

西藏冈底斯东段扎雪地区林子宗群帕那组火山岩 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义

刘富军^{1,2)}, 秦松^{1,3)}, 孙传敏¹⁾

1) 成都理工大学地球科学学院, 成都, 610059; 2) 东华理工大学地球科学学院, 南昌, 330013;

3) 四川省地质矿产勘查开发局区域地质调查队, 成都, 610213

内容提要: 本文对扎雪地区林子宗群帕那组火山岩进行主微量地球化学和锆石 U—Pb—Hf 同位素研究, 以探讨其形成时代、岩石成因及其构造意义。锆石 U-Pb 年龄表明, 扎雪地区帕那组火山岩形成于 ~52 Ma, 与冈底斯东段帕那组火山岩形成时代相似, 暗示了帕那组在时空上具有相对一致的活动时限。研究区火山岩高硅、富钠、富碱, A/CNK 值为 1.30~1.73, 属于过铝质钾玄岩系列。同时, 这些火山岩富集大离子亲石元素和轻稀土元素, 亏损高场强元素, 有岛弧岩浆的亲属性, 且其低 $Mg^{\#}$ (19.77~38.96) 及低含量的 Cr (3.00~34.3 $\mu\text{g/g}$)、Ni (2.90~15.6 $\mu\text{g/g}$)、Co (2.20~9.58 $\mu\text{g/g}$)、La/Sm 值随 La 含量升高而无明显变化, 表明这些火山岩在成岩过程中经历了明显的分离结晶作用。此外, 扎雪地区帕那组火山岩锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 平均值 -4.4~-3.6, 表明该火山岩起源于新生地壳物质的部分熔融, 有古老壳源物质加入源区中, 形成了相对富集的 Hf 同位素特征。结合前人在林周盆地及邻区的研究结果, 表明冈底斯东段林子宗群火山岩母岩浆随时间由岛弧环境的亏损地幔源区向碰撞环境壳源物质加入相对富集型源区的转变, 指示其形成环境经历了由岛弧向陆陆碰撞的转变; 帕那组火山岩形成于印度板块与欧亚板块碰撞的初期阶段, 是记录这种体制转换的主要载体。

关键词: 地球化学; 锆石 U-Pb 年龄; 锆石 Hf 同位素; 岩石成因; 扎雪地区火山岩; 西藏冈底斯

夹持于班公湖—怒江和印度河—雅鲁藏布江两大巨型缝合带之间的冈底斯构造岩浆带位于欧亚板块南缘, 是青藏高原的重要组成部分, 又称拉萨地体, 其内部发育的大规模的中—新生代岩浆作用完整地记录了与拉萨地体的形成和特提斯构造演化有关的洋—陆转换、碰撞造山和陆内汇聚等各演化阶段的重要信息 (McDermid et al., 2002; 莫宣学等, 2003, 2007; 侯增谦等, 2006; 孟元库等, 2015a; Zhu Dicheng et al., 2015; 许志琴等, 2019)。目前, 来自岩浆岩岩石学、古生物学与沉积学、构造地质学以及变质岩石学的证据基本一致认为青藏高原主碰撞带内印度—欧亚大陆碰撞初始时间为 70~60 Ma (莫宣学等, 2003; Ding Lin et al., 2005; Leech et al., 2005; Clementz et al., 2011; Zhu Dicheng et al., 2011; Wu Fuyuan et al., 2014), 结束于 40 Ma 左右, 这段时间为同碰撞阶段, 40 Ma 之后则称后碰撞

阶段 (Yin An and Harrison, 2000; Dong Guochen et al., 2005; Mo Xuanxue et al., 2007, 2008; Zhao Zhidan et al., 2009)。在同碰撞阶段, 强烈的火山—岩浆活动贯穿于整个主碰撞造山过程, 形成了规模巨大的新生代冈底斯花岗岩岩基以及同时代的林子宗火山岩系 (莫宣学等, 2003; 侯增谦等, 2006; Ji Weiqiang et al., 2009; Mo Xuanxue et al., 2009; 孟元库等, 2018)。

林子宗火山岩系主要呈带状分布于冈底斯构造岩浆岩带的南部, 在东部的拉萨地区、中西部的朱诺地区、措勤地区、桑桑地区以及西部狮泉河地区均有出露, 构成了一条东西走向长约 1200 km, 南北宽约 100 km 的巨型陆相火山岩带, 整个火山岩系厚度超过 5000 m, 分布面积占冈底斯岩浆带面积的一半以上 (莫宣学等, 2003)。近年来, 不同学者对展布在冈底斯东段不同地区的林子宗群帕那组火山岩进行

注: 本文为中国地质调查局大调查项目“西藏当雄—色日绒地区 1:5 万矿产远景调查 (编号: 1212011221077)”的成果。

收稿日期: 2019-01-29; 改回日期: 2019-08-06; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2019.05.006

作者简介: 刘富军, 男, 1981 年生, 博士研究生, 第四纪地质学专业; Email: fjliu81@163.com。通讯作者: 秦松, 男, 1986 年生, 高级工程师, 主要从事区域地质调查与研究; Email: qinsong2004@163.com。

了详细的研究,认为帕那组火山岩具有过铝质钾玄岩地球化学特征,形成于大陆碰撞及地壳加厚的构造环境(Mo Xuanxue et al., 2008; 付文春等, 2014; 梁银平等, 2010; 莫宣学等, 2003)。但对于林子宗群帕那组火山岩的岩浆源区和成因认识仍存在不同解释,有的学者认为其形成于增厚地壳的部分熔融(黄映聪等, 2005; 李再会等, 2008; 杨硕等, 2016),亦有部分学者提出其岩浆来源于富集岩石圈地幔和局部下地壳的混合(Lee Haoyang et al., 2012; Liu Anlin et al., 2018; 谢克家等, 2011),造成这些不同解释的主要原因,在很大程度上与缺少有效的同位素研究有关。此外,前人在探讨林子宗群火山岩成因和源区性质时主要开展全岩主、微量元素和 Sr—Nd 同位素等研究(Lee Haoyang et al., 2012; Mo Xuanxue et al., 2008; 于枫等, 2010),有关原位锆石 Lu—Hf 同位素组分的研究存在明显的不足。本文依托中国地质调查局大调查项目“西藏色日绒地区 1:5 万矿产远景调查项目”,对扎雪地区出露的一套林子宗群帕那组火山岩展开了详细的岩相学、岩石地球化学、LA-ICP-MS 锆石 U—Pb—Hf 同位素组分研究,以期探讨其成岩时代、岩石成因和源区特征,为进一步认识和完善林子宗火山岩系的年代学格架、壳—幔相互作用和区域构造体制转变等问题提供了丰富的资料。

1 区域地质概况

冈底斯构造岩浆岩带呈近东西向展布于青藏高原南部,其南北分别以雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)和班公湖—怒江缝合带(BNSZ)为界,而与羌塘地块和特提斯喜马拉雅地块相隔(图 1a)。前人根据基底性质和沉积盖层的差异,以狮泉河—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带(SNMZ)和洛巴堆—米拉山断裂带(LMF)为界,进一步将冈底斯构造岩浆岩带由南向北划分为南冈底斯(SG)、冈底斯弧背断隆带(GRUB)、中冈底斯(MG)和北冈底斯(NG)(图 1b)(和钟铎等, 2006; 秦臻等, 2018; 潘桂棠等, 2004a)。中冈底斯和冈底斯弧背断隆带被认为是一个经历了多期变质作用的前寒武纪结晶基底(Dong Xin et al., 2011; Zhang Zeming et al., 2012; 张泽明等, 2010),并广泛被石炭纪—二叠纪变沉积岩系和晚侏罗世—早白垩世火山—沉积地层覆盖(Zhu Dicheng et al., 2009, 2011),局部地段还出露有少量奥陶纪、志留纪、泥盆纪和三叠纪地层(潘桂棠等, 2004b)。而南冈底斯和北冈底斯则被认为是由

雅鲁藏布江和班公湖—怒江洋俯冲过程中岛弧拼贴而成的新生地壳(朱弟成等, 2008; Zhu Dicheng et al., 2011)。南冈底斯主要以白垩纪—古近纪冈底斯岩基和古近纪林子宗火山岩为主,二者占其总面积的 60% 以上(Ji Weiqiang et al., 2009; Zhu Dicheng et al., 2011, 2013),沉积地层主要局限在其东部,岩性以三叠纪—白垩纪火山—沉积岩为特征(潘桂棠等, 2004b; Yin Jiarun and Grant-Mackie, 2005; Zhu Dicheng et al., 2008),并且局部地段可能有前寒武纪结晶基底保留(Dong Xin et al., 2010)。目前,北冈底斯发现的最老岩性为中、晚三叠统复理石沉积岩系,并推测其可能为班公湖—怒江特提斯洋壳向南俯冲过程中形成的增生杂岩(尼玛次仁和谢尧武, 2005; 潘桂棠等, 2006),其余为广泛出露的具有正 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值的白垩世火山—沉积岩及其有关的花岗侵入岩和少量侏罗纪沉积岩(Zhu Dicheng et al., 2011; Sui Qinglin et al., 2013;)。

本文报道的帕那组火山岩位于冈底斯弧背断隆带中东段扎雪地区,属青藏高原腹地,距林周盆地东北约 100 km。该区林子宗群帕那组火山岩之下的地层主要有前奥陶系松多岩群(AnOsd)、石炭系—二叠系来姑组(C_2P_1l)和少量的中二叠统洛巴堆组(P_2l),它们与帕那组火山岩呈显著的角度不整合关系(图 1c)。前奥陶系松多岩群为一套绿片岩相—低角闪岩相变质岩,主要岩性为云母片岩、阳起(角闪)片岩、片麻岩、石英片岩及大理岩等,前人获得该套变质岩的主变质期温压条件为 500~553 °C 和 0.93~1.15 GPa,属中低温、中高压区域变质作用,并具有相似于板块碰撞带变质作用的特征(杨德明等, 2005);石炭系—二叠系来姑组则由一套低绿片岩相的浅变质岩组成,主要岩性为板岩、砂质板岩、含砾砂质板岩、夹石英砂岩、细砾岩及中基性火山岩或薄层灰岩等^①;中二叠统洛巴堆组仅在研究区西北部有少量出露,主要岩性为一套浅海相碳酸盐岩沉积建造^②。在研究区内还可见古近纪花岗斑岩和石英二长斑岩也被帕那组火山岩所覆盖,前人对其石英二长斑岩进行了黑云母 K—Ar 测年获得 54.42 Ma 成岩年龄,并显示出钾玄岩的地球化学特征(和钟铎等, 2004)。区内断裂构造主要为近东西向、北东向和北西向,在帕那组火山岩南部前奥陶系松多岩群内发育一条近 E—W 向延伸的韧性剪切带(即扎雪—门巴韧性剪切带),前人通过同构造花岗岩体 LA-ICP-MS 锆石 U—Pb 和糜棱岩中黑云母 Ar—Ar 年代学研究,均认为该剪切带主要形成于白垩纪

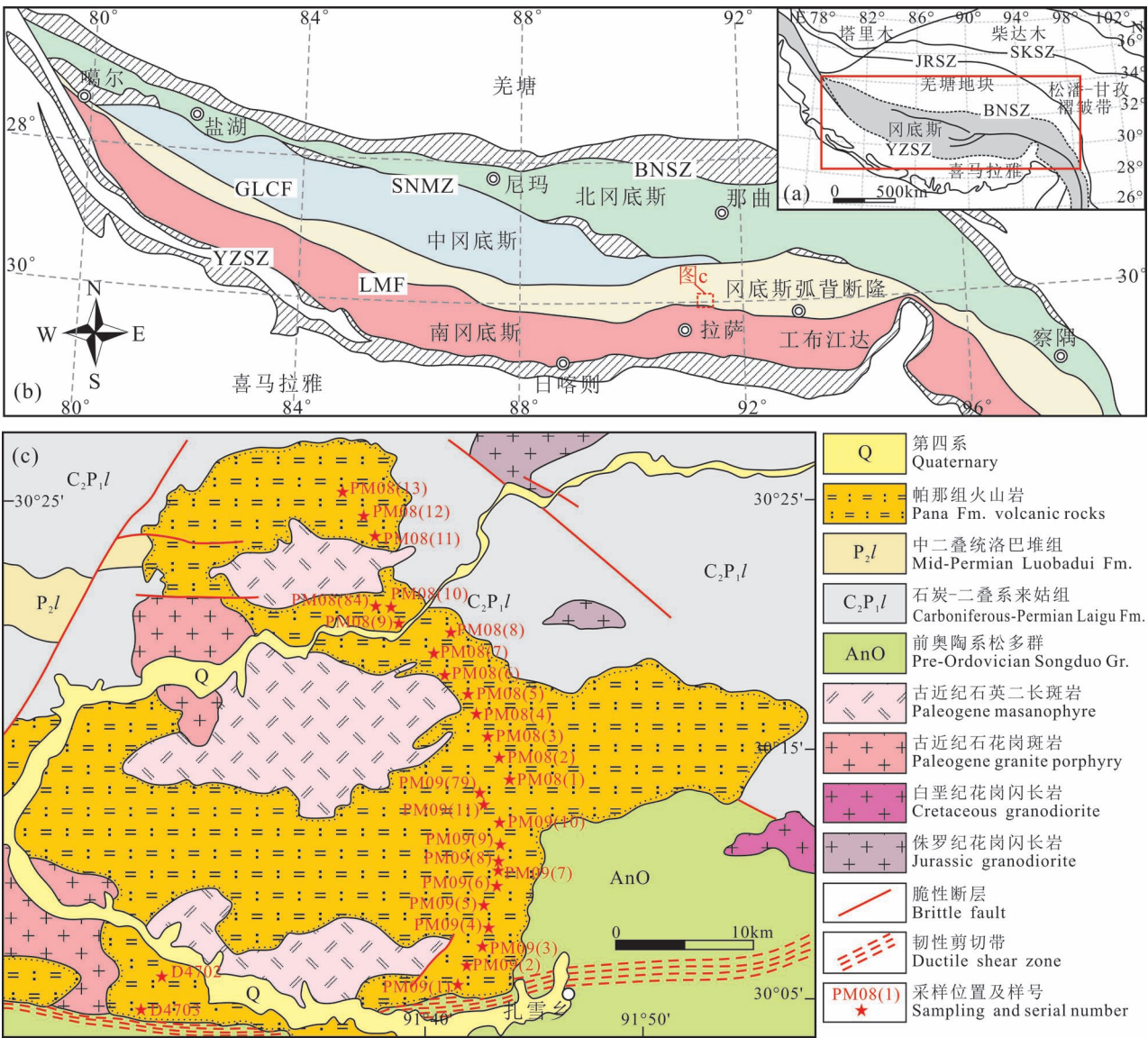


图 1 (a)青藏高原大地构造图(据 Ding Lin et al., 2014);(b)冈底斯构造单元划分地质简图(据朱弟成等, 2009);(c)藏南扎雪地区地质图(据 1:25 万西藏门巴幅地质图^①修改)

Fig. 1 (a) Tectonic framework of the Xizang (Tibetan) Plateau(modified from Ding Lin et al., 2014); (b) simplified geological map of the Gangdese(modified from Zhu Dicheng et al., 2009); (c) geological map of Zhaxue area, southern Xizang (Tibet) (modified from the 1/250000 Regional Geologic Report of Menba Area, Xizang (Tibet))

SKSZ—南昆仑缝合带;JRSZ—金沙江缝合带;BNSZ—班公湖—怒江缝合带;SNMZ—狮泉河—永珠—纳木错—嘉黎蛇绿混杂岩带;GLCF—噶尔—隆格尔—措麦断裂带;YZSZ—雅鲁藏布江缝合带;LMF—洛巴堆—米拉山断裂带

