

日喀则夏鲁 N-MORB 型辉长岩与辉绿岩:雅鲁藏布江特提斯洋早白垩世初始俯冲记录

刘函¹, 王保弟², 陈莉¹, 王立全¹, 张予杰¹, 李俊¹, 苟正彬¹, 张士贞¹

LIU Han¹, WANG Baodi², CHEN Li¹, WANG Liquan¹, ZHANG Yujie¹, LI Jun¹,

GOU Zhengbin¹, ZHANG Shizhen¹

1. 中国地质调查局成都地质调查中心, 四川 成都 610081;

2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083

1. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China

摘要:雅鲁藏布江结合带 130~120 Ma 蛇绿岩分布广泛,但其形成环境存在较大争论。以日喀则地区夏鲁辉长岩及辉绿岩锆石 U-Pb 定年、主量及微量元素数据为基础,结合大量的日喀则蛇绿岩研究数据,分析蛇绿岩的构造环境及其动力学意义。夏鲁辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 123.8 ± 1.1 Ma (MSWD=0.97),表明其是日喀则 130~120 Ma 蛇绿岩残片之一。主量、微量元素特征显示,部分辉长岩样品高 CaO、低 SiO₂及极低的 K₂O、Na₂O 含量,为异剥钙榴岩化所致,而辉绿岩无流体影响。夏鲁辉长岩与辉绿岩显示正常型大洋中脊玄武岩(N-MORB)特征,且轻稀土元素较 N-MORB 亏损,来自亏损地幔尖晶石二辉橄辉岩源区高程度部分熔融。日喀则 130~120 Ma 的蛇绿岩 N-MORB 型基性岩来自俯冲组分混入不均的地幔源区,表现为洋中脊玄武岩至火山弧玄武岩过渡特征,并且无陆壳物质混入,最有可能形成于洋内弧系统。综合区域地质资料,认为日喀则 130~120 Ma 的蛇绿岩在发育时限、岩石组合及地球化学特征上与伊豆小笠原-琉球-马里亚纳(IBM)弧前蛇绿岩类似,代表雅鲁藏布江新特提斯洋一次洋内俯冲的开始。

关键词:雅鲁藏布江结合带;日喀则;早白垩世;洋内弧;弧前蛇绿岩;初始俯冲

中图分类号:P534.53;P588.12⁺4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2021)11-1836-16

Liu H, Wang B D, Chen L, Wang L Q, Zhang Y J, Li J, Gou Z B, Zhang S Z. Xialu N-MORB gabbros and diabases in the Xigaze ophiolite: Record of subduction initiation of the Yarlung Zangbo Tethyan Ocean at Early Cretaceous. *Geological Bulletin of China*, 2021, 40(11): 1836-1851

Abstract: The 130~120 Ma ophiolite is the most widely distributed in the Yarlung Zangbo suture zone, however, its formation environment remains controversial. Based on zircon U-Pb ages, whole-rock geochemical data of Xialu gabbros and diabases, and a large number of data of Xigaze ophiolite, the tectonic environment and dynamic significance of Early Cretaceous ophiolite were discussed. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Xialu gabbro yields weighted mean age of 123.8 ± 1.1 Ma (MSWD = 0.97), indicating one of the 130~120 Ma Xigaze ophiolite relics. Some gabbro samples are characterized by high CaO, low SiO₂ and very low K₂O and Na₂O contents, which can be attributed to a rodingitization process, whereas diabases suffer from minimal affection of fluid. Xialu gabbros and diabases show N-MORB type characteristics and more depleted in light rare earth elements than normal N-MORB, suggesting high degree partial melting of a depleted mantle of spinel lherzolite source. The N-MORB basic rocks of the 130~120 Ma ophiolite in

收稿日期:2021-04-19;修订日期:2021-05-08

资助项目:中国地质调查局项目《中尼铁路沿线(境内段)区域地质调查》(编号:DD20211195)、国家自然科学基金项目《西藏那曲地区中晚侏罗世拉贡塘组沉积作用对班公湖-怒江构造带地质演化的制约》(批准号:41972113)、《羌塘中部泥盆纪-石炭纪岩浆作用对古特提斯洋构造演化的制约》(批准号:41773026)、《措勤-改则地区木里组时代厘定:对拉萨地块晚二叠世-三叠纪沉积演化的制约》(批准号:42002032)和科技部青藏科考项目《深时特提斯生物与环境演变》(编号:2019QZKK0706)

作者简介:刘函(1986-),男,硕士,高级工程师,从事青藏高原区域地质调查及地质演化研究。E-mail:liuhan_cdcgs@163.com

Xigaze were generated from a mantle source with inhomogeneous mixture of subduction components, and characterized by the transition from MORB to VAB, with a minimal adding of continental crust, which suggest that the Xigaze ophiolite was formed in an intra-oceanic arc system. Combined with regional geology, it is suggested that the 130~120 Ma ophiolite in Xigaze is similar to the IBM fore-arc ophiolite in development time, lithology and geochemistry, representing a subduction initiation in the Yarlung Zangbo Tethys Ocean.

Key words: Yarlung Zangbo suture zone; Xigaze; Early Cretaceous; intra-oceanic arc; fore-arc ophiolite; subduction initiation

雅鲁藏布江结合带作为青藏高原最年轻的结合带,构成欧亚板块与印度板块的分界线。早期研究主要针对洋盆的初始裂解及闭合时限,最近在仲巴以西的那久及地区发现晚泥盆世—早石炭世的蛇绿岩记录^[1-2],暗示雅鲁藏布江特提斯洋可能经历了比传统认识更漫长的演化过程。洋盆性质也是重点研究方向,目前在带至少识别出大陆岛弧型、地幔柱—洋内热点型、洋中脊—大洋岛弧型和大洋岛弧型 4 种洋壳类型^[3-5]。近年,西太平洋伊豆小笠原—玻安岛—马里亚纳(IBM)洋内弧研究表明,弧前盆地熔岩形成于俯冲开始不久后的伸展环境,代表了俯冲启动时期的地幔减压熔融,并详细识别了其从地幔到洋壳的岩浆演化序列^[6-7],使精细刻画各个古老蛇绿岩的俯冲过程变为可能。目前,在南迦巴瓦峰、泽当—日喀则等地已有弧前辉长岩、玻安岩等与 IMB 弧前盆地蛇绿岩序列类似的岩块发现^[8-11],可能代表了雅鲁藏布江新特提斯洋一次或多次洋内俯冲启动事件^[6]。

同位素年龄研究显示,雅鲁藏布江结合带主体形成于侏罗纪—白垩纪^[11-14],而早白垩世(130~120 Ma)蛇绿岩残片尤为发育,人们普遍将如此短时间的大洋岩浆作用归因于一套洋内弧系统^[5, 10, 15-17]或冈底斯陆缘弧的弧前系统^[18-20]。一种新观点认为,其受控于大洋变质核杂岩系统的拆离断裂系^[21-23]。上述表明,雅鲁藏布江结合带 130~120 Ma 的演化异常关键,其具体动力学过程需要进一步探索及数据支撑。

日喀则蛇绿混杂岩的年龄数据及地球化学数据都相对丰富^[4],同位素年龄主要集中在 130~120 Ma 之间^[22],是研究该年龄段蛇绿岩成因的理想场所。本文选择夏鲁一带辉长岩及辉绿岩岩块进行锆石 U-Pb 测年与地球化学分析,结合已有资料,探讨该期蛇绿岩的构造环境及其动力学意义。

1 地质背景

雅鲁藏布江结合带大体沿雅鲁藏布江分布,东西长约 1500 km,向东绕过“大拐弯”至墨脱,向西与

印度河蛇绿混杂岩带相连^[24-25]。雅鲁藏布江结合带自西向东分为 3 段:西段从萨嘎以西至中印边境,中段自昂仁至仁布,东段自曲水到墨脱^[26],而日喀则蛇绿混杂岩构成雅鲁藏布江结合带中段的主体。

本文所指日喀则蛇绿混杂岩为分布在日喀则一带,东起大竹卡、西至昂仁的蛇绿混杂岩组合。其蛇绿岩单元出露齐全,由地幔橄榄岩、堆积杂岩、席状岩床(墙)群、枕状玄武岩及硅质岩组成。其北侧为日喀则中生代弧前盆地(图 1),为冲堆组、日喀则群半深海—深海相过渡到滨海—浅海相沉积建造,时代为早白垩世晚期—晚白垩世。其南侧紧邻上侏罗统—下白垩统嘎学岩群,为一套次深—深海相沉积建造,变形强烈,常见各蛇绿岩岩块(蚀变超镁铁岩、玄武岩、辉绿岩等)以构造透镜体与基质断层接触。

日喀则蛇绿混杂岩硅质岩中放射虫时代为中三叠世—晚白垩世^[27-29],但同位素年代学资料确定的时代范围偏小,为早白垩世(132~120 Ma)^[13, 30-32]。日喀则蛇绿混杂岩中蛇绿岩类型多样,包括弧后型、弧前型、洋中脊型、洋岛型、岛弧型、早期裂谷型等蛇绿岩岩片^[3, 33-35]。值得注意的是,大多数基性岩稀土元素(REEs)组成具有正常大洋中脊玄武岩(N-MORB)特征,但是部分岩石兼具俯冲带型蛇绿岩(SSZ)特征,因此对其成因的解释存在较大分歧。

夏鲁蛇绿岩位于日喀则市东南约 20 km,近南北向展布,出露的蛇绿岩单元以蛇纹石化橄榄岩为主,另见辉长岩、玄武岩、辉绿岩、硅质岩等。夏鲁以东的得几乡枕状玄武岩具玻安岩性质^[8],故 1:25 万日喀则幅将夏鲁一带蛇绿岩划归弧前盆地型^①。

2 岩石学特征

本次分析样品包括辉长岩和辉绿岩 2 种类型,二者被蛇纹石化橄榄岩分割。辉长岩样品采自夏鲁寺一带,露头上辉长岩与蛇纹石化橄榄岩呈构造混杂,二者互为透镜体,其中淡色辉长岩多被蛇纹

