ₂ O ₃	0.61	1.00	0.21	0.58	0.65
FeO	2.48	0.58	1.07	0.97	2.63
FeO _t	3.03	1.48	1.26	1.49	3.21
MnO	0.02	0.01	0.02	0.01	0.04
MgO	1.21	0.78	0.60	0.63	1.77
CaO	1.79	1.82	2.11	1.15	0.56
Na ₂ O	5.96	1.95	4.44	4.97	4.06
K ₂ O	1.03	3.66	1.48	0.80	3.78
P ₂ O ₅	0.06	0.03	0.03	0.03	0.07
LOI	1.85	1.29	2.00	0.71	1.37
Mg [#]	42	48	46	43	50
Sc	8.8	6.5	5.6	5.9	11.0
V	19	6	8	5	15
Cr	2.2	1.4	2.1	0.8	2.3
Co	35.1	40.2	29.0	47.6	43.0
Ni	1.6	1.5	1.5	1.2	1.6
Cu	4.7	3.2	3.8	3.0	1.8
Zn	41.4	33.0	25.1	25.7	46.6
Ga	14.3	15.9	11.4	10.7	16.6
Rb	18.9	109.7	36.6	22.9	53.4
Sr	182	219	213	163	43
Y	19.9	33.9	27.6	25.1	28.4
Zr	183	143	115	139	166
Nb	7.9	7.5	9.5	7.3	9.8
Cs	0.6	3.5	1.0	0.8	0.6
Ba	352	1281	590	236	654
La	22.8	30.5	25.9	26.7	27.0
Ce	43.2	57.0	47.6	49.1	51.9
Pr	4.8	6.3	5.4	5.6	5.7
Nd	17.9	23.6	19.9	20.4	22.1
Sm	3.64	5.12	3.94	4.37	4.70
Eu	0.85	0.81	0.78	0.61	1.04
Gd	3.65	5.04	3.90	4.26	4.54
Tb	0.58	0.87	0.68	0.71	0.74
Dy	3.26	5.72	4.25	4.35	4.47
Ho	0.62	1.12	0.88	0.80	0.93
Er	1.68	3.15	2.69	2.30	3.01
Tm	0.24	0.48	0.42	0.38	0.46
Yb	1.75	3.57	3.03	2.82	3.20
Lu	0.26	0.51	0.46	0.40	0.47
Hf	5.00	4.49	3.39	4.22	4.49
Ta	0.76	0.86	0.88	0.90	0.84
Pb	12.0	13.2	13.7	11.7	3.9
Th	11.33	15.05	10.66	13.26	12.02
U	2.50	3.30	2.99	2.74	3.19
ΣREE	105.16	143.81	119.84	122.82	130.28
(La/Yb) _N	8.79	5.77	5.78	6.42	5.70
δEu	0.71	0.48	0.60	0.43	0.68
⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	0.301 ₂			0.407 ₂	
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0.707 947			0.708 653	
¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	0.123 2			0.129 8	
¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	0.512 500			0.512 491	
I _{Sr}	0.707			0.707	
εNd(<i>t</i>)	-0.53			-0.91	

注：FeO_t 表示全铁，空白处表示未测试或计算，Mg[#] = 100 × Mg²⁺ / (Mg²⁺ + Fe²⁺), *t* = 230 Ma。

εNd(*t*) 值为 -0.91 ~ -0.53 (图 6)，两阶段模式年龄 (*t*_{2DM}) 变化在 1.05 ~ 1.08 Ga 之间，明显年轻于北羌塘地体元古代片麻岩和 S 型花岗岩的 *t*_{2DM}。绝大多数样品的 ¹⁷⁶Lu/¹⁷⁷Hf 比值小于 0.002 157 7，表明锆石在形成后具有极低的放射性成因 Hf 的积累。12 个测点的 ¹⁷⁶Hf/¹⁷⁷Hf 比值分布在 0.282 746 2 ~ 0.282 825 0 之间，其 εHf(*t*) 值远大于 0，介于 +3.81 ~ +7.61 之间 (图 7)，两阶段模式年龄 (*t*_{DM2}) 分布在 0.58 ~ 0.73 Ga 之间，反映了其岩浆源区可能有大量的地幔物质或新生地壳物质的加入。此外，本次 Sr-Nd-Hf 同位素研究结果也显示隆宝火山岩样品存在明显的 Nd-Hf 同位素的解耦。

4 讨论

4.1 岩石成因

目前国内外学者已经从矿物学、地球化学和实验岩石学等多个角度对长英质岩浆的起源与成因机制展开研究，并且积累了大量的成果 (Brophy, 1991; Bonin, 2004; Streck *et al.*, 2007; Brophy, 2008)。

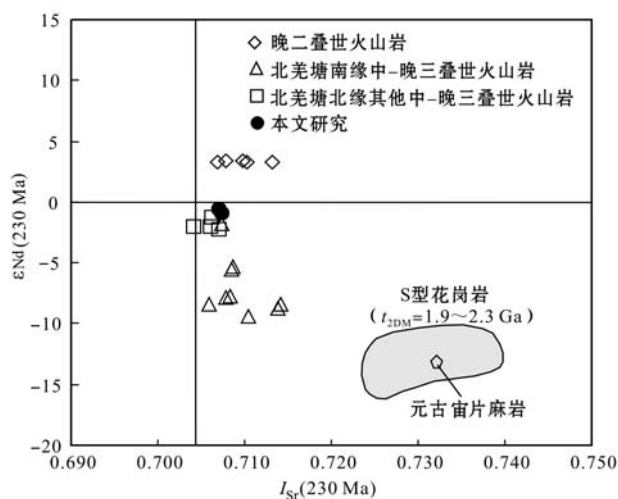


图 6 隆宝火山岩样品的 εNd(*t*) - I_{Sr} 图解

Fig. 6 Plot of εNd(*t*) versus I_{Sr} for the Longbao volcanic rocks

图中 S 型花岗岩和元古代片麻岩 Sr-Nd 同位素数据据 Peng 等 (2014) 和 Tao 等 (2014)；北羌塘地体晚二叠世火山岩、南缘中晚三叠世火山岩以及北缘其他中晚三叠世火山岩的 Sr-Nd 同位素数据分别据 Zhang 等 (2013)，Zhai 等 (2013a) 和 Zhao 等 (2015) Late Permian volcanic rocks (after Zhang *et al.*, 2013) with Middle to Late Triassic volcanic rocks from the north part (after Zhao *et al.*, 2015) and the south part (after Zhai *et al.*, 2013a) of the North Qiantang terrane are shown for comparison

