

# 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据

刘 飞<sup>1,2</sup> 杨经绥<sup>1</sup> 陈松永<sup>1</sup> 李兆丽<sup>1</sup> 连东洋<sup>1,3</sup> 周文达<sup>1,3</sup> 张 岚<sup>4</sup>

(1. 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地, 江西 南昌 330013; 3. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 4. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 普兰蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带西段, 面积约 650 km<sup>2</sup>, 主要由方辉橄榄岩、含单辉方辉橄榄岩和透镜状纯橄岩组成, 缺失堆晶岩和枕状熔岩等洋壳端元。方辉橄榄岩中普遍发育辉绿岩和辉石岩脉, 地幔橄榄岩上部被块状玄武岩、玄武质火山碎屑岩、粉砂质泥岩、硅质岩和硅质灰岩覆盖。辉绿岩低 K、Ti, 球粒陨石标准化 REE 配分曲线具有 N-MORB 特征, 富集 LILE (K、Sr、Rb), 亏损 HFSE (U、Th、Nb),  $(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_i = 0.512904 \sim 0.512909$ ,  $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +8.6 \sim +8.7$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i = 0.704893 \sim 0.705310$ , 显示俯冲带弧后盆地环境的特征。对比前人研究, 认为雅鲁藏布江缝合带普遍存在洋内俯冲作用, 但开始俯冲的时间不同: 雅鲁藏布江缝合带中西段开始于早白垩世, 而东段开始于中侏罗世。

**关键词:** 雅鲁藏布江缝合带; 普兰蛇绿岩; 新特提斯; 辉绿岩; Sr-Nd-Pb 同位素

**中图分类号:** P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2013)03-0742-14

## 1 前 言

青藏高原南部的雅鲁藏布江缝合带被普遍认为是新特提斯洋壳的残余, 是印度板块和欧亚板块的界线<sup>[1,2]</sup>, 该缝合带向西经巴基斯坦向地中海延伸, 向东经南迦巴瓦构造结过云南转入缅甸, 在中国境内断续延伸近 2 000 km<sup>[3]</sup>。雅鲁藏布江缝合带是中国规模最大最新鲜的蛇绿岩带, 保留了大量洋内、洋陆俯冲、陆陆碰撞等特提斯洋演化信息, 并且发育中国最大的罗布莎铬铁矿床, 是寻找新的铬铁矿的前景区之一, 一直受到国内外学者的关注。尤其近年来在雅鲁藏布江缝合带的铬铁矿和地幔橄榄岩中发现金刚石、碳硅石、斯石英假象的柯石英, 及自然铁、镍等异常地幔矿物<sup>[4-12]</sup>, 指示地幔橄榄岩和铬铁矿形成于地幔深部 (>300 km), 改变了蛇绿岩铬铁矿浅部成因的观点, 引起了国际地质学界的广泛兴趣。然而对

于雅鲁藏布江蛇绿岩的成因和侵位还存在不同观点, 从最初形成于低速扩张的 MOR 环境<sup>[1]</sup>, 临近洋脊—转换断层的交叉环境<sup>[13]</sup>, 到先形成于 MOR 环境后受到 SSZ 环境叠加<sup>[3,14,15]</sup>, 以及全部形成于 SSZ 环境<sup>[16]</sup>等。由于雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩大部分被后期构造肢解, 或洋壳组分缺少, 不同区域可能残存的成分不同。

雅鲁藏布江缝合带 (YZSZ) 自萨嘎以西分为两支, 即达机翁—萨嘎蛇绿岩带 (北亚带) 和达巴—休古嘎布蛇绿岩带 (南亚带)<sup>[17]</sup>。前人对南亚带西段的普兰超镁铁岩体进行了地球化学和年代学研究, 认为地幔橄榄岩具有俯冲流体交代富集的亏损地幔特征<sup>[3,14,15,17,18]</sup>, 侵入地幔橄榄岩的基性岩脉锆石 U-Pb 年龄为 120~130 Ma<sup>[19,20]</sup>, Sm-Nd 同位素等时线年龄为  $(147 \pm 25)$  Ma<sup>[21]</sup>, 代表大洋扩张时代; 但万晓樵等 (2007) 根据雅鲁藏布江缝合带两侧的古生物环境认

收稿日期: 2013-01-27; 改回日期: 2013-04-15

基金项目: 本文得到国家行业专项 (SinoProbe-05-02)、国家自然科学基金重点项目 (40930313)、中国地质调查局工作项目 (1212011121263, 1212011121272)、国家自然科学基金创新群体项目 (40921001)、核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地项目 (NRE1204) 联合资助。

作者简介: 刘飞, 男, 1982 年生, 博士, 主要从事岩石大地构造和蛇绿岩的研究; E-mail: lfhy112@126.com。

为新特提斯洋至晚白垩世开始收缩<sup>[2]</sup>。本文通过普兰超镁铁岩体中的辉绿岩脉的岩石学、地球化学和 Sr、Nd、Pb 同位素研究,探讨雅鲁藏布江蛇绿岩形成的时代和构造环境。

## 2 区域地质背景

青藏高原是由印度板块北缘、拉萨地块、羌塘地块、松潘甘孜和西秦岭地块组成的复杂地体,被雅鲁藏布江、班公—怒江、金沙江、阿尼玛卿缝合带分隔<sup>[4]</sup>。雅鲁藏布江缝合带主体由晚侏罗世—早白垩世深海相至次深海相活动型碎屑岩、火山岩和蛇绿岩组成,晚白垩世碎屑岩复理石沉积及古近—新近纪磨拉石不整合于其上<sup>[23]</sup>,从北到南包括日喀则弧前盆地、雅鲁藏布江蛇绿岩带和增生楔。日喀则弧前盆地为晚白垩世至始新世复理石沉积岩,增生楔主要包括三叠纪—古近纪沉积<sup>[25, 26]</sup>。

雅鲁藏布江缝合带西段南亚带(达巴—休古嘎布)呈 NWW 展布,断续长约 400 km,宽 10~35 km,其中的蛇绿岩与晚三叠世—白垩世海相地层呈断层接触,或被新近系—第四系覆盖<sup>[7]</sup>。普兰(或拉昂错)蛇绿岩位于南亚带中段,东西长约 60 km,南北宽约 20 km,呈 NWW-SEE 向带状展布,总面积约 650

km<sup>2</sup>。岩体与围岩均为断层接触,西部北侧为三叠系海相碎屑岩;中部及东部北侧为侏罗系—白垩系砂板岩、硅质岩及中基性火山岩;西部南侧为三叠系硅质岩、玄武岩;东部南侧为前寒武系结晶岩系及新近系陆相磨拉石组合,与蛇绿岩呈构造接触,局部可见新近系砾岩不整合覆盖在蛇绿岩之上<sup>[14, 27]</sup>。

普兰蛇绿岩包括地幔橄榄岩和基性岩脉,在岩体边部两者被火山—沉积混杂岩覆盖,缺少典型的堆晶岩、枕状玄武岩和席状辉长辉绿岩岩墙群。地幔橄榄岩主要为方辉橄榄岩和少量含单斜方辉橄榄岩和纯橄岩,方辉橄榄岩中辉石和铬尖晶石显示强烈的高温韧性变形,定向性明显,走向 290°~340°,与超镁铁岩体走向一致,含单斜方辉橄榄岩和纯橄岩呈透镜状出露于方辉橄榄岩中(图 2);地幔橄榄岩与周围地层接触部位呈灰黑色,强烈的蛇纹石化和片理化,远离接触部位过渡为蛇纹石化逐渐减弱的透镜状、块状,显示构造接触;基性岩脉侵入于方辉橄榄岩中,主要为辉长辉绿岩、辉石岩,脉体宽度由数厘米至数米不等,NW 走向,局部可见冷凝边(图 3-e, 3-f);上覆的火山—沉积混杂岩主要为块状玄武岩、火山凝灰岩、放射虫硅质岩、硅质泥页岩和硅质灰岩、鲕状灰岩等。块状玄武岩多呈透镜状包裹于红

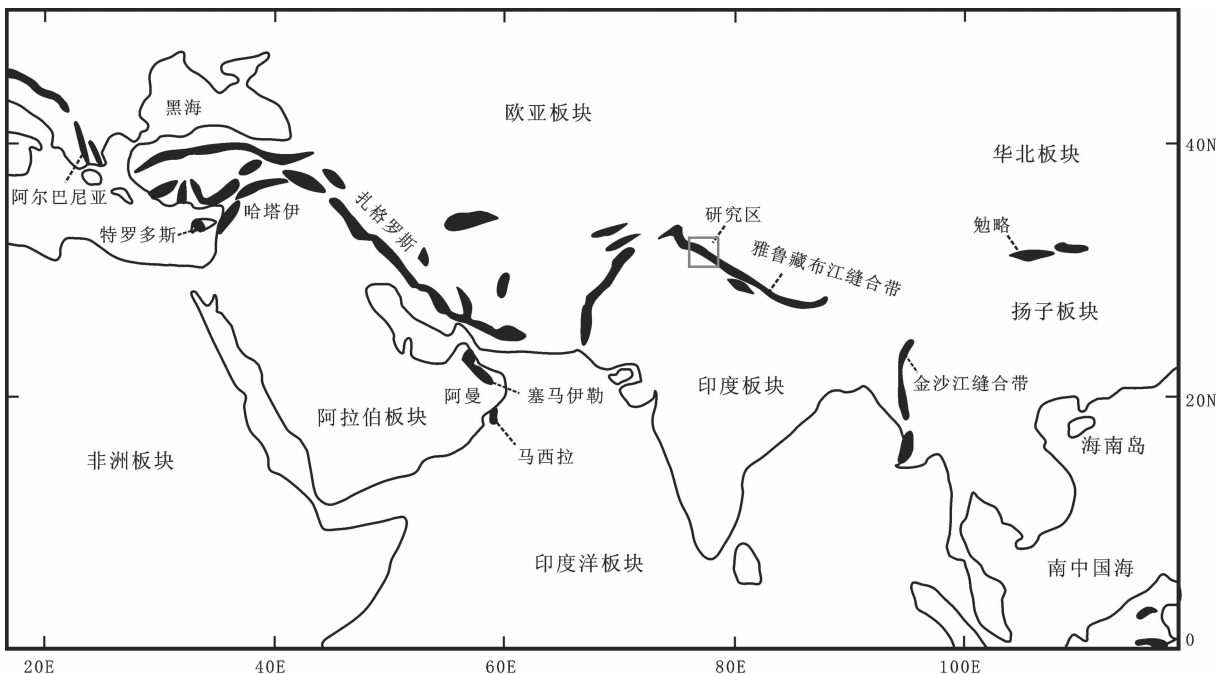


图 1 特提斯蛇绿岩分布简图(据参考文献[23]修改)