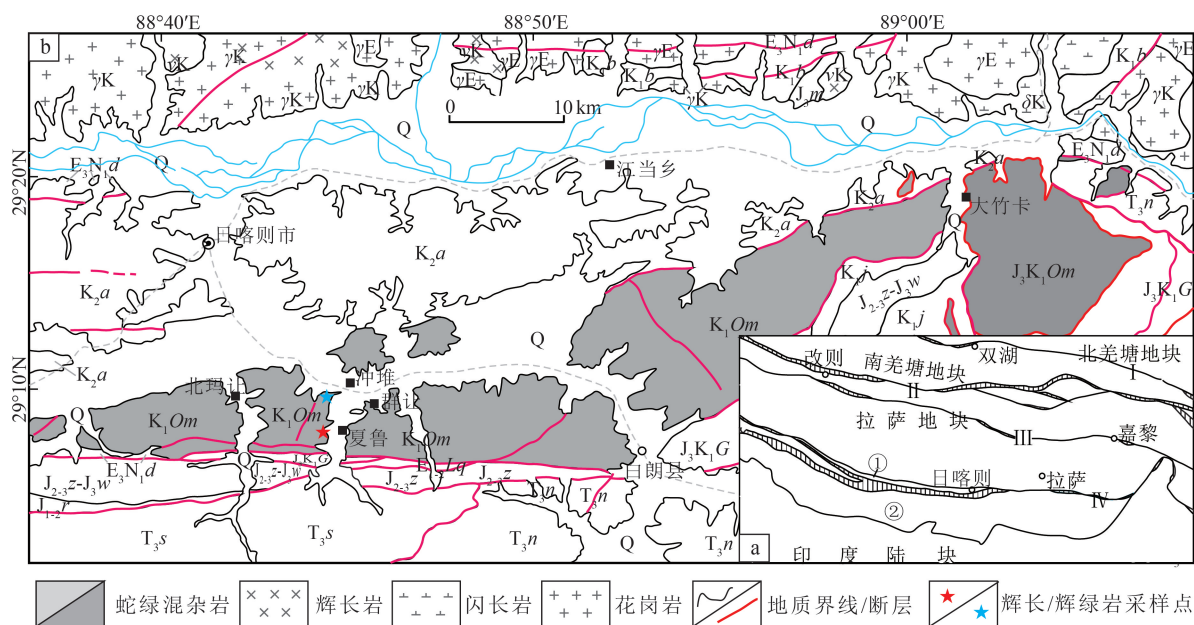


图1 青藏高原构造格架(a)和日喀则地区区域地质图(b 据参考文献①修改)

Fig. 1 Tectonic frame work of Tibetan Plateau(a) and regional geological map of the Rikaze area(b)

a: I—龙木错-双湖蛇绿混杂岩带; II—班公湖-怒江蛇绿混杂岩带; III—狮泉河-永珠-嘉黎蛇绿混杂岩带; IV—雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带; ①—日喀则弧后盆地; ②—特提斯喜马拉雅带。b: T_3s —朗杰学岩群未热岩组; T_3n —涅如组; $J_{2-3}z$ —遮拉组; J_3K_1G —嘎学岩群; J_3w —维美组; K_{1j} —甲不拉组; K_{1b} —比马组; K_2a —昂仁组; E_3N_1d —旦师庭组; Q—第四系; K_1Om —早白垩世蛇绿岩; J_3K_1Om —晚侏罗世—早白垩世蛇绿岩; vK —白垩纪辉长岩; δK —白垩纪闪长岩; γK —白垩纪花岗岩; γE —古新世花岗岩

石化橄榄岩包围,并且颜色从浅灰色向白色过渡,岩石变形较强,揉皱发育,分别采集辉长岩与淡色辉长岩样品各2件。辉长岩为变余辉长结构(图2-a),辉石含量达60%~70%,斜长石在30%~40%之间,蚀变较强矿物以他形为主,辉石常见绿泥石化,斜长石绢云母化较强。岩石轻微碎裂岩化,常见近平行排列的细小裂隙,碎斑由辉石、斜长石及少量

磁铁矿组成,碎基矿物颗粒更细小,主要由绿泥石、绢云母化的辉石及斜长石残晶组成。

辉绿岩在夏鲁以北冲堆村南国道旁呈岩席状产出,共采集6件样品,呈灰绿色,块状构造,坚硬致密,节理极发育,可见明显的球形风化。岩石为辉绿结构(图2-b),斜长石含量约为65%,自形程度较好,仅轻微绢云母化;辉石含量约为35%,以他形

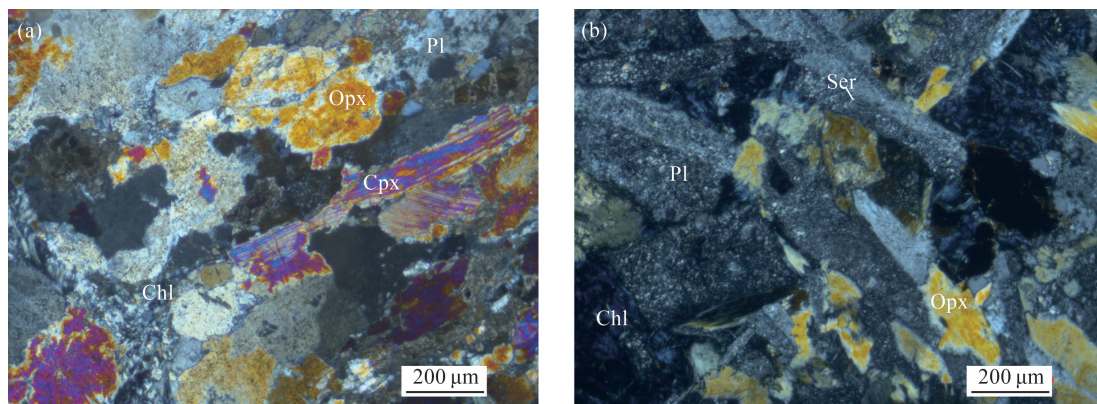


图2 夏鲁辉长岩(a)与辉绿岩(b)镜下照片

Fig. 2 Micrographs of Xiaolu gabbro(a) and diabase(b)

Cpx—单斜辉石; Opx—斜方辉石; Pl—斜长石; Chl—绿泥石; Ser—绢云母

粒状分布于斜长石格架内, 主要为单斜辉石, 以绿泥石化为主, 常见辉石假象。岩石学特征显示, 辉长岩较辉绿岩经历了更强的蚀变作用。

3 分析方法

选择辉长岩 11XL-1 进行锆石 U-Pb 定年分析, 碎样和锆石挑选由河北省廊坊区域地质调查研究院地质实验室完成, 锆石阴极发光 (CL) 照相和 LA-ICP-MS 测年在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室完成。其中, 激光剥蚀系统为 Resonetics 公司生产的 RESOLUTIONM-50, 等离子质谱仪型号为 Agilent 7500a, 激光剥蚀斑束

直径为 31 μm , 频率为 8 Hz, 使用标准锆石 Temora (417 Ma) 进行校正, 详细分析方法见参考文献 [36]; 数据离线处理基于 ICPMSDataCal 软件^[37], 锆石 U-Pb 年龄谐和图绘制和年龄加权平均值计算采用 Isoplot/Ex_ver3 软件^[38], 分析结果见表 1。主量元素采用 X 射线荧光光谱分析法 (XRF) 在自然资源部西南测试中心完成, 分析误差小于 1%; 微量元素分析在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室采用酸溶法, 利用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 完成, 具体的分析流程见参考文献 [39], 分析精度优于 5%; 主量和微量元素分析结果见表 2。

表 1 夏鲁辉长岩 (11XL-1) 锆石 LA-ICP-MS U-Th-Pb 分析结果
Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb analytical results of Xialu gabbro (11XL-1)

测点	含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值				年龄/Ma			
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ
01	7.00	124	314	0.4	0.1304	0.0092	0.0190	0.0005	124	8	121	3
02	36.5	1631	1285	1.3	0.1370	0.0069	0.0199	0.0004	130	6	127	3
03	12.34	630	432	1.5	0.1261	0.0076	0.0188	0.0005	121	7	120	3
04	9.30	374	344	1.1	0.1553	0.0094	0.0192	0.0005	147	8	123	3
05	14.69	563	553	1.0	0.1276	0.0078	0.0197	0.0005	122	7	126	3
06	24.2	1564	664	2.4	0.1289	0.0079	0.0200	0.0004	123	7	128	3
07	21.1	1281	697	1.8	0.1214	0.0061	0.0189	0.0004	116	6	121	2
08	20.2	812	719	1.1	0.1363	0.0074	0.0198	0.0004	130	7	127	2
09	26.2	1914	782	2.4	0.1312	0.0071	0.0192	0.0004	125	6	123	2
10	27.7	1941	778	2.5	0.1234	0.0073	0.0200	0.0004	118	7	127	3
11	13.25	655	460	1.4	0.1204	0.0078	0.0193	0.0004	115	7	123	3
12	35.6	3076	861	3.6	0.1303	0.0072	0.0199	0.0005	124	6	127	3
13	14.9	1008	427	2.4	0.1240	0.0080	0.0192	0.0005	119	7	122	3
14	10.26	402	390	1.0	0.1332	0.0089	0.0193	0.0004	127	8	123	3
15	13.10	656	420	1.6	0.1554	0.0129	0.0197	0.0006	147	11	126	4
16	22.9	1581	654	2.4	0.1086	0.0078	0.0198	0.0005	105	7	126	3
17	22.5	946	851	1.1	0.1069	0.0064	0.0189	0.0005	103	6	121	3
18	26.5	1017	951	1.1	0.1064	0.0063	0.0201	0.0005	103	6	128	3
19	15.4	1203	378	3.2	0.1328	0.0112	0.0195	0.0006	127	10	125	4
20	17.79	733	648	1.1	0.1090	0.0078	0.0193	0.0005	105	7	123	3
21	19.0	1019	638	1.6	0.1065	0.0070	0.0187	0.0004	103	6	119	3
22	5.31	209	188	1.1	0.1888	0.0180	0.0197	0.0006	176	15	126	4
23	17.0	944	556	1.7	0.1119	0.0077	0.0189	0.0004	108	7	121	3
24	21.2	1311	655	2.0	0.0927	0.0068	0.0189	0.0005	90.0	6.3	121	3

表 2 夏鲁基性岩主量、微量和稀土元素地球化学特征分析结果
Table 2 Major, trace elements and REE result of Xialu mafic rocks