表 3 隆宝火山岩样品的锆石 Lu-Hf 同位素组成
Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compositions of the Longbao volcanic rocks

测点	年龄/Ma	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	1 σ	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	1 σ	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}(\text{corr})$	1 σ	t_{DM1}/Ga	t_{DM2}/Ga	$\epsilon\text{Hf}(0)$	$\epsilon\text{Hf}(t)$	1 σ	f_{Lu}/Hf
LB12-01	229	0.044 458	0.000 673	0.001 349	0.000 022	0.282 823	0.000 017	0.61	0.76	1.81	6.64	0.80	-0.96
LB12-02	232	0.041 199	0.000 335	0.001 258	0.000 010	0.282 848	0.000 015	0.58	0.71	2.70	7.61	0.75	-0.96
LB12-03	226	0.033 194	0.000 170	0.000 999	0.000 005	0.282 838	0.000 013	0.59	0.73	2.35	7.17	0.69	-0.97
LB12-04	234	0.050 995	0.000 989	0.001 696	0.000 045	0.282 799	0.000 025	0.65	0.81	0.94	5.82	1.03	-0.95
LB12-05	226	0.049 098	0.001 308	0.001 636	0.000 055	0.282 746	0.000 022	0.73	0.92	-0.91	3.81	0.94	-0.95
LB12-06	225	0.034 275	0.000 778	0.001 140	0.000 037	0.282 779	0.000 020	0.67	0.85	0.25	5.03	0.88	-0.97
LB12-07	230	0.067 212	0.003 296	0.002 158	0.000 116	0.282 800	0.000 021	0.66	0.81	0.98	5.71	0.93	-0.94
LB12-08	229	0.045 227	0.000 540	0.001 382	0.000 022	0.282 835	0.000 017	0.60	0.74	2.22	7.04	0.80	-0.96
LB12-09	231	0.077 478	0.001 027	0.002 516	0.000 038	0.282 827	0.000 025	0.63	0.76	1.94	6.63	1.04	-0.92
LB12-10	231	0.069 895	0.000 965	0.002 230	0.000 031	0.282 835	0.000 023	0.61	0.74	2.22	6.96	0.96	-0.93
LB12-11	231	0.079 768	0.001 739	0.002 606	0.000 063	0.282 850	0.000 031	0.60	0.72	2.75	7.43	1.23	-0.92
LB12-12	231	0.041 554	0.000 347	0.001 467	0.000 009	0.282 825	0.000 023	0.61	0.76	1.87	6.73	0.98	-0.96

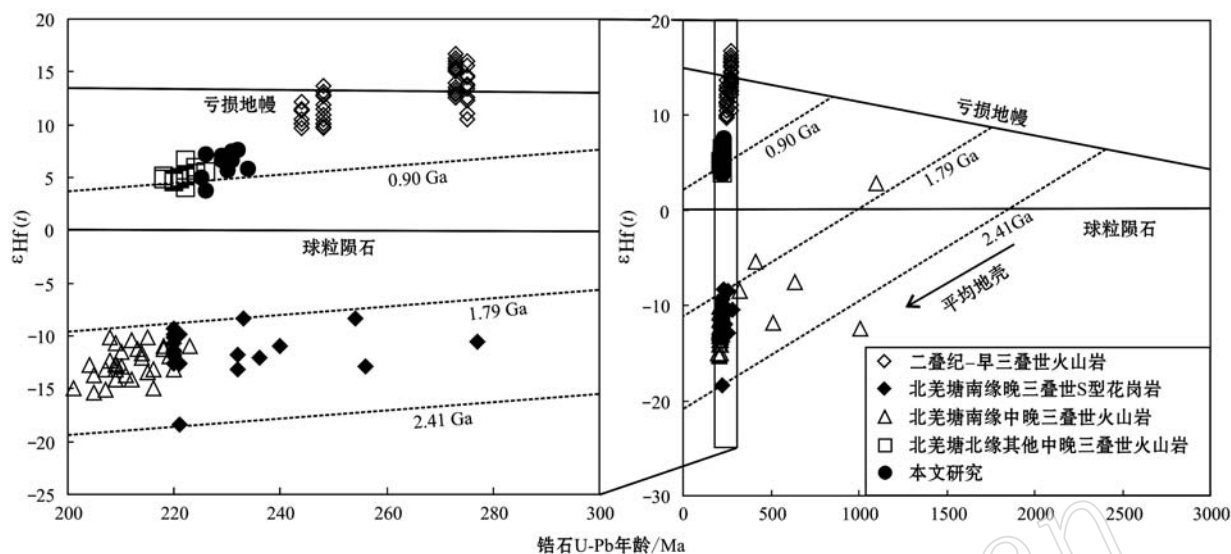


图 7 隆宝火山岩样品 Hf 同位素组成图解

Fig. 7 Plot of $\epsilon\text{Hf}(t)$ versus zircon U-Pb ages (Ma) for the Longbao volcanic rocks

图中二叠纪-早三叠世火山岩的 Hf 同位素数据据 Yang 等(2011); 北羌塘地体南缘晚三叠世 S 型花岗岩与中晚三叠世火山岩以及北缘其他中晚三叠世火山岩分别据 Peng 等(2014)、Zhai 等(2013a)和 Zhao 等(2015); 图中火山岩的成分均为长英质

Late Triassic S-type granites (after Peng *et al.*, 2014) and Middle to Late Triassic felsic volcanic rocks (after Zhai *et al.*, 2013a) from the south part of the North Qiantang (NQ) as well as Middle to Late Triassic felsic volcanic rocks from the north part of the NQ (after Zhao *et al.*, 2015) are shown for comparison