Fig.1 Generalized tectonic map showing ophiolites distribution along the Tethys suture

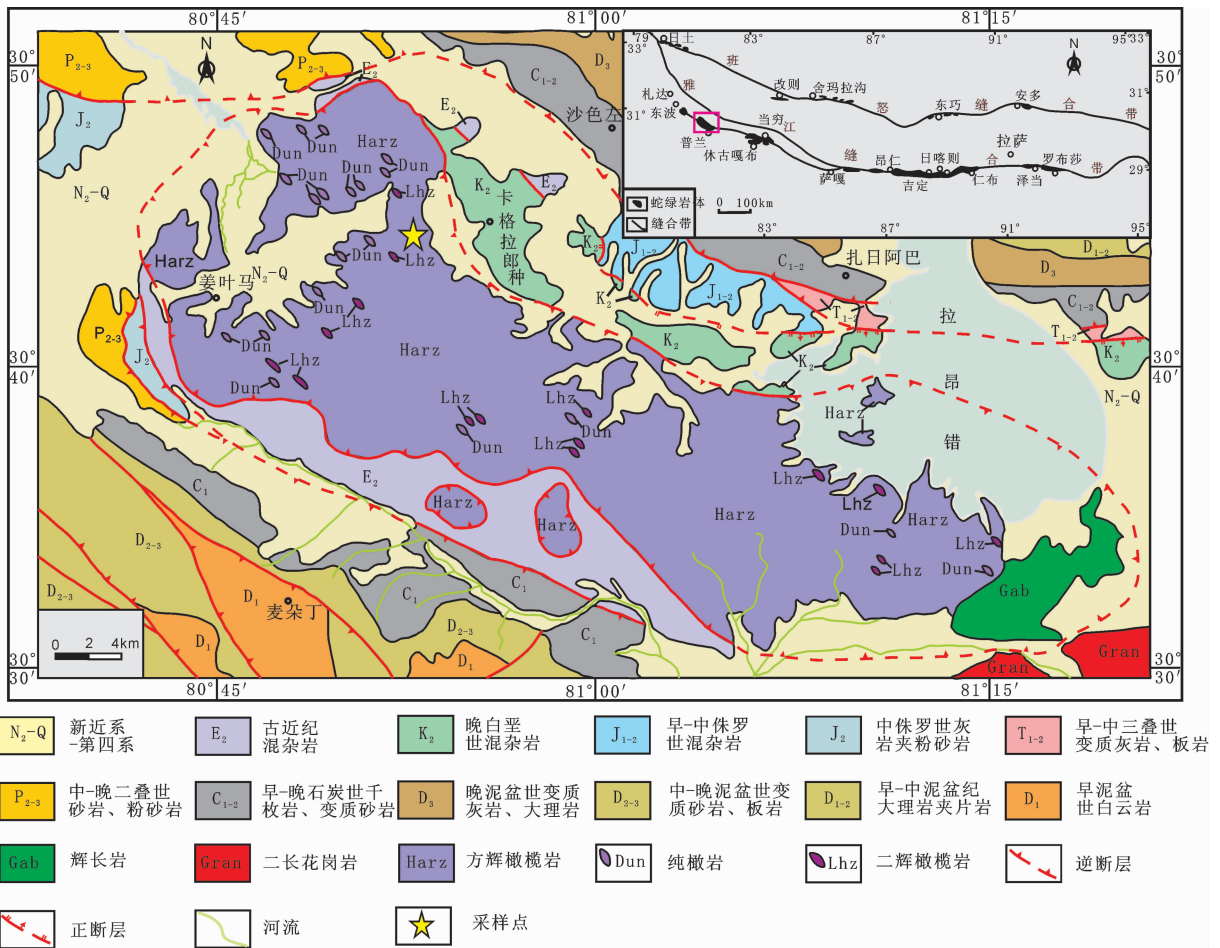


图2 普兰岩体区域地质简图<sup>[14]</sup>

Fig.2 Geological map of Purang massif in Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

色硅质岩中，或呈薄层状分布于地幔橄榄岩和硅质岩之间，气孔或杏仁状构造(图 3-a, 3-c);红褐色硅质岩，与硅质灰岩和硅质泥页岩密切共生，厚层状，块状构造，泥质含量较高过渡为硅质泥页岩，普遍层理明显，局部变形强烈(图 3-d);硅质灰岩表现为硅质和钙质条带相间分布(图 3-b)，或硅质呈网脉状分布于灰岩之中，硅质含量较低者逐渐过渡为灰岩，鲕粒发育。

### 3 样品测试及分析方法

测试样品采于普兰岩体西北部(图 2)，岩性为辉绿岩，样品号 C9，采样位置 N 30°44'48"，E 80°52'32"。辉绿岩侵入于弱蛇纹石化方辉橄榄岩中，走向 310°左右，露头不连续，宽 1~3m 不等，长约 150 m(图 3-e)，发育冷边，宽 20~20 cm(图 3-f)。风化面灰白色，新鲜面灰绿色，斑状结构，斑晶主要为斜

长石，他形一半自形宽板状，粒径 1 mm×3 mm~6 mm×8 mm，含量 5%~10%，聚片双晶发育，少量弱粘土化；基质间粒结构，辉绿结构，主要成分为斜长石(60%~65%)，局部粘土化，少量绢云母化，不规则排列的斜长石格架中充填他形一半自形的单斜辉石(20%~25%)和钛铁矿等矿物，辉石普遍发生角闪石化、绿泥石化、榴石化、钛铁矿化等(图 4)。

选取相对新鲜的样品磨制薄片，通过显微镜下的薄片观察进一步选择辉绿岩样品进行主、微量元素和 Sr、Nd、Pb 同位素测试。

辉绿岩的常量、微量元素和 Sr、Nd、Pd 同位素测试在澳实分析检测集团—澳实矿物实验室完成。常量元素用 X 荧光光谱仪 XRF06 (PANalytical AXIOS)测试，二价铁采样滴定法，分析精度 0.01%；稀土微量元素采用等离子质谱仪 (PerkinElmer, Agilent 7700x)测试，将按要求制备定量样品加入偏