样号	11XL-1	11XL-2	11XL-3	11XL-4	11XL-6	11XL-7	11XL-8	11XL-9	11XL-10	11XL-12
岩性	辉长岩	辉长岩	淡色辉长岩	淡色辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩
SiO ₂	47.49	48.91	47.53	46.36	50.52	51.29	52.29	50.51	51.07	50.87
Al ₂ O ₃	17.76	16.7	17.63	15.64	15.54	15.58	15.4	15.75	15.68	15.58
TFe ₂ O ₃	6.81	8.91	3.67	2.48	9.59	9.57	10.01	9.63	9.6	9.19
CaO	13.87	10.98	16.53	24.86	8.23	7.99	6.55	7.65	7.98	9.29
MgO	7.42	7.53	6.69	5.77	6.94	6.97	7.37	7.74	7.2	7.97
K ₂ O	0.38	0.24	1.03	0.01	0.22	0.55	0.67	0.46	0.55	0.42
Na ₂ O	1.67	2.78	1.94	0.057	4.26	3.73	3.21	3.33	3.5	2.41
TiO ₂	0.79	1.06	1.22	1.38	1.33	1.33	1.14	1.35	1.32	1.01
P ₂ O ₅	0.035	0.052	0.079	0.036	0.046	0.042	0.045	0.053	0.046	0.035
MnO	0.092	0.14	0.045	0.037	0.16	0.16	0.14	0.15	0.16	0.18
烧失量	3.62	2.61	3.56	3.36	3.15	2.75	3.13	3.35	2.86	3.01
总计	99.94	99.91	99.92	99.99	99.99	99.96	99.96	99.97	99.97	99.97
Mg [#]	71.7	66.3	80.9	84.4	62.8	62.9	63.2	65.2	63.6	66.9
σ	0.94	1.54	1.95	0.00	2.67	2.21	1.62	1.91	2.03	1.02
Sc	30.06	33.1	33.67	26.22	32.15	32.6	31.63	32.71	32.17	33.97
Ti	4383	6002	7004	8020	7615	7522	6310	7718	7530	5745
V	192.6	233.6	222.2	184.3	234.4	233.9	221.6	234.3	230.7	218.9
Cr	134.5	193.9	84.32	42.39	164.4	174.4	120.1	180.3	173.3	189.1
Co	30.92	32.1	16.58	11.86	32.04	31.94	29.73	32.11	31.32	33.61
Ni	68.15	75.83	53.81	54.01	64.77	62.69	46.9	64.81	59.2	59.71
Cu	8.379	8.093	8.732	11.09	15.96	27.35	9.913	31.75	25.16	37.38
Zn	33.41	55.18	20.09	21.05	59.53	61.11	39.07	59.36	59.6	82.74
Ga	12.51	13.59	12.81	7.503	14.7	15.71	14.48	16.15	15.44	14.78
Rb	1.985	1.151	6.726	0.057	0.875	2.085	3.049	1.666	1.94	1.826
Sr	708.8	780.4	564.8	21.03	138.2	140.6	124.1	129.7	140.4	119.6
Y	16.35	20.37	28.12	24.37	24.66	24.97	22.5	26.77	24.51	19.15
Zr	44.94	53.15	89.94	62.26	86.01	90.01	69.77	101.6	87.31	56.84
Nb	0.359	0.454	0.823	0.573	1.041	1.039	0.587	1.139	1.046	0.541
Cs	0.069	0.084	0.135	0.054	0.065	0.088	0.113	0.085	0.078	0.095
Ba	35.77	12.48	52.77	0.567	2.133	3.677	4.217	3.279	3.443	2.43
La	0.921	1.457	2.103	1.81	1.941	2.009	1.776	2.351	1.968	1.225
Ce	3.338	4.861	7.696	6.556	6.397	6.65	5.727	7.532	6.605	4.14
Pr	0.719	0.979	1.544	1.275	1.272	1.264	1.052	1.437	1.247	0.805
Nd	4.22	5.691	8.66	7.248	6.837	6.888	5.959	7.683	7.059	4.853
Sm	1.573	2.089	3.014	2.549	2.379	2.513	2.14	2.714	2.318	1.825
Eu	0.571	0.815	1.098	1.188	1.037	1.033	0.842	1.045	1.009	0.773
Gd	1.938	2.444	3.345	2.985	2.874	2.874	2.614	3.117	2.882	2.25

续表 2

样号	11XL-1	11XL-2	11XL-3	11XL-4	11XL-6	11XL-7	11XL-8	11XL-9	11XL-10	11XL-12
岩性	辉长岩	辉长岩	淡色辉长岩	淡色辉长岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩	辉绿岩
Tb	0.397	0.506	0.709	0.593	0.601	0.621	0.552	0.654	0.612	0.445
Dy	2.763	3.415	4.767	3.916	4.049	4.241	3.691	4.412	4.159	3.274
Ho	0.64	0.809	1.081	0.913	0.956	1.004	0.894	1.023	0.957	0.767
Er	1.792	2.246	3.009	2.608	2.778	2.88	2.556	3.018	2.752	2.136
Tm	0.279	0.327	0.439	0.398	0.405	0.434	0.402	0.46	0.412	0.324
Yb	1.809	2.137	3.055	2.597	2.742	2.957	2.499	2.96	2.698	2.167
Lu	0.253	0.323	0.448	0.372	0.409	0.439	0.382	0.474	0.43	0.335
Hf	1.265	1.628	2.356	1.757	2.353	2.485	1.95	2.768	2.422	1.611
Ta	0.04	0.055	0.081	0.056	0.102	0.095	0.071	0.109	0.102	0.054
Pb	0.151	0.22	0.122	3.411	0.269	0.318	0.174	0.213	0.298	0.589
Th	0.041	0.056	0.095	0.056	0.083	0.09	0.071	0.1	0.081	0.051
U	0.014	0.024	0.043	0.033	0.04	0.037	0.025	0.048	0.038	0.024
δEu	1.00	1.10	1.06	1.32	1.21	1.17	1.09	1.10	1.19	1.17
(La/Yb) _N	0.37	0.49	0.49	0.50	0.51	0.49	0.51	0.57	0.52	0.41
ΣREE	21.21	28.10	40.97	35.01	34.68	35.81	31.09	38.88	35.11	25.32

注: σ 为里特曼指数, $Mg^\# = 100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+})$, Fe^{2+} 以 $Fe_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3) = 0.15$ 估算, $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{1/2}$; 主量元素含量单位为%, 微量和稀土元素含量单位为 10^{-6}

4 分析结果

4.1 辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年

辉长岩样品 (11XL-1) 锆石为无色透明, 粒度变化于 30~200 μm 之间, 晶体呈自形-半自形, 多为粒状或短柱状, 少数为长柱状, 长宽比多为 1:1~2:1。阴极发光图像 (图 3) 显示, 锆石具板状环带或整体均匀, 个别具溶蚀结构。该样品 24 颗锆石的

24 个测点分析结果见表 1。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分布见图 3, 所有数据点位于谐和线及其附近, $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄变化于 $119 \pm 3 \sim 128 \pm 3$ Ma 之间, 年龄加权平均值为 123.8 ± 1.1 Ma (MSWD = 0.97); 相应测点的 Th、U 含量分别变化于 $124 \times 10^{-6} \sim 3076 \times 10^{-6}$ 和 $314 \times 10^{-6} \sim 1285 \times 10^{-6}$ 之间, 线性相关性较好, Th/U 值在 0.39~3.57 之间。因此, 123.8 ± 1.1 Ma 代表辉长岩结晶时代。

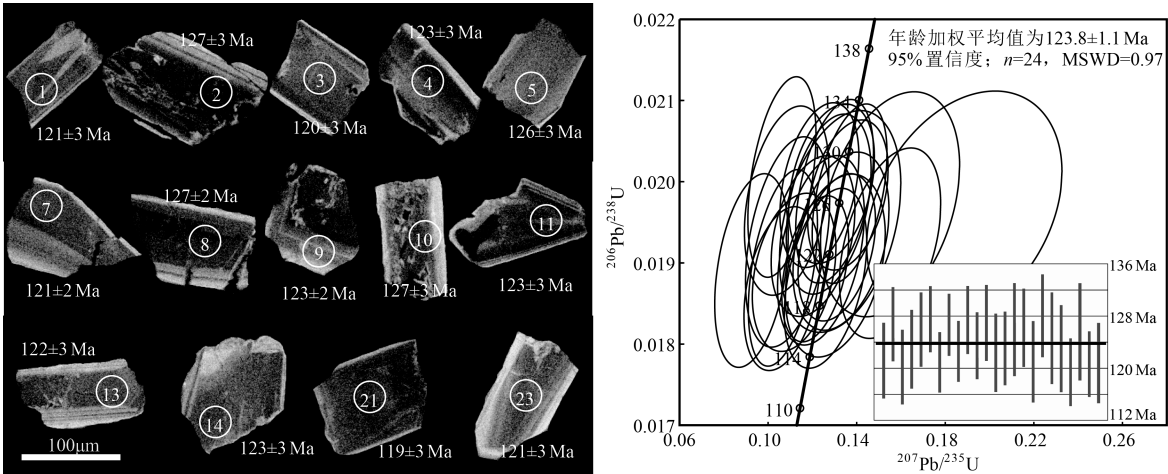


图 3 夏鲁辉长岩样品 (11XL-1) 锆石阴极发光 (CL) 图像和 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 3 CL images and U-Pb concordia diagram of zircons from Xialu gabbro (11XL-1)

4.2 地球化学特征

辉长岩和辉绿岩的里特曼指数(小于2.67)和 SiO_2 -Alk图解均表明其属于亚碱性系列,考虑蚀变影响,在高场强元素 $\text{Nb/Y-Zr/TiO}_2 \times 0.0001$ 图解(图4-a)中仍落入亚碱性玄武岩区域;在 SiO_2 - TFeO/MgO 图解(图4-b)中,介于拉斑与钙碱性之间。二者表现出不同的主量元素特征,体现为辉长岩元素含量变化较大,而辉绿岩仅小范围波动;但是微量元素二者又体现出相似的特征。

4.2.1 主量元素

辉长岩类 SiO_2 含量变化不大(46.36%~48.91%), TiO_2 含量较高(0.79%~1.22%), Al_2O_3 含量较高(15.64%~17.76%); MgO 含量为5.77%~7.53%, $\text{Mg}^\#$ 值较高(67~85)。随着 $\text{Mg}^\#$ 值的升高, SiO_2 、 MgO 、 TFe_2O_3 呈降低趋势, CaO 升高明显,而 TiO_2 先降低后升高, Al_2O_3 先升高后降低(图5)。淡色辉长岩的 CaO 含量明显高于均质辉长岩,其中样品11XL-4的 CaO 含量高达24.86%,低 SiO_2 与极低的 K_2O 、 Na_2O 表明其为异剥钙榴岩化所致^[22-33]。因此,2个淡色辉长岩可能是不同程度异剥钙榴岩化成因。淡色辉长岩因钙榴岩化作用, MgO 、 SiO_2 含量逐步降低, TFe_2O_3 丢失更强烈,因此表现出更高的 $\text{Mg}^\#$ 值,而活动性更强的 K_2O 、 Na_2O 含量与均质辉长岩相比变化更大。

辉绿岩类 SiO_2 含量较辉长岩高,在50.51%~52.29%之间,其他主量元素含量也相对稳定, TiO_2 含量在1.01%~1.35%之间, Al_2O_3 (15.40%~15.75%)、

CaO (6.55%~9.29%)含量较辉长岩低, TFe_2O_3 含量(9.57%~10.01%)则较辉长岩高, MgO 含量(6.94%~7.97%)稍高,但 $\text{Mg}^\#$ 值(63~67)略低。 $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ 含量(2.83%~4.48%)较辉长岩高, $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 值为0.05~0.21。