SKSZ—South Kunlun suture zone;JRSZ—Jinsha River suture zone;BNSZ—Banggong Lake—Nujiang River suture zone; SNMZ—Shiquan River—Nam Lake mélange zone; GLCF—Gar—Lunggar—Zhari—Comai fault;YZSZ—Yarlung River suture zone;LMF—Luobadui—Mila Mountain fault

(翟文建等, 2012; 张认和和钟铎, 2007),并推测其形成可能与新特提斯洋闭合及洋壳向北俯冲消减作用有关(翟文建等, 2012)。

2 样品描述

扎雪地区帕那组火山岩主要岩性为巨厚的深灰

色、紫红色中酸性火山碎屑岩夹少量火山熔岩,岩石组合主要为流纹质含角砾晶屑凝灰岩、粗安质含角砾晶屑凝灰岩及粗安质含角砾熔结凝灰岩等,局部夹有少量火山角砾岩等。与林周盆地建组剖面并不完全一致(董国臣等, 2005),显示出更多的火山爆发空落堆积相、崩落堆积相和火山碎屑流堆积相。



图 2 藏南扎雪地区帕那组火山岩野外露头 and 显微镜下照片: (a) 流纹质晶屑凝灰岩; (b) 粗安质含角砾晶屑凝灰岩; (c) 粗安质含角砾熔结凝灰岩; (d) 流纹质晶屑凝灰岩镜下特征; (e) 粗安质含角砾晶屑凝灰岩镜下特征; (f) 粗安质含角砾熔结凝灰岩镜下特征

Fig. 2 Field photos and photomicrographs of the volcanic rocks from the Pana Formation in the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet): (a) Rhyolitic crystal tuff; (b) trachytic brecciated crystal tuff; (c) trachytic brecciated welded tuff; (d) micrograph of rhyolitic crystal tuff; (e) micrograph of trachytic brecciated crystal tuff; (f) micrograph of trachytic brecciated crystal tuff

Q—石英; Pl—斜长石; Kfs—碱性长石; Bt—黑云母

Q—quartz; Pl—plagioclase; Kfs—K-feldspar; Bt—biotite

表 1 藏南扎雪地区帕那组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试结果
Table 1 Zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic compositions of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet)

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)	
	Pb	Th	U		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$			$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$				
					测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		
样品号 PM09(6)																		
01	6.30	584	566	1.03	0.0525	0.0021	0.0578	0.0022	0.0081	0.0001	306	90.7	57.0	2.1	51.7	0.5	90%	
02	1.58	135	136	0.99	0.0522	0.0039	0.0584	0.0039	0.0085	0.0001	295	166	57.6	3.7	54.3	0.8	94%	
03	1.83	188	167	1.12	0.0508	0.0038	0.0537	0.0037	0.0078	0.0001	232	174	53.2	3.6	50.3	0.9	94%	
04	3.70	392	305	1.28	0.0465	0.0023	0.0534	0.0026	0.0083	0.0001	33.4	167	52.8	2.5	53.5	0.7	98%	
05	3.47	512	244	2.10	0.0491	0.0026	0.0564	0.0029	0.0085	0.0001	154	121	55.7	2.8	54.3	0.6	97%	
06	2.04	222	182	1.22	0.0483	0.0038	0.0506	0.0039	0.0079	0.0001	122	178	50.1	3.8	50.4	0.7	99%	
07	1.27	131	116	1.13	0.0483	0.0044	0.0505	0.0044	0.0079	0.0001	122	194	50.1	4.3	50.9	0.9	98%	
08	2.66	310	217	1.43	0.0464	0.0027	0.0506	0.0028	0.0081	0.0001	16.8	133	50.1	2.7	52.0	0.7	96%	
09	0.97	129	74.2	1.74	0.0537	0.0056	0.0573	0.0057	0.0083	0.0002	367	235	56.6	5.5	53.2	1.2	93%	
10	2.24	201	196	1.03	0.0533	0.0031	0.0594	0.0033	0.0083	0.0001	343	134	58.5	3.2	53.2	0.7	90%	
11	1.34	133	118	1.13	0.0502	0.0045	0.0537	0.0045	0.0083	0.0001	211	256	53.1	4.3	53.1	0.8	99%	
12	2.54	364	180	2.02	0.0536	0.0033	0.0610	0.0036	0.0085	0.0001	354	139	60.1	3.5	54.4	0.8	90%	
13	1.99	209	169	1.24	0.0490	0.0030	0.0550	0.0033	0.0083	0.0001	146	141	54.4	3.1	53.1	0.9	97%	
14	1.49	157	135	1.16	0.0482	0.0037	0.0522	0.0040	0.0081	0.0002	109	170	51.7	3.8	52.0	1.0	99%	
15	2.88	331	250	1.32	0.0461	0.0026	0.0494	0.0027	0.0078	0.0001	400	-268.48	48.9	2.6	50.2	0.6	97%	
16	1.26	127	109	1.17	0.0532	0.0049	0.0599	0.0056	0.0085	0.0002	345	239	59.1	5.4	54.4	1.0	91%	
样品号 PM09(79)																		
01	3.69	476	284	1.68	0.0527	0.0023	0.0571	0.0024	0.0080	0.0001	322	102	56.4	2.3	51.3	0.6	90%	
02	6.80	563	650	0.87	0.0476	0.0015	0.0528	0.0018	0.0081	0.0001	79.7	-116.65	52.2	1.7	51.7	0.7	99%	
03	4.05	670	285	2.35	0.0475	0.0022	0.0521	0.0024	0.0080	0.0001	76.0	107	51.6	2.3	51.2	0.6	99%	
04	1.29	120	118	1.02	0.0505	0.0054	0.0548	0.0062	0.0079	0.0002	217	239	54.1	6.0	50.6	1.1	93%	
05	1.77	245	130	1.88	0.0522	0.0040	0.0562	0.0041	0.0081	0.0001	295	178	55.5	3.9	51.9	0.9	93%	
06	2.18	271	180	1.50	0.0478	0.0029	0.0515	0.0030	0.0080	0.0001	100	128	51.0	2.9	51.5	0.8	99%	
07	4.27	562	340	1.65	0.0520	0.0027	0.0572	0.0030	0.0080	0.0001	283	119	56.4	2.9	51.2	0.6	90%	
08	6.89	1027	521	1.97	0.0513	0.0017	0.0580	0.0019	0.0082	0.0001	257	77.8	57.2	1.8	52.9	0.5	92%	
09	2.60	287	208	1.38	0.0478	0.0029	0.0531	0.0031	0.0083	0.0001	87.1	146	52.6	3.0	53.3	0.9	98%	
样品号 PM08(84)																		
01	1.31	130	112	1.17	0.0472	0.0046	0.0529	0.0050	0.0083	0.0001	57.5	215	52.4	4.9	53.4	0.9	98%	
02	1.26	127	109	1.16	0.0511	0.0043	0.0546	0.0045	0.0080	0.0002	243	197	54.0	4.3	51.2	1.0	94%	
03	2.54	233	229	1.02	0.0524	0.0030	0.0563	0.0030	0.0080	0.0001	302	130	55.6	2.9	51.3	0.8	91%	

本文样品分别采自唐古乡曾热弄沟剖面 PM08 (起点为 N 30°13'40", E 91°44'07", 终点为 N 30°19'23", E 91°40'55", 海拔为 4160 m) 和剖面 PM09 (起点为 N 30°09'57", E 91°44'15", 终点为 N 30°13'05", E 91°43'24", 海拔为 4480 m), 用于地球化学、锆石 U-Pb 和 Lu—Hf 同位素测试的岩性主要为流纹质晶屑凝灰岩、粗安质含角砾晶屑凝灰岩和粗安质含角砾熔结凝灰岩。

流纹质晶屑凝灰岩新鲜面呈灰白色, 具晶屑凝灰结构 (图 2a), 块状构造, 岩石主要由晶屑 (45%) 和火山灰 (55%) 组成。晶屑成分为石英、斜长石、碱性长石和少量黑云母。其中斜长石和碱性长石裂纹发育, 形成次圆状、次棱角状 (图 2d), 石英可见有港湾状熔蚀, 以上晶屑粒径为 0.1~3.5 mm。火山灰呈深黑色, 粒度细小, 起胶结作用。

粗安质含角砾晶屑凝灰岩新鲜面呈灰白色, 具含角砾晶屑凝灰结构 (图 2b), 块状构造, 主要包含晶屑 (30%)、火山角砾 (10%) 和火山灰 (60%)。火山角砾为粗面岩岩屑, 呈次棱角状, 粒径 20~30 mm。晶屑成分主要为斜长石、碱性长石及少量黑云母, 其中斜长石和碱性长石呈棱角状、次棱角状, 裂纹发育, 黑云母可见有弱暗化边和发生扭折、弯曲等现象 (图 2e), 以上晶屑粒径为 1~2 mm, 火山灰粒度细小, 总体颜色较深, 不易辨认。

粗安质含角砾熔结凝灰岩新鲜面呈灰红色, 具熔结凝灰结构, 可见假流动构造 (图 2c), 由晶屑 (20%)、塑性岩屑 (25%)、少量的火山角砾 (5%) 和火山灰 (50%) 组成。晶屑成分为石英、碱性长石, 裂纹较发育, 石英常被溶蚀呈浑圆状, 塑性岩屑呈拉长的条带状, 遇到晶屑绕过并出现弯曲嵌入现象, 局部发生弱的脱玻化现象 (图 2f), 晶屑粒径一般为 1~2 mm, 个别大于 3 mm, 多为次棱角状, 火山灰粒度细小, 起胶结作用。

3 分析方法

3.1 锆石 U-Pb 定年

锆石 U-Pb 年代学测试工作在中国科学院青藏高原研究所大陆碰撞与高原隆升重点实验室激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪 (LA-ICP-MS) 上完成。在分析测试之前, 用于测年研究的 3 件样品采用电磁和重液将锆石分选出来, 再在双目镜下挑选出晶型较好的锆石置于环氧树脂内固定、抛光。对制好的锆石靶样进行透、反射和阴极发光 (CL) 图像采集, 结合这些图像, 初步判断锆石成因, 并圈定无裂隙、无包体的锆石微区以备测试分析。LA-ICP-MS 激光剥蚀系统为美国 NewWave 公司生产的 UP193FX 型 (新系统: 美国 ESI 公司生产的 NWR193 UC 型) 193 nm ArF 准分子系统, 激光器来自于德国 ATL 公司, ICP-MS 为 Agilent 7500a。激光器波长为 193 nm, 脉冲宽度 <4 ns, 束斑直径为 20 μm。样品的同位素比值及元素含量计算采用 Glitter 4.0 (Van Achterbergh et al., 1999) 程序, 年龄谐和图、分布频率图绘制和年龄权重平均计算利用软件 Isoplot 3.0 完成 (Ludwig, 2003)。

3.2 主、微量元素分析

全岩主、微量元素分析在原国土资源部保定矿产资源监督检测中心完成, 在测试分析之前, 选取新鲜、无污染的均质样品粉碎至 200 目。主量元素分析方法为 X 荧光光谱法 (XRF), 分析的相对误差为 1%~3%; 微量元素分析方法为等离子质谱法 (ICP-MS), 分析的相对精度优于 5%。

3.3 锆石 Lu—Hf 同位素分析

锆石 Lu—Hf 同位素测试在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,

测点号	元素含量($\times 10^{-6}$)			Th/U	同位素比值						同位素年龄(Ma)						谐和度 (%)
					$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{206}\text{Pb})$		$n(^{207}\text{Pb})/n(^{235}\text{U})$		$n(^{206}\text{Pb})/n(^{238}\text{U})$		
	Pb	Th	U		1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ	测值	1 σ		
04	1.42	143	122	1.17	0.0539	0.0034	0.0580	0.0035	0.0081	0.0001	369	144	57.2	3.4	51.9	0.9	90%
05	1.32	129	113	1.14	0.0519	0.0039	0.0576	0.0041	0.0081	0.0001	280	170	56.9	4.0	52.2	0.9	91%
06	1.25	124	111	1.12	0.0487	0.0050	0.0490	0.0050	0.0080	0.0001	132	235	48.5	4.8	51.0	0.9	94%
07	1.39	141	123	1.14	0.0482	0.0042	0.0511	0.0044	0.0081	0.0001	109	196	50.6	4.2	52.3	0.9	96%
08	1.34	130	121	1.08	0.0462	0.0036	0.0501	0.0037	0.0080	0.0001	9.4	178	49.6	3.6	51.6	0.9	96%

采用美国 ASI (AppliedSpectra Inc.) J-100 飞秒激光和 Neptune MC-ICP-MS (Thermo Finnigan) 联用技术。激光频率为 8 Hz 的,剥蚀坑尺寸为 20 μm × 40 μm,能量密度为 16 J/cm²,剥蚀时间为 31 s。由于锆石中 $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值非常低(通常小于 0.002),¹⁷⁶Lu 对¹⁷⁶Hf 同质异位素干扰可以忽略,根据 Yb 自然丰度,以及测试得到的 $n(^{173}\text{Yb})/n(^{172}\text{Yb})$ 值以扣除¹⁷⁶Yb 对¹⁷⁶Hf 的干扰。锆石 Hf 同位素分析点与锆石 U-Pb 年龄分析点尽量重合或者位于同一环带内,以使 Hf 同位素分析与锆石 U-Pb 年龄分析相对应。

4 实验结果

4.1 锆石 U-Pb 定年

本文在研究区 3 处选取各重达 20 kg 的新鲜岩石样品,用于挑选锆石,以备单颗粒锆石 U-Pb 测年,数据结果列于表 1。

样品 PM09(6)挑选出的锆石在 CL 图像上呈短柱状或长柱状,颗粒长轴长 120~230 μm,长宽比为 1.3:1~3.2:1。锆石无色至灰色,大部分锆石的振荡环带清晰可见,且部分锆石被熔蚀呈港湾状。根据测试结果,16 个测点谐和度大于 90%,均落在一致线上或其附近。锆石的 Th 和 U 的含量分别为 127~584 μg/g 和 74.2~566 μg/g, Th/U 值为 0.99~2.10,表明它们均属于典型的岩浆锆石(Wu Yuanbao and Zheng Yongfei, 2004)。所测定的 16 个锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄分布于 50.2~54.4 Ma,其加权平均年龄为 52.4 ± 0.8 Ma($N=16$, MSWD=4.4),该年龄可以代表火山岩的形成年龄(图 3a、b)。

样品 PM09(79)挑选出的锆石在 CL 图像上呈短柱状或长柱状,锆石颗粒长轴长 130~240 μm,长宽比为 1.7:1~3.3:1。锆石无色至灰色,大部分锆石的振荡环带清晰可见。根据测试结果,9 个测点谐和度大于 90%,均落在一致线上或其附近。锆石的 Th 和 U 含量分别为 120~1027 μg/g 和 118~650 μg/g, Th/U 值为 0.87~2.35,表明他们均属于典型的岩浆锆石(Wu Yuanbao and Zheng Yongfei, 2004)。所测定的 9 个锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄分布于 50.6~53.3 Ma,其加权平均年龄为 51.8 ± 0.6 Ma($N=9$, MSWD=1.4),可以代表火山活动的年龄(图 3c、d)。

样品 PM08(84)挑选出的锆石在 CL 图像上呈短柱状或长柱状,锆石颗粒长轴长 110~260 μm,长宽比为 1.3:1~3.6:1。锆石无色至灰色,部分锆