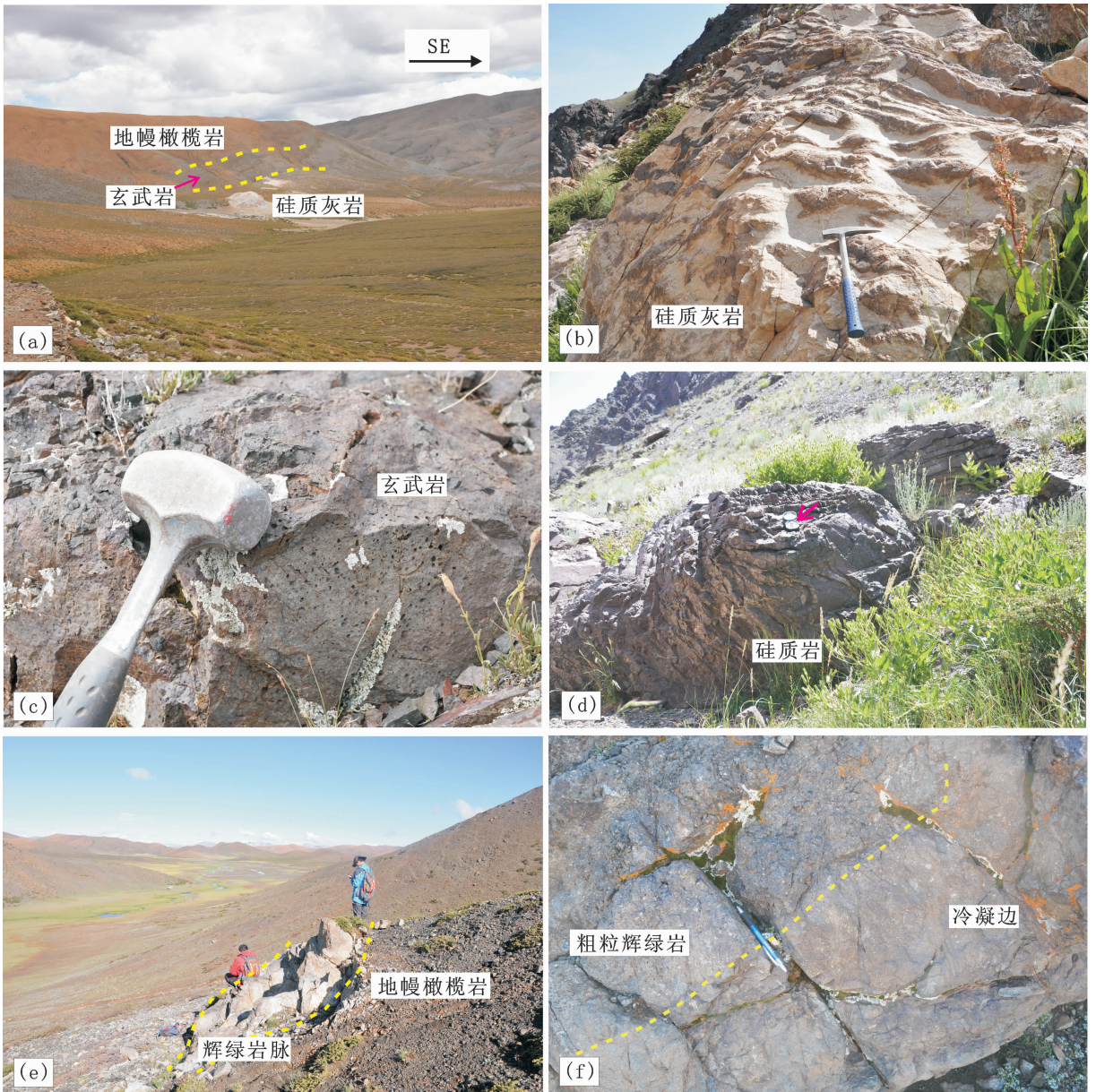


图 3 普兰蛇绿岩中各种岩石的野外产状特征

a—地幔橄榄岩上覆的玄武岩、硅质岩和硅质灰岩; b—硅质和钙质条带相距分布的硅质灰岩; c—气孔或杏仁状玄武岩; d—变形强烈的含泥硅质岩; e—辉绿岩脉侵入于地幔橄榄岩中; f—与地幔橄榄岩接触部位辉绿岩的冷凝边; g—地质剖面简图

Fig.3 Field photographs of various lithologies in Purang massif along Yarlung Zangbo suture zone, Tibet  
 a-Basalt, chert and siliceous limestone overlying peridotite; b-Siliceous limestone with siliceous and calcareous belts; c-Vesicular or amygdaloidal basalt; d-Strongly deformed mud-rich chert; e-Diabase dike that intruded into peridotite; f-Chilled border of diabase near peridotite; g- Simplified geological section

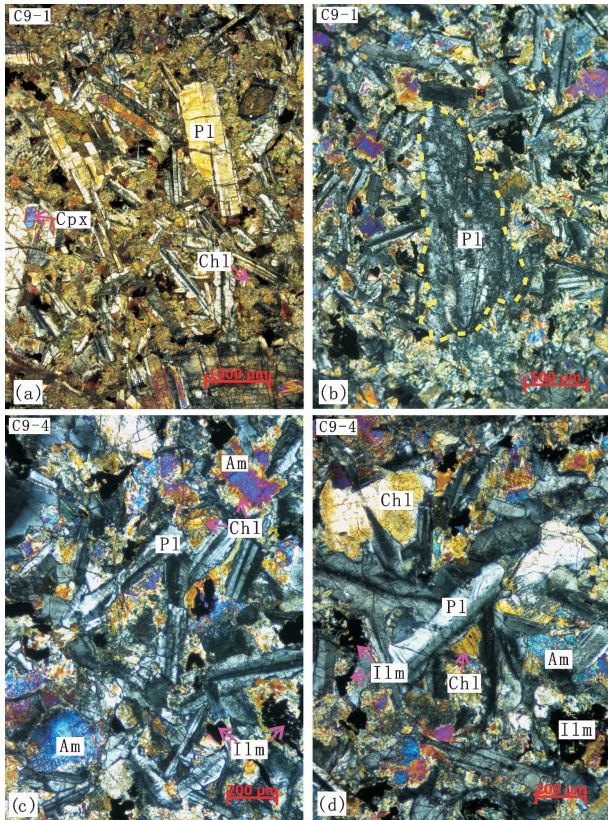


图4 普兰蛇绿岩中辉绿岩显微照片

a—弱绿泥石化的单斜辉石分布于长条状或柱状的斜长石格架之间；  
b—弱蚀变的斜长石斑晶；c—角闪石化和绿泥石化的辉石分布于斜长石格架之间形成典型的辉绿结构；d—辉石的绿泥石化、角闪石化和钛铁矿化。Am—角闪石；Chl—绿泥石；Cpx—单斜辉石；Ilm—钛铁矿；Pl—斜长石

Fig.4 Microstructure of diabases from Purang massif in Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

a—Chloritized clinopyroxenes filled in plagioclase intersertal framework;  
b—Weak clay alteration of plagioclase phenocryst; c—Diabasic texture with long striped plagioclase and granular clinopyroxene; d—Chloritized, amphibolized and ilmenitized clinopyroxenes

硼酸锂(LiBO<sub>2</sub>)熔剂中,均匀混合,在1000℃以上的熔炉中熔化,待熔液冷却后,用硝酸定溶,再用等离子质谱仪分析,稀土元素分析精度大于 $0.05 \times 10^{-6}$ ,La、Ce、Y精度为 $0.5 \times 10^{-6}$ ,Pb和Ni精度为 $5 \times 10^{-6}$ ;Sr、Nd、Pb同位素测试在 Neptune 多接收等离子体质谱仪(MC-ICP-MS)上进行测试,常规称样量1g,对于含量太低的,按10倍取样量,用硝酸-氢氟酸溶解样品,蒸干溶液后放入浓硝酸中,用离子交换柱分离 Sr、Nd 和 Pb,得到纯化富集物,用单接收扇形磁场电感耦合等离子体质谱仪(ICP-SFMS)测定各元素的分离富集程度,测定过程中使用同位素内

标和外标,每个待测对象重复分析两次。测试结果见表1和表2。

## 4 分析结果

### 4.1 主量元素

辉绿岩的全岩地球化学:SiO<sub>2</sub>为44.55%~47.45%,平均45.66%,MgO为6.59%~8.63%,平均7.82%,分别比N-MORB的48.77%,9.67%<sup>[28]</sup>略低,接近原始岩浆MgO>8%成分<sup>[29]</sup>;TiO<sub>2</sub>为0.83%~1.22%,平均1.01%;P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>为0.04%~0.10%,平均0.07%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为12.96%~17.23%,平均15.66%,分别与N-MORB(1.15%、0.09%、15.9%<sup>[28,30]</sup>)接近,K<sub>2</sub>O为0.11%~0.22%,全铁含量较低(8.19%~9.52%),其中FeO平均含量7.23%,Mg<sup>#</sup>为0.61~0.69,略低于初始岩浆Mg<sup>#</sup>为0.68~0.75<sup>[30,31]</sup>的特点,反映了N-MORB或岛弧玄武岩(IAB,>0.65)特征,而与板内玄武岩明显不同<sup>[32]</sup>,表明辉绿岩岩浆没有经历明显的结晶分异过程,总体反映了N-MORB或IAB特征。

考虑到后期蚀变作用对K、Na等碱金属元素丰度产生影响,采用不活泼元素(Zr、Ti、Nb、Y)判别岩石类型,在Zr/TiO<sub>2</sub>-Nb/Y图解和SiO<sub>2</sub>-Zr/TiO<sub>2</sub>\*0.0001图解中,辉绿岩为亚碱性系列(图5)。

### 4.2 微量元素

普兰辉绿岩的稀土总量 $\sum \text{REE} = 18.71 \times 10^{-6} \sim 41.46 \times 10^{-6}$ ,平均 $30.20 \times 10^{-6}$ ,较N-MORB的 $39.11 \times 10^{-6}$ 低<sup>[34]</sup>。轻重稀土基本没有分馏,(Ce/Yb)<sub>N</sub>=0.64~0.82,平均0.76,(La/Yb)<sub>N</sub>=0.60~0.79,平均0.73,Eu具正异常 $\delta \text{Eu} = 1.06 \sim 1.37$ ,平均1.16,没有斜长石的分离结晶作用。球粒陨石标准化曲线为LREE略亏损型左倾模式,与N-MORB和岛弧玄武岩(IAT)相似(图6)。原始地幔标准化微量元素蛛网图中,U、Th、Nb、Ta等HFSE强烈亏损,K、Sr、Rb等LILE强烈富集,与IAT的地球化学分布样式相似(图6-c,6-d),Ti/Zr为 $77.7 \times 10^{-6} \sim 204.7 \times 10^{-6}$ ,平均 $124.4 \times 10^{-6}$ ,接近于MORB和岛弧拉斑玄武岩的 $110 \times 10^{-6}$ <sup>[34]</sup>,Cr含量较高( $230 \times 10^{-6} \sim 300 \times 10^{-6}$ )反映了初始岩浆没有橄榄石、铬尖晶石和辉石的分离结晶作用<sup>[35]</sup>,是一种初始岩浆的反映<sup>[36]</sup>。显生宙以来,海水的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值变化于0.7068~0.7092(J-P<sub>3</sub>),现代大洋海水进入洋中脊的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值为0.7092,作为热液流体离开洋壳的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值为0.703<sup>[37]</sup>,本区高的Sr(平均 $502.8 \times 10^{-6}$ )含量及较高的

表 1 西藏普兰蛇绿岩中辉绿岩常量元素(%) 和微量元素(10<sup>-6</sup>) 含量

Table 1 Major (%) and trace elements (10<sup>-6</sup>) content of diabases from Purang massif in the YZSZ, Tibet