归纳起来主要有如下 4 种不同的成因：① 幔源岩浆（如玄武质岩浆）的高度分离结晶或同化混染（如 AFC 过程）；② 玄武质岩浆与长英质岩浆的混合作用；③ 新生地壳物质的部分熔融；④ 古老地壳物质的重熔。

与北羌塘地体内部元古代片麻岩以及三叠纪 S 型花岗岩相比，本文研究的隆宝火山岩样品具有相对高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值（ $-0.91 \sim -0.53$ ）、低的 I_{Sr} （0.707）以及更加年轻的 $t_{2\text{DM}}$ 模式年龄（1.05~1.08 Ga）。岩石样品的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值远大于 0（ $+3.8 \sim +7.6$ ）， t_{DM2} 分布在 0.58~0.73 Ga 之间，明显不同于三叠纪 S 型花岗岩的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值和 t_{DM2} （分别为 $-18.33 \sim -8.30$ 和 1.87~1.90 Ga，据 Peng *et al.*, 2014）。多数岩石样品具有相对高的 Na_2O 含量（1.95% ~ 5.96%），并且 Na_2O 大于 K_2O （ $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}=1.07 \sim 6.21$ ）。这些特征表明隆宝火山岩不可能由单纯的古老地壳物质重熔形成。大量实验岩石学资料也显示不同的源岩发生部分熔融产生的长英质熔体在地球化学组成上存在明显的差异（Altherr and Siebel, 2002; Topuz *et al.*, 2005）。例如，由变沉积物（例如变泥质岩和变杂砂岩）熔融产生的熔体往往比变基性岩的熔融具有较

高的 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 以及更低的 $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_t)$ 值。岩石样品在 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}_t)$ （摩尔比）图解中投影均落在变玄武岩部分熔融范围内（图 8a），进一步指示其源岩可能以玄武质岩石为主。

从理论上来看，玄武质岩浆只有经过较高度度的结晶分异作用（大于 90%）才能产生长英质岩浆，并且通常形成的规模较小（Shinjo and Kato, 2000）。但是大陆环境的玄武质岩浆如果发生同时的岩浆同化混染和分离结晶作用（即 AFC 过程）将有可能产生较多的长英质岩浆。隆宝火山岩样品具有相对高的 SiO_2 含量（可达 77.96%），异常低的 Rb、Cr 和 Ni 含量（多数样品分别为 $18.92 \times 10^{-6} \sim 53.39 \times 10^{-6}$ 、 $0.76 \times 10^{-6} \sim 2.30 \times 10^{-6}$ 和 $1.15 \times 10^{-6} \sim 1.62 \times 10^{-6}$ ）等特征，与玄武质岩浆高度分离结晶形成的长英质熔体的成分明显不同（Brophy, 1991, 2008）。岩石样品在 La/Sm-La 或者 La/Yb-La 图解中投影结果也不符合岩浆分离结晶的趋势（图略）。鉴于研究区内火山岩均以长英质成分为主，缺少同时期伴生出现的玄武质岩石，因此用玄武质岩浆的高度分离结晶的模式来解释本区火山岩的成因不太合适。所有的岩石样品 Nb/La 比值（0.25 ~ 0.36）随着 $\text{Mg}^\#$ 值的降低而基本保持不变（图 8b），

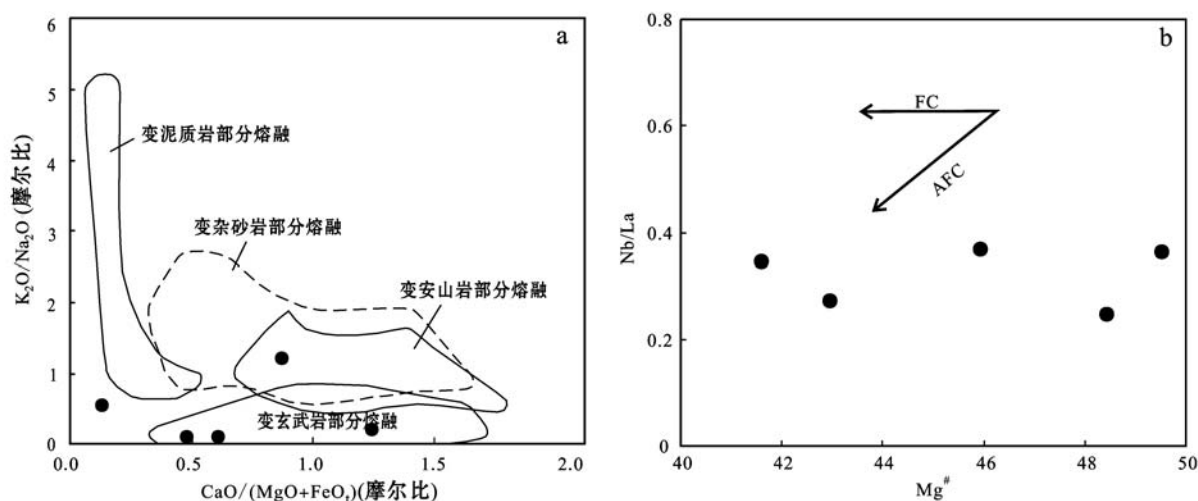


图8 隆宝火山岩样品 $K_2O/Na_2O - CaO/(MgO + FeO)$ (摩尔比) 和 $Nb/La - Mg^\#$ 图解

Fig. 8 Plots of molar K_2O/Na_2O versus molar $CaO/(MgO + FeO)$ and Nb/La versus $Mg^\#$ for the Longbao volcanic rocks

并且多数样品具有相对高的 $\epsilon Nd(t)$ 值 ($-0.91 \sim -0.53$)、相对低的 I_{Sr} (0.707) 以及基本一致的稀土和微量元素分布样式 (图5), 这些指示火山岩在形成过程中受到地壳混染的影响要小。由于野外地质调查和岩相学分析未发现基性包体和矿物间的不平衡结构等典型的岩浆混合证据, 并且多数样品具有较一致的稀土、微量和同位素组成, 因此, 玄武质岩浆与长英质岩浆的混合作用也不能用来解释本区火山岩的成因。