石的振荡环带清晰可见,且部分锆石颗粒可见熔蚀的港湾结构。根据测试结果,8 个测点谐和度大于 90%,均落在一致线上或其附近。锆石的 Th 和 U 的含量分别为 124~233 μg/g 和 112~121 μg/g, Th/U 值为 1.02~1.17,表明他们均属于典型的岩浆锆石(Wu Yuanbao and Zheng Yongfei, 2004)。所测定的 8 个锆石的²⁰⁶Pb/²³⁸U 的年龄分布于 51.0~53.4 Ma,其加权平均年龄为 51.8 ± 0.6 Ma($N=8$, MSWD=0.71),该年龄可以代表火山活动的年龄(图 3e、f)。

4.2 全岩地球化学特征

本文选取 26 件代表性的样品进行全岩主、微量元素测试分析,测试结果列于表 2,在分析计算前,扣除烧失量后,重新换算,得出的地球化学属性判别图解见图 4。数据结果显示,所测样品烧失量(LOI)值范围为 0.32%~2.56%,均小于 6%,反映出样品未经历岩浆后期热液蚀变作用改造的影响,较好的保存了样品原始地球化学的特征(Polat and Hofmann, 2003)。

据表 2 可知,样品的 SiO₂、K₂O、Na₂O、MgO 和 CaO 含量分别为 63.98%~75.34%、5.07%~6.71%、2.31%~4.14%、0.21%~1.06%和 0.39%~2.94%, Mg[#] 值为 19.77~38.96。样品的 Al₂O₃ 含量为 13.46%~16.74%,得出的 A/CNK 值为 1.30~1.73,表现为强过铝质的特征(图 4)。所测样品在 TAS 图解中(Middlemost, 1994)(图 4),均投在粗面英安岩至流纹岩区域,属于钾玄岩系列。所测样品稀土总含量为 219~356 μg/g,在球粒陨石标准化稀土图谱中(图 5)具有明显右倾式分布特征,呈现出轻稀土元素(LREE)强富集,重稀土元素(HREE)分异相对不明显,其 (La/Yb)_N 值为 11.4~42.9, (Gd/Yb)_N 值范围为 1.35~3.32。除样品 D4702 具有 Eu 轻微正异常外(δEu=1.10),其余样品具有明显至中等的 Eu 负异常,其 δEu 异常值为 0.38~0.70。在原始地幔标准化微量元素蛛网图中(图 5),该组样品富集大离子亲石元素(LILEs,例如 Rb 和 Th 等),高场强元素中等强度亏损(HFSEs,例如 Nb、K 和 Ti 等)。

4.3 Hf 同位素特征

样品 PM09(6)对已开展 U-Pb 定年的 16 个锆石颗粒再进行原位 Lu—Hf 同位素分析,可得 $n(^{176}\text{Yb})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.017255~0.058896, $n(^{176}\text{Lu})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.000577~0.001915, $n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282555~0.282659,初始

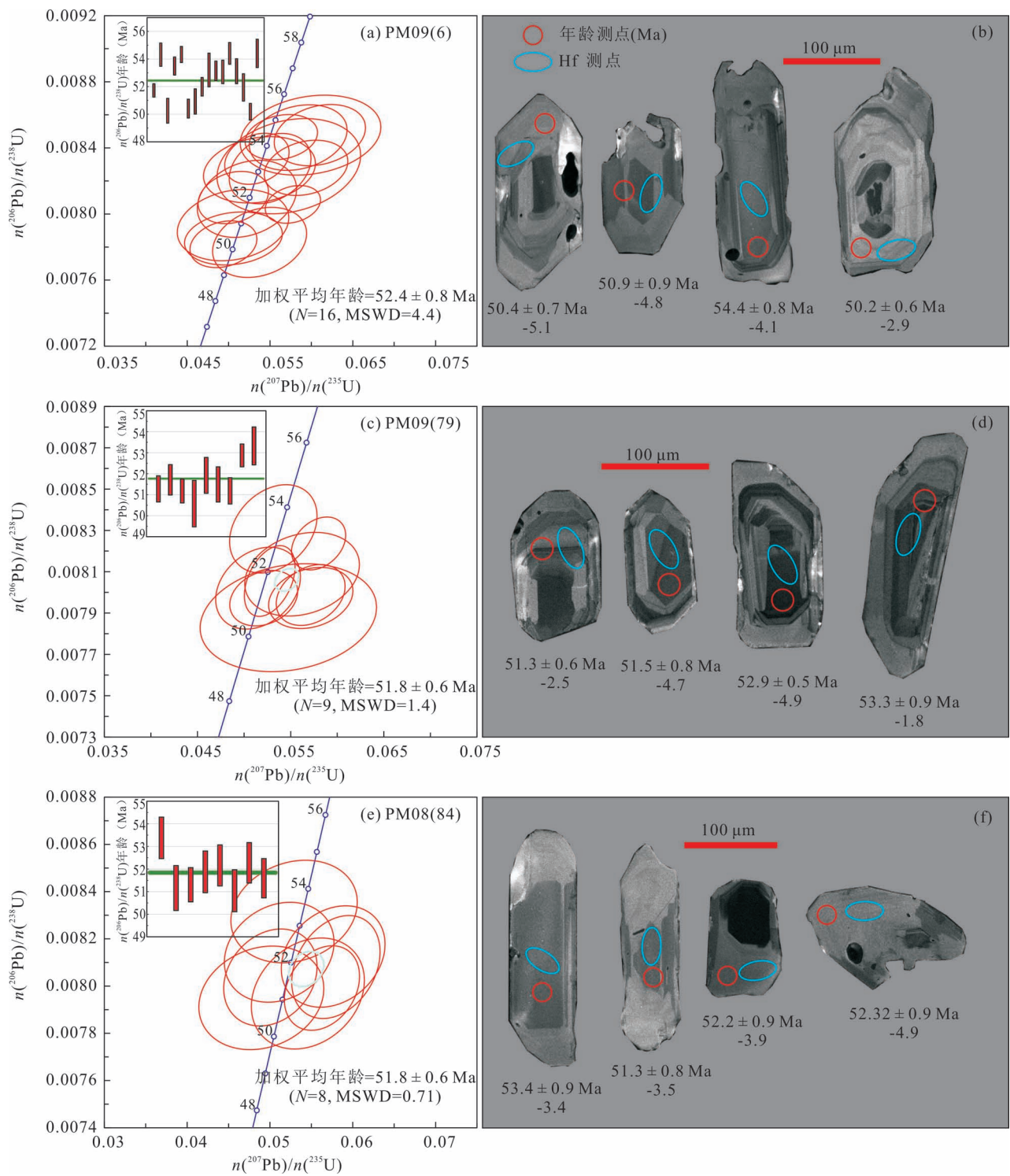


图 3 藏南扎雪地区帕那组火山岩锆石 U-Pb 年龄谐和图及典型锆石 CL 图像

Fig. 3 Zircon U-Pb concordia diagram and Cathodoluminescence images of representative zircons of Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang(Tibet)

锆石 CL 图像下方的数据分别是锆石年龄及对应的 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值

The numbers below CL images are U-Pb ages of zircon and the corresponding $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values

$n(^{176}\text{Hf})/n(^{177}\text{Hf})$ 值为 0.282554 ~ 0.282657, $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 -6.6 ~ -3.0 (平均值为 -4.4), $f_{\text{Lu/Hf}}$ 值为 -0.98 ~ -0.94, 一阶段模式年龄为 861 ~ 1000 Ma (平均值为 902 Ma), 二阶段模式年龄为 1309 ~ 1538

表 2 藏南扎雪地区帕那组火山岩主量元素(%)、微量元素及稀土元素(μg/g)分析结果

Table 2 Analytical data of whole-rock major(%) and trace elements(μg/g) of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang(Tibet)													
样品编号	PM09 (1)	PM09 (2)	PM09 (3)	PM08 (4)	D4702	D4703	PM09 (5)	PM09 (6)	PM09 (7)	PM09 (8)	PM09 (9)	PM09 (10)	PM09 (11)
SiO ₂	71.4	63.98	74.69	70.14	64.24	71.38	70.35	68.2	70.21	69.66	71.41	68.71	68.4
TiO ₂	0.29	0.54	0.29	0.48	0.6	0.41	0.33	0.53	0.34	0.37	0.34	0.4	0.5
Al ₂ O ₃	14.05	15.93	13.77	16.25	16.74	14.04	14.48	15.59	14.93	14.68	14.14	14.21	16.01
Fe ₂ O ₃	1.44	1.63	0.63	0.9	1.66	1.34	1.38	1.04	2.29	1.5	1.15	1.6	1.45
FeO	0.45	1.44	0.21	0.29	1.28	0.53	0.78	1.11	0.29	0.99	1.07	1.52	0.74
TFeO	1.75	2.91	0.78	1.1	2.77	1.74	2.02	2.05	2.35	2.34	2.1	2.96	2.04
MnO	0.08	0.07	0.03	0.03	0.08	0.06	0.1	0.07	0.09	0.11	0.11	0.15	0.07
CaO	1.32	2.46	0.39	0.39	2.94	1.12	1.09	2.15	0.46	1.44	1.48	1.78	1.26
MgO	0.28	0.96	0.23	0.27	0.78	0.24	0.52	0.47	0.5	0.59	0.52	1.06	0.41
Na ₂ O	3.44	4.14	3.43	2.31	3.45	3.43	3.15	3.43	3.22	3.37	2.87	3.1	3.24
K ₂ O	5.95	5.21	5.12	6.71	6.38	6.22	5.85	6.22	5.07	5.61	5.68	5.19	6.47
P ₂ O ₅	0.06	0.17	0.03	0.1	0.14	0.04	0.07	0.09	0.08	0.08	0.07	0.1	0.09
CO ₂	0.22	1.1	0.2	0.2	0.35	0.2	0.4	0.22	0.29	0.37	<0.20	0.5	<0.20
烧失	0.5	2.56	0.82	1.44	0.85	0.42	1.11	0.32	1.64	0.86	0.78	1.49	0.76
总量	99.48	100.2	99.84	99.51	99.49	99.43	99.61	99.44	99.42	99.63	99.62	99.81	99.4
DI	91.27	84.32	94.83	91.6	81.6	92.24	90.25	86.32	90.32	88.41	88.07	84.91	88.88
σ	3.09	4.07	2.3	2.97	4.49	3.26	2.94	3.67	2.49	3	2.56	2.64	3.68
τ	36.59	21.83	35.66	29.04	22.15	25.88	34.33	22.94	34.44	30.57	33.15	27.78	25.54
Mg [#]	22.23	37.06	34.54	30.44	33.39	19.77	31.43	29.05	27.49	31.01	30.57	38.96	26.33
A/CNK	1.31	1.35	1.54	1.73	1.31	1.3	1.44	1.32	1.71	1.41	1.41	1.41	1.46
A/NK	1.5	1.7	1.61	1.8	1.7	1.45	1.61	1.62	1.8	1.63	1.65	1.71	1.65
V	18.7	53.2	19.4	32.7	37.6	18.6	27.5	26.1	26.1	36.4	33.2	59	25.5
Cr	4.1	11.7	6	3.9	9.1	6	9.5	3.6	7.5	11.9	14.9	34.3	4.2
Co	6.26	7.07	4.44	2.2	5.06	4.9	7.26	4.82	5.72	4.96	6.28	8.07	4.12
Ni	4.8	5.3	4.1	4	7.4	6.5	5.8	5.8	5.2	8	7.7	15.6	6.9
Cu	5.8	3.2	31.9	2.9	17	2.7	2.6	5	2.3	3.7	3.4	2.2	9.4
Zn	56.8	31.4	51	24.3	56.2	16.1	71.4	45	55	59.5	70.5	104	46.1
Rb	272	197	191	346	230	351	211	300	189	203	243	207	311
Sr	162	239	92.1	153	629	102	211	330	149	284	151	293	293
Y	32.8	31.8	29.3	22.5	22	27.9	26.3	27.6	23.5	28.3	28.6	25.8	27.3
Zr	245	272	235	388	402	331	318	393	321	307	280	180	384
Nb	20.4	17.9	19.2	20	15.4	24.5	16.5	19	18.2	17.2	17.7	13.6	20.3
Sn	3	3.8	3.6	2.6	3.7	3.7	2.3	3.1	3	3.2	4.3	3.8	4.3
Cs	6.78	6.38	11.2	8.06	12	4.34	6.61	7.64	9.72	5.53	6.05	3.85	8.2
Ba	298	656	208	801	1219	135	648	635	591	683	416	529	622
Hf	9.4	7.34	7.67	16.1	15.7	16.7	8.36	19.7	8.04	8.44	8.46	5.23	18.6
Pb	32	19.3	25.5	12.4	34	33.8	52.6	37	23	24.4	29.3	27.5	35.9
Th	34.3	27.6	34.7	37.1	24.3	46.2	26.9	39.4	30.1	26	30.9	27.3	36.5
U	5.58	5.18	6.89	6.18	3.47	6.1	5.33	5.3	4.83	4.85	5.83	3.13	3.27
La	82	78.1	78.4	58.4	56.6	83.8	66.2	76.9	68.4	63	65.3	53.1	62.7
Ce	134	127	129	116	99	145	110	136	123	105	110	90	113
Pr	15.9	15.3	15.1	13.3	11.2	16.7	12.7	15.2	13.5	12.3	12.6	10.5	12.8
Nd	54.8	54.4	51.1	45.3	39.8	55.7	43.1	52.4	46	42.1	43.1	36.1	44.2
Sm	9.67	9.57	8.17	7.46	6.87	9.11	7.27	9.04	8.03	6.91	7.36	6.37	7.63
Eu	1.46	2	1.04	1.27	2.31	1.1	1.5	1.74	1.54	1.4	1.35	1.16	1.47
Gd	8.51	8.52	5.25	5.33	5.71	7.48	6.31	7.56	6.3	6.24	6.38	5.66	6.53
Tb	1.46	1.37	0.59	0.78	0.86	1.2	1.06	1.19	0.92	1.04	1.1	0.95	1.08
Dy	8.16	7.76	2.34	3.8	4.88	6.99	6.02	7.04	5.05	6.1	6.49	5.67	6.16
Ho	1.58	1.47	0.37	0.62	0.9	1.32	1.19	1.32	0.9	1.18	1.3	1.13	1.18
Er	4.48	3.97	1.06	1.59	2.74	3.87	3.38	4.04	2.9	3.5	3.76	3.31	3.4

样品编号	PM09 (1)	PM09 (2)	PM09 (3)	PM08 (4)	D4702	D4703	PM09 (5)	PM09 (6)	PM09 (7)	PM09 (8)	PM09 (9)	PM09 (10)	PM09 (11)
Tm	0.71	0.6	0.19	0.23	0.4	0.61	0.55	0.62	0.46	0.56	0.59	0.52	0.57
Yb	4.72	3.78	1.31	1.46	2.34	4.09	3.6	3.9	3.13	3.74	3.87	3.35	3.45
Lu	0.7	0.55	0.18	0.2	0.32	0.59	0.53	0.56	0.44	0.53	0.58	0.44	0.46
TREE	328	314	294	256	234	338	263	318	281	254	264	219	265
LREE	298	286	283	242	216	311	241	291	260	231	240	197	242
HREE	30.3	28	11.3	14	18.2	26.2	22.6	26.2	20.1	22.9	24.1	21	22.8
LREE/HREE	9.82	10.2	25.1	17.3	11.9	11.9	10.6	11.1	13	10.1	10	9.4	10.6
δEu	0.48	0.66	0.45	0.59	1.1	0.4	0.66	0.63	0.64	0.64	0.59	0.58	0.62
(La/Yb) _N	12.5	14.8	42.9	28.7	17.4	14.7	13.2	14.1	15.7	12.1	12.1	11.4	13
(Gd/Yb) _N	1.49	1.86	3.32	3.02	2.02	1.51	1.45	1.6	1.67	1.38	1.36	1.4	1.57