4.2.2 微量元素

辉长岩类随 $\text{Mg}^\#$ 值增大,Cr、V、Sr、Zr等微量元素呈无规律变化,正好与辉长岩部分主量元素含量大范围变化特征一致。辉长岩微量元素原始地幔标准化蛛网图略微左倾(图6-b),与N-MORB相似,Rb、Ba、Sr流体相容元素的含量变化较大,但含量基本没有超过富集型大洋中脊玄武岩(E-MORB),高场强元素(HFSE)Nb负异常,Ta、Ti、Zr、Hf无异常或异常不明显。样品11XL-4中Ba、Rb、Sr等大离子亲石元素(LILE)含量与其他样品不一致,反映其强蚀变特征。稀土元素总量在 $21 \times 10^{-6} \sim 41 \times 10^{-6}$ 之间,球粒陨石标准配分曲线轻微左倾(图6-a),与标准N-MORB近于平行,轻稀土元素(LREE)强烈亏损;Eu显示轻微正异常($\delta\text{Eu} = 1.00 \sim 1.32$)。

辉绿岩类微量元素含量较辉长岩稳定,在微量元素原始地幔标准化蛛网图与辉长岩相似(图6-b),Rb、Ba等LILE含量较辉长岩稳定、轻微正Sr异常,暗示辉长岩中Rb、Ba、Sr等元素的强烈变化可能为流体蚀变成因。稀土元素总量($25 \times 10^{-6} \sim 39 \times 10^{-6}$)较辉长岩稳定,球粒陨石标准配分曲线显示LREE亏损(图6-a),与N-MORB一致;同样显示

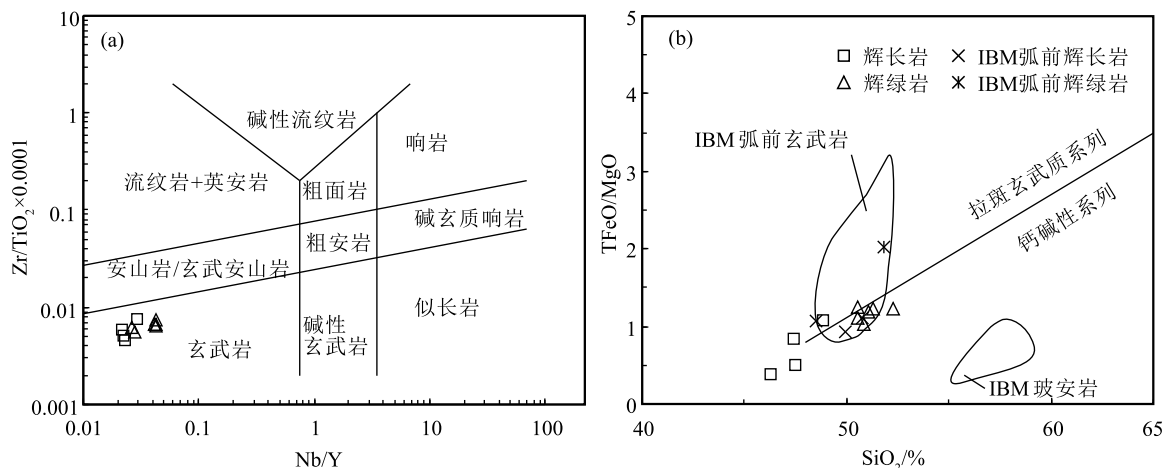


图4 夏鲁辉长岩与辉绿岩 $\text{Nb/Y-Zr/TiO}_2 \times 0.0001$ (a)和 SiO_2 - TFeO/MgO 图解

(IBM弧前辉长岩和辉绿岩数据参考文献[7,40])

Fig. 4 Diagrams of $\text{Nb/Y-Zr/TiO}_2 \times 0.0001$ (a) and SiO_2 - TFeO/MgO (b) of Xialu gabbros and diorites

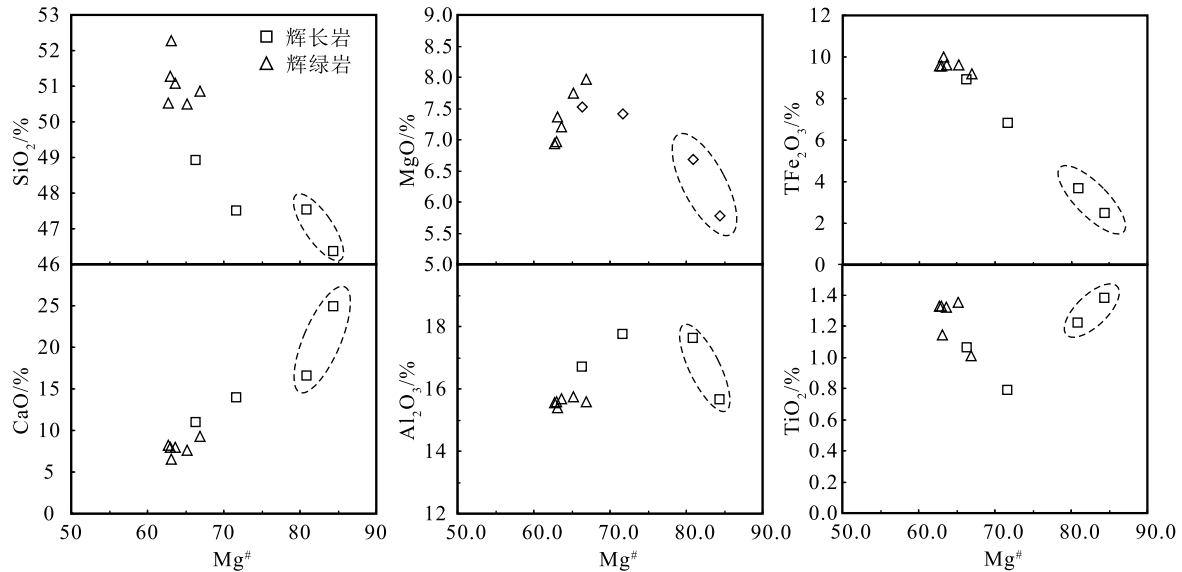

 图 5 夏鲁辉长岩和辉绿岩主量元素和 $Mg^\#$ 谐变图解(图例同图 4, 虚线为异剥钙榴岩化辉长岩)

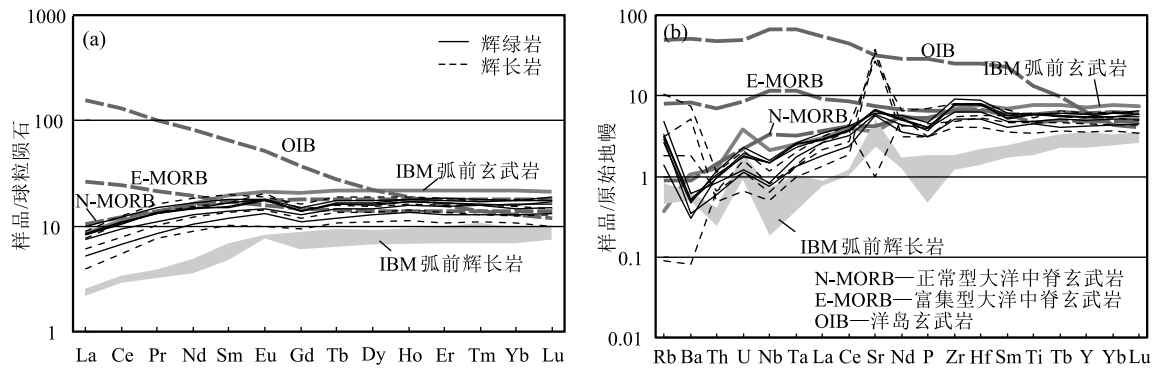
 Fig. 5 Major elements versus $Mg^\#$ diagrams for Xialu gabbros and diabases


图 6 夏鲁辉长岩与辉绿岩稀土元素分配形式(a)和微量元素蛛网图(b)(E-MORB、OIB、球粒陨石、原始地幔数据据参考文献[41]; IBM 弧前辉长岩和辉绿岩数据来源同图 4)

Fig. 6 Chondrite normalized rare earth elements pattern (a) and primitive mantle normalized trace elements pattern (b) of Xialu gabbros and diabases

轻微正 Eu 异常($\delta Eu = 1.09 \sim 1.21$)。

5 讨论

5.1 岩石成因

5.1.1 岩浆演化

玄武质岩浆上侵过程中除自身的结晶分异外, 还可能经历与其他岩浆混合及与围岩同化混染过程。大陆地壳中 Nb/U 值约等于 10, 而大洋玄武岩一般与原始地幔(30)相当^[42], 夏鲁地区辉长岩和辉绿岩 Nb/U 值在 17.4~28.1 之间, 靠近大洋玄武岩

一侧, 反映几乎没有大陆地壳物质影响, 辉长岩中 Nb/U 值更低, 应当与流体加入导致 U 含量增加有关; Ti、P 并无亏损, 同样表明没有大陆地壳物质混入。

M/Yb-Nb/Yb 图解(图略)显示 Ta、Zr 等 HFSE 位于地幔序列, LILE 中 Rb、Sr 等均偏离地幔序列, Ba 仅辉长岩偏离地幔序列, 活动性相对较低的 Th、La 则位于地幔序列边部。U 较 Th 活动性更强, 流体的混入将使岩石产生高的 U/Th 值和相对低的 Th 含量。所有夏鲁样品都有较低的 Th 含量,

其中辉长岩样品 U/Th 值为 0.34~0.59, 辉绿岩样品 U/Th 值为 0.35~0.48, 揭示辉长岩较辉绿岩具有更高的 U/Th 值及范围, 表明辉长岩较辉绿岩遭受了更强的流体交代影响, 与辉长岩遭受异剥钙榴岩化作用相符。洋底沉积物的 Th 含量较高且其在熔体中迁移性较强^[43~44], 即使岩浆源区有很少俯冲沉积物熔体也会使 Th 呈显著正异常^[45], 但夏鲁样品 Th 并没有表现出正异常, 表明受俯冲洋底沉积物影响轻微。