分析项目	本文工作					(刘钊等, 2011) <sup>[19]</sup>							
	C9-1	C9-2	C9-3	C9-4	C9-5	Y-40-1	Y-40-4	Y-48-1	Y-51-3	Y-59-1	Y-64-3	Y-64-4	Y-73-1
SiO <sub>2</sub>	44.55	45.68	44.75	45.85	47.45	46.03	49.00	46.99	46.09	48.20	46.56	48.36	48.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.12	17.23	12.96	16.73	15.27	14.90	14.61	16.49	15.79	14.11	13.65	14.01	14.29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.77	1.91	2.09	1.98	2.00	2.68	2.51	1.68	1.72	2.38	3.16	2.81	2.07
FeO	7.49	6.47	7.64	6.96	7.60	9.89	8.39	7.87	7.86	8.88	9.74	9.99	9.42
CaO	10.68	11.91	10.56	10.49	10.11	11.43	11.52	11.32	12.01	9.95	9.75	9.93	10.03
MgO	7.91	7.82	8.63	8.15	6.59	7.11	6.80	7.74	8.69	7.86	6.62	6.15	7.07
Na <sub>2</sub> O	4.43	3.67	5.42	4.42	5.03	3.00	3.58	2.62	2.27	2.76	2.72	3.26	3.13
K <sub>2</sub> O	0.11	0.22	0.14	0.13	0.12	0.15	0.14	0.13	0.08	0.15	0.21	0.23	0.13
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03	0.04	0.05	0.02	0.01	0.01	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.99	0.83	1.06	0.94	1.22	1.66	1.35	1.17	1.00	1.34	1.77	1.72	1.38
MnO	0.15	0.13	0.16	0.14	0.16	0.19	0.18	0.15	0.15	0.18	0.20	0.20	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.04	0.06	0.09	0.05	0.10	0.12	0.12	0.09	0.09	0.10	0.14	0.14	0.11
LOI	3.98	3.18	6.39	3.77	3.39	2.75	2.15	2.39	2.84	2.88	4.81	3.28	2.22
Total	98.13	98.98	99.77	99.48	98.91	99.69	100.15	98.52	98.47	98.53	99.03	99.82	98.40
TFeO	9.08	8.19	9.52	8.74	9.40	12.30	10.65	9.38	9.41	11.02	12.58	12.52	11.28
Mg <sup>#</sup>	65.53	68.51	67.03	67.82	60.95	56.41	59.33	63.90	66.56	61.29	55.02	52.56	57.46
Cr	300	260	280	280	230	130	180	250	320	140	60	60	110
Ni	130	130	143	124	77	57	65	95	115	53	34	32	47
V	263	218	208	236	231	328	268	266	235	288	318	322	304
La	1.00	1.90	2.30	1.30	2.50	2.30	2.60	2.30	2.20	2.40	3.50	3.50	2.40
Ce	3.30	6.00	7.70	4.20	8.40	8.10	8.50	7.80	6.70	8.10	11.40	11.20	8.10
Pr	0.60	1.05	1.35	0.75	1.46	1.55	1.55	1.39	1.18	1.43	2.02	2.02	1.47
Nd	3.40	5.90	7.70	4.30	8.30	8.70	8.70	7.30	6.70	8.10	10.90	11.10	8.20
Sm	1.18	2.00	2.54	1.49	2.83	3.21	3.03	2.46	2.28	2.88	3.91	3.80	2.90
Eu	0.65	0.87	0.99	0.66	1.11	1.35	1.18	1.06	0.92	1.19	1.52	1.44	1.19
Gd	1.77	2.77	3.19	1.98	3.57	4.19	4.14	3.22	2.95	3.96	5.06	5.01	3.89
Tb	0.38	0.59	0.66	0.42	0.73	0.87	0.81	0.66	0.60	0.79	1.00	0.98	0.77
Dy	2.52	3.86	4.33	2.79	4.95	5.38	5.08	4.21	3.86	5.11	6.44	6.40	5.00
Ho	0.53	0.83	0.93	0.59	1.02	1.18	1.14	0.93	0.85	1.14	1.42	1.46	1.13
Er	1.59	2.43	2.77	1.74	3.02	3.40	3.17	2.63	2.45	3.24	4.10	4.08	3.21
Tm	0.22	0.35	0.40	0.25	0.43	0.50	0.49	0.40	0.37	0.50	0.62	0.62	0.48
Yb	1.35	2.03	2.46	1.50	2.71	3.14	3.10	2.53	2.34	3.08	3.96	3.88	2.99
Lu	0.22	0.33	0.39	0.23	0.43	0.49	0.47	0.39	0.37	0.50	0.61	0.62	0.47
Rb	1.70	1.60	4.80	1.20	1.40	0.80	1.70	1.00	0.70	4.70	11.20	7.70	2.10
Ba	14.60	8.60	20.60	8.70	12.50	6.30	7.00	5.70	6.40	36.30	32.50	51.40	14.30
Sr	681	275	640	404	514	196	112	130	133	123	76	109	110
U	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0.05	0.07	0.08	<0.05
Th	<0.05	0.06	0.07	0.05	0.08	0.06	0.09	0.05	<0.05	0.07	0.11	0.12	0.07
K	913	1826	1162	1079	996	1245	1162	1079	664	1245	1743	1909	1079
Nb	0.40	0.70	0.90	0.50	1.00	1.10	1.10	0.80	0.70	1.10	1.50	1.50	1.10
Ta	<0.1	<0.1	0.10	<0.1	0.10	0.10	0.10	0.10	<0.1	0.10	0.10	0.10	0.10
Zr	29	64	72	36	77	71	81	63	66	73	110	104	72
Hf	0.90	1.90	2.00	1.10	2.20	2.00	2.20	1.80	1.70	2.10	3.00	2.80	2.10
Ti	5935	4976	6355	5635	7314	9952	8093	7014	5995	8033	10611	10311	8273
Y	14.30	21.90	25.90	16.30	28.30	31.70	30.40	24.40	22.70	29.70	37.40	37.80	29.50
ΣREE	18.71	30.91	37.71	22.20	41.46	44.36	43.96	37.28	33.57	42.42	56.46	56.11	42.20
LREE/HREE	1.18	1.34	1.49	1.34	1.46	1.32	1.39	1.49	1.43	1.32	1.43	1.43	1.35
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.50	0.64	0.64	0.59	0.63	0.50	0.57	0.62	0.58	0.53	0.60	0.61	0.55
(Ce/Yb) <sub>N</sub>	0.64	0.78	0.82	0.74	0.81	0.68	0.72	0.81	0.75	0.69	0.76	0.76	0.71
δ Eu	1.37	1.13	1.06	1.17	1.06	1.12	1.02	1.15	1.08	1.07	1.04	1.01	1.08

注: K=K<sub>2</sub>O×10000×0.83013; Ti=TiO<sub>2</sub>×10000×0.5995; TFeO=FeO+0.9×Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Mg<sup>#</sup>=100×Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)。

表 2 西藏普兰蛇绿岩中辉绿岩的 Sr、Nd 和 Pb 同位素组成

Table 2 Sr, Nd and Pb isotopic compositions of diabases from Purang massif in the YZSZ, Tibet

同位素组成	C9-1	C9-4	同位素组成	C9-1	C9-4
Sr	681	404	ε Sr(0)	11.7	5.8
Rb	1.7	1.2	ε Sr(t)	13.7	7.8
Pb	<5	<5	<sup>147</sup> Sm/ <sup>144</sup> Nd	0.21	0.21
Th	<0.05	0.05	<sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd	0.513092	0.513097
U	<0.05	<0.05	2s	34	14
Sm	1.18	1.49	( <sup>143</sup> Nd/ <sup>144</sup> Nd) <sub>t</sub>	0.5129134	0.5129184
Nd	3.4	4.3	eNd(0)	8.9	9.0
<sup>87</sup> Rb/ <sup>86</sup> Sr	0.0072234	0.0085949	eNd(t)	8.6	8.7
<sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr	0.705324	0.704890	<sup>206</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	17.948028	17.90536
2s	38	14	<sup>207</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	15.496889	15.488494
( <sup>87</sup> Sr/ <sup>86</sup> Sr) <sub>t</sub>	0.705310	0.704893	<sup>208</sup> Pb/ <sup>204</sup> Pb	37.879393	37.848213

注: (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>CHUR</sub>=0.7045, (<sup>87</sup>Rb/<sup>86</sup>Sr)<sub>CHUR</sub>=0.0827, λ<sub>Sr</sub>=0.0000142 Ma<sup>-1</sup>, λ<sub>Nd</sub>=0.00000654 Ma<sup>-1</sup>,

<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.512638, <sup>147</sup>Sm/<sup>144</sup>Nd=0.1967, 同位素年龄校正 t=130 Ma。

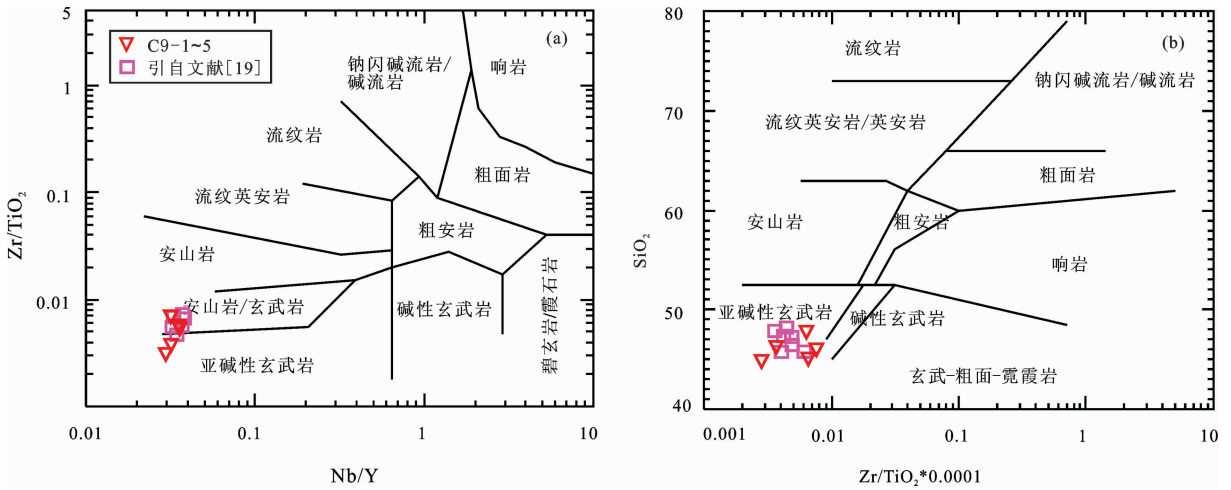


图5 普兰蛇绿岩中辉绿岩的  $Zr/TiO_2-Nb/Y$  图解和  $SiO_2-Zr/TiO_2$  图解(底图引自文献[33])