样品编号	PM08 (1)	PM08 (2)	PM08 (3)	PM08 (4)	PM08 (5)	PM08 (6)	PM08 (7)	PM08 (8)	PM08 (9)	PM08 (10)	PM08 (11)	PM08 (12)	PM08 (13)
SiO ₂	69.99	67.99	66.88	67.4	67.47	68.18	67.78	67.82	68.36	75.34	68.46	70.63	69.06
TiO ₂	0.4	0.54	0.56	0.53	0.56	0.57	0.53	0.55	0.5	0.2	0.52	0.4	0.5
Al ₂ O ₃	15.34	15.93	16.06	15.99	16.2	15.8	15.82	16.04	15.96	13.46	15.83	15.17	15.56
Fe ₂ O ₃	1.22	1.45	1.36	1.4	1.45	1.65	1.36	1.68	1.56	0.76	1.34	1.08	1.79
FeO	0.62	0.86	1.24	1.03	0.99	0.7	0.97	0.78	0.91	0.12	1.03	0.78	0.58
TFeO	1.72	2.16	2.46	2.29	2.29	2.18	2.19	2.29	2.31	0.8	2.24	1.75	2.19
MnO	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.1	0.09	0.1	0.08	0.03	0.09	0.07	0.09
CaO	1.09	1.66	2.16	2.06	1.89	1.66	1.97	1.72	0.99	0.43	1.45	1.19	1.26
MgO	0.24	0.49	0.49	0.49	0.49	0.52	0.54	0.57	0.57	0.21	0.53	0.28	0.49
Na ₂ O	3.3	3.13	3.16	3.24	3.17	3.05	3.22	3.1	3.16	2.95	3.2	3.24	3.19
K ₂ O	6.41	6.23	5.96	6.19	5.97	6.15	6.04	6.08	6.05	5.11	6	6.15	5.99
P ₂ O ₅	0.05	0.09	0.1	0.1	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.03	0.1	0.05	0.1
CO ₂	0.21	0.21	0.88	0.3	0.22	0.2	0.33	0.21	0.26	0.3	0.32	<0.20	<0.20
烧失	0.45	0.81	1.06	0.66	0.79	0.84	0.81	0.81	1.1	1.02	0.93	0.37	0.93
总量	99.4	99.48	100	99.47	99.38	99.5	99.55	99.55	99.59	99.96	99.8	99.41	99.54
DI	91.05	86.93	85.7	85.79	85.53	86.66	86.03	86.02	88.59	94.48	87.61	90.32	88.32
σ	3.47	3.47	3.45	3.61	3.38	3.33	3.43	3.36	3.31	2	3.3	3.18	3.21
τ	30.1	23.7	23.04	24.06	23.27	22.37	23.77	23.53	25.6	52.55	24.29	29.83	24.74
Mg [#]	19.94	28.75	26.17	27.61	27.57	29.79	30.50	30.72	30.51	31.77	29.70	22.17	28.50
A/CNK	1.42	1.45	1.42	1.39	1.47	1.45	1.41	1.47	1.56	1.59	1.49	1.43	1.49
A/NK	1.58	1.7	1.76	1.7	1.77	1.72	1.71	1.75	1.73	1.67	1.72	1.62	1.69
V	14.2	33.4	37.3	27	26.4	28.4	36.6	35.3	39.2	15.3	37.9	17.6	31.3
Cr	5.2	4.6	7.6	4.3	6.8	4	9.6	5.2	3.9	3	9.1	5.1	7.1
Co	9.58	6.14	6.47	6.02	5.3	5.98	5.85	5.33	3.89	4.01	8.08	8.97	5.81
Ni	3	4.6	6.5	4.6	7.4	5.7	4	6.5	4.4	2.9	4.7	5.1	5
Cu	4.7	5.8	8.4	5.8	9.2	3.3	9.6	6.1	23.2	2	3.9	4.5	5.8
Zn	46	72.9	48.4	54.2	70.8	79.4	71.4	75.4	42.9	24.1	64.4	37.7	66.3
Rb	298	307	293	294	299	313	302	307	315	272	303	315	315
Sr	198	330	363	351	329	301	341	325	206	95.2	331	162	305
Y	32.7	27.9	27.4	28	27.8	27.2	28.8	28.2	24.2	25.4	29.1	27.6	30.7
Zr	385	385	389	394	384	383	385	379	380	187	407	372	401
Nb	24.4	19.4	19.7	19.6	20.4	20.8	19.6	20.1	20.7	26.3	20.8	23.7	22.4
Sn	5.2	4.3	4.4	3.9	4.4	4.3	4	4.4	2.8	3.1	4.6	4.3	4.7
Cs	6.94	8.26	6.51	8.65	7.78	8.33	7.06	8.03	7.45	4.07	6.57	6.61	7.53
Ba	211	702	732	719	688	694	710	714	741	207	649	222	608
Hf	11	15.28	17.4	17.3	16.6	18.8	23.5	16.8	24.5	7.17	9.95	11	10.5
Pb	41.2	54.7	38.4	43	54.3	51.4	59.3	51.7	10.2	14.9	37.9	34.2	47.5
Th	45.8	36.1	33.8	36.2	35.8	37.4	36.2	38.5	35.7	39	38.3	43.3	41.8
U	9.7	5	2.84	5.54	4.98	5.08	4.56	4.54	7.97	5.16	3.69	7.57	4.22
La	84.7	77.2	68.7	72.5	69.1	72.2	64.4	73.4	64.7	58.5	66.2	68.4	75
Ce	154	129	116	130	123	128	120	123	131	108	123	139	140

样品编号	PM08 (1)	PM08 (2)	PM08 (3)	PM08 (4)	PM08 (5)	PM08 (6)	PM08 (7)	PM08 (8)	PM08 (9)	PM08 (10)	PM08 (11)	PM08 (12)	PM08 (13)
Pr	17.4	15	13.5	14.4	13.8	14.2	13.4	14.4	13.2	11.3	12.9	13.6	15.1
Nd	58.4	51.3	45.6	50	48	49.1	45.4	49.1	46	37.6	42.9	46.5	53.4
Sm	9.9	8.79	7.81	8.78	8.08	8.4	8.06	8.3	8.18	6.64	7.64	8.27	9.51
Eu	1.44	1.67	1.7	1.72	1.54	1.6	1.52	1.57	1.44	0.7	1.43	1.24	1.54
Gd	8.48	7.33	6.67	7.23	6.7	7.1	6.54	6.99	6.61	4.14	6.54	6.64	7.7
Tb	1.36	1.17	1.07	1.12	1.09	1.1	1.04	1.14	1.01	0.49	0.91	1.04	1.2
Dy	8.08	6.61	6.16	6.5	6.26	6.52	6.02	6.44	6.03	2.28	5.31	6.49	7.33
Ho	1.54	1.26	1.19	1.22	1.18	1.2	1.18	1.24	1.07	0.38	0.95	1.21	1.31
Er	4.78	3.58	3.33	3.63	3.58	3.66	3.5	3.4	3.56	1.4	3.07	4.1	4.23
Tm	0.76	0.53	0.51	0.57	0.56	0.59	0.55	0.53	0.57	0.28	0.5	0.68	0.69
Yb	4.75	3.32	3.27	3.54	3.38	3.53	3.32	3.36	3.26	2.14	2.76	4.07	4
Lu	0.71	0.5	0.46	0.51	0.5	0.5	0.47	0.49	0.5	0.35	0.39	0.6	0.58
TREE	356	307	276	302	287	298	275	293	287	234	275	302	322
LREE	326	283	253	277	264	274	253	270	265	223	254	277	295
HREE	30.5	24.3	22.7	24.3	23.3	24.2	22.6	23.6	22.6	11.5	20.4	24.8	27
LREE/HREE	10.7	11.6	11.2	11.4	11.3	11.3	11.2	11.4	11.7	19.4	12.4	11.2	10.9
δEu	0.47	0.62	0.7	0.64	0.62	0.62	0.62	0.61	0.58	0.38	0.6	0.5	0.53
(La/Yb) _N	12.8	16.7	15.1	14.7	14.7	14.7	13.9	15.7	14.2	19.6	17.2	12.1	13.5
(Gd/Yb) _N	1.48	1.83	1.69	1.69	1.64	1.66	1.63	1.72	1.68	1.6	1.96	1.35	1.59

注: $Mg^{\#} = 100 \frac{n(Mg)}{n(Mg) + n(TFe)}$; $A/CNK = \frac{n(Al_2O_3)}{n(CaO) + n(Na_2O) + n(K_2O)}$

Ma(平均值为 1402 Ma)(图 6,表 3)。

样品 PM09(79)对已开展 U-Pb 定年的 9 个锆石颗粒再进行原位 Lu—Hf 同位素分析,可得 $n(^{176}Yb)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.015608~0.073905, $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.000534~0.002362, $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282605~0.282692,初始 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282602~0.282690, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-4.8~-1.7(平均值为-3.6), $f_{Lu/Hf}$ 值为-0.98~-0.93,一阶段模式年龄为 803~951 Ma(平均值为 872 Ma),二阶段模式年龄为 1233~1429 Ma(平均值为 1348 Ma)(图 6,表 3)。

样品 PM08(84)对已开展 U-Pb 定年的 8 个锆石颗粒再进行原位 Lu—Hf 同位素分析,可得 $n(^{176}Yb)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.004374~0.036137, $n(^{176}Lu)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.000094~0.001126, $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282573~0.282665,初始 $n(^{176}Hf)/n(^{177}Hf)$ 值为 0.282572~0.282664, $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为-5.9~-2.7(平均值为-4.2), $f_{Lu/Hf}$ 值为-1.00~-0.97,一阶段模式年龄为 827~964 Ma(平均值为 833 Ma),二阶段模式年龄为 1292~1498 Ma(平均值为 1388 Ma)(图 6,表 3)。

5 讨论

5.1 火山岩的时代归属

西藏冈底斯岩浆岩带林子宗群火山岩地层序一直是众多学者的研究焦点(Coulon et al., 1986; Lee Haoyang et al., 2009; Liu Anlin et al., 2018; Zhu Dicheng et al., 2015; 董国臣等, 2005; 黄映聪等, 2005; 李皓扬等, 2007; 李再会等, 2009; 梁银平等, 2010; 周肃等, 2001, 2004),前人通过野外地质填图和室内年代学等测试分析,综合研究确定林子宗群火山岩从古新世至始新世存在 3 期火山活动旋回,即:早期典中组旋回、中期年波组旋回和晚期帕那组旋回。

就冈底斯东段发育的林子宗群火山岩而言,周肃等(2004)对林周盆地火山岩通过⁴⁰Ar-³⁹Ar 阶段升温法,认为典中组、年波组和帕那组火山活动时间分别为 64.43~60 Ma、54.07 Ma 和 48.73~43.93 Ma。李皓扬等(2007)对林周盆地典中组和年波组火山岩进行了 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年,获得的年龄结果分别为(62.5±1.1)Ma 和(56.4±1.2)Ma。Zhu Dicheng 等(2015)对林周盆地典中组、年波组和帕那组火山岩开展 SIMS 锆石 U-Pb 年代学研究,限定林周盆地 3 期火山活动旋回时限分别为 60.2~58.3 Ma、55.4~52.6 Ma 和 52.6~52.3 Ma。杨硕等(2016)利用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 方法,获得了林周盆地帕那组火山岩的锆石年龄结果为(51.3±0.7)Ma。上述年龄结果较好的限定了林周盆地 3 期火山活动旋回的时限,且帕那组火山岩锆石 U-Pb 方法所获得的年龄较为一致,均比经 Ar-Ar 方法得

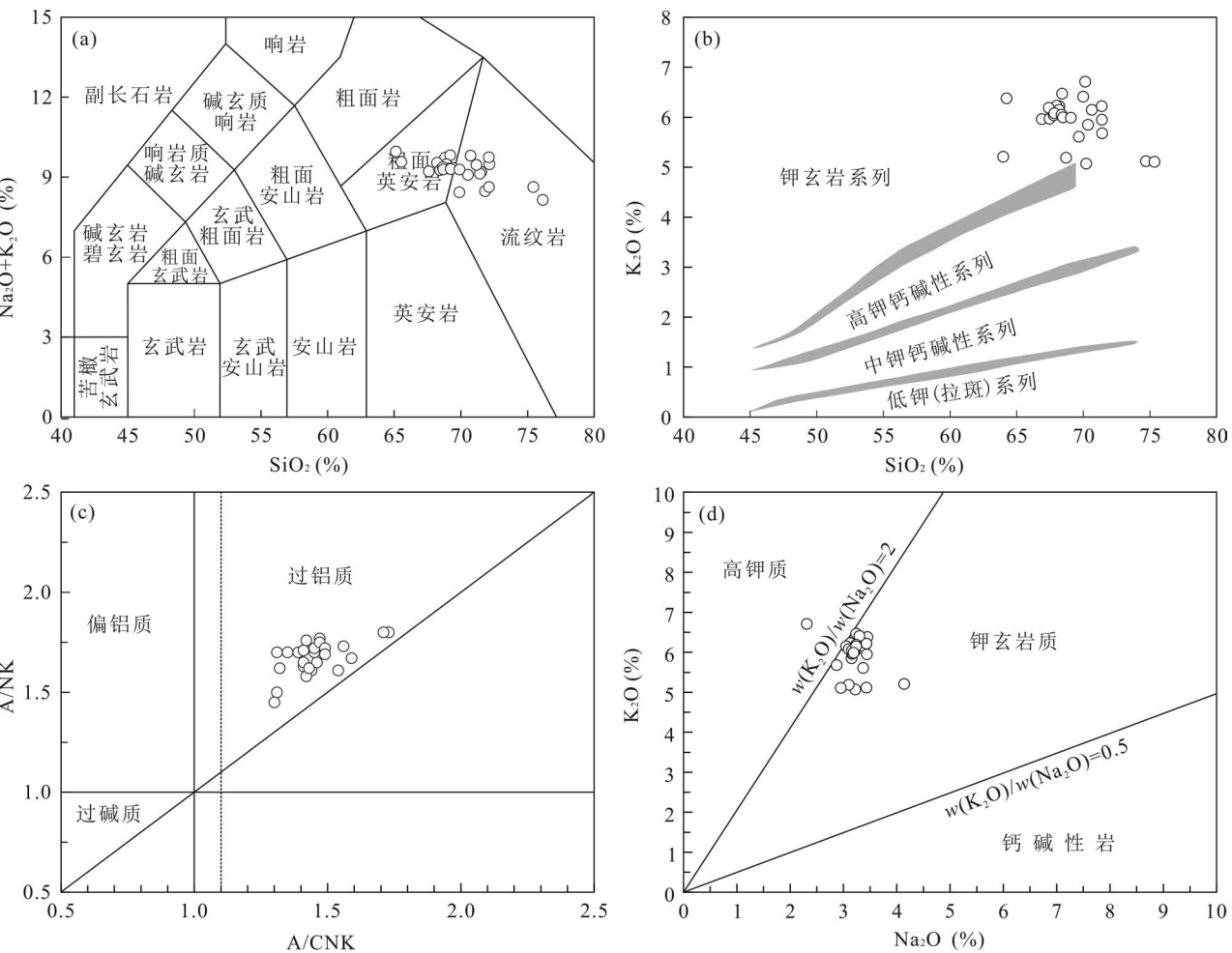


图 4 藏南扎雪地区帕那组火山岩主量元素关系图

Fig. 4 Major elements variation diagrams of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet)