除 2 个异剥钙榴岩化的淡色辉长岩外, 夏鲁地区基性岩和辉长岩的 $Mg^\#$ 值在 62.9~71.7 之间, 较原始 MORB 熔体 (MgO 约为 10.5%, $Mg^\# > 72$) 稍低^[46], 且岩石具有高 Ni、Cr 含量, 反映岩浆经历的结晶分异作用不明显。辉长岩与辉绿岩各自 La/Sm 值随 La 含量轻微变化 (图 7-a), 辉绿岩较辉长岩稍高, 反映结晶分异是控制岩浆演化的主要因素, 并且辉长岩和辉绿岩的 $Mg^\#$ 值与各个主量元素线性关系良好 (图 5), 显示辉绿岩较辉长岩经历了更显著的岩浆演化。辉长岩和辉绿岩在 $CaO-CaO/Al_2O_3$ 图解 (图 7-b) 中显示以单斜辉石分离结晶演化为主, 二者良好的线性关系可能暗示二者为同源岩浆结晶分异所致; 此判断与岩相学观察结果一致, 即岩石中辉石含量变化较大。所有样品都表现出轻微的正 Eu 异常, 强烈的正 Sr 异常, 指示了斜长石堆晶过程; 其中淡色辉长岩 Sr 含量差异较大, 且 1 个样品 (11XL-4) 负 Sr 异常明显, 可能受后期蚀变影响所致^[47]。

5.1.2 岩浆源区

夏鲁辉长岩与辉绿岩的稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图与 N-MORB 近于平行 (图 6), Zr/Nb 值分别为 108.7~125.2 和 82.6~118.9, 指示二者原始岩浆来自亏损地幔部分熔融^[48], 而低 Rb/Sr 值和高 Zr/Ba 值 (大于 0.2) 也符合亏损地幔源区特征。另外, 大量 130~120 Ma 基性岩显示正的锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值, 也指示了早白垩世亏损地幔源区^[22]。白朗一带石榴辉石岩 (149 Ma) 的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 平均值为 +17.7^[49], 表明非常亏损的地幔在晚侏罗世已经存在。

在球粒陨石标准化 $(Ce/Yb)_N - (Dy/Yb)_N$ 图解中, 所有样品点都位于 N-MORB 一侧 (图 8-a), 明显不同于亏损重稀土元素的石榴子石源区玄武岩 (G-MORB), 指示夏鲁辉长岩和辉绿岩来自非石榴子石橄榄岩的地幔源区^[50]。辉长岩与辉绿岩 Ce/Yb 值相近, 为 1.85~2.54, 表明二者都来自小于 70 km 的尖晶石稳定区或经历了较高的熔融程度^[51], 与根据 Ce/Y 值 (0.20~0.28) 判别的来自尖晶石二辉橄榄岩源区一致。尖晶石二辉橄榄岩发生部分熔融时, 地幔残留体和熔体具有相似的 Sm/Yb 值, 而 La/Sm 值随着部分熔融程度的增高而降低^[52], 因此, 夏鲁辉长岩与辉绿岩都落入尖晶石二辉橄榄岩区域, 且 La/Sm 值变化范围较大, 而 Sm/Yb 值几乎没有变化 (图 8-b)。

5.2 地球动力学环境

5.2.1 日喀则蛇绿混杂岩时代

日喀则蛇绿混杂岩带硅质岩中放射虫的时代跨度较大^[28, 53~54], 而只有紧贴蛇绿岩套枕状熔岩之

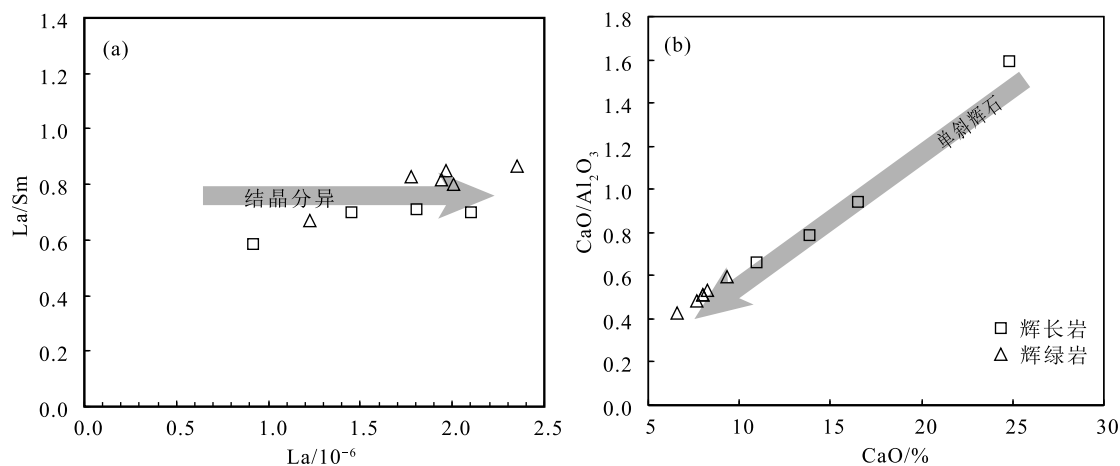


图 7 夏鲁辉长岩与辉绿岩 La-La/Sm 图解 (a) 和 CaO-CaO/Al₂O₃ 图解 (b)

Fig. 7 Diagrams of La-La/Sm (a) and CaO-CaO/Al₂O₃ (b) of Xialu gabbros and diabases

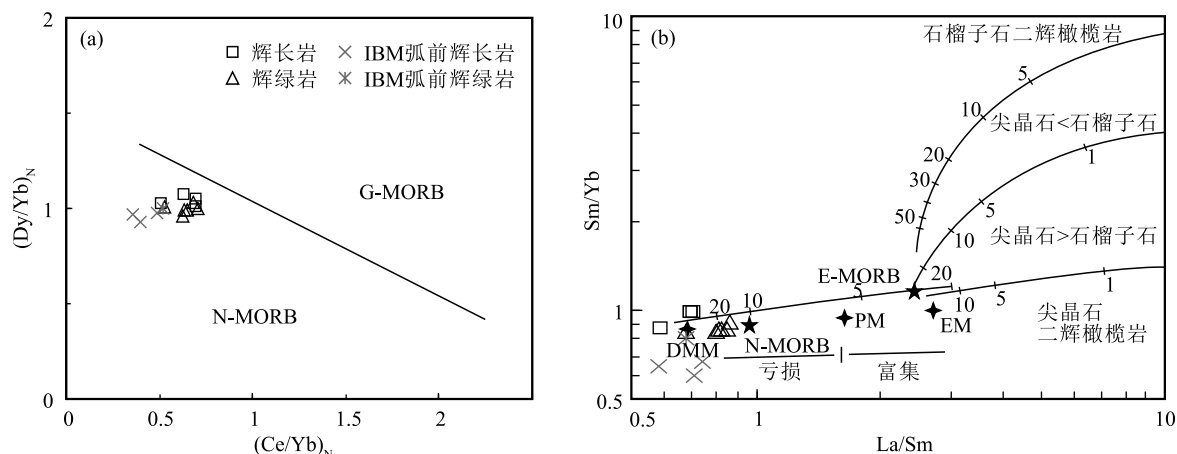


图 8 夏鲁辉长岩与辉绿岩 $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ – $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ (a) 与 La/Sm – Sm/Yb (b) 图解 (E-MORB、OIB、球粒陨石、原始地幔数据据参考文献[41]; IBM 弧前辉长岩和辉绿岩数据来源同图 4)

Fig. 8 Diagrams of $(\text{Ce}/\text{Yb})_N$ – $(\text{Dy}/\text{Yb})_N$ (a) and La/Sm – Sm/Yb (b) of Xialu gabbros and diabases

N-MORB—正常型洋中脊玄武岩; G-MORB—源自石榴子石相的洋中脊玄武岩; E-MORB—富集型洋中脊玄武岩; DMM—亏损地幔; EM—富集地幔; PM—原始地幔

上的放射虫硅质岩才具有洋壳盖层性质,属于蛇绿岩建造的一部分^[55],放射虫时代往往略晚于其下伏洋壳的形成时代。白朗西、冲堆、纳虾等地枕状熔岩的上覆硅泥质岩中,放射虫时代为早白垩世阿尔比期—晚白垩世土伦期^[53, 55],时代略晚于夏鲁辉长岩锆石 U–Pb 年龄 (123.8 ± 1.1 Ma),它们共同代表了一套早—晚白垩世的大洋岩石及盖层组合。

自 Göpel 等^[30] 获得日喀则蛇绿岩时代数据 (120 Ma) 以来,不同研究者对该蛇绿岩的时代进行了广泛研究。大竹卡玄武岩、辉长岩、异剥钙榴岩、石英闪长岩等锆石 U–Pb 年龄都集中在 128~124 Ma^[31–22],其上覆硅质岩中放射虫的时代为早白垩世 Barremian 期—Aptian 期^[28],与夏鲁辉长岩时代及上覆硅质岩时代特征一致。吉定辉长岩锆石 U–Pb 年龄在 132~125 Ma 之间^[22, 32, 56]。另外,群让蛇绿岩中的辉长岩锆石 U–Pb 年龄为 125.6 ± 0.9 Ma^[57];白朗蛇绿岩 3 个角闪岩中角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄集中在 128~123 Ma^[13];夏鲁异剥钙榴岩和冲堆辉长岩为 129~125 Ma^[22]。上述数据表明,日喀则蛇绿混杂岩中不同地方蛇绿岩形成于一个极短暂的时期,代表早白垩世 (130~120 Ma) 一次快速的大规模岩浆作用。

5.2.2 夏鲁辉长岩及辉绿岩 N-MORB 特征

夏鲁辉长岩与辉绿岩在微量元素蛛网图及稀土元素球粒陨石配分图解中都表现出 N-MORB

特征 (图 6)。在 Zr – Zr/Y 图解 (图 9-a) 中,几乎所有辉长岩与辉绿岩投点都落入大洋中脊玄武岩 (MORB) 区域,仅部分落入火山弧玄武岩 (VAB) 与 MORB 共有区域;在 $\text{Ti}/10000$ – V 图解 (图 9-c) 和 Th – $\text{Hf}/3$ – Ta 图解 (图 9-c) 中,投点则落入 N-MORB 区域;在 $\text{Zr}/4$ – $\text{Nb} \times 2$ – Y 图解 (图 9-d) 中,均落入 N-MORB 和岛弧玄武岩 (IAB) 区域。尽管夏鲁辉长岩和辉绿岩样品 Nb、Ta 相对典型的 N-MORB 亏损,但 Ta 的相对含量仍大于 Th, Nb、Ta 相对 Th 并不存在亏损, Th/Ta 值为 $0.81 \sim 1.17$, 小于 1.6, 位于 MORB 的 Th/Ta 值范围^[62];同时, Nb、Ta 含量更接近 N-MORB 含量 (2.33×10^{-6} 和 0.132×10^{-6}), 明显不同于岛弧玄武岩 (48.0×10^{-6} 和 2.70×10^{-6})^[41]。HFSE 相对 LILE 的明显亏损是与俯冲相关岩浆岩最本质的标志,但夏鲁样品并没有 HFSE 明显亏损的特征 (图 6-b), 因此夏鲁辉长岩和辉绿岩具有 N-MORB 特征是无疑的。