本区火山岩样品的岩浆锆石 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值分布在 $0.282\,746\,2 \sim 0.282\,825\,0$ 之间, 均具有正的 $\epsilon Hf(t)$ 值 ($+3.81 \sim +7.61$), 反映了其岩浆源区可能存在大量的地幔物质或者新生地壳组分。由于地幔岩中最接近液相线的矿物相是橄榄石和辉石, 因而地幔橄榄岩的部分熔融不可能直接产生长英质岩浆。此外, 地幔组分 (例如亏损地幔或原始地幔) 通常是亏损 Zr, 锆石不可能直接由其结晶而成, 其必须通过新生地壳物质的熔融再造或者在侵位过程中混染陆壳物质才能提高 Zr 的含量进而形成锆石 (贺淑赛等, 2015)。因此, 本区火山岩的形成很可能与新生地壳物质的部分熔融有关。

4.2 构造意义

由于研究区分布面积广大、中新生代地层覆盖严重、自然地理条件恶劣 (多数为无人区) 以及早期测试条件的限制等因素, 目前对于北羌塘地体内部三叠纪火山岩的成因机制与构造背景的认识还存在

很大的争议。一些学者基于年代学与地球化学的研究结果认为这些火山岩应该形成于陆内裂谷的环境 (Fu *et al.*, 2010)。然而, 另一部分学者却倾向用板片俯冲观点来解释北羌塘三叠纪火山岩的成因 (Wang *et al.*, 2008; Zhai *et al.*, 2013a; Zhao *et al.*, 2015), 并且提出了金沙江或甘孜-理塘古特提斯洋盆的向南俯冲以及龙木错-双湖洋盆的向北俯冲等多种演化模型。

综合本文以及区域上现已报道的其他三叠纪火山岩资料, 可以发现北羌塘地体内部三叠纪火山岩的岩石组合与源区组成在区域分布上具有一定的规律性 (图9)。其中, 早三叠世至中三叠世早期 (例如 244 Ma) 的火山岩在区域分布上不具明显的分带性, 岩性以英安岩为主, 具有正的 $\epsilon Hf(t)$ 值 ($+9.7 \sim +12.2$), 与二叠纪火山岩的类似, 并且通常被认为是大洋板片俯冲的产物 (Yang *et al.*, 2011)。中晚三叠世火山岩在区域分布上具有较明显的分带性 (图9): ① 北羌塘南缘的火山岩主要集中分布在那底岗日-雁石坪一带 (图9), 成分上具有双峰式火山岩的特点, 其中流纹岩、英安岩与玄武岩伴生出现 (Fu *et al.*, 2010); ② 北羌塘北缘的火山岩主要集中分布在沱沱河至玉树一带 (图9), 以安山岩、流纹岩和英安岩的大量出现为特征, 多数缺少伴生出现玄武质岩石, 与南缘双峰式火山岩组合存在较大的差异。中晚三叠世长英质火山岩 Sr-Nd-Hf 同位素数据的对比结果也显示, 北羌塘地体北缘火山岩具

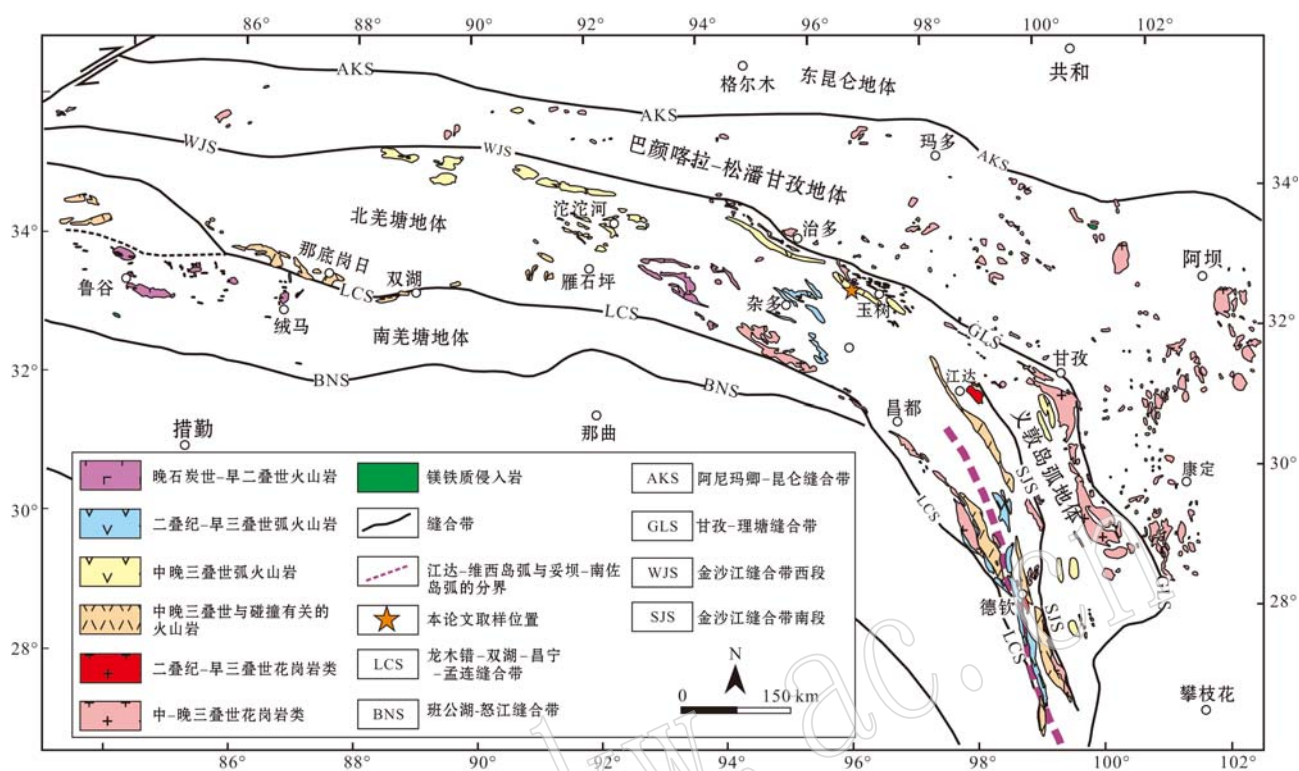


图 9 青藏高原中部地区晚石炭世-三叠纪岩浆岩地质分布简图

Fig. 9 Simplified geological map of Carboniferous-Triassic magmatic rocks in the Central Tibetan Plateau