Fig.5  $Zr/TiO_2-Nb/Y$  and  $SiO_2-Zr/TiO_2$  diagrams for diabases of Purang massif in Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

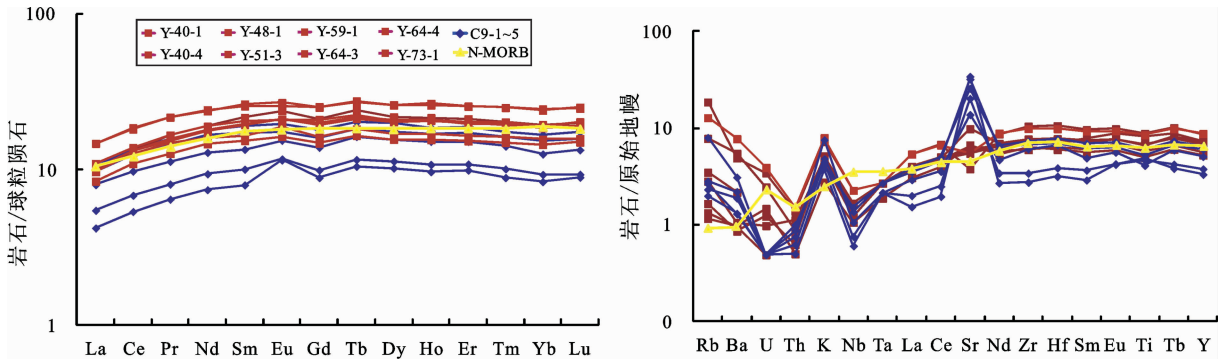


图6 西藏普兰蛇绿岩中辉绿岩的稀土和微量元素配分曲线. 样品Y-引自文献[19], C9-1~5来自本文; N-MORB引自文献[34].

Fig.6 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle normalized rare elements diagrams for diabase from Purang massif in the western part of YZSZ, Tibet

$^{87}Sr/^{86}Sr$  比值(0.704 890~0.705 324),可能是海水与洋壳相互反应的结果。

### 4.3 同位素地球化学

普兰辉绿岩脉的 Sr、Nd、Pb 同位素测试及年龄校正结果见表2。根据前人报道基性岩年龄数据,普兰蛇绿岩中辉绿岩墙锆石的 U-Pb 年龄为  $(120.2 \pm 2.3) Ma^{[20]}$ ,  $(130.2 \pm 3) Ma^{[19]}$ ,且本文发现的辉绿岩脉与刘钊等(2011)<sup>[19]</sup>报道的基性岩具有相似的野外产状和稀土、微量元素特征(表1),以 130 Ma 作为 Sr、Nd 和 Pb 同位素的校正年龄。普兰辉绿岩脉的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t = 0.704 893 \sim 0.705310$ ,平均 0.705110,高于大西洋、印度洋和太平洋的 N-MORB (0.702 29~0.703 16)和 E-MORB (0.702 80~0.703 34)值<sup>[38]</sup>,与爪哇岛弧火山岩(0.70504~0.70576)相似<sup>[39]</sup>,与 Miller

et al. (2003)<sup>[21]</sup> 报道的辉长岩全岩  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  值(0.70552)稍低,位于阿曼的 Samail 蛇绿岩中辉绿岩墙群的  $(^{87}Sr/^{86}Sr)_t$  值(0.7030~0.706<sup>[40]</sup>)范围内,反映了海水与洋壳相互作用的过程。普兰辉绿岩的  $\epsilon_{Nd}(t) = +8.6 \sim +8.7$ ,  $(^{143}Nd/^{144}Nd)_t = 0.512904 \sim 0.512909$ ,低于大西洋、印度洋和太平洋典型 N-MORB 值(0.5130~0.5133)和 E-MORB (0.51299~0.5130)值<sup>[38,41]</sup>,与阿曼的 Samail 蛇绿岩中堆晶辉长岩、方辉橄榄岩、辉绿岩墙群、斜长花岗岩和玄武岩的  $\epsilon_{Nd}(t)$  值(+7.5~+8.6)类似<sup>[40]</sup>,表现出洋壳的亲缘性。由于 U、Th 值低于实验仪器的检测值( $<0.5 \times 10^{-6}$ ),本区辉绿岩 Pb 同位素的测试值为:  $^{206}Pb/^{204}Pb = 17.90536 \sim 17.948028$ ,  $^{207}Pb/^{204}Pb = 15.488494 \sim 15.496889$ ,  $^{208}Pb/^{204}Pb = 37.848213 \sim 37.879393$ ,均位于印度洋的亏损地幔组分

范围内(17.31~18.5, 15.43~15.56, 37.1~38.7)<sup>[38,41]</sup>,反映了大洋地幔的亲缘性。

## 6 讨论

### 6.1 构造环境判别

Pearce and Cann(1971, 1973)最早提出根据岩石化学成分来限定岩浆起源的大地构造背景,并建立了一系列岩浆-构造判别图解<sup>[42,43]</sup>。高场强元素(HFSE),如 Nb、Ta、Th、Zr、Hf、HREE 等,一般不受热液蚀变和低于角闪岩相变质作用的影响<sup>[33,42,44]</sup>,是判别不同大地构造环境玄武岩最有效的判别因子。Th/Hf-Ta/Hf 图解需满足  $\text{SiO}_2 \leq 56\%$ ,  $\text{Cr} \geq 200 \times 10^{-6}$ ,  $\text{MgO} \geq 8\%$  的玄武岩或玄武安山岩<sup>[45]</sup>。本区辉绿岩除 MgO(6.59%~8.63%, 平均 7.82%)含量稍低外,满足 Th/Hf-Ta/Hf 图解要求,落入离散板块边缘 N-MORB 区域。Th/Yb-Nb/Yb 图解和  $\text{TiO}_2/\text{Yb-Nb/Yb}$  图解<sup>[46]</sup>同样投入 N-MORB 范围内(图 7)。

普兰蛇绿岩中辉绿岩脉的  $\text{SiO}_2$ 、MgO 平均含量分别为 45.66%、7.82%,比 N-MORB(48.77%、9.67%)<sup>[28]</sup>略低,  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  平均值(1.01%、0.07%、15.66%)分别与 N-MORB(1.15%、0.09%、15.9%)<sup>[28,30]</sup>接近,稀土元素配分曲线也与 N-MORB 相一致。然而,原始地幔标准化微量元素蛛网图中, U、Th、Nb 等 HFSE 亏损, Ti 弱负异常, K、Sr、Rb 等 LILE 强烈富集,与典型的岛弧火山岩(IAT)的地球化学相似,如印度尼西亚的 Sunda 岛弧带的 Merapi 岩体<sup>[47]</sup>,日本四国中部的三波川带的 Iratsu 岛弧<sup>[48]</sup>, Izu - Bonin 岛弧<sup>[49]</sup>。普兰辉绿岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 平均 0.705 110,高于典型 N-MORB 大西洋、印度洋和太平洋值(0.702 29~0.703 16)<sup>[38,41]</sup>, ( $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ )<sub>t</sub> 平均 0.512 906,低于大西洋、印度洋和太平洋典型 N-MORB 值(0.5130~0.5133)<sup>[38,41]</sup>,与年轻的爪哇岛弧型火山岩 ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ =0.705 04~0.705 76,  $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ =0.512 67~0.512 77)相近<sup>[47]</sup>。夏林圻等(2007)认为岛弧玄武岩一般具有较低的 Zr 含量 ( $<130 \times 10^{-6}$ ), Zr/Y 比值( $<4$ )为特征<sup>[50]</sup>,本区辉绿岩的 Zr 含量= $29 \times 10^{-6}$ ~ $77 \times 10^{-6}$ , Zr/Y=2.03~2.78,指示了岛弧的特点。辉绿岩脉的直接围岩(地幔橄榄岩)也具有流体交代的痕迹。地幔橄榄岩中橄榄石的  $\text{Fo}=90\sim 93$ ,以低铝和高镁为特征,显示亏损的地幔岩特征,但同时方辉橄榄岩中铬尖晶石的  $\text{Cr}^\# = 20\sim 75$ ,和含单辉的方辉橄榄岩中铬尖晶石  $\text{Cr}^\# = 20\sim 30$ ,方辉橄榄岩富集轻稀土

元素(LREE)和 Th、Ba 等大离子亲石元素,显示 SSZ 的构造环境特征<sup>[3,14]</sup>。因此,辉绿岩侵入于地幔橄榄岩中野外产出,说明在辉绿岩成岩之前地幔橄榄岩已经受到俯冲流体的交代作用,地幔楔的部分熔融形成玄武质熔浆,在大洋岛弧环境形成辉绿岩。