5.2.3 日喀则早白垩世 MORB 型基性岩的流体影响

日喀则蛇绿混杂岩带中 130~120 Ma 基性岩大部分具 N-MORB 特征,且出露最广泛,除夏鲁地区外,在大竹区、白朗、群让、杯玛让、吉定、洞拉村等地都有分布^[4, 18, 33, 63]。尽管它们都为 N-MORB 特征,但部分样品具 Nb、Ta、Ti 负异常,且亏损程度差异较大,可能与不同地幔源区遭受俯冲组分交代

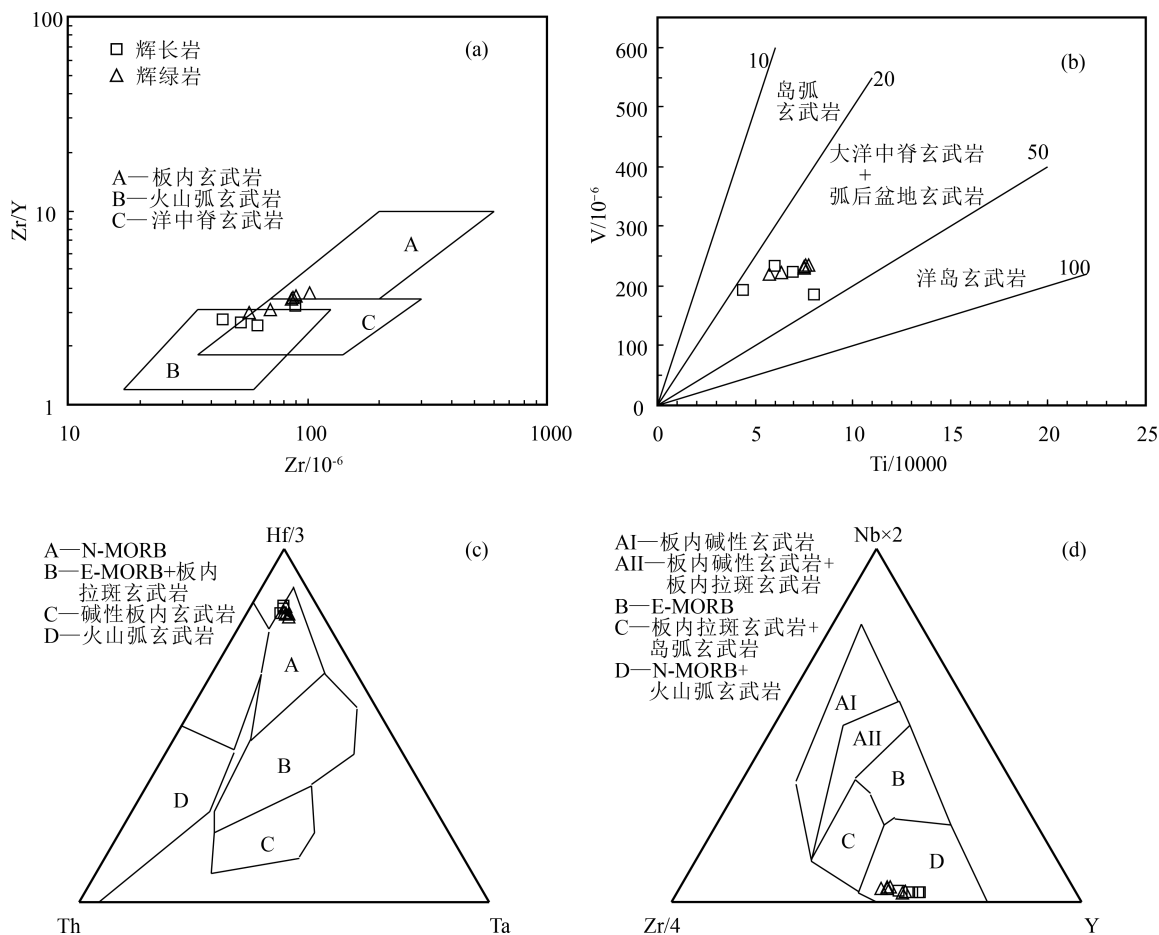


图9 夏鲁辉长岩与辉绿岩 $Zr-Zr/Y$ (a)、 $Ti/10000-V$ (b)、 $Th-Hf/3-Ta$ (c) 和 $Zr/4-Nb*2-Y$ (d) 图解^[58-61]

Fig. 9 Diagrams of $Zr-Zr/Y$ (a), $Ti/10000-V$ (b), $Th-Hf/3-Ta$ (c) and $Zr/4-Nb*2-Y$ (d) of Xialu gabbros and diabases

程度差异有关^[63],与日喀则蛇绿混杂岩中地幔橄榄岩在 130 ~ 120 Ma 普遍经历流体交代作用相符^[18, 22, 33]。MORB 和洋岛玄武岩 (OIB) 及大洋玄武岩的 La/Nb 值小于 1.4, Ni 含量大于 30×10^{-6} , IAB 的 La/Nb 值大于 1.4^[64]。N-MORB 型夏鲁辉长岩和辉绿岩的 La/Nb 值在 1.86 ~ 3.21 之间,而 Ni 含量为 $54 \times 10^{-6} \sim 76 \times 10^{-6}$,显示其兼具大洋及岛弧玄武岩特征,指示俯冲组分的影响。

K、Rb、U、Ba、Sr、Pb 等流体相容元素在日喀则蛇绿混杂岩部分基性岩中显示富集特征,同样暗示其源区遭受俯冲组分影响^[65]。在低温条件下, Th 活动性较低,只有俯冲到一定深度时, Th 才会汇聚在俯冲组分中^[66]。日喀则蛇绿岩中所有 130 ~ 120 Ma 的 N-MORB 型基性岩的 $Nb/Yb-Th/Yb$ 图解 (图 10-a) 显示,大量岩石 Th 位于地幔演化序列中,表明其未遭受较深俯冲熔体的影响或仅有浅部

俯冲流体的加入。大竹卡、白朗、群让、杯玛让等地区的部分 N-MORB 型基性岩样品 Th 含量较高 (图 10-a),因落入大洋岛弧区域而被解释为弧后盆地或岛弧环境^[33, 63],同时也有较高的 Th/Ta 值 (大于 1.6),反映这些样品向岛弧玄武岩过渡,同时也揭示这些岩石来自交代地幔源区。Ba 是俯冲流体中最活跃的元素之一,首先进入俯冲流体中,因此 Ba/Th 值在一定程度上可描述浅部俯冲物质组成。日喀则蛇绿岩中基性岩 Ba/Th 值在 Th 含量较低的情况下显示较大的变化区间 (图 10-b),多数样品的 Ba/Th 值大于 N-MORB (52.5)^[41],表明遭受了俯冲流体影响。以大竹卡基性岩为例,大部分样品的 Ba/Th 值较高且变化范围较大^[33, 63],反映浅部低温俯冲组分特征^[66],推测为浅部俯冲流体中 Ba 的不均匀混入成因;仅少量样品有 Th 增加趋势,反映俯冲深度的逐步增加,与大竹卡 N-MORB 型基性岩

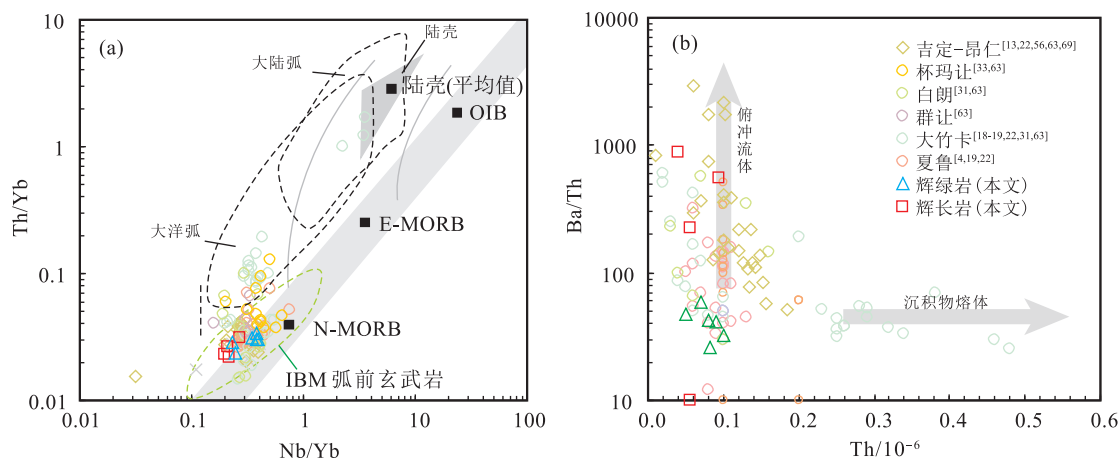


图 10 日喀则蛇绿岩早白垩世 MORB 型基性岩 Nb/Yb-Th/Yb 图解(a) 和 Th-Ba/Th 图解(b) (代号注释同图 6)

Fig. 10 Diagrams of Nb/Yb-Th/Yb (a) and Th-Ba/Th (b) for Early Cretaceous MORB-type metabasites in the Xigaze ophiolite

中见少量岛弧拉斑玄武岩相符,其 Nb、Ta、Ti、Zr 强烈负异常,不相容元素丰度与 Tonga 岛弧相似^[63]。

值得一提的是,日喀则 130~120 Ma N-MORB 型基性岩中的 Ce 和 Yb 呈良好的正相关性,并显示极低的 Ce/Yb 值(图 11),揭示这些岩石受大陆地壳流体的影响极弱,是一套与洋内弧相关的岩石组合^[67-68]。

5.2.4 早白垩世弧前扩张

雅鲁藏布江结合带 130~120 Ma 的洋壳残片记录了一次短暂且广泛的洋底伸展扩张事件^[14, 21, 69],日喀则蛇绿混杂岩(130~120 Ma)是该期扩张事件

的产物。日喀则蛇绿岩中陆壳物质含量不明显(图 11),表明其形成并非陆缘系统,而属于远离陆缘较远的大洋体系。那么,大洋变质核杂岩系统或洋内俯冲系统都是其可能成因。