有相对的高的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($-2.23 \sim -1.20$)、相对低的 I_{Sr} ($0.704 \sim 0.708$) 以及相对年轻的 $t_{2\text{DM}}$ ($1.05 \sim 1.19 \text{ Ga}$), 并且具有正的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($+3.81 \sim +7.61$), 与三叠纪 S 型花岗岩的 Sr-Nd-Hf 同位素组成差别很大 (图 6 和图 7), 反映了其源区存在大量的新生地壳组分。然而, 北羌塘南缘火山岩具有相对低的 $\epsilon\text{Nd}(t)$ 值 ($-8.79 \sim -1.77$), 相对高的 I_{Sr} ($0.706 \sim 0.714$) 以及古老的 $t_{2\text{DM}}$ ($1.19 \sim 2.18 \text{ Ga}$), 并且具有负的 $\epsilon\text{Hf}(t)$ 值 ($-15.3 \sim -10.1$), 与三叠纪 S 型花岗岩的 Hf 同位素组成基本一致 (图 7), 反映了其源区可能以古老陆壳物质为主。北羌塘地体北缘和南缘中晚三叠世火山岩在岩石组合与 Sr-Nd-Hf 同位素组成上的明显差异性可能反映了该地块在中晚三叠世时期应该存在两种不同的构造体制。

从区域地质分布情况来看, 北羌塘地体正好位于龙木错-双湖缝合带与金沙江缝合带西段或甘孜-理塘缝合带之间。龙木错-双湖缝合带作为古特提斯洋主洋盆重要代表的观点已经得到了大量地质资料 (包括蛇绿岩、高压变质岩、OIB 型镁铁质岩、沉积建造、两侧板块的地体属性、生物组合以及地球物理等) 的证实 (李才, 2008; Zhai *et al.*, 2011; Met-

calfe, 2013; Zhai *et al.*, 2013b)。通常认为该缝合带向东南可与昌宁-孟连缝合带相连构成东亚古特提斯体系中规模最大的主缝合带。Zhai 等 (2013b) 测定龙木错-双湖缝合带具有 N-MORB 或 E-MORB 特征的蛇绿岩的锆石 U-Pb 年龄为 $357 \sim 345 \text{ Ma}$, 表明早石炭世时期龙木错-双湖古特提斯洋盆已经存在。古生物和沉积方面的资料显示, 在早二叠世时期, 北羌塘地体主要出现温水动物群, 而南羌塘地块则出现冷水动物群, 并发育冰海杂砾岩, 暗示着早二叠世时期龙木错-双湖洋盆已经具有很大的规模 (Metcalf, 2013)。现有的研究多认为龙木错-双湖洋盆向北俯冲至北羌塘地体下部。张乐等 (2014) 在羌塘中西部地区二叠纪蛇绿岩中发现了与板片熔融有关的埃达克质岩 ($272 \pm 2 \text{ Ma}$), 表明至少从早二叠世开始该洋盆已进入俯冲消减阶段。对羌塘中部高压变质带的研究显示中三叠世时期发生洋壳与少量陆壳的深俯冲 (张修政等, 2014)。与洋壳深俯冲有关的榴辉岩的锆石 U-Pb 变质年龄为 $237 \sim 230 \text{ Ma}$ (Zhai *et al.*, 2011), 与高压岩石的退变质或折返有关的白云母 Ar-Ar 年龄为 $222 \sim 203 \text{ Ma}$ (Kapp *et al.*, 2000, 2003; 翟庆国等, 2009)。但是对于原先

定义金沙江西段缝合带西段究竟是“三江”地区金沙江缝合带还是与甘孜-理塘缝合带相连仍存在很大的争论(Reid *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2014)。现已报道的金沙江缝合带西段蛇绿岩的形成时代(240~232 Ma; 段其发等, 2009; 张能等, 2012)均明显晚于“三江”地区金沙江蛇绿岩的形成时代(346~341 Ma; Jian *et al.*, 2009), 但是与甘孜-理塘缝合带内三叠纪蛇绿岩的形成时代相近(236~234 Ma; 据马昌前等, 未刊资料)。近年来, 作者所在的项目组对原先被认为是金沙江缝合带西段蛇绿岩代表的“多彩-隆宝蛇绿混杂岩”开展了详细的研究, 发现这些“蛇绿岩”明显缺少地幔橄榄岩、辉石岩和席状岩墙群等典型的蛇绿岩单元, 各岩石单元之间在成分和成因机制上并不存在密切的联系, 与典型的蛇绿岩组分明不同(周国庆, 2008; Dilek and Furnes, 2011)。从严格意义上来说, 这些“蛇绿岩”很可能只是一套晚二叠世(258~257 Ma)镁铁质杂岩组合, 并非洋壳的残余组分(据马昌前等, 未刊资料)。此外, 在北羌塘地体内部并不存在与金沙江缝合带以西地区类似的两条平行并存的二叠纪-三叠纪弧岩浆岩带(江达-维西岛弧带和妥坝-南佐岛弧带)。这些资料表明“三江”地区金沙江缝合带并不能向西延伸至北羌塘地体内部, 原先定义的金沙江缝合带西段更可能是甘孜-理塘缝合带的西延部分。因此, 北羌塘地体内部早三叠世至中三叠世早期这套具有弧岩浆岩特征的火山岩的形成很可能与龙木错-双湖古特提斯洋盆的向北俯冲有关。