到的年龄较早,表明锆石 U-Pb 年龄更具有代表性。此外, Liu Anlin 等(2018)对旁多地区帕那组英安岩

开展 SIMS 和 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,获得的喷发时间为(50±1) Ma,认为火山活动与冈

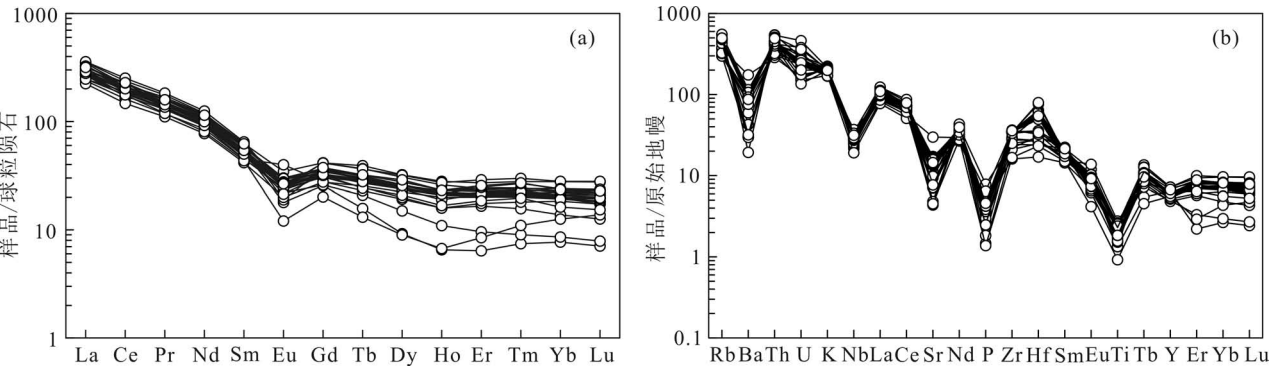


图 5 藏南扎雪地区帕那组火山岩稀土元素原始标准配分曲线及微量元素原始地幔标准化蛛网图(标准化数据来源于 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE distribution patterns and primitive mantle-normalized trace elements spidergrams of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang(Tibet) (the normalized values after Sun and McDonough, 1989)

表 3 藏南扎雪地区帕那组火山岩锆石 Lu-Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Lu-Hf isotopic compsoptions of Pana Formation volcanic rocks

from the Zhaxue area, southern Xizang(Tibet)

点 号	年龄 (Ma)	$\frac{n(^{176}\text{Yb})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}$		$\varepsilon_{\text{Hf}}(0)$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_i$	T_{DM1} (Ma)	T_{DM2} (Ma)	$f_{\text{Lu/Hf}}$
		测值	2σ	测值	2σ	测值	2σ						
样品号 PM09(6)													
01	51.7	0.017617	0.000103	0.000582	0.000005	0.282607	0.000019	-5.8	-4.7	0.282606	904	1422	-0.98
02	54.3	0.028874	0.000565	0.000978	0.000019	0.282601	0.000018	-6.0	-4.9	0.282600	920	1433	-0.97
03	50.3	0.039039	0.001163	0.001288	0.000030	0.282613	0.000021	-5.6	-4.6	0.282612	911	1409	-0.96
04	53.5	0.026278	0.000305	0.000914	0.000005	0.282634	0.000020	-4.9	-3.8	0.282633	873	1361	-0.97
05	54.3	0.036665	0.000667	0.001105	0.000013	0.282633	0.000018	-4.9	-3.8	0.282632	879	1363	-0.97
06	50.4	0.029596	0.000295	0.001016	0.000005	0.282597	0.000020	-6.2	-5.1	0.282596	928	1446	-0.97
07	50.9	0.021931	0.000433	0.000717	0.000009	0.282605	0.000017	-5.9	-4.8	0.282605	909	1425	-0.98
08	52	0.045039	0.000481	0.001547	0.000010	0.282555	0.000021	-7.7	-6.6	0.282554	1000	1538	-0.95
09	53.2	0.029389	0.000698	0.000943	0.000017	0.282624	0.000019	-5.2	-4.1	0.282623	887	1382	-0.97
10	53.2	0.043418	0.000812	0.001438	0.000031	0.282614	0.000018	-5.6	-4.5	0.282612	914	1407	-0.96
11	53.1	0.017255	0.000108	0.000577	0.000006	0.282629	0.000016	-5.0	-3.9	0.282629	872	1370	-0.98
12	54.4	0.043862	0.000253	0.001319	0.000011	0.282625	0.000020	-5.2	-4.1	0.282624	895	1381	-0.96
13	53.1	0.034128	0.000320	0.001089	0.000007	0.282619	0.000016	-5.4	-4.3	0.282618	899	1395	-0.97
14	52	0.020999	0.000215	0.000709	0.000010	0.282622	0.000022	-5.3	-4.2	0.282621	885	1388	-0.98
15	50.2	0.058896	0.001305	0.001915	0.000043	0.282659	0.000019	-4.0	-3.0	0.282657	861	1309	-0.94
16	54.4	0.025467	0.000206	0.000858	0.000011	0.282614	0.000023	-5.6	-4.4	0.282613	899	1404	-0.97
样品号 PM09(79)													
01	51.3	0.031698	0.001243	0.001084	0.000035	0.282671	0.000024	-3.6	-2.5	0.282670	824	1279	-0.97
02	54.9	0.041371	0.000212	0.001507	0.000012	0.282629	0.000025	-5.1	-3.9	0.282627	895	1373	-0.95
03	51.2	0.035144	0.001117	0.001168	0.000038	0.282635	0.000023	-4.8	-3.7	0.282634	877	1359	-0.96
04	50.6	0.017236	0.000223	0.000593	0.000009	0.282614	0.000024	-5.6	-4.5	0.282613	894	1406	-0.98
05	51.9	0.034822	0.000426	0.001269	0.000012	0.282670	0.000025	-3.6	-2.5	0.282668	831	1282	-0.96
06	51.5	0.031041	0.000316	0.001068	0.000008	0.282608	0.000023	-5.8	-4.7	0.282607	913	1420	-0.97
07	51.2	0.015608	0.000151	0.000534	0.000007	0.282638	0.000023	-4.7	-3.6	0.282638	859	1352	-0.98
08	52.9	0.073905	0.000405	0.002362	0.000017	0.282605	0.000032	-5.9	-4.8	0.282602	951	1429	-0.93
09	53.3	0.045082	0.000652	0.001445	0.000023	0.282692	0.000024	-2.8	-1.7	0.282690	803	1233	-0.96
样品号 PM08(84)													
01	53.4	0.018560	0.000259	0.000602	0.000006	0.282643	0.000022	-4.6	-3.4	0.282642	853	1339	-0.98
02	51.2	0.004374	0.000019	0.000094	0.000001	0.282592	0.000019	-6.3	-5.2	0.282592	912	1453	-1.00
03	51.3	0.023534	0.000223	0.000755	0.000004	0.282642	0.000022	-4.6	-3.5	0.282642	857	1342	-0.98
04	51.9	0.025040	0.000378	0.000813	0.000018	0.282665	0.000020	-3.8	-2.7	0.282664	827	1292	-0.98
05	52.2	0.014046	0.000287	0.000475	0.000004	0.282631	0.000017	-5.0	-3.8	0.282631	867	1366	-0.99
06	51	0.015945	0.000080	0.000544	0.000004	0.282624	0.000019	-5.2	-4.1	0.282624	878	1383	-0.98
07	52.3	0.017172	0.000081	0.000578	0.000006	0.282603	0.000016	-6.0	-4.8	0.282603	908	1429	-0.98
08	51.6	0.036137	0.000676	0.001126	0.000020	0.282573	0.000019	-7.0	-5.9	0.282572	964	1498	-0.97

注:计算公式如下:

$$\varepsilon_{\text{Hf}}(t) = 10000 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s \cdot (e^{\lambda t} - 1)}{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR},0} - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} \cdot (e^{\lambda t} - 1)} - 1 \right\}; \quad T_{\text{DM1}} = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s - \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{DM}}} \right\}$$
$$T_{\text{DM2CC}} = T_{\text{DM1}} - (T_{\text{DM1}} - t) \cdot \frac{f_{\text{CC}} - f_{\text{S}}}{f_{\text{CC}} - f_{\text{DM}}}; \quad f_{\text{Lu/Hf}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}}} - 1$$

其中: $\lambda(^{176}\text{Lu}) = 1.867 \times 10^{-11} / \text{a}$ (Söderlund et al., 2004); $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$ 和 $\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_s$ 为样品测量值; $\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})} \right]_{\text{CHUR}} = 0.0332$,

$$\left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{CHUR},0} = 0.282772 \text{ (Blichert-Toft et al., 1997)}; \left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{DM}} = 0.0384, \left[\frac{n(^{176}\text{Hf})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{DM}} = 0.28325 \text{ (Griffin et al., 2000)};$$
$$\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{平均地壳}} = 0.015; f_{\text{CC}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{平均地壳}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{CHUR}}} - 1; f_{\text{S}} = f_{\text{Lu/Hf}}; f_{\text{DM}} = \frac{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{DM}}}{\left[\frac{n(^{176}\text{Lu})}{n(^{177}\text{Hf})}\right]_{\text{CHUR}}} - 1; t \text{ 为锆石结晶年龄。}$$

底斯基岩大爆发(51 ± 1 Ma)是同期发生的。

黄映聪等(2005)对扎雪地区帕那组火山岩进行全岩 K-Ar 测年,获得的年龄为 38. 18~45. 14 Ma,并依据扎雪地区老岩层角度不整合下伏于帕那组火山岩之下,避免了帕那组火山岩受后期热扰动的影响,认为扎雪地区帕那组火山岩形成于 40 Ma 前后。单久库(2009)同样对该地区帕那组火山岩开展 K-Ar 测年,获得火山活动年龄为 41. 46~45. 14 Ma。这些年龄结果均晚于林周盆地及邻区帕那组火山岩的锆石 U-Pb 年龄,有待于高精度方法进一步验证。本次工作中,我们对扎雪地区帕那组三件火山岩样品开展了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年,获得的锆石年龄结果在 51. 8 ±0. 6 Ma~52. 4 ±0. 8 Ma,比前人经 K-Ar 方法得出的结果相对较早,并与各学者在林周盆地及邻区由锆石 U-Pb 方法所获得的年龄相似,表明扎雪地区帕那组火山活动时间应该为 52 Ma 左右。这些锆石年龄结果一致表明,东冈底斯岩浆弧地区帕那组火山活动时间相一致,推测冈底斯东段地区林子宗群帕那组火山活动时间在 52 Ma 左右。

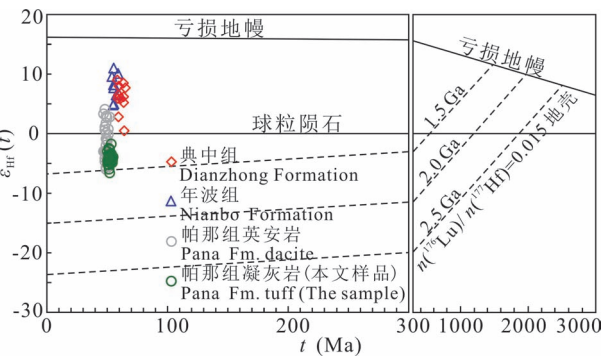


图 6 藏南扎雪地区帕那组火山岩锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t 图 (引用数据来源于 Liu Anlin et al., 2018; 李皓扬等, 2007)

Fig. 6 Zircon $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ — t diagram of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet) (Data are from Liu Anlin et al., 2018; Lee Haoyang et al., 2007&)

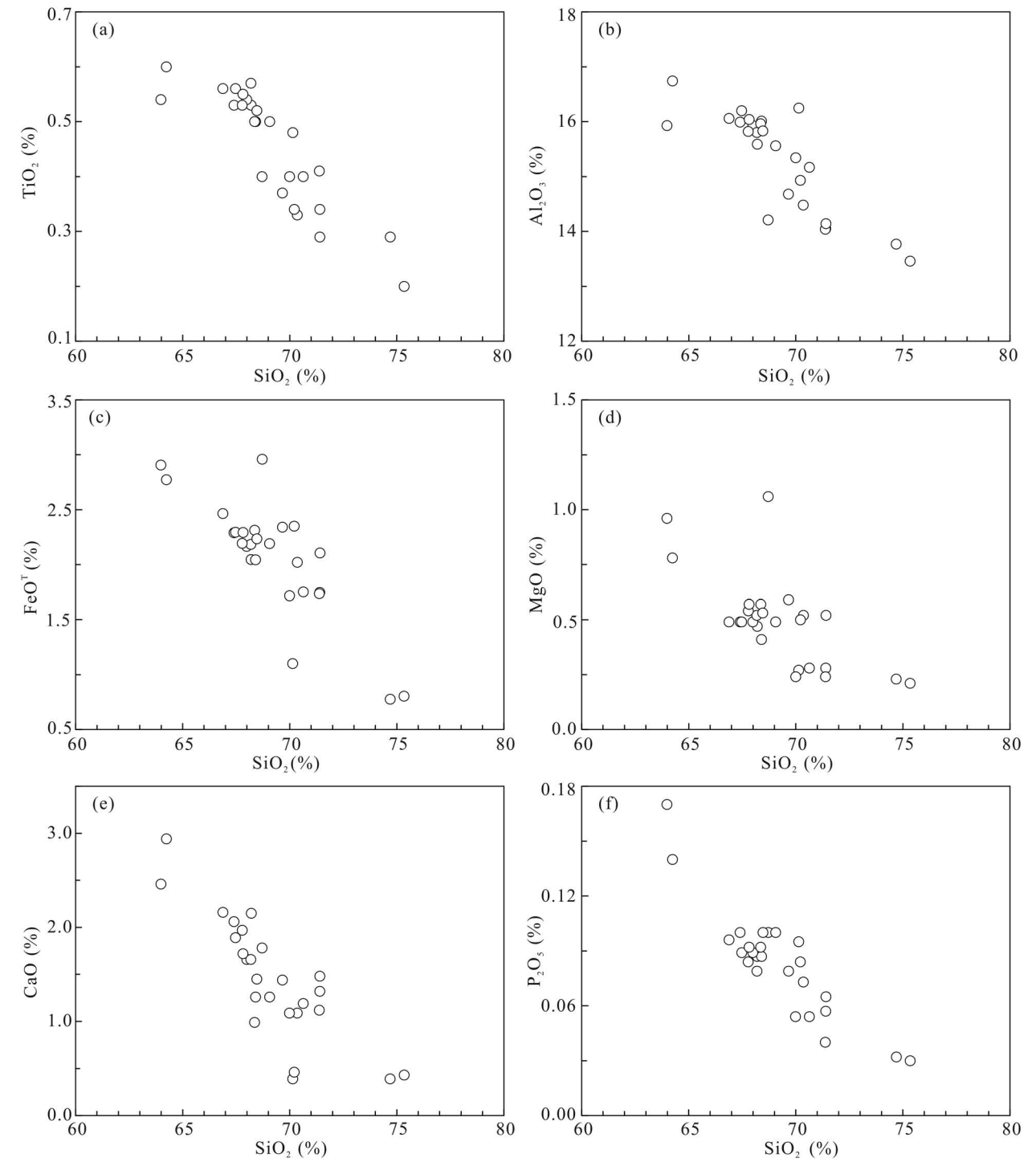
5.2 岩石成因

本文报道的扎雪地区帕那组火山岩样品分异指数(DI)为 81. 60~94. 83(平均值为 88. 31),里特曼组合指数(σ)为 2. 00~4. 49(平均值为 3. 22),均投在粗面英安岩至流纹岩区域,属于高钾、钙碱性—碱性岩石组合,为钾玄岩质系列。此外,所有样品的 A/CNK 值在 1. 30~1. 73,均大于 1. 1,具有过铝质特征。稀土、微量元素分析结果显示,这些火山岩具有明显的大离子亲石(Rb、Th、U 和 K 等)和轻稀土元素富集、高场强元素(Nb、P 和 Ti 等)相对亏损、轻重稀土强烈分异(LREE/HREE = 9. 40~25. 1)的特征。通常情况下,地壳混染作用和俯冲流体/熔体交代作用均可以导致上述大离子亲石元素、轻稀土元素富集及高场强元素亏损的特征,同时地壳混染的程度可以较好的用 La/Nb 和 La/Sm 值体现出来,即其比值随混染强弱变化而改变(Green et al., 2000; Pearce and Cann, 1993)。然而,本文样品的 La/Nb 和 La/Sm 值分别为 2. 22~4. 63 和 7. 83~9. 60,与 SiO₂ 含量无明显变化,可出排除其明显受地壳混染作用的影响。因此,本文帕那组火山岩成因与俯冲流体/熔体交代作用有关,形成于板块俯冲—消减环境,具有典型的岛弧岩浆岩的地球化学属性。从 Haker 图解上可以看出(图 7),本文报道的火山岩 SiO₂ 含量与 TiO₂、Al₂O₃、FeO^T、MgO、CaO、P₂O₅ 和 K₂O+N₂O 含量之间存在不同程度的负相关性,这些成分的变异趋势反映在成岩过程中存在钛铁矿、斜长石、铁镁矿物以及磷灰石等矿物的分离结晶。同时, Eu、Ba 和 Sr 呈现出明显的负异常,进一步说明在成岩过程中源区存在明显的斜长石结晶分异作用;以及 Nb、P 和 Ti 的显著负异常与磷灰石、Fe—Ti 氧化物残留或分异有关。此外,La/Sm 值随着 La 含量升高而无明显变化,呈现出一条近乎水平的直线(图 8),证实这些火山岩母岩浆在成岩过程中经历了明显的分离结晶作用。

