

文章编号: 1000-4734(2022) 05-0590-15

# 雅鲁藏布江缝合带西段普兰地幔源区特征

胡杰<sup>1,2</sup>, 钟宏<sup>1,2\*</sup>, 阮涛<sup>1,2</sup>, 郑石基<sup>1,2</sup>, 柏中杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 普兰蛇绿岩位于西藏雅鲁藏布江缝合带西部, 岩体出露面积约 800 km<sup>2</sup>, 是雅江蛇绿岩带上为数不多的保存完好、岩石新鲜度高的大岩体之一。目前对于普兰地幔为弧下地幔或 MORB 地幔, 还是大陆岩石圈地幔仍存在分歧, 其形成时是否存在洋内俯冲以及地幔深循环等地幔动力学过程的了解也不够充分。本文对普兰地幔岩展开精细的岩石学、矿物学和地球化学研究, 初步探讨普兰地幔源区性质和地幔过程。结果表明, 普兰二辉橄榄岩具有深海橄榄岩的特征, 经历 10%~15% 的部分熔融, 而方辉橄榄岩与弧前橄榄岩类似, 并经历 13%~25% 的部分熔融。普兰地幔岩具“V”型原始地幔标准化稀土配分模式, 显著富集不相容元素, 如轻稀土元素、部分高场强元素 (Hf、U、Pb 等) 和大离子亲石元素 (Rb、Sr 等)。我们认为这种富集特征源自俯冲含水熔体的交代作用, 普兰地幔是一个经历了洋内俯冲过程的弧下地幔。

**关键词:** 雅鲁藏布江缝合带; 地幔橄榄岩; 俯冲过程; 弧地幔; 普兰

**中图分类号:** P585.1; P584; P595

**文献标识码:** A

**doi:** 10.16461/j.cnki.1000-4734.2022.42.053

**第一作者:** 胡杰, 男, 1994 年生, 硕士研究生, 主要从事矿床学研究. E-mail: hj0906@vip.qq.com

## Characteristics of source of the Purang pyrolite in the western Yarlung—Zangbo suture zone

HU Jie<sup>1,2</sup>, ZHONG Hong<sup>1,2\*</sup>, RUAN Tao<sup>1,2</sup>, ZHENG Shi-ji<sup>1,2</sup>, BAI Zhong-jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Deposit Geochemistry, Institute of geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The Purang ophiolite, located in the western Yarlung—Zangbo suture zone (YZSZ), with the covered area of 800 km<sup>2</sup>, is one of the largest massifs with well-preserved and fresh mantle peridotites in the YZSZ. It is still debated whether the source of Purang pyrolites belongs to the sub-arc mantle, the MORB mantle, or the subcontinental lithospheric mantle, and it is poorly understood whether there was the intra-ocean subduction or the deep mantle cycling of mantle geodynamic processes at the time of the formation of Purang pyrolites. In this study, we have conducted detailed petrological, mineralogical and geochemical studies of the Purang pyrolites, and have preliminarily explored the nature and related mantle dynamic processes of the source of Purang pyrolites. The results show that the lherzolite in the Purang area has similar geochemical characteristics of the abyssal peridotite and had experienced 10%-15% partial melting, while the harzburgite has similar characteristics of the fore-arc peridotite and had experienced 13%-25% partial melting. The Purang pyrolites are characterized with “V-shaped” primitive mantle-normalized REE patterns, and are significantly enriched in incompatible elements such as LREEs, high field strength elements (e.g., Hf, U, Pb) and large ion lithophile elements (e.g., Rb and Sr). We have suggested that this feature of the enrichment of incompatible elements in the Purang pyrolites was resulted from the metasomatism of the mantle by subduction-