北羌塘南缘中晚三叠世火山岩的形成时代集中分布在223~205 Ma(Fu *et al.*, 2010; Zhai *et al.*, 2013a), 可与羌塘中部高压变质岩的退变质或折返年龄(222~203 Ma)类比。这些火山岩在岩石组合上也可与羌塘中部高压变质带中的晚三叠世双峰式火山岩组合类似(Zhang *et al.*, 2011)。与长英质火山岩相比, 玄武质岩石的出露面积相对较小。玄武质岩石小面积出露的同时伴随着大量的超高压-高压岩石的折返与碰撞阶段板片断离的特征基本一致(Camp *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2011)。另外, 北羌塘南缘这些中晚三叠世火山岩在区域上呈较明显的线性分布, 也与板片断离形成的岩浆岩的展布特征类似(Rogers *et al.*, 2002; Gerya *et al.*, 2004)。因此, 南缘这些中晚三叠世火山岩的形成很可能与板片断离作用导致玄武质岩浆底侵进而引发古老的陆壳物质发生部分熔融作用有关。本文对沱沱河-

玉树(北羌塘地体北缘)、江达-维西(“三江”地区金沙江西侧)、义敦岛弧3个地区岩浆岩的锆石 U-Pb 年龄统计结果表明, 北羌塘地体北缘中晚三叠世(230~200 Ma)的岩浆活动与金沙江缝合带以西地区同时期的岩浆活动存在明显的区别, 但是与义敦岛弧同时期的岩浆活动却非常相似, 均显示相同的峰值(约215 Ma, 据刘彬, 2014)。Yang 等(2012)的研究结果显示玉树地区存在两期明显的构造变形事件(分别为~230 Ma 和~195 Ma), 其形成时代和构造样式均可与义敦岛弧类比(Reid *et al.*, 2005)。这些可能暗示着北羌塘地体北缘中晚三叠世岩浆活动可能与义敦岛弧内部同时期岩浆岩具有相同的成因机制。沉积地层资料也显示, 北羌塘北缘中晚三叠世发育较连续的海相碳酸盐岩沉积。因此, 本文更倾向于认为北羌塘南缘中晚三叠世火山岩的形成应与甘孜-理塘古特提斯洋盆向南俯冲作用有关。在这一过程中, 流体交代地幔楔发生部分熔融形成玄武质岩浆, 玄武质岩浆的持续底侵导致区域上热流值升高, 进而引发新生下地壳物质部分熔融形成长英质火山岩。此外, 俯冲带内含水流体和沉积物熔体对地幔楔的交代作用会使得地幔的 Nd-Hf 同位素发生解耦, 偏离 $\epsilon_{\text{Hf}}-\epsilon_{\text{Nd}}$ 的地幔排列(Pearce *et al.*, 1999; Polat and Munker, 2004), 上述新生下地壳物质可能继承了这种被交代的地幔源区同位素特征, 进而导致北羌塘南缘中晚三叠世长英质火山岩样品出现明显的 Nd-Hf 同位素的解耦。

5 结论

通过对玉树隆宝地区三叠纪火山岩开展较详细的锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr-Nd-Hf 同位素研究, 并与区域最新研究资料进行综合对比, 获得了如下结论:

(1) LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果显示这些火山岩的形成年龄约为 230 ± 2 Ma(MSWD=0.5);

(2) 岩石样品均具有相对高的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值($-0.91 \sim -0.53$)、低的 I_{Sr} (0.707)以及正的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值($+3.81 \sim +7.61$), 表明其源区应以新生地壳组分为主;

(3) 北羌塘地体北缘和南缘中晚三叠世火山岩在岩石组合与 Sr-Nd-Hf 同位素组成上存在显著的差异, 其形成应分别与甘孜-理塘古特提斯洋盆向南俯冲或碰撞阶段的板片断离有关。

致谢 研究工作得到了中国地质科学院许志琴院士、杨经绥研究员和李海兵研究员的关心与指导; 野外地质考察和室内工作得到郭盼、洛桑塔青、白玛益西和索朗欧珠等的帮助; 样品处理与实验测试得到了中国地质大学(武汉)刘勇胜、胡兆初、陈海红和周炼等老师的热情帮助与耐心指导。在此特表感谢。

References

- Altherr R and Siebel W. 2002. I-type plutonism in a continental back-arc setting: Miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(4): 397~415.
- Belousova E A, Griffin W L and O'reilly S Y. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143(5): 602~622.
- Bonin B. 2004. Do coeval mafic and felsic magmas in post-collisional to within-plate regimes necessarily imply two contrasting, mantle and crustal, sources? A review[J]. *Lithos*, 78(1): 1~24.
- Brophy J G. 1991. Composition gaps, critical crystallinity, and fractional crystallization in orogenic (calc-alkaline) magmatic systems[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 109: 173~182.
- Brophy J G. 2008. A study of rare earth element (REE) SiO₂ variations in felsic liquids generated by basalt fractionation and amphibolite melting: a potential test for discriminating between the two different processes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156: 337~357.
- Camp V E, Ross M E and Hanson W E. 2003. Genesis of flood basalts and Basin and Range volcanic rocks from Steens Mountain to the Malheur River Gorge, Oregon[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 115(1): 105~128.
- Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3~4): 387~411.
- Duan Qifa, Wang Jianxiang, Bai Yunshan, *et al.* 2009. Zircon SHRIMP U-Pb dating and lithogeochemistry of gabbro from the ophiolite in southern Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 36(2): 291~299(in Chinese with English abstract).
- Fu X G, Wang J, Tan F W, *et al.* 2010. The Late Triassic rift-related volcanic rocks from eastern Qiangtang, northern Tibet (China): Age and tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 17(1): 135~144.
- Gao S, Rudnick R L, Yuan H L, *et al.* 2004. Recycling lower continental crust in the North China craton[J]. *Nature*, 432(7 019): 892~897.
- Gerya T V, Yuen D A and Maresch W V. 2004. Thermomechanical modelling of slab detachment[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 226(1~2): 101~116.
- He Shusai, Li Qiugen, Wang Zongqi, *et al.* 2015. Zircon U-Pb-Hf Isotopic Characteristics from Felsic Volcanic Rocks of Baoligaomiao Formation, the Middle Segment of Inner Mongolia: Implications for Geological Evolution[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 51(1): 50~64(in Chinese with English abstract).
- Hu Z C, Liu Y S, Gao S, *et al.* 2012. 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*, 27: 1 391~1 399.
- Jian P, Liu D Y, Kröner A, *et al.* 2009. Devonian to Permian plate tectonic cycle of the Paleo-Tethys Orogen in southwest China (II): Insights from zircon ages of ophiolites, arc/back-arc assemblages and within-plate igneous rocks and generation of the Emeishan CFB province[J]. *Lithos*, 113(3~4): 767~784.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, *et al.* 2003. Tectonic evolution of the early Mesozoic blueschist-bearing Qiangtang metamorphic belt, central Tibet[J]. *Tectonics*, 22(4): 540~566.
- Kapp P, Yin A, Manning C E, *et al.* 2000. Blueschist-bearing metamorphic core complexes in the Qiangtang block reveal deep crustal structure of northern Tibet[J]. *Geology*, 28(1): 19~22.
- Li Cai. 2008. A review on 20 years' study of the Longmuco-Shuanghu-Lancang River suture zone in Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Geological Review*, 54(1): 105~119(in Chinese with English abstract).
- Li Shanping, Wang Yizhi, Shen Chunshan, *et al.* 2007. Geochemical characteristics of Late Permian-Early Triassic continental volcanic rocks in the Zaiduo area, Northern Qiangtang, Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 26(6): 675~681(in Chinese with English abstract).
- Liu Bin. 2014. Petrogenesis and Geodynamic setting of Permian to Triassic mafic rocks in the Yushu area, Central Qinghai-Tibetan Plateau[D]. China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Liu Y S, Gao S, Hu Z C, *et al.* 2010b. 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*, 51(1~2): 537~571.