由于锆石 Lu—Hf 同位素体系具有较高的封闭温度,不易被后期流体、热事件改造,使得不同物源的锆石,在 Hf 同位素组成上呈现出一定的差异,这一特性可以有效地用于示踪岩浆作用的过程和源区

特征,揭示复杂的地质演化过程(Griffin et al., 2002; Harrison et al., 2005; 吴福元等, 2007)。本文报道的三件帕那组火山岩样品的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值,平均值为 $-4.4 \sim -3.6$,变化范围不足一个 ε 单位,二阶段模式年龄为 $1348 \sim 1402 \text{ Ma}$,指示其岩浆源区有古老印度陆壳物质参与其中。此外,Mo Xuanxue 等(2008)对林周盆地帕那组火山岩全岩 Sr—Nd 同位素研究表明,其初始 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.70469 \sim 0.70575$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-3.01 \sim -0.95$,

认为其是早期典中组火山岩重熔的产物。Liu Anlin 等(2018)对旁多地区帕那组火山岩全岩 Sr—Nd—Hf 和锆石 Lu—Hf 同位素研究表明,玄武岩全岩初始 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 0.7051 , $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $+1.7$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $+3.8$,指示基性火山岩具有亏损地幔源特征,而玄武安山岩至英安岩的全岩初始 $n(^{87}\text{Sr})/n(^{86}\text{Sr})$ 值为 $0.7061 \sim 0.7069$, $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值为 $-6.0 \sim -3.3$, $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值为 $-1.6 \sim -5.6$,以及英安岩的锆石 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ 为宽泛值,为 $-6.0 \sim +4.1$,显示出中酸性火山



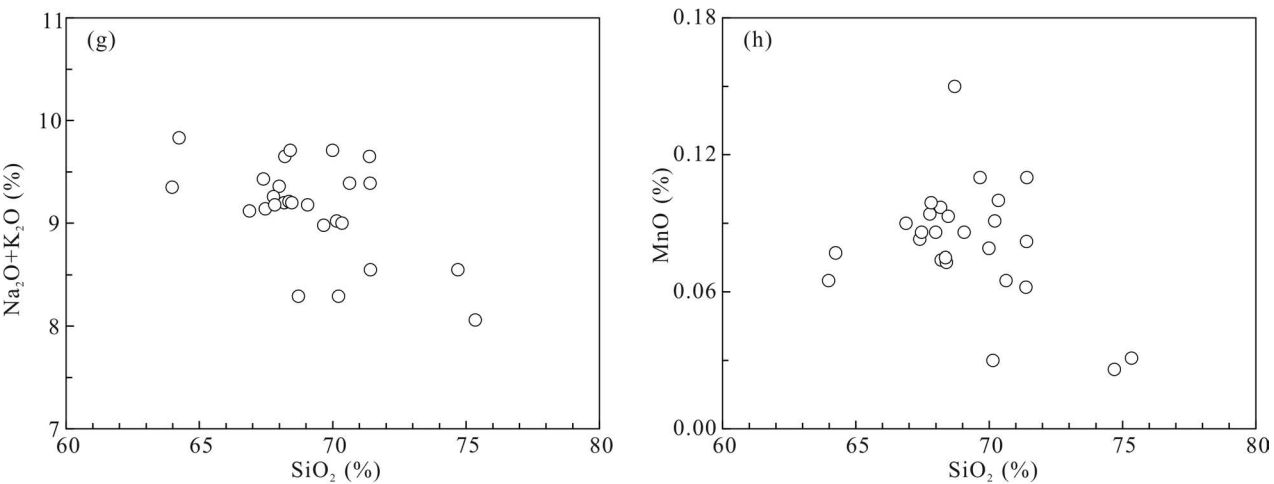


图 7 藏南扎雪地区帕那组火山岩主量元素关系图解

Fig. 7 Major elements variation diagrams of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang(Tibet)

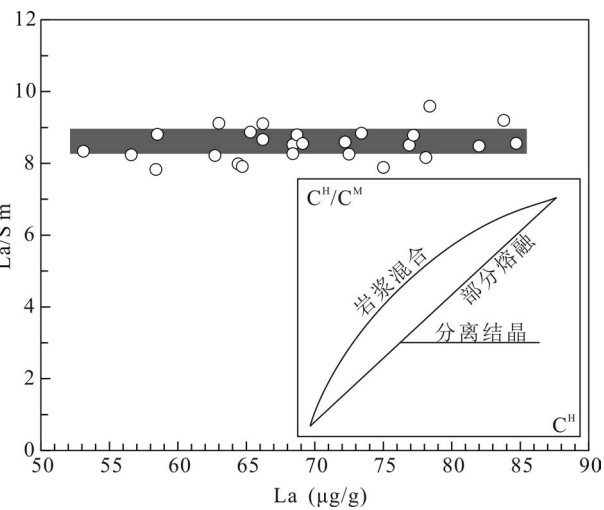


图 8 藏南扎雪地区帕那组火山岩 La/Sm—La 图解

Fig. 8 La/Sm versus La diagram of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet)

岩母岩浆具有壳源物质加入幔源的特征。综合分析表明,冈底斯东段帕那组基性火山岩可能来源于亏损地幔的部分熔融,而中酸性火山岩可能起源于玄武质岩浆板底垫托作用形成的新生地壳物质的部分熔融,并有古老陆壳物质加入岩浆房中。

综上所述,林周县扎雪地区帕那组火山岩主要起源于新生地壳物质的部分熔融,有古老壳源物质加入源区中,并经历了进一步的结晶分异,存在明显的斜长石、铁镁矿物、磷灰石以及含钛矿物的分离结晶。

5.3 构造意义

在冈底斯地区,古新世—始新世早期是重要的构造转换期,该时期的火成岩记录了新特提斯洋俯冲消亡到印度—亚洲碰撞的关键信息(孟元库等, 2015b)。因此,对该时期的火山岩开展系统性的岩石学和地球化学研究对了解岩石成岩的构造背景具有重要的指示意义。在火山岩里特曼组合指数与戈蒂里指数对数图解中(图 9),扎雪地区帕那组火山岩样品均投在造山带区,具有典型的大离子亲石(Rb、Ba、Th 和 K)和轻稀土元素富集、高场强元素(Nb、Ta 和 Ti)相对亏损等岛弧岩浆岩特征(McCulloch and Gamble, 1991),证实其形成环境与俯冲—消减有关。同位素研究表明,林周盆地典中组(63 Ma)和年波组(56 Ma)火山岩的结晶锆石,除典中组样品有两个测点 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 值(+0.5 和+2.8)接近球粒陨石线外,其余测点值均为较大的正值,分别为+5.2~+9.0(平均值为+7.0)和+4.8~+11.0(平均值为+7.8),指示典中组和年波组火山岩母岩浆具有明显的亏损地幔亲缘性(李皓扬等, 2007)。此外,如前文所述,旁多地区帕那组玄武岩全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为正值,反映该基性火山岩母岩浆具有亏损地幔来源的特征;而帕那组的玄武安山岩至英安岩的全岩 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 和 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值,英安岩的锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 具有正负变化的宽泛值,显示出该地区中酸性火山岩母岩浆源区具有壳源物质加入的特征(Liu Anlin et al., 2018)。本文报道的扎雪地区帕那组酸性火山岩(~52 Ma)锆石 $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ 均为负值,为-6.6~-1.8,揭示壳源物质加入源区的特征。这些

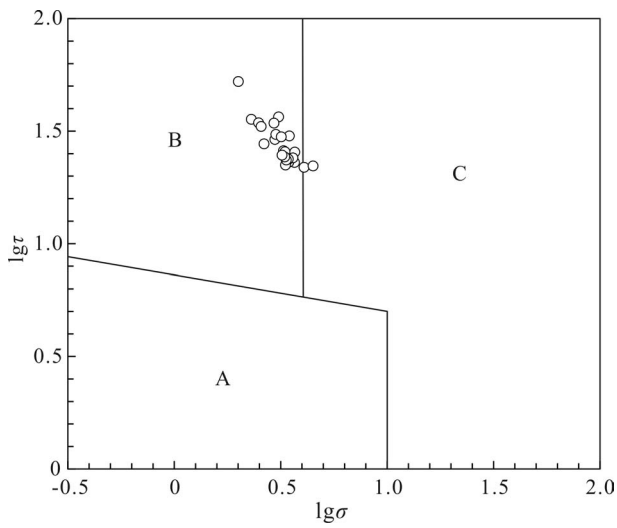


图9 藏南扎雪地区帕那组火山岩 $\lg\tau$ — $\lg\sigma$ 图解 (据 Rittmann, 1973)

Fig. 9 $\lg\tau$ — $\lg\sigma$ diagram of the Pana Formation volcanic rocks from the Zhaxue area, southern Xizang (Tibet) (after Rittmann, 1973)

A—稳定构造环境;B—造山带(岛弧及活动大陆边缘);C—由 A 或 B 区演化的碱性偏碱性岩浆岩

Sr—Nd—Hf 同位素组分特征显示,冈底斯东段地区林子宗群典中组、年波组和帕那组火山岩源区有由岛弧环境的亏损地幔源区向碰撞环境中壳源物质加入形成富集型源区的转变,这种源区相变特征在旁多和扎雪地区随基性向中酸性演化的帕那组火山岩中呈现得尤为明显。同时,扎雪地区出露的帕那组火山岩均显示过铝质的钾玄岩,是大洋岩石圈俯冲结束、陆内汇聚开始的岩石学标志(鲍春辉等, 2014; 邓晋福等, 1996),结合林周盆地、旁多和扎雪地区位于冈底斯弧背断隆带与南冈底斯的接触部位(图 1b),推测这些地区发育的林子宗群火山岩随时间岩浆源区发生了相变,指示其形成环境由岛弧向陆陆碰撞的转变,帕那组火山岩形成于印度板块与欧亚板块碰撞的初期阶段,是记录这种体制转换的主要载体。

6 结论

- (1) 林周县扎雪地区帕那组火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄结果表明,其形成于 ~52 Ma,与冈底斯东段广泛发育的帕那组火山岩时代相似,暗示了帕那组在时空上具有相对一致的活动时限。
- (2) 林周县扎雪地区帕那组火山岩主要起源于新生地壳物质的部分熔融,有古老壳源物质加入源

区中,并经历了进一步的结晶分异作用。

(3) 冈底斯东段林子宗群火山岩母岩浆随时间由岛弧环境的亏损地幔源区向碰撞环境壳源物质加入相对富集型源区的转变,指示其形成环境由岛弧向陆陆碰撞的转变;帕那组火山岩形成于印度板块与欧亚板块碰撞的初期阶段,是记录这种体制转换的主要载体。

致谢: 中国地质科学院郑光高博士后、核工业北京地质研究院吴玉博士对本文的撰写提供了建设性意见,实验测试得到中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室张东阳副教授、中国地质科学院国家地质实验测试中心李超副研究员的帮助,章雨旭研究员和审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此一并表示衷心感谢。

注 释 / Note

- ① 吉林大学地质调查研究院.2005.西藏门巴区幅(H46C002002)1:25 区域地质调查报告[R]:1~263.

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

鲍春辉,丁枫,王乾,刘寿航,徐峰,何朝鑫.2014.西藏措勤县雄玛地区始新统林子宗群帕那组火山岩地球化学特征及构造背景.地质论评,60(2):275~284.

邓晋福,赵海玲,莫宣学,吴宗絮,罗照华.1996.中国大陆根—柱构造—大陆动力学的钥匙.北京:地质出版社:50~120.

董国臣,莫宣学,赵志丹,王亮,周肃.2005.拉萨北部林周盆地林子宗火山岩层序新议.地质通报,24(6):549~557.

付文春,康志强,潘会彬.2014.西藏冈底斯带西段狮泉河地区林子宗群火山岩地球化学特征、锆石 U-Pb 年龄及地质意义.地质通报,33(6):850~859.

和钟铎,杨德明,王天武,郑常青.2004.冈底斯带扎雪石英二长斑岩体的地质特征及构造环境.沉积与特提斯地质,24(4):35~40.

和钟铎,杨德明,郑常青,王天武.2006.冈底斯带门巴花岗岩同位素测定及其对新特提斯洋俯冲时代的约束.地质论评,52(1):100~106.

侯增谦,莫宣学,高永丰,杨志明,董国臣,丁林.2006.印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型—来自西藏冈底斯新生代火成岩证据.地质学报,80(9):1233~1248.

黄映聪,杨德明,郑常青,和钟铎,戴琳娜,李建国,张耀宇.2005.西藏林周县扎雪地区林子宗群帕那组火山岩的地球化学特征及其地质意义.吉林大学学报(地球科学版),35(5):576~580.

李皓扬,钟孙霖,王彦斌,朱弟成,杨进辉,宋彪,刘敦一,吴福元.2007.藏南林周盆地林子宗火山岩的时代、成因及其地质意义:锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素证据.岩石学报,23(2):493~500.

李再会,郑来林,李军敏,夏祥标.2008.冈底斯中段林子宗火山岩岩石地球化学特征.矿物岩石地球化学通报,27(1):20~27.

李再会,郑来林,李军敏,夏祥标.2009.冈底斯中段林子宗火山岩 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其意义.矿物岩石地球化学通报,28(3):223~227.