大洋变质核杂岩系统或洋内俯冲系统都存在广泛的流体交代作用。如果仅是拆离作用造成的亏损地幔上涌的减压熔融,并不会会有俯冲熔体组分的参与,日喀则地区 130~120 Ma 的蛇绿岩不但在地幔橄榄岩中普遍存在俯冲流体的交代作用^[18, 33],并且部分玄武质岩石中具有沉积物熔体组分(图 10),大洋变质核杂岩模型不能解释地幔局部俯冲组分交代。杯玛让一带尽管识别出糜棱岩化超基性岩带^[70],但是并不能确定其糜棱岩化作用的时间,并且由南向北地幔橄榄岩、辉长辉绿岩、玄武岩及硅质岩盖层的格局更符合向北俯冲形成的弧前环境岩石单元分布^[40],其南部强变形的上侏罗统一下白垩统嘎学群^[12]更可能与洋内俯冲的变形作用有关。若日喀则 130~120 Ma 的蛇绿岩为大洋变质核杂岩残余,应存在大洋早期盖层被拆离断层破坏,因此蛇绿岩时代应稍晚于放射虫硅质岩的时代;但日喀则地区直接覆盖于枕状玄武岩之上的冲堆组放射虫硅质岩的时代为早一晚白垩世^[53, 55],与蛇绿岩套顶部硅质岩放射虫时代(Barremian 期—Aptian 期)一致^[28],更符合弧前盆地先有玄武质洋壳、后有盖层的序列。另外,日喀则蛇绿岩以 N-MORB 型基性岩为主,仅有少量类岛弧岩石组合被认为是大洋变质核杂岩的重要证据之一,但是如果

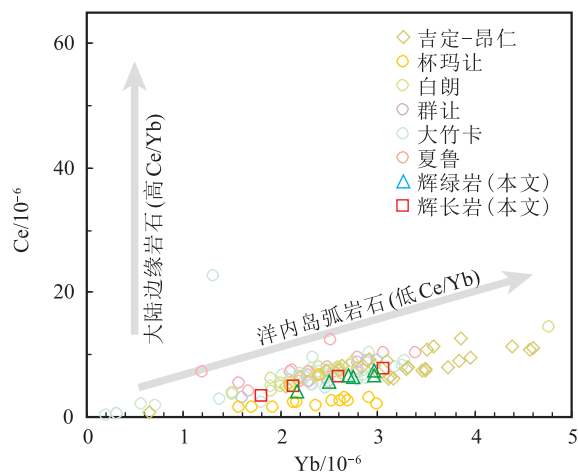


图 11 日喀则蛇绿岩早白垩世 MORB 型基性岩 Yb-Ce 图解(趋势线据参考文献[67],图例同图 10)

Fig. 11 Variations of Yb and Ce contents for Early Cretaceous MORB-type metabasites in the Xigaze ophiolite

初始俯冲被早期阻止,同样会出现仅有 MORB 型蛇绿岩的情况^[72],岛弧岩石组合则是洋内俯冲系统的有力证据。因此,笔者认为,日喀则蛇绿岩形成于洋内俯冲环境,并且主要保存了代表初始俯冲的弧前蛇绿岩组合。

在俯冲过程中,典型的洋中脊蛇绿岩组合大部分随俯冲隧道进入地幔,仅少量进入增生楔,只有俯冲带上叠型蛇绿岩才能大规模保存,弧前环境能更合理地解释日喀则地区大量 130~120 Ma 的蛇绿岩组合。日喀则蛇绿混杂岩中地幔橄榄岩(斜方辉橄岩、纯橄岩等)块体指示源区已经受到流体交代的影响^[63],地球化学成分从 MORB 至岛弧拉斑玄武岩(IAT)型,反映俯冲带物质不均一加入;超基性岩中浅色异剥钙榴岩的形成时代同样为 130~120 Ma^[22],反映了流体在 130~120 Ma 对地幔楔的改造作用;其岩石地球化学特征(U 型稀土元素配分曲线)与弧前盆地超基性岩类似^[18, 63, 71]。大量研究揭示,日喀则 N-MORB 型基性岩并非典型的扩张洋脊环境,轻稀土元素较典型 N-MORB 显示更亏损特征(图 6-a),如本文夏鲁辉长岩和辉绿岩(La/Yb)_N值(分别为 0.37~0.50 和 0.41~0.57)较典型 N-MORB(0.59)更低^[41],指示来自更亏损的地幔源区,与弧前玄武岩(FAB)强烈亏损地幔源区类似;其极低的 Th 含量与 IBM 弧前玄武岩极低的 Th 含量一致(图 10)。得几乡玻安质辉绿岩和枕状玄武岩是 130~120 Ma 之间玻安质洋壳的扩张产物^[10],其与地幔橄榄岩、异剥橄榄岩、块状辉长岩等组成典型弧前蛇绿岩套组合^[8]。另外,白朗—昂仁一带见大量石榴子石的斜长角闪岩的角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄为 132~123 Ma^[13, 73],指示变质底板是先成的洋壳受到热幔的烘烤而成,认为斜长角闪岩在形成不久即就位于洋内俯冲形成的弧前位置。根据 IBM 弧前蛇绿岩序列的认识,洋内弧弧前蛇绿岩演化持续时间在 10 Ma 左右^[7],而后演化为正常的成熟洋内弧,日喀则蛇绿岩时代主要集中在 130~120 Ma 之间,与弧前蛇绿岩的持续时间大致相当,明显大于大洋变质核杂岩中拆离断层 1~2 Ma 的发育时限^[74]。

类似西南太平洋区域洋内弧可能在特提斯构造域蛇绿岩中普遍残存^[6],而雅鲁藏布江结合带作为新特提斯大洋多岛弧盆系演化的记录之一^[75],是青藏高原较早识别出洋内弧的结合带之一。自

Aitchison 等^[15]提出雅鲁藏布江蛇绿混杂岩带存在一个中生代洋内俯冲系统以来,先后在得几、泽当、南迦巴瓦等地发现玻安岩^[8-11],其时代分别为晚三叠世、中晚侏罗世和早白垩世,表明雅鲁藏布江蛇绿混杂岩中残存多期次的洋内俯冲记录^[14]。其中,泽当弧岩浆岩年龄在 161~152 Ma 之间^[76],并识别出洋壳俯冲成因的埃达克岩^[77];扎达县夏普沟岛弧火山岩也可能属于洋内俯冲成因^[78],其相邻的早白垩世达巴蛇绿岩形成于与初始俯冲有关的弧前扩张中心^[79]。日喀则 130~120 Ma 的弧前蛇绿岩残片作为大洋初始俯冲的标志^[1-2],记录了雅鲁藏布江特提斯洋早白垩世早期又一次洋内俯冲的开始^[80]。

6 结 论

(1)夏鲁辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 123.8±1.1 Ma,与区域上日喀则蛇绿岩的形成时代一致。

(2)夏鲁辉长岩与辉绿岩表现为 N-MORB 特征,来自亏损地幔部分熔融,俯冲组分加入极少,而日喀则 130~120 Ma 的 MORB 型基性岩遭受俯冲组分影响不一。

(3)日喀则 130~120 Ma 蛇绿岩形成于洋内俯冲系统,其包含弧前地幔橄榄岩、弧前基性岩、玻安岩及少量弧岩浆岩,代表雅鲁藏布江新特提斯洋一次洋内俯冲的开始。

致谢:潘桂棠老师一直从事青藏高原大地构造研究,并在基础地质调查成果基础上提炼出“多岛弧盆系理论”,成为研究青藏高原特提斯演化的基石之一。今年是他 80 寿辰,编写此文感谢潘老师一直以来在工作中的指导和帮助。感谢审稿专家的宝贵意见。野外工作得到中国地质调查局成都地质调查中心驾驶员陈宁的帮助。

参考文献

- [1] Dai J G, Wang C S, Hébert R, et al. Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleotethys? [J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(1): 232-243.
- [2] 郎兴海,唐菊兴,邓煜霖,等.西藏拉萨地块南缘雄村矿集区首次发现早石炭世辉长岩:古特提斯洋的残留? [J]. *地球学报*, 2017, 38(5): 745-753.
- [3] Xia B, Chen G W, Wang R, et al. Seamount volcanism associated with the Xigaze ophiolite, Southern Tibet [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 396-405.
- [4] 李文霞,赵志丹,朱弟成,等.西藏雅鲁藏布蛇绿岩形成构造环境的