- Liu Y S, Hu Z C, Gao S, *et al.* 2008a. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 257(1): 34~43.
- Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, *et al.* 2010a. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS[J]. *Chinese Science Bulletin*, 55(15): 1 535~1 546.
- Liu Y S, Zong K Q, Kelemen P B, *et al.* 2008b. Geochemistry and magmatic history of eclogites and ultramafic rocks from the Chinese continental scientific drill hole: subduction and ultrahigh-pressure metamorphism of lower crustal cumulates[J]. *Chemical Geology*, 247(1): 133~153.
- Lu Yuanfa. 2004. Geokit—A geochemical toolkit for Microsoft Excel[J]. *Geochimica*, 33(5): 459~464(in Chinese with English abstract).
- Ludwig K R. 2000. Users Manual for Isoplot 3.00: A geochronological toolkit for Microsoft Excel[J]. *Ex. Rev.*, 2: 1~56.
- Metcalfe I. 2013. Gondwana dispersion and Asian accretion: Tectonic and palaeogeographic evolution of eastern Tethys[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 66: 1~33.
- Mo Xuanxue. 2010. A review and prospect of geological researches on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 37(4): 841~853 (in Chinese with English abstract).
- Pan G T, Wang L Q, Li R S, *et al.* 2012. Tectonic evolution of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 3~14.
- Pearce J A, Kempton P D, Nowell G M, *et al.* 1999. Hf-Nd element isotope perspective on the nature and provenance of mantle and subduction components in Western Pacific arc-basin systems[J]. *Journal of Petrology*, 40: 1 579~1 611.
- Peng T P, Zhao G C, Fan W M, *et al.* 2014. Late Triassic granitic magmatism in the Eastern Qiangtang, Eastern Tibetan Plateau: Geochronology, petrogenesis and implications for the tectonic evolution of the Paleo-Tethys[J]. *Gondwana Research*.
- Polat A and Munker C. 2004. Hf-Nd isotope evidence for contemporaneous subduction processes in the source of late Archean arc lavas from the Superior Province, Canada [J]. *Chemical Geology*, 213: 403~429.
- Reid A J, Wilson C J L and Liu S. 2005. Structural evidence for the Permo-Triassic tectonic evolution of the Yidun Arc, eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Structural Geology*, 27(1): 119~137.
- Roger F, Jolivet M and Malavielle J. 2010. The tectonic evolution of the Songpan-Garzê (North Tibet) and adjacent areas from Proterozoic to Present: A synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(4): 254~269.
- Rogers R D, Káráson H and Hilst R D. 2002. Epeirogenic uplift above a detached slab in northern Central America[J]. *Geology*, 30: 1 031~1 034.
- Shinjo R and Kato Y. 2000. Geochemical constraints on the origin of bimodal magmatism at the Okinawa Trough, an incipient back-arc basin[J]. *Lithos*, 54: 117~137.
- Streck M J, Leeman W P and Chesley J. 2007. High-magnesian andesite from Mount Shasta: A product of magma mixing and contamination, not a primitive mantle melt[J]. *Geology*, 35(4): 351.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313~345.
- Tao Y, Bi X W, Li C, *et al.* 2014. Geochronology, petrogenesis and tectonic significance of the Jitang granitic pluton in eastern Tibet, SW China[J]. *Lithos*, 184: 314~323.
- Taylor S R and McLennan S M. 1985. *The Continental Crust: its Composition and Evolution*[M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications: 1~328.
- Topuz G, Altherr R, Schwarz W H, *et al.* 2005. Post-collisional plutonism with adakite-like signatures: the Eocene Sarayclk granodiorite (Eastern Pontides, Turkey)[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150(4): 441~455.
- Wang Q, Wyman D A, Xu J F, *et al.* 2008. Triassic Nb-enriched basalts, magnesian andesites, and adakites of the Qiangtang terrane (Central Tibet): evidence for metasomatism by slab-derived melts in the mantle wedge[Z]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 155: 473~490.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 20: 325~343.
- Xu Zhiqin, Yang Jinshui, Li Wenchang, *et al.* 2013. Paleo-Tethys system and accretionary orogen in the Tiber Plateau[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1 847~1 860(in Chinese with English abstract).
- Yang, T N, Ding Y, Zhang H R, *et al.* 2014. Two-phase subduction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(11~12): 1 654~1 682.
- Yang T N, Hou Z Q, Wang Y, *et al.* 2012. Late Paleozoic to Early Mesozoic tectonic evolution of northeast Tibet: Evidence from the Triassic composite western Jinsha-Garzê-Litang suture[J]. *Tectonics*, 31(4): 1~20.
- Yang T N, Zhang H R, Liu Y X, *et al.* 2011. Permo-Triassic arc magmatism in central Tibet: Evidence from zircon U-Pb geochronology, Hf isotopes, rare earth elements, and bulk geochemistry[Z]. *Chem-*