- 梁银平,朱杰,次邛,何卫红,张克信.2010.青藏高原冈底斯带中部朱诺地区林子宗群火山岩锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征.地球科学,35(2):211~223.
- 孟元库,许志琴,陈希节,马绪宣,贺振宇,张雪松.2015a.藏南冈底斯中段谢通门始新世复式岩体锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素特征及其地质意义.大地构造与成矿学,39(5):933~948.
- 孟元库,许志琴,陈希节,马绪宣,马士委.2015b.冈底斯中段碱长花岗岩锆石 U—Pb—Hf 同位素特征及地质意义.中国地质,42(5):1202~1213.
- 孟元库,许志琴,高存山,徐扬,李日辉.2018.藏南冈底斯带中段始新世岩浆作用的厘定及其大地构造意义.岩石学报,34(3):513~546.
- 莫宣学,赵志丹,邓晋福,董国臣,周肃,郭铁鹰,张双全,王亮亮.2003.印度—亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应.地学前缘,10(3):135~148.
- 莫宣学,赵志丹,周肃,董国臣,廖忠礼.2007.印度—亚洲大陆碰撞的时限.地质通报,26(10):10~14.
- 尼玛次仁,谢尧武.2005.藏北那曲地区中三叠世地层的新发现及其地质意义.地质通报,24(12):1141~1149.
- 潘桂棠,丁俊.2004a.青藏高原及邻区地质图(1:1500000)说明书.成都:成都地图出版社:1~133.
- 潘桂棠,朱弟成,王立全,廖忠礼,耿全如,江新胜.2004b.班公湖—怒江缝合带作为冈瓦纳大陆北界的地质地球物理证据.地学前缘,11(4):371~382.
- 潘桂棠,莫宣学,侯增谦,朱弟成,王立全,李光明,赵志丹,耿全如,廖忠礼.2006.冈底斯造山带的时空结构及演化.岩石学报,22(3):521~533.
- 秦臻,余朋涛,易鹏飞,张继军,张若愚,于恒彬,姚肖博,康琴琴.2018.西藏冈底斯带昂仁县差绒—丁欧复式花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学及地球化学制约.地质论评,64(6):1557~1573.
- 单久库.2009.西藏扎雪地区始新世钾玄岩特征及其构造环境.世界地质,28(2):171~178.
- 吴福元,李献华,郑永飞,高山.2007.Lu—Hf 同位素体系及其岩石学应用.岩石学报,23(2):185~220.
- 谢克家,曾令森,刘静,高利娥,胡古月.2011.藏南昂仁县桑桑地区林子宗群火山岩的形成时代和地球化学特征.地质通报,30(9):1339~1352.
- 许志琴,赵中宝,马绪宣,陈希节,马元.2019.从安第斯到冈底斯:从洋—陆俯冲到陆—陆碰撞.地质学报,93(1):1~11.
- 杨德明,和钟铎,黄映聪,赵亮,戴琳娜.2005.西藏墨竹工卡县门巴地区松多岩群变质作用特征及时代讨论.吉林大学学报(地球科学版),35(4):430~0435.
- 杨硕,向树元,苏英明.2016.西藏林周地区帕那组火山岩时代及构造背景.地质科技情报,35(6):9~17.
- 于枫,李志国,赵志丹,谢国刚,董国臣,周肃,朱弟成,莫宣学.2010.西藏冈底斯带中西部措麦地区林子宗火山岩地球化学特征及意义.岩石学报,26(7):2217~2225.
- 翟文建,崔霄峰,岳国利,杜欣,王琰,陈志敏,苏建仓.2012.西藏扎雪—门巴韧性剪切带变形时代及机制研究:来自同构造花岗岩体的证据.大地构造与成矿学,36(2):149~156.
- 张认,和钟铎.2007.西藏冈底斯带扎雪—门巴韧性变形带形成时代及构造背景.沉积与特提斯地质,27(1):19~24.
- 张泽明,董昕,耿官升,王伟,于飞,刘峰.2010.青藏高原拉萨地体北部的前寒武纪变质作用及构造意义.地质学报,84(4):449~456.
- 周肃,方念乔,董国臣,赵志丹,刘秀明.2001.西藏林子宗群火山岩氩—氩年代学研究.矿物岩石地球化学通报,20(4):317~319.
- 周肃,莫宣学,董国臣,赵志丹,邱瑞照,王亮亮,郭铁鹰.2004.西藏林周盆地林子宗火山岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年代格架.科学通报,49(20):2095~2103.
- 朱弟成,潘桂棠,王立全,莫宣学,赵志丹,周长勇,廖忠礼,董国臣,袁四化.2008.西藏冈底斯带中生代岩浆岩的时空分布和相关问题的讨论.地质通报,27(9):1535~1536.
- 朱弟成,莫宣学,王立全,赵志丹,牛耀玲,周长勇,杨岳衡.2009.西藏冈底斯东部察隅高分异 I 型花岗岩的成因:锆石 U-Pb 年代学、地球化学和 Sr—Nd—Hf 同位素约束.中国科学(D 辑),39(7):833~848.
- Bao Chunhui, Ding Feng, Wang Qian, Liu Shouhang, Xu Feng, He Chaoxin. 2014. Lithochemical, geochemical, characteristics and tectonic setting of the volcanic rocks in the Eocene Pana Formation, Linzizong Group, in the Xiongma area, Coqen County, Xizang (Tibet). Geological Review, 60(2):275~284.
- Blichert-Toft J, Albarede F. 1997. The Lu—Hf geochemistry of chondrites and the evolution of the mantle—crust system. Earth and Planetary Science Letters, 148:243~258.
- Clementz M, Bajpai S, Ravikant S, Thewissen J G M, Saravanan N, Singh I B and Prasad V. 2011. Early Eocene warming events and the timing of terrestrial faunal exchange between India and Asia. Geology, 39(1):15~18.
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C, Wang S. 1986. Mesozoic and cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: ³⁹Ar-⁴⁰Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. Earth & Planetary Science Letters, 79(3):281~302.
- Deng Jinfu, Zhao Hailing, Mo Xuanxue, Wu Zongxu, Luo Zhaozhua. 1996. Continental roots—plume Tectonics of China—Key to Continental Dynamics. Beijing: Geological Publishing House: 50~120.
- Ding Lin, Kapp P, Wan Xiaojiao. 2005. Paleocene—Eocene record of ophiolite obduction and initial India—Asia collision, south—central Tibet. Tectonics, 24(3):1~18.
- Ding Lin, Xu Qiang, Yue Yahui, Wang Houqi, Cai Fulong, Li Shun. 2014. The Andean-type Gangdese Mountains: Paleoelevation record from the Paleocene – Eocene Linzhou Basin. Earth and Planetary Science Letters, 392:250~264.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Guo Tieying, Wang Lingling and Chen Tao. 2005. Geochronologic constraints on the magmatic underplating of the Gangdise Belt in the India—Eurasia collision: Evidence of SHRIMP II zircon U - Pb dating. Acta Geologica Sinica (English Edition), 79(6):787~794.
- Dong Guochen, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Wang Liang, Zhou Su. 2005. A new understanding of the stratigraphic successions of the Linzizong volcanic rocks in the Lhiinzhub basin, northern Lhasa, Tibet, China. Geological Bulletin of China, 24(6):549~557.
- Dong Xin, Zhang Zeming, Santosh M. 2010. Zircon U-Pb chronology of the Nyingtri Group, Southern Lhasa Terrane, Tibetan Plateau: Implications for Grenvillian and Pan-African provenance and Mesozoic—Cenozoic metamorphism. Journal of Geology, 118(6):677~690.
- Dong Xin, Zhang Zeming, Santosh M, Wang Wei, Yu Fei, Liu Feng. 2011. Late Neoproterozoic thermal events in the northern Lhasa terrane, south Tibet: Zircon chronology and tectonic implications. Journal of Geodynamics, 52(5):389~405.
- Fu Wenchun, Kang Zhiqiang, Pan Huibin. 2014. Geochemistry, zircon U-Pb age and implications of the Linzizong Group volcanic rocks in Shiquan River area, western Gangdise belt, Tibet. Geological Bulletin of China, 33(6):850~859.
- Green M G, Sylvester P J, Buick R. 2000. Growth and recycling of early Archaean continental crust: geochemical evidence from the

- Coonerunah and Warrawoona Groups, Pilbara Craton, Australia. *Tectonophysics*, 322(1): 69~88.
- Griffin W L, Pearson N J, Belousova E, Jackson S E, van Achterbergh E, O'Reilly S Y, Shee S R. 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 133~147.
- Griffin W L, Wang Xiang, Jackson S E, Pearson N J, O'Reilly S Y, Xu Xisheng, Zhou Xinmin. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61(3): 237~269.
- Harrison T M, Blichert-Toft J, Müller W, Albarede F, Holden P, Mojzsis S J. 2005. Heterogeneous Hadean hafnium: evidence of continental crust at 4.4 to 4.5 Ga. *Science*, 310(5756): 1947~1950.
- He Zhonghua, Yang Deming, Wang Tianwu, Zheng Changqing. 2004. The geology and tectonic setting of the Zaxoi beschtauite massifs in the Gangdise zone, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 24(4): 35~40.
- He Zhonghua, Yang Deming, Zheng Changqing, Wang Tianwu. 2006. Isotopic dating of the Mamba granitoid in the Gangdise tectonic belt and its constraint on the subduction time of the Neotethys. *Geological Review*, 52(1): 100~106.
- Hou Zengqian, Mo Xuanxue, Gao Yongfeng, Yang Zhiming, Dong Guochen, Ding Lin. 2006. Early processes and tectonic model for the Indian—Asian continental collision: evidence from the cenozoic Gangdise igneous rocks in Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1233~1248.
- Huang Yingcong, Yang Deming, Zheng Changqing, He Zhonghua, Dai Linna, Li Jianguo, Zhang Yaoyu. 2005. The Geochemical characteristics of the Pana Volcanic rocks of the Linzizong Group in the Zhaxue Area, Linzhou County, Tibet and Its Geological Implication. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(5): 576~580.
- Ji Weiqiang, Wu Fuyuan, Chung Sunlin, Li Jinxiang, Liu Chuankou. 2009. Zircon U-Pb geochronology and Hf isotopic constraints on petrogenesis of the Gangdise batholith, southern Tibet. *Chemical Geology*, 262: 229~245.
- Lee Haoyang, Chung Sunlin, Ji Jianqing, Qian Qing, Gallet S, Lo Chinghua, Lee Tungyi, Zhang Qi. 2012. Geochemical and Sr - Nd isotopic constraints on the genesis of the Cenozoic Linzizong volcanic successions, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53(2): 96~114.
- Lee Haoyang, Chung Sunlin, Lo Chinghua, Ji Jianqing, Lee Tungyi, Qian Qing, Zhang Qi. 2009. Eocene Neotethyan slab breakoff in southern Tibet inferred from the Linzizong volcanic record. *Tectonophysics*, 477(1): 20~35.
- Lee Haoyang, Chung Sunlin, Wang Yanbin, Zhu Dicheng, Yang Jinhui, Song Biao, Liu Dunyi and Wu Fuyuan. 2007. Age, petrogenesis and geological significance of the Linzizong volcanic successions in the Linzhou basin, southern Tibet; Evidence from zircon U-Pb dates and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 493~500.
- Leech M L, Singh S, Jain A K, Klemperer S L, Manickavasagam R M. 2005. The onset of India - Asia continental collision: Early, steep subduction required by the timing of UHP metamorphism in the western Himalaya. *Earth & Planetary Science Letters*, 234(1): 83~97.
- Li Zaihui, Zheng Lailin, Li Junmin, Xia Xiangbiao. 2008. Petrological and geochemical characteristics of the Linzizong volcanic rocks in the central Gangdise Area. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 27(1): 20~27.
- Li Zaihui, Zheng Lailin, Li Junmin, Xia Xiangbiao. 2009. ⁴⁰Ar-³⁹Ar dating of Linzizong volcanic rocks in the central Gangdise Area and Its Geological Implication. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 28(3): 223~227.
- Liang Yinping, Zhu Jie, Ci Qiong, He Weihong, Zhang Kexin. 2010. Zircon U-Pb Ages and Geochemistry of Volcanic Rock from Linzizong Group in Zhunuo Area in Middle Gangdise Belt, Tibet Plateau. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 35(2): 211~223.
- Liu Anlin, Wang Qing, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Liu Shengao, Wang Rui, Dai Jingen, Zheng Yuanchuan, Zhang Liangliang. 2018. Origin of the ca.50 Ma Linzizong shoshonitic volcanic rocks in the eastern Gangdise arc, southern Tibet. *Lithos*, 304.
- Ludwig K R. 2003. User's Manual for Isoplot/Ex. Version 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center Special Publication, (4): 1~70.
- McCulloch M T, Gamble J A. 1991. Geochemical and geodynamical constraints on subduction zone magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, 102(3~4): 358~374.
- McDermid I R C, Aitchison J C, Davis A M, Harrison T M, Grove M. 2002. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187(3): 267~277.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Chen Xijie, Ma Xuxuan, Ma Shiwei. 2015b. Isotope study of alkali feldspar granite zircon in the middle Gangdise batholith and its geological significance. *Geology in China*, 42(5): 1202~1213.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Chen Xijie, Ma Xuxuan, He Zhenyu, Zhang Xuesong. 2015a. Zircon Geochronology and Hf Isotopic Composition of Eocene Granite Batholith from Xaitongmoin in the Middle Gangdise and its Geological Significance. *Geotectonica et Metallogenia*, 39(5): 933~948.
- Meng Yuanku, Xu Zhiqin, Gao Cunshan, Xu Yang, Li Rihui. 2018. The identification of the Eocene magmatism and tectonic significance in the middle Gangdise magmatic belt, southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 34(3): 513~546.
- Middlemost E A K. 1994. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*, 37(3~4): 215~224.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Deng Jinfu, Dong Guochen, Zhou Su, Guo Tieying, Zhang Shuangquan, Wang Liangliang. 2003. Response of volcanism to the India—Asia collision. *Earth Science Frontiers*, 10(3): 135~148.
- Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Su, Dong Guochen, Liao Zhongli. 2007. On the timing of India—Asia continental collision. *Geological Bulletin of China*, 26(10): 1240~1244.
- Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Niu Yaoling, Dong Guochen, Qu Xiaoming, Zhao Zhidan, Yang Zhiming. 2007. Mantle contributions to crustal thickening during continental collision: Evidence from Cenozoic igneous rocks in southern Tibet. *Lithos*, 96(1~2): 225~242.
- Mo Xuanxue, Niu Yaoling, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Hou Zengqian, Zhou Su, Ke Shan. 2008. Contribution of syncollisional felsic magmatism to continental crust growth: A case study of the Paleogene Linzizong volcanic succession in southern Tibet. *Chemical Geology*, 250(1): 49~67.
- Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, Zhou Su. 2009. Mantle input to the crust in southern Gangdise, Tibet, during the Cenozoic: Zircon Hf isotopic evidence. *Journal of Earth Science*, 20