- 地球化学鉴别[J]. 岩石学报, 2012, 28(5): 1663-1673.
- [5] Dai J G, Wang C S, Li Y L. Relicts of the Early Cretaceous seamounts in the central-western Yarlung Zangbo Suture Zone, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 25-37.
- [6] Reagan M K, Ishizuka O, Stern R J, et al. Fore-arc basalts and subduction initiation in the Izu - Bonin - Mariana system [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, 11, Q03X12. doi: 10.1029/2009GC002871.
- [7] Ishizuka O, Tani K, Reagan M K, et al. The timescales of subduction initiation and subsequent evolution of an oceanic island arc [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 306(3/4): 229-240.
- [8] 陈根文, 夏斌, 钟志洪, 等. 西藏得儿蛇绿岩体中玻安岩的地球化学特征及其地质意义[J]. *矿物学报*, 2003, 23(1): 91-96.
- [9] 郑来林, 耿全如, 欧春生, 等. 藏东南迦巴瓦地区雅鲁藏布江蛇绿混杂岩中玻安岩的地球化学特征和地质意义[J]. *地质通报*, 2003, 22(11/12): 8-11.
- [10] Dai J G, Wang C S, Polat A, et al. Rapid forearc preading between 130 and 120 Ma: evidence from geochronology and geochemistry of the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2013, 172/173: 1-16.
- [11] Liu W L, Zhong Y, Sun Z L, et al. The Late Jurassic Zedong ophiolite: A remnant of subduction initiation within the Yarlung Zangbo Suture Zone(southern Tibet) and its tectonic implications[J]. *Gondwana Research*, 2020, 78: 172-188.
- [12] 吴浩若. 西藏南部下鲁硅岩晚侏罗世罩笼虫(放射虫)新材料[J]. *现代地质*, 2000, 14(3): 301-306.
- [13] Guilmette C, Hébert R, Wang C S, et al. Geochemistry and geochronology of the metamorphic sole underlying the Xigaze Ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone, South Tibet [J]. *Lithos*, 2009, 112: 149-162.
- [14] Hébert R, Bezard R, Guilmette C, et al. The Indus-Yarlung Zangbo ophiolites from Nanga Parbat to Namche Barwa syntaxes, southern Tibet: First synthesis of petrology, geochemistry, and geochronology with incidences on geodynamic reconstructions of Neo-Tethys[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 377-397.
- [15] Aitchison J C, Zhu B D, Davis A M, et al. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, (183): 231-244.
- [16] Dupuis C, Hébert R, Dubois-Côté V, et al. The Yarlung Zangbo Suture Zone ophiolitic melange(southern Tibet) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 937-960.
- [17] Bezard R, Hébert R, Wang C S, et al. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Lithos*, 2011, 125: 347-367.
- [18] Xia B, Yu H J, Chen G W, et al. Geochemistry and tectonic environment of the Dagzhuka ophiolite in the Yarlung - Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geochemical Journal*, 2003, 37: 311-324.
- [19] Zhang S Q, Mahoney J J, Mo X X, et al. Evidence for a Widespread Tethyan Upper Mantle with Indian - Ocean - Type Isotopic Characteristics[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(4): 829-858.
- [20] Xiong Q, Griffin W L, Zheng J P, et al. Southward trench migration at ~130-120 Ma caused accretion of the Neo-Tethyan forearc lithosphere in Tibetan ophiolites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 438: 57-65.
- [21] 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 等. 雅鲁藏布蛇绿岩——事实与臆想[J]. *岩石学报*, 2014, 30(2): 293-325.
- [22] Liu T, Wu F Y, Zhang L L, et al. Zircon U-Pb geochronological constraints on rapid exhumation of the mantle peridotite of the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2016, 443: 67-86.
- [23] 刘飞, 连东洋, 牛晓露, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段东波 MORB 型均质辉长岩的大洋核杂岩成因[J]. *地球科学*, 2018, 43(4): 952-974.
- [24] 潘桂棠, 王立全, 李兴振, 等. 青藏高原区域构造格局及其多岛弧盆系的空间配置[J]. *沉积与特提斯地质*, 2001, 21(3): 1-26.
- [25] 王立全, 朱同兴. 青藏高原及邻区地质图说明书(1: 1500000) [M]. 北京: 地质出版社, 2013: 1-319.
- [26] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 东特提斯地质构造形成演化 [M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-100.
- [27] 吴浩若. 西藏南部和地中海西部白垩纪中期放射虫化石的对比[J]. *微体古生物学报*, 2010, 27(4): 299-304.
- [28] Ziabrev S V, Aitchison J C, Abrajvitch A V, et al. Precise radiolarian age constraints on the timing of ophiolite generation and sedimentation in the Dazhuqu terrane, Yarlung - Tsangpo suture zone, Tibet [J]. *Journal of the Geological Society*, 2003, 160: 591-599.
- [29] 朱杰, 杜远生, 刘早学, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段中生代放射虫硅质岩成因及其大地构造意义[J]. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(12): 1131-1139.
- [30] Göpel C, Allègre C J, Xu R H. Lead isotopic study of the Xigaze ophiolite(Tibet) the problem of the relationship between magmatites (gabbros, dolerites, lavas) and tectonites (harzburgites) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, 69: 301-310.
- [31] Malpas J, Zhou M F, Robinson P T, et al. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites, Southern Tibet [J]. *Geological Society*, 2003, 218: 191-206.
- [32] 王冉, 夏斌, 周庆国, 等. 西藏吉定蛇绿岩中辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 114-117.
- [33] Huot F, Hébert R, Varfalvy V, et al. The Beimarang mélange(southern Tibet) brings additional constraints in assessing the origin, metamorphic evolution and obduction processes of the Yarlung Zangbo ophiolite[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 21: 307-322.
- [34] 牛晓露, 赵志丹, Depaolo D J, 等. 西藏日喀则地区德村-昂仁蛇绿岩内基性岩的元素与 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学及其揭示的特提斯地幔域特征[J]. *岩石学报*, 2006, 22(12): 2875-2888.
- [35] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世—早白垩世岩浆作用推论[J]. *岩石学报*, 2008, 24(2): 225-237.
- [36] Huang F, Xu J F, Zeng Y C, et al. Slab Breakoff of the Neo-Tethys Ocean in the Lhasa Terrane Inferred From Contemporaneous Melting of the Mantle and Crust [J]. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2017, 18(11): 4074-4095.
- [37] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace

- elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. *Chemical Geology*, 2008, 257(1/2): 34-43.
- [38] Ludwig K R. ISOPLOT 3. 00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronology Center, California, Berkeley, 2003: 1-77.
- [39] 刘颖, 刘海臣, 李献华. 用 ICP-MS 准确测定岩石样品中的 40 余种微量元素[J]. *地球化学*, 1996, 25(6): 552-558.
- [40] Reagan M K, McClelland W C, Girard G, et al. The geology of the southern Mariana fore-arc crust: Implications for the scale of Eocene volcanism in the western Pacific [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 380: 41-51.
- [41] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[J]. *Geological Society Special Publication*, 1989, 42: 313-345.
- [42] Sylvester P J, Campbell I H, Bowyer D A. Niobium/Uranium Evidence for Early Formation of the Continental Crust[J]. *Science*, 1997, 275: 521-523.
- [43] Pthman B D, White W M, Patchett J. The geochemistry of marine sediments, island arc magma genesis, and crust-mantle recycling[J]. *Earth Planetary Science Letters*, 1989, 94: 1-21.
- [44] 李曙光. 蛇绿岩生成构造环境的 Ba-Th-Nb-La 判别图[J]. *岩石学报*, 1993, 9(2): 146-157.
- [45] Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle[J]. *Chemical Geology*, 1998, 145: 325-394.
- [46] Niu Y L. The Meaning of Global Ocean Ridge Basalt Major Element Compositions[J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57(11/12): 2081-2104.
- [47] 李昌年. 火成岩微量元素地球化学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 1-195.
- [48] Roex A P, Dick H J B, Erlank A J, et al. Geochemistry, mineralogy and petrogenesis of lavas erupted along the southwest Indian Ridge between the Bouver triple junction and degree east [J]. *Journal of Petrology*, 1983, 24(3): 267-318.
- [49] 赵佳楠, 许志琴, 梁凤华, 等. 西藏日喀则地区白朗蛇绿岩中石榴辉石岩的岩石地球化学、年代学及其构造意义[J]. *岩石学报*, 2015, 31(12): 3687-3700.
- [50] Saccani E. A new method of discriminating different types of post-Archean Ophiolitic Basalts and Their Tectonic Significance Using Th-Nb and Ce-Dy-Yb Systematics[J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6(4): 481-501.
- [51] 肖龙, 徐义刚, 梅厚钧, 等. 云南宾川地区峨眉山玄武岩地球化学特征: 岩石类型及随时间演化规律[J]. *地质科学*, 2003, 38(4): 478-494.
- [52] Aldanmaz E, Pearce J A, Thirlwall M F, et al. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, post-collision volcanism in western Anatolia, Turkey[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, 102: 67-95.
- [53] 吴浩若. 西藏南部白垩纪深海沉积地层——冲堆组及其地质意义[J]. *地质科学*, 1984, 1: 26-33.
- [54] Matsuoka A, Yang Q, Kobayashi K, et al. Jurassic-Cretaceous radiolarian biostratigraphy and sedimentary environments of the Ceno-Tethys records from the Xialu Chert in the Yarlung-Zangbo Suture Zone, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2002, 20(3): 277-287.
- [55] 王玉净, 舒良树. 中国蛇绿岩带形成时代研究中的两个误区[J]. *古生物学报*, 2001, 40(4): 529-532.
- [56] Ngai Chan G H, Aitchison J C, Crowley Q G, et al. Michael P. Searle A, U-Pb zircon ages for Yarlung Tsangpo suture zone ophiolites, southwestern Tibet and their tectonic implications [J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 719-732.
- [57] 李建峰, 夏斌, 刘立文, 等. 西藏群让蛇绿岩辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(2): 294-298.
- [58] Pearce J A, Norry M J. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb Variations in volcanic rocks [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 69: 33-37.
- [59] Shervais J W. Ti-V plots and the petrogenesis of modern and ophiolitic lavas[J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1982, 59: 110-118.
- [60] Wood D A. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1980, 50(1): 11-30.
- [61] Meschede M. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram[J]. *Chemical Geology*, 1986, 56: 207-218.
- [62] McKenzie D, O'Nions R K. Partial melt distributions from inversion of rare earth element concentrations[J]. *Journal of Petrology*, 1991, 32(5): 1021-1091.
- [63] Dubois-Côté V, Hébert R, Dupuis C, et al. Petrological and geochemical evidence for the origin of the Yarlung Zangbo ophiolites, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 265-286.
- [64] Condie K C. Mafic crustal xenoliths and the origin of the lower continental crust[J]. *Lithos*, 1999, 46: 95-101.
- [65] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 1984, 25(4): 956-983.
- [66] Pearce J A, Stern R J, Bloomer S H, et al. Geochemical mapping of the Mariana arc-basin system: Implications for the nature and distribution of subduction components[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(7): p. Q07006. doi: 10.1029/2004GC000895.
- [67] El-Rahman Y A, Polat Y, et al. Geochemistry and tectonic evolution of the neoproterozoic wadi ghadir ophiolite, eastern desert, Egypt[J]. *Lithos*, 2009, 113(1/2), 158-178.
- [68] Hawkesworth C J, Gallagher K, Hergt J M, et al. Mantle and slab contributions in arc magmas [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1993, 21: 175-204.
- [69] 李源, 杨经绥, 裴先治, 等. 秦岭造山带早古生代蛇绿岩的多阶段演化: 从岛弧到弧间盆地[J]. *岩石学报*, 2012, 28(6): 1896-1914.
- [70] 夏斌, 王冉, 陈根文. 西藏仁布蛇绿岩壳层熔岩的岩石地球化学及成因[J]. *高校地质学报*, 2003, 9(4): 638-647.
- [71] Chen G W, Xia B. Platinum-group elemental geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 406-422.

- [72] Whattam S A, Stern R J. The 'subduction initiation rule': a key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2011, 162: 1031-1045.
- [73] Guilmette C, Hébert R, Dostal J, et al. Discovery of a dismembered metamorphic sole in the Saga ophiolitic mélange, South Tibet: Assessing an Early Cretaceous disruption of the Neo-Tethyan supra-subduction zone and consequences on basin closing [J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(2): 398-414.
- [74] Canales J P. Small-Scale Structure of the Kane Oceanic Core Complex, Mid-Atlantic Ridge 23° 30' N, from Wave Form Tomography of Multichannel Seismic Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(21): 1-6.
- [75] 潘桂棠, 王立全, 尹福光, 等. 从多岛弧盆系研究实践看板块构造登陆的魅力[J]. *地质通报*, 2004, 23(9/10): 933-939.
- [76] McDermid I R C, Aitchison J C, Davis A M, et al. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo suture zone, southeastern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2002, 187: 267-277.
- [77] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当英云闪长岩的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征: 特提斯洋内俯冲的新证据[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 37(4): 442-450.
- [78] 许荣科, 郑有业, 冯庆来, 等. 西藏札达县夏浦沟的放射虫硅质岩和岛弧火山岩: 新特提斯洋内俯冲体系的记录? [J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2009, 34(6): 884-894.
- [79] 程晨, 夏斌, 郑浩, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段达巴蛇绿岩年代学、地球化学特征及其构造意义[J]. *地球科学*, 2018, 43(4): 975-990.
- [80] Butler J P, Beaumont C. Subduction zone decoupling/retreat modeling explains south Tibet (Xigaze) and other supra-subduction zone ophiolites and their UHP mineral phases[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 463: 101-117.
- ①西藏自治区区域地质调查大队. 中华人民共和国 1:25 万区域地质图: 日喀则幅. 2004.