- ical Geology, 284: 270~282.
- Yin A and Harrison T M. 2000. Geologic Evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Science, 28: 211~280.
- Zhai Q G, Jahn B M, Su L, *et al.* 2013a. Triassic arc magmatism in the Qiangtang area, northern Tibet: Zircon U-Pb ages, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics, and tectonic implications[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 63: 162~178.
- Zhai Q G, Jahn B M, Wang J, *et al.* 2013b. The Carboniferous ophiolite in the middle of the Qiangtang terrane, Northern Tibet: SHRIMP U-Pb dating, geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic characteristics[J]. Lithos, 168~169: 186~199.
- Zhai Q G, Zhang R Y, Jahn B M, *et al.* 2011. Triassic eclogites from central Qiangtang, northern Tibet, China: Petrology, geochronology and metamorphic P-T path[J]. Lithos, 125(1~2): 173~189.
- Zhai Qingguo, Li Cai, Wang Jun, *et al.* 2009. Petrology, mineralogy and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ chronology for Rongma blueschist from central Qiangtang, northern Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 25(9): 2 281~2 288(in Chinese with English abstract).
- Zhang H R, Yang T N, Hou Z Q, *et al.* 2013. Petrogenesis and tectonics of late Permian felsic volcanic rocks, eastern Qiangtang block, north-central Tibet: Sr and Nd isotopic evidence[J]. International Geology Review, 55(8): 1 017~1 028.
- Zhang K J, Tang X C, Wang Y, *et al.* 2011. Geochronology, geochemistry, and Nd isotopes of early Mesozoic bimodal volcanism in northern Tibet, western China: Constraints on the exhumation of the central Qiangtang metamorphic belt[J]. Lithos, 121(1~4): 167~175.
- Zhang Le, Dong Yongsheng, Zhang Xiuzheng, *et al.* 2014. The discovery of the Early Permian adakitic rock in the Hongji Mountain area within central and western Qiangtang, Tibet Plateau, and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 33(11): 1 728~1 739(in Chinese with English abstract).
- Zhang Neng, Li Jianbo, Yang Yunsong, *et al.* 2012. Petrogeochemical characteristics and tectonic setting of the Wandaohu ophiolite melange, Jinshajiang suture, Tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(4): 1 291~1 304(in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiuzheng, Dong Yongsheng, Li Cai, *et al.* 2014. A record of complex histories from oceanic lithosphere subduction to continental subduction and collision: Constraints on geochemistry of eclogite and blueschist in Central Qiangtang, Tibetan Plateau[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(10): 2 821~2 834(in Chinese with English abstract).
- Zhao S Q, Tan J, Wei J H, *et al.* 2015. Late Triassic Batang Group arc volcanic rocks in the northeastern margin of Qiangtang terrane, northern Tibet: partial melting of juvenile crust and implications for Paleo-Tethys ocean subduction[J]. International Journal of Earth Sciences, 104(2): 369~387.
- Zhou Guoqing. 2008. Ophiolite: Some key aspects regarding its definition and classification[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 44(1): 1~24(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 段其发, 王建雄, 白云山, 等. 2009. 青海南部蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年和岩石地球化学特征[J]. 中国地质, 36(2): 291~299.
- 贺淑赛, 李秋根, 王宗起, 等. 2015. 内蒙古中部宝力高庙组长英质火山岩 U-Pb-Hf 同位素特征及其地质意义[J]. 北京大学学报(自然科学版), 51(1): 50~64.
- 李 才. 2008. 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, 54(1): 105~119.
- 李善平, 王毅智, 沈存祥, 等. 2007. 青藏高原北羌塘盆地杂多地区晚二叠世-早三叠世陆相火山岩的地球化学特征及其意义[J]. 地质通报, 26(6): 675~681.
- 刘 彬. 2014. 青藏高原中部玉树二叠纪-三叠纪镁铁质岩石的成因及其地球动力学背景[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 路远发. 2004. GeoKit——一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包[J]. 地球化学, 33(5): 459~464.
- 莫宣学. 2010. 青藏高原地质研究的回顾与展望[J]. 中国地质, 37(4): 841~853.
- 许志琴, 杨经绥, 李文昌, 等. 2013. 青藏高原中的古特提斯体制与增生造山作用[J]. 岩石学报, 29(6): 1 847~1 860.
- 翟庆国, 李 才, 王 军, 等. 2009. 藏北羌塘中部绒玛地区蓝片岩岩石学、矿物学和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学[J]. 岩石学报, 25(9): 2 281~2 288.
- 张 乐, 董永胜, 张修政, 等. 2014. 藏北羌塘中西部红脊山地区早二叠世埃达克质岩石的发现及其地质意义[J]. 地质通报, 33(11): 1 728~1 739.
- 张 能, 李剑波, 杨云松, 等. 2012. 金沙江缝合带弯岛湖蛇绿混杂岩带的岩石地球化学特征及其构造背景[J]. 岩石学报, 28(4): 1 291~1 304.
- 张修政, 董永胜, 李 才, 等. 2014. 从洋壳俯冲到陆壳俯冲和碰撞: 来自羌塘中西部地区榴辉岩和蓝片岩地球化学的证据[J]. 岩石学报, 30(10): 2 821~2 834.
- 周国庆. 2008. 蛇绿岩研究新进展及其定义和分类的再讨论[J]. 南京大学学报(自然科学版), 44(1): 1~24.