- (2):241~249.
- Nimaciren, Xie Raowu. 2005. Discovery of Middle Triassic strata in the Nagqu area, northern Tibet, China, and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 24(12):1141~1149.
- Pan Guitang, Ding Jun. 2004. Introduction of Geologic Map of Tibet and Its Adjacent Area. Chengdu: Chengdu Map Publishing House.
- Pan Guitang, Mo Xuanxue, Hou Zengqian, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Li Guangming, Zhao Zhidan, Geng Quanru and Liao Zhongli. 2006. Spatial—temporal framework of the Gangdese Orogenic Belt and its evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3):521~533.
- Pan Guitang, Zhu Dicheng, Wang Liquan, Liao Zhongli, Geng Quanru, Jiang Xinsheng. 2004. Bangong Lake—Nu River suture zone—the northern boundary of Gondwanaland: Evidence from geology and geophysics. *Earth Science Frontiers*, 11(4):371~382.
- Pearce J A, Cann J R. 1993. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2):290~300.
- Polat A, Hofmann A W. 2003. Alteration and geochemical patterns in the 3.7~3.8 Ga Isua greenstone belt, West Greenland. *Precambrian Research*, 126(3):197~218.
- Qin Zhen, She Pengtao, Yi Pengfei, Zhang Jijun, Zhang Ruoyu, Yu Hengbin, Yao Xiaobo, Kang Qinqin. 2018. Petrogenesis of Charong—Ding’ou composite granites in Angren County, Gangdese belt, Xizang (Tibet): Constraints from geochemical features and zircon U-Pb ages. *Geological Review*, 64(6):1557~1573.
- Rittmann A. 1973. Stable mineral assemblages of igneous rocks. Berlin: Springer Verlag: 1~262.
- Shan Jiuku. 2009. Characteristic and tectonic settings of Eocene shoshonite In Xaxue area of Tibet. *Global Geology*, 28(2):171~178.
- Söderlund U, Patchett P J, Vervoort J D and Isachsen C E. 2004. The ^{176}Lu decay constant determined by Lu—Hf and U-Pb isotope systematics of Precambrian mafic intrusions. *Earth and Planetary Science Letters*, 219:311~324.
- Sui Qinglin, Wang Qing, Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Chen Yue, Santosh M, Hu Zhaochu, Yuan Honglin, Mo Xuanxue. 2013. Compositional diversity of ca. 110 Ma magmatism in the northern Lhasa Terrane, Tibet: Implications for the magmatic origin and crustal growth in a continent—continent collision zone. *Lithos*, 168(3):144~159.
- Sun S S, McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1):313~345.
- Van Achterbergh E, Ryan C G, Griffin W L. 1999. GLITTER: On-line interactive data reduction for the laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry microprobe. Ninth Annual VM Goldschmidt Conference.
- Wu Fuyuan, Ji Weiqiang, Wang Jiangang, Liu Chuazhou, Chung Sunlin, Clift P D. 2014. Zircon U-Pb and Hf isotopic constraints on the onset time of India—Asia collision. *American Journal of Science*, 314(2):548~579.
- Wu Fuyuan, Li Xianhua, Zheng Yongfei and Gao Shan. 2007. Lu—Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):185~220.
- Wu Yuanbao, Zheng Yongfei. 2004. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(15):1554~1569.
- Xie Kejia, Zeng Lingsen, Liu Jing, Gao Lie, Hu Guyue. 2011. Timing and geochemistry of the Linzizong Group volcanic rocks in Sangsang area, Ngamring County, southern Tibet. *Geological Bulletin of China*, 30(9):1339~1352.
- Xu Zhiqin, Zhao Zhongbao, Ma Xuxuan, Chen Xijie, Ma Yuan. 2019. From Andean orogen to Gangdese orogeny: from ocean continent subduction to continent—continent collision. *Acta Geologica Sinica*, 93(1):1~11.
- Yang Deming, He Zhonghua, Huang Yingcong, Zhao Liang, Dai Linna. 2005. Metamorphism characteristics of Songduo Group in Menba Township, Mozhugongka County, Tibet and the discussion on its age. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 35(4):430~443.
- Yang Shuo, Xiang Shuyuan, Su Yingming. 2016. Geochronology and Tectonic Setting of Pana Formation Volcanic Rock in Linzhou Area, Tibet. *Geological Science and Technology Information*, 35(6):9~17.
- Yin An, Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan—Tibetan orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28:211~280.
- Yin Jiarun, Grant-Mackie J A. 2005. Late Triassic—Jurassic bivalves from volcanic sediments of the Lhasa block, Tibet. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 48(3):555~577.
- Yu Feng, Li Zhiguo, Zhao Zhidan, Xie Guogang, Dong Guochen, Zhou Su, Zhu Dicheng and Mo Xuanxue. 2010. Geochemistry and implication of the Linzizong volcanic succession in Cuomai area, central—western Gangdese, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7):2217~2225.
- Zhai Wenjian, Cui Xiaofeng, Yue Guoli, Du Xin, Wang Yan, Chen Zhimin and Su Jiancang. 2012. Age and genetic mechanism of deformation of the Zhaxue—Menba shear zone in Tibet: Evidence from the synorogenic granites. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(2):149~156.
- Zhang Ren, He Zhonghua. 2007. The ages and tectonic setting of the Xaxoi—Mamba ductile shear zone in the Gangdise orogenic belt, Xizang. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 27(1):19~24.
- Zhang Zeming, Dong Xin, Geng Guansheng, Wang Wei, Yu Fei, Liu Feng. 2010. Precambrian metamorphism of the northern Lhasa terrane, south Tibet and its tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 84(4):449~456.
- Zhang Zeming, Dong Xin, Liu Feng, Lin Yanhao, Yan Rong, He Zhenyu, Santosh M. 2012. The making of Gondwana: Discovery of 650 Ma HP granulites from the North Lhasa, Tibet. *Precambrian Research*, 212~213(8):107~116.
- Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, Dilek Y, Niu Yaoling, DePaolo D J, Robinson P, Zhu Dicheng, Sun Chenguang, Dong Guochen, Zhou Su, Luo Zhaochun, Hou Zengqian. 2009. Geochemical and Sr—Nd—Pb—O isotopic compositions of the post-collisional ultrapotassic magmatism in SW Tibet: petrogenesis and implications for India intra-continental subduction beneath southern Tibet. *Lithos*, 113(1):190~212.
- Zhou Su, Fang Nianqiao, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Liu Xiuming. 2001. Argon dating on the volcanic rocks of the Linzizong Group, Tibet. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 20(4):317~319.
- Zhou Su, Mo Xuanxue, Dong Guochen, Zhao Zhidan, Qiu Ruizhao, Wang Liangliang, Guo Tieying. 2004. ^{40}Ar — ^{39}Ar geochronology of Cenozoic Linzizong volcanic rocks from Linzhou Basin, Tibet, China, and their geological implications. *Chinese Sci Bull*, 49(20):2095~2103.
- Zhu Dicheng, Pan Guitang, Chung Sunlin, Liao Zhongli, Wang Liquan, Li Guangming. 2008. SHRIMP zircon age and geochemical constraints on the origin of Lower Jurassic volcanic rocks from the Yeba Formation, southern Gangdese, south Tibet. *International Geology Review*, 50(5):442~471.

Zhu Dicheng, Pan Guitang, Wang Liquan, Mo Xuanxue, Zhao Zhidan, Zhou Changyong, Liao Zhongli, Dong Guochen, Yuan Sihua. 2008. Temporal-spatial variations of Mesozoic magmatic rocks in the Gangdise belt, Tibet, China, with a discussion of geodynamic setting-related issues. *Geological Bulletin of China*, 27(9): 1535~1550.

Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Niu Yaoling, Zhao Zhidan, Wang Liquan, Liu Yongsheng, Wu Fuyuan. 2009. Geochemical investigation of Early Cretaceous igneous rocks along an east-west traverse throughout the central Lhasa Terrane, Tibet. *Chemical Geology*, 268(3): 298~312.

Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Zhou Changyong, Yang Yueheng. 2009. Petrogenesis of highly fractionated I-type granites in the Chayu area of eastern Gangdise, Tibet: Constraints from zircon U-Pb geochronology, geochemistry and Sr-Nd-Hf isotopes. *Sci. China (Ser. D—Earth Sci.)*, 39(7): 833~848.

Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Mo Xuanxue, Chung Sunlin, Hou Zengqian, Wang Liquan, Wu Fuyuan. 2011. The Lhasa Terrane: Record of a microcontinent and its histories of drift and growth. *Earth & Planetary Science Letters*, 301(1~2): 241~255.

Zhu Dicheng, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, Dilek Y, Hou Zengqian, Mo Xuanxue. 2013. The origin and pre-Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau. *Gondwana Research*, 23(4): 1429~1454.

Zhu Dicheng, Wang Qing, Zhao Zhidan, Chung Sunlin, Cawood P A, Niu Yaoling, Liu Shengao, Wu Fuyuan, Mo Xuanxue. 2015. Magmatic record of India-Asia collision. *Scientific Reports*, 5: 14289, DOI: 10.1038/srep14289.

Zircon U-Pb ages and geochemical characteristics of the Pana Formation volcanic rocks from the Linzizong Group in Zhaxue area, eastern Gangdese belt, Xizang(Tibet) , and its tectonic significance

LIU Fujun^{1,2)}, QIN Song^{1,3)}, SUN Chuanmin¹⁾

1) College of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, 610059;

2) School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

3) Regional Geological Survey Team, Sichuan Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Chengdu, 610213

Objectives: The Pana Formation volcanic rocks of the Linzizong Group are widely distributed in Zhaxue area, eastern Gangdese belt, which is an important object to understand the geological evolution of the Gangdese belt.

Methods: In this study, we report the results of whole-rock geochemistry, zircon U-Pb age and Lu—Hf isotopic composition date for the Pana Formation volcanic rocks in the Zhaxue area to constrain their emplacement ages, petrogenesis and tectonic significance.

Results: The LA-ICP-MS zircon U-Pb age reveals that the Pana Formation volcanic rocks were erupted at 52 Ma, which is similar to the geochronology of the Pana Formation volcanic successions in the eastern Gangdese arc, indicating that there has a relatively consistent time of the Pana Formation in the Gangdese arc. Geochemical data display that these volcanic rocks have high content of SiO₂ content, high sodium and alkali with A/CNK values ranging from 1.30 to 1.73, suggesting that it belongs to the peraluminous shoshonite series. Meanwhile, they present obvious enrichment in LILEs (such as Rb, Th, U and K) and LREE, depletion in HFSEs (such as Nb, P and Ti), showing the arc magma affinity. These samples have low Mg[#] (19.77~38.96), Cr (3.00~34.3 μg/g), Ni (2.90~15.6 μg/g), Co (2.20~9.58 μg/g), and the La/Sm ratios show no significant change with the increasing content of La, suggesting that the Pana Formation volcanic rocks in this study experienced crystal fractionation in the petrogenesis. Additionally, in combination with their negative ε_{Hf}(t) values (−4.4 to −3.6), the Pana Formation volcanic rocks in Zhaxue area mainly derived from partial melting of juvenile crust with some continental crust material involvement.

Conclusions: Combined with the published isotopic data around the Linzhou region, the Linzizong group volcanic rocks changed from a depleted mantle in island arc environment to a relatively enriched source formed by involvement of continental crust material in collision environment over time, indicating that the formation environment underwent a transition from island arc to continental collision. What's more, the Pana Formation volcanic rocks were considered as a magma response caused by the transfer from subduction to collision at initial stage of the Indian—Asia continental collision.

Keywords: geochemistry, zircon U-Pb dating, Lu—Hf isotope, petrogenesis, Zhaxue area volcanic rocks

Acknowledgement: This study was supported by The Geological Survey Project of Geological Survey of China “The strategic mineral prospective survey in Serirong Area, Tibet” (No.1212011221077).

First author: LIU Fujun, male, doctoral candidate. Email: fjliu81@163.com

Corresponding author: QIN Song, male, Senior Engineer, Research area include regional geological survey and research. Email: qinsong2004@163.com

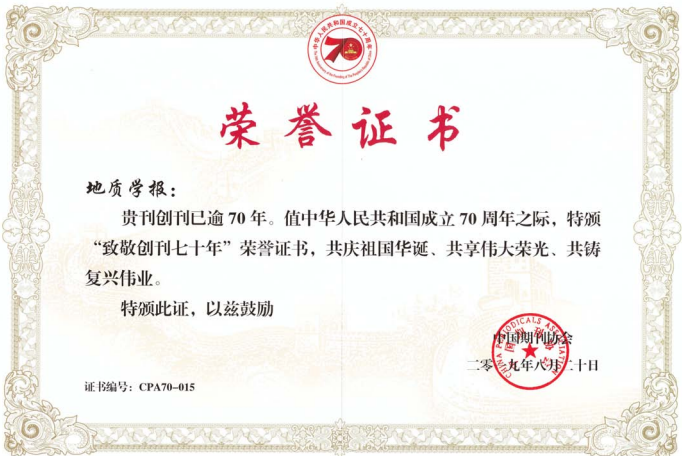
Manuscript received on:2019-01-29; Accepted on: 2019-08-06; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2019.05.006

(上接第 1102 页)

包括地层学、古生物学、地史学、构造地质学、大地构造学、矿物学、岩石学、地球化学、地球物理、矿床地质学、水文地质学、工程地质学、环境地质学、区域地质学以及地质勘查的新理论和新技术。近年来,《地质学报》(英文版)在新闻出版总署、中国科协大力推进实施的科技期刊国际化、精品化、网络化和人才战略的进程中,取得了较好的成绩,赢得了国内外地质科技人员和出版界的高度重视。多次获得科技部、新闻出版署、中国科协的中国优秀科技期刊称号。目前被“SCI”、“CA”、“GeoRef”、“Scopus”、“TULSA”、“澳大利亚国家图书馆”、“德国国家科技图书馆”、“耶鲁大学图书馆”等多家国内外数据库收录。

《地质学报》自 1922 年创刊以来,共发表文章近万篇,是我国地质事业的忠实见证者,中国地质界的所有重大发现都能从中找到源头。《地质学报》是我国最著名的地学期刊之一,在国内外地质学界上具有很高声誉。曾荣获“国家期刊奖”、中国科学技术协会“中国科技期刊一等奖”等称号。《地质学报》除被“EI”收录外,还被汤森路透下属与“SCI”数据库并列的“Zoological Record”、“Biological Abstracts”、“BIOSIS Previews”三个子数据库所收录。最新数据表明,2018 年,《地质学报》年阅读量 10 万余次,下载量 3 万余次。《地质学报》网站年均浏览量达 100 万余次。据中国科学技术情报研究所的《中国科技期刊引证报告》,2018 年核心影响因子 2.253(排地质学类第 2),核心总被引频次为 6162(排地质学类第 2 位),综合评价总分 75.4(排地质学



类第 2)。在国内外具有很高的学术影响力。

《地质论评》创刊于 1936 年,是第一本中文地质学定期学术期刊。其刊头图案缺右上少左下,代表东北三省被日寇侵占,藏南被英帝掠夺,表达了我地质学人的爱国之心和忧愤之情。该刊头图案自创刊号一直沿用至今,我们希望她能同时代诞生的《义勇军进行曲》一样,继续激励全中国地质工作者立足中华大地,在促进世界地质学学术理论发展的同时,切实地为国家、为民族解决资源和环境等问题贡献我们的智慧,为祖国的进一步繁荣富强贡献我们的力量。爱国和争鸣是《地质论评》的宗旨,《地质论评》始终坚持“百花齐放、百家争鸣”,对促进中国地质学的进步起了不可磨灭的作用。《地质论评》以论、评、述、报为特色。所刊论文涉及地质学及相关学科各领域,包括新理论和新技术等。据中国科学技术情报研究所的《中国科技期刊引证报告》,《地质论评》2018 年度的核心影响因子 2.354(排地质学类第 1 位),核心总被引频次为 3285(排地质学类第 5 位)。2018 年,《地质论评》年阅读量 10 万余次,下载量 3 万余次。她是中国地质界最受欢迎的刊物之一。她被国内外多家数据库收录。

(刘志强 供稿)

LIU Zhiqiang: *Acta Geologica Sinica, Acta Geologica Sinica (English edition) and Geological Review Honoured Saluting the periodical starting publication more than 70 years from China Periodicals Association*