### 6.2 地幔源区

被俯冲流体交代的地幔楔被认为是大多数玄武质岛弧岩浆最重要的源区,但岛弧火山岩的微量元素和同位素还应考虑俯冲玄武质洋壳及附属沉积物的贡献<sup>[47,51-53]</sup>。岩浆分离过程中相同母岩浆的一系列岩石具有相似的同位素比值,最终可以反映地幔楔的同位素组成<sup>[47]</sup>。前人通过地中海至雅鲁藏布江蛇绿岩与印度洋玄武岩的对比研究,认为 46~150 Ma 特提斯大洋在空间上占据了现代印度洋的位置,同时印度洋继承了特提斯洋地幔域的地球化学和放射性同位素特征<sup>[54-57]</sup>。HFSE 是流体不相容元素,在板片流体交代地幔楔过程中不会富集,火山岛弧岩浆的 HFSE 的比值对板片成分的加入不敏感,可用于指示流体交代之前的地幔楔成分<sup>[41,47]</sup>,普兰辉绿岩脉的 Ta/Nb、Zr/Hf 和 Th/Nb 比值分别为 0.07~0.20、32.73~37.14、0.06~0.10 与 N-MORB 的比值(0.06、36.10 和 0.05<sup>[58]</sup>)相近, Th/Hf-Ta/Hf、Th/Yb-Nb/Yb 和  $\text{TiO}_2/\text{Yb-Nb/Yb}$  图解(图 7),指示 N-MORB 环境,反映了流体未交代以前的地幔楔成分是亏损的。对比原始地幔成分,普兰辉绿岩中 U、Th、Nb 等元素亏损, Ti 弱负异常, K、Sr、Rb 等元素富集, ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )<sub>t</sub> 相比 N-MORB(0.702 29~0.703 11)<sup>[38]</sup>稍高,是深海沉积物随大洋板片俯冲到地幔深处发生脱水,地幔楔被流体交代后发生部分熔融的结果。

### 6.3 地质意义

利用辉绿岩脉(墙)的地球化学判别蛇绿岩形成时的构造背景,需要考虑辉绿岩的不同产状,比如作为蛇绿岩堆晶岩端元上部的席状岩墙群是大洋扩张时期的产物,而侵入到地幔橄榄岩中的辉绿岩脉则具有不同的构造含义,可以是具有 OIB 性质的俯冲板片断离软流圈上涌的产物<sup>[59]</sup>,或者俯冲板片回返引起的弧前拉张的产物<sup>[60]</sup>,也可以为俯冲的深海沉积物流体交代地幔楔形成的玄武质熔融体。

雅鲁藏布江缝合带中蛇绿岩组成层序大部分不完整或被后期构造肢解,未肢解的主要出露在日喀则地区的得村、吉定、昂仁、大竹卡、日喀则和柳曲(Liuqu)蛇绿岩<sup>[1,2,61,62]</sup>,以及印度西北部的 Spondtang



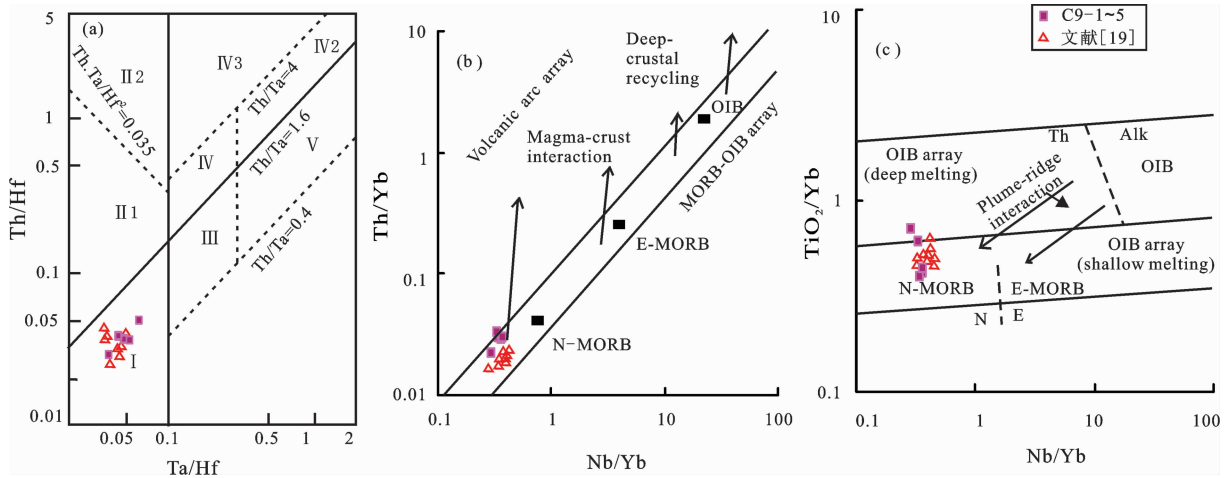


图7 普兰蛇绿岩中辉绿岩脉的构造判别图解

a—Th/Hf-Ta/Hf图解<sup>[45]</sup> (I—板块发散边缘 N-MORB; II—板块汇聚边缘; II 1—大洋岛弧玄武岩区; II 2—陆缘岛弧及陆缘火山弧玄武岩区; III—大洋板内洋岛、海山玄武岩区及 T-MORB, E-MORB 区; IV—大陆板内; IV 1—陆内裂谷及陆源裂谷拉斑玄武岩区; IV 2—陆内裂谷碱性玄武岩区; IV 3—大陆拉张或初始裂谷玄武岩区; V—地幔柱玄武岩区); b—Th/Yb-Nb/Yb 图解; c—TiO<sub>2</sub>/Yb-Nb/Yb 图解<sup>[46]</sup>

Fig.7 Discrimination diagrams for diabases of Purang massif in Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

a—Th/Hf-Ta/Hf diagram<sup>[45]</sup> (I—Plate spreading edge N-MORB; II—Plate convergence edge; II 1—Oceanic island arc basalt unit; II 2—Continental margin island and volcanic arc units); III—Oceanic intra-plate island arc, sea mountain basalt unit, T-MORB, E-MORB units; IV. Continental intraplate (IV 1—Intracontinental rift and terrigenous tholeiite rift units; IV 2—Intracontinental rift alkali basalt unit; IV 3—Continental spreading or initial rift basalts units; V—Mantle plume basalt unit); b—Th/Yb-Nb/Yb diagram; c—TiO<sub>2</sub>/Yb-Nb/Yb diagram<sup>[46]</sup>

和 Nidar 蛇绿岩<sup>[63,64]</sup>。日喀则地区的德村、吉定和昂仁蛇绿岩体的辉绿岩岩墙群的 REE 配分曲线显示 N-MORB 特征,存在 Th、Nb 的亏损,以及 Rb、Ba、K、Pb、Sr 及 U 的富集,130 Ma 校正后的同位素为 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub>=0.703 039~0.704 839, (<sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=17.586~18.507, (<sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=15.436~15.594, (<sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb)<sub>t</sub>=37.446~38.470<sup>[62]</sup>,除 (<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>t</sub> 值与本区辉绿岩稍低外,其他同位素和地球化学特征全部一致。日喀则地区的夏鲁和吉定岩体,虽然没有具体描述剖面产出特征,但辉绿岩也具有早白垩世的岛弧特征<sup>[65,66]</sup>。YZSZ 西段南亚带的休古嘎布蛇绿岩主要由方辉橄榄岩、含单斜方辉橄榄岩组成,地幔橄榄岩南部被含角闪石的微晶辉长岩和辉长苏长岩脉侵入,具有拉斑玄武岩性质和 N-MORB 特征,富集 LILE(主要为 Hf),明显的 Nb、Ta 和 Ti 亏损,具有俯冲带的亲缘性<sup>[67]</sup>,辉绿岩墙的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 (122.3 ± 2.4) Ma<sup>[68]</sup>。萨嘎蛇绿岩由新鲜的二辉橄榄岩、含单斜方辉橄榄岩、蛇绿混杂岩、变质基性洋壳(变辉长岩、变玄武岩和角闪石岩)和上部洋壳端元(硅质岩、玄武质熔岩、辉绿岩墙或脉)组成;桑桑蛇绿岩包括蛇绿混杂岩(主要为方辉橄榄岩)和上地幔

方辉橄榄岩及少量火山熔岩、辉长岩等,两个岩体基性岩为玄武岩和玄武质安山岩,亏损 LREE, (La/Yb)<sub>N</sub>=0.5 和 0.8,弱 Ta-Nb 负异常,指示俯冲带的成分存在,基性岩的不相容元素显示 N-MORB 或弧后盆地<sup>[69]</sup>。普兰岩体西侧的东波超镁铁岩体中辉长辉绿岩和辉石岩脉侵入于地幔橄榄岩的现象也很普遍,基性岩脉的锆石 U-Pb 年龄为 128~130 Ma,2 个样品的地球化学数据显示球粒陨石标准化的 REE 具有 N-MORB 特征,富集 LILE(主要是 Sr、Rb),明显亏损 Nb<sup>[70]</sup>,同样显示俯冲带弧后盆地特征。雅鲁藏布江缝合带东部的罗布莎岩体,侵入于地幔橄榄岩的辉绿岩脉具有 N-MORB 稀土元素配分曲线, <sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd=0.513 089~0.513 166,平均为 0.513 128, ε<sub>Nd</sub>(t)=+7.9~+10.1, <sup>206</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=17.632~17.762, <sup>207</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=15.437~15.551, <sup>208</sup>Pb/<sup>204</sup>Pb=37.323~37.638,显示辉绿岩浆来自亏损地幔源区,同时富集 K、Rb、Ba,亏损 Ta、Nb 和 Ti, <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr=0.703 150~0.706 626,平均为 0.704 808,说明辉绿岩的初始岩浆具有俯冲带的特点<sup>[71]</sup>,指示一种洋内俯冲环境,但是辉绿岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄为 (162.9 ± 2.8) Ma<sup>[71]</sup>,时代比雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)中、西段蛇绿岩发生洋

内俯冲的时间早,可能与新特提斯洋在中生代时期呈向东开启的喇叭状有关<sup>[72, 73]</sup>,导致 YZSZ 东段新特提斯大洋的演化与中西段不同。总之,YZSZ 蛇绿岩普遍发育与洋内俯冲有关的岩浆作用,即东段开始于中侏罗世,而中西段发生在早白垩世,在洋内俯冲背景下发育成熟(或不成熟的)弧后盆地形成新的洋壳,于晚白垩世开始安第斯型俯冲作用,在晚白垩世末或古新世初印度板块和欧亚板块碰撞,新特提斯洋最终闭合<sup>[16,73,74]</sup>。

## 7 结 论

普兰蛇绿岩普遍发育辉绿岩和辉石岩脉侵入地幔橄榄岩中,球粒陨石标准化的 REE,和 HFSE 元素判别图解显示辉绿岩具有 N-MORB 特征,但富集 LILE(K、Sr、Rb),亏损 HFSE(U、Th、Nb),具有俯冲带弧后盆地的特征。除(<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr)<sub>i</sub>稍高外,本区辉绿岩 Nd、Pb 同位素比值与印度洋地幔域的同位素特征相似,较高的 Sr 同位素比值指示俯冲大洋沉积物流体的贡献。普兰辉绿岩脉的产出及地球化学特征与 YZSZ 其他蛇绿岩中基性岩脉一致,认为 YZSZ 蛇绿岩普遍存在洋内俯冲作用,但开始时代不同,即中西段开始于早白垩世,而东段开始于中侏罗世。

**致谢:**野外工作得到中国地质大学(北京)的高健及中国地质大学(武汉)的赵文和李奇维的帮助,在此表示真挚的谢意。

## 参考文献(References):

- [1] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): a peculiar oceanic lithosphere [J]. *Nature*, 1981, 294:414-417.
- [2] Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, et al. The Tibetan side of the India-Eurasia collision [J]. *Nature*, 1981, 294(3):405-410.
- [3] 杨经绥,熊发挥,郭国林,等.东波超镁铁岩体:西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11):3207-3222.  
Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guolin, et al. The Dongbo ultramafic massif: Amantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3207-3222(in Chinese with English abstract).
- [4] Bai W J, Yang J S, Fang Q S, et al. Study on a storehouse of ultrahigh pressure mantle minerals-podiform chromite deposits [J].

- Earth Science Frontiers*, 2001, 8(3):111-122.
- [5] Yang J S, Dobrzhinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. *Geology*, 2007, 35(10):875-878.
- [6] 白文吉,杨经绥,方青松,等.西藏蛇绿岩的超高压矿物:FeO, Fe, FeSi, Si 和 SiO<sub>2</sub> 组合及其地球动力学意义 [J]. *地球学报*, 2002, 23(5):395-402.  
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Ultra-High Pressure Minerals: FeO, Fe, FeSi, Si and SiO<sub>2</sub>-Assemblage from Ophiolite in Tibet and Its Earth Dynamic Significance [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2002, 23(5):395-402(in Chinese with English abstract).
- [7] 白文吉,施倪承,杨经绥,等.西藏蛇绿岩豆荚状铬铁矿中简单氧化物矿物组合及其超高压成因 [J]. *地质学报*, 2007, 81(11):1538-1549.  
Bai Wenji, Shi Nicheng, Yang Jingsui, et al. An Assemblage of Simple Oxide Minerals from Ophiolitic Podiform Chromitites in Tibet and Their Ultrahigh Pressure Origin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11):1538-1549(in Chinese with English abstract).
- [8] 徐向珍,杨经绥,巴登珠,等.雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石 [J]. *岩石学报*, 2008, 24(7):1453-1462.  
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, et al. Diamond discovered from the Kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7):1453-1462(in Chinese with English abstract).
- [9] 杨经绥,白文吉,方青松,等.西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英 [J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2004, 29(6):651-660.  
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Coesite Discovered from the Podiform Chromitite in the Luobusha Ophiolite, Tibet [J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2004, 29(6):651-660(in Chinese with English abstract).
- [10] 杨经绥,白文吉,方青松,等.西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述) [J]. *地球学报*, 2008, 29(3):263-274.  
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Ultrahigh-pressure Minerals and New Minerals from the Luobusa Ophiolitic Chromitites in Tibet: A review [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2008, 29(3):263-274 (in Chinese with English abstract).
- [11] 杨经绥,徐向珍,李源,等.西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石:蛇绿岩型金刚石分类的提出 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11):3171-3178.  
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, et al. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (11):3171-3178 (in Chinese with English abstract).
- [12] 白文吉,杨经绥,方青松,等.西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物

- 群[J]. 中国地质, 2003, 30(2):144-150.
- Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. An unusual mantle mineral group in ophiolites of Tibet [J]. *Geology in China*, 2003, 30(2):144-150 (in Chinese with English abstract).
- [13] Pearce J A, Wanming D. The ophiolites of the Tibetan geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986) [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988, 327 (1594):215-238.
- [14] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究 [J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3179-3196.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung-Zangbo suture zone in Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (11):3179-3196(in Chinese with English abstract).
- [15] Liu C Z, Wu F Y, Wilde S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. *Lithos*, 2010, 114(3):413-422.
- [16] 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, 22:377-397.
- [17] 徐德明, 黄圭成, 黄陵勤, 等. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带中地幔橄榄岩的成因[J]. *华南地质与矿产*, 2006, 3:10-18.
- Xu Deming, Huang Guicheng, Huang Lingqin, et al. The origin of mantle peridotites in the Daba-Xiugugabu ophiolite belt, SW Tibet[J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2006, 3: 10-18 (in Chinese with English abstract).
- [18] 徐德明, 黄圭成, 雷义均. 西藏西南部拉昂错地幔橄榄岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2008, 27(1):1-13.
- Xu Deming, Huang Guicheng, Lei Yijun, et al. Geochemistry and tectonic significance of mantle peridotites from the Laangcuo ophiolite massif, southwest Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2008, 27(1):1-13 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘钊, 李源, 熊发挥, 等. 西藏普兰拉昂错的 MOR 型辉长岩: 岩石学和年代学[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11):3169-3279.
- Liu Zhao, Li Yuan, Xiong Fahui, et al. Petrology and geochronology of MOR gabbro in the Purang ophiolite of western Tibet, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11):3169-3279 (in Chinese with English abstract).
- [20] 李建峰, 夏斌, 刘立文, 等. 西藏普兰地区拉昂错蛇绿岩中辉绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义 [J]. *地质通报*, 2008, 27(10):1739-1743.
- Li Jianfeng, Xia Bin, Liu Liwen, et al. SHRIMP U-Pb zircon dating of diabase in the La'nga Co ophiolite, Burang, Tibet, China, and its geological significance [J]. *Geological Bulletin of China*, 2008, 27(10):1739-1743 (in Chinese with English abstract).
- [21] Miller C, Th -ni M, Frank W, et al. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet [J]. *Lithos*, 2003, 66(3):155-172.
- [22] 万晓樵, 孙立新, 刘文灿, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带地层[M]. 北京:地质出版社, 2007:1-119.
- Wan Xiaoqiao, Sun Lixin, Liu Wencan, et al. Stratigraphy of the Yalung Zangbo Suture Zone in Tibet [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2007:1-119 (in Chinese with English abstract).
- [23] Coleman R G. Tectonic setting for ophiolite obduction in Oman [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4):2497-2508.
- [24] 许志琴, 李海兵, 唐哲民, 等. 大型走滑断裂对青藏高原地体构架的改造[J]. *岩石学报*, 2012, 27(11):3157-3170.
- Xu Zhiqin, Li Haibin, Tang Zheming, et al. [J]. The transformation of the terrain structures of the Tibet Plateau through large-scale strike-slip faults [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 27 (11):3157-3170 (in Chinese with English abstract).
- [25] Dürr S B. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, south Tibet) [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1996, 108(6):669-684.
- [26] Yin A. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation [J]. *Earth Science Reviews*, 2006, 76(1):1-131.
- [27] 夏斌. 西藏拉昂错蛇绿岩岩石地球化学特征及成因意义[J]. *西藏地质*, 1991, 5(1):38-54.
- Xia Bin. The characteristic of rock geochemistry and origin for Laangcuo ophiolite in Tibet [J]. *Tibet Geology*, 1991, 5 (1):38-54 (in Chinese with English abstract).
- [28] Schilling J G, Zajac M, Evans R, et al. Petrologic and geochemical variations along the Mid-Atlantic Ridge from 29 degrees N to 73 degrees N[J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(6):510-586.
- [29] Mckenzie D, Bickle M J. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 29(3):625-679.
- [30] Wilkinson J. The genesis of mid-ocean ridge basalt [J]. *Earth Science Reviews*, 1982, 18(1):1-57.
- [31] Le Maitre R W, Streckeisen A, Zanettin B, et al. *Igneous Rocks: A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms*[M]. New York:Cambridge University Press, 2002, 2:1-236.
- [32] Perfit M R, Gust D A, Bence A E, et al. Chemical characteristics of island-arc basalts: implications for mantle sources [J]. *Chemical Geology*, 1980, 30(3):227-256.

- [33] Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements[J]. *Chemical Geology*, 1977, 20:325-343.
- [34] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [35] Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C] // Thorpe R S (ed.). *Orogenic Andesites and Related Rocks*. Chichester, England: John Wiley and Sons, 1982: 528-548.
- [36] Garzanti E, Le Fort P, Sciunnach D. First report of Lower Permian basalts in South Tibet: tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 1999, 17(4):533-546.
- [37] Elderfield H. Strontium isotope stratigraphy [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1986, 57(1):71-90.
- [38] Saunders A D, Norry M J, Tarney J. Origin of MORB and chemically-depleted mantle reservoirs: trace element constraints [J]. *Journal of Petrology*, 1988, 1:415-445.
- [39] McDermott F, Hawkesworth C. Th, Pb, and Sr isotope variations in young island arc volcanics and oceanic sediments [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104(1):1-15.
- [40] Mcculloch M T, Gregory R T, Wasserburg G J, et al. Sm-Nd, Rb-Sr, and  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  isotopic systematics in an oceanic crustal section: Evidence from the Samail ophiolite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86(B4):2721-2735.
- [41] Rollison Hugh R., 杨学明, 杨晓勇, 等. 岩石地球化学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001:180-184.  
Rollison Hugh R., Yang Xueming, Yang Xiaoyong, et al. *Rock Geochemistry*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2001:180-184 (in Chinese).
- [42] Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2):290-300.
- [43] Pearce J A, Cann J R. Ophiolite origin investigated by discriminant analysis using Ti, Zr and Y [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 12(3):339-349.
- [44] 朱弟成, 潘桂棠. 正确使用构造判别图解和地球化学数据的一些建议[J]. *地质地球化学*, 2001, 29(3):152-157.  
Zhu Dicheng, Pan Guitang. Some suggestions of how to correctly use the tectonic discrimination diagrams and geochemical data [J]. *Geology-geochemistry*, 2001, 29 (3):152-157 (in Chinese with English abstract).
- [45] 汪云亮, 张成江, 修淑芝. 玄武岩类形成的大地构造环境的 Th/Hf-Ta/Hf 图解判别[J]. *岩石学报*, 2001, 17(3):413-421.  
Wang Yunliang, Zhang Chengjiang, Xiu Shuzhi. Th/Hf-Ta/Hf identification of tectonic setting of basalts [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2001, 17(3):413-421 (in Chinese with English abstract).
- [46] Pearce J A. Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust[J]. *Lithos*, 2008, 100(1):14-48.
- [47] Gertisser R, Keller J. Trace element and Sr, Nd, Pb and O isotope variations in medium-K and high-K volcanic rocks from Merapi Volcano, Central Java, Indonesia: evidence for the involvement of subducted sediments in Sunda Arc magma genesis [J]. *Journal of Petrology*, 2003, 44(3):457-489.
- [48] Utsunomiya A, Jahn B, Okamoto K, et al. Intra-oceanic island arc origin for Iratsu eclogites of the Sanbagawa belt, central Shikoku, southwest Japan[J]. *Chemical Geology*, 2011, 280(1):97-114.
- [49] Taylor R N, Nesbitt R W. Isotopic characteristics of subduction fluids in an intra-oceanic setting, Izu-Bonin Arc, Japan [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 164(1):79-98.
- [50] 夏林圻, 夏祖春, 徐学义, 等. 利用地球化学方法判别大陆玄武岩和岛弧玄武岩[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1):77-89.  
Xia Linqi, Xia Zuchun, Xu Xueyi, et al. The discrimination between continental basalt and island arc basalt based on geochemical method [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2007, 26(1):77-89 (in Chinese with English abstract).
- [51] Arculus R J, Powell R. Source component mixing in the regions of arc magma generation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(B6):5913-5926.
- [52] Turner S, Foden J. U, Th and Ra disequilibria, Sr, Nd and Pb isotope and trace element variations in Sunda arc lavas: predominance of a subducted sediment component [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, 142(1):43-57.
- [53] Pearce J A, Baker P E, Harvey P K, et al. Geochemical evidence for subduction fluxes, mantle melting and fractional crystallization beneath the South Sandwich island arc [J]. *Journal of Petrology*, 1995, 36(4):1073-1109.
- [54] Mahoney J J, Frei R, Tejada M, et al. Tracing the Indian Ocean mantle domain through time: isotopic results from old West Indian, East Tethyan, and South Pacific seafloor [J]. *Journal of Petrology*, 1998, 39(7):1285-1306.
- [55] Xu J F, Castillo P R. Geochemical and Nd-Pb isotopic characteristics of the Tethyan asthenosphere: implications for the origin of the Indian Ocean mantle domain [J]. *Tectonophysics*, 2004, 393(1):9-27.
- [56] 侯青叶, 赵志丹, 张本仁, 等. 青藏高原东北缘特提斯构造域界线的探讨[J]. *岩石学报*, 2006, 22(3):567-577.  
Hou Qingye, Zhao Zhidan, Zhang Benren, et al. On the boundary of Tethyan tectonic domain on northeastern margin of the Tibetan

- Plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22 (3):567–577 (in Chinese with English abstract).
- [57] 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.
- [58] McDonough W F, Sun S S. The composition of the Earth [J]. *Chemical geology*, 1995, 120(3):223–253.
- [59] Dai J G, Wang C S, Hobert R, et al. Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo–Tethys–[J]. *Gondwana Research*, 2011, 19(1):232–243.
- [60] Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123 (3–4):387–411.
- [61] Chen G, 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(5):406–422.
- [62] 牛晓露, 赵志丹, 莫宣学, 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.
- Niu Xiaolu, Zhao Zhidan, Mo Xuanxue, et al. Elemental and Sr–Nd–Pb isotopic geochemistry for basic rocks from Decun–Angren ophiolites in Xigaze area, Tibet: implications for the characteristics of the Tethyan upper mantle domain [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(12):2875–2888 (in Chinese with English abstract).
- [63] Mahéo G, Bertrand H, Guillot S, et al. The South Ladakh ophiolites (NW Himalaya, India): an intra–oceanic tholeiitic arc origin with implication for the closure of the Neo–Tethys [J]. *Chemical Geology*, 2004, 203(3):273–303.
- [64] Mahéo G, Fayoux X, Guillot S, et al. Relicts of an intra–oceanic arc in the Sapi–Shergol mélange zone (Ladakh, NW Himalaya, India): implications for the closure of the Neo–Tethys Ocean [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 26(6):695–707.
- [65] 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.
- Li Wenxia, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, et al. Geochemical discrimination of tectonic environments of the Yalung Zangpo ophiolite in southern Tibet [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(5): 1663–1673 (in Chinese with English abstract).
- [66] 王冉, 夏斌, 周国庆, 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.
- Wang Ran, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. SHRIMP zircon U–Pb dating for gabbro from the Tiding ophiolite in Tibet [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(1):114–117 (in Chinese).
- [67] Bezard R, Hébert R, Wang C, et al. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet [J]. *Lithos*, 2011, 125(1):347–367.
- [68] 韦振权, 夏斌, 张玉泉, 等. 西藏休古嘎布蛇绿岩中辉绿岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义 [J]. *大地构造与成矿*, 2006, 30(1): 93–97.
- Wei Zhenquan, Xia Bin, Zhang Yuquan, et al. Shrimp zircon dating of diabase in the Xiugugabu ophiolite in Tibet and its geological implications [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2006, 30 (1):93–97 (in Chinese with English abstract).
- [69] Bédard É, Hébert R, Guilmette C, et al. Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolitic massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: Evidence for an arc–back–arc origin [J]. *Lithos*, 2009, 113(1):48–67.
- [70] 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U–Pb 定年及地质意义 [J]. *岩石学报*, 2011, 27 (11):3223–3238.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Zircon U–Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11):3223–3238 (in Chinese with English abstract).
- [71] 钟立峰, 夏斌, 陈根文. 藏南罗布莎蛇绿岩岩石学, 地球化学及其构造环境研究 [D]. 广州: 中国科学院广州地球化学研究所, 2006:1–100.
- Zhong Lifeng, Xia Bin, Chen Genwen. Petrology, Geochemistry and Tectonic Setting of The Luobusa Ophiolite, Southern Xizang (Tibet) [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2006:1–100 (in Chinese with English abstract).
- [72] Metcalfe I. Palaeozoic–Mesozoic history of SE Asia [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2011, 355(1):7–35.
- [73] Stampfli G M. Tethyan oceans [J]. *Geological Society, London, special publications*, 2000, 173(1):1–23.
- [74] Aitchison J C, Ali J R, Davis A M. When and where did India and Asia collide [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(B5): 0148–0227.

## Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra-oceanic supra-subduction within the Neo-Tethys

LIU Fei<sup>1,2</sup>, YANG Jing-sui<sup>1</sup>, CHEN Song-yong<sup>1</sup>, LI Zhao-li<sup>1</sup>,  
LIAN Dong-yang<sup>1,3</sup>, ZHOU Wen-da<sup>1,3</sup>, ZHANG Lan<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory for Continental Tectonic and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China; 3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 4. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Ophiolites that discontinuously crop out along the Yarlung-Zangbo suture zone (YZSZ) are remnants of Neo-Tethyan ocean lithosphere emplaced during subduction of the Indian plate beneath Eurasia. The Purang massif is one of the largest ophiolites in the western part of the suture with exposed area of about 650 km<sup>2</sup> and consists dominantly of harzburgites, minor Cpx-harzburgites and dunites as well as a series of uppermost crustal rocks (siliceous limestone, siliceous shale, chert, basaltic lavas, and pyroclastic rocks), without cumulate rocks and pillow lava. In the northwestern part of the massif, peridotites were intruded by diabase dykes and sills. The diabases show N-MORB type REE patterns with (<sup>143</sup>Nd/<sup>144</sup>Nd)<sub>t</sub> being 0.512904~0.512909 and  $\epsilon_{Nd}(t)$  +8.6~+8.7, and are characterized by LILE (mainly K, Sr, Rb) enrichment and noticeable Nb, Th and U negative anomalies. They have a supra-subduction affinity and were formed in a back-arc basin setting. A comparison with other YZSZ ophiolites suggests that various intra-oceanic supra-subduction events within the Neo-Tethys began in different periods. The oceanic crust of the eastern part of YZSZ was formed in about Middle Jurassic in the back-arc basin, while those in central and western segments were formed in about Early Cretaceous above the SSZ setting.

**Key words:** Yarlung Zangbo suture zone; Purang ophiolite; Neo-Tethys; diabase; Sr-Nd-Pb isotope

---

**About the first author:** LIU Fei, male, born in 1982, doctor, mainly engages in the study of lithology and tectonics of ophiolites; E-mail: lfhy112@126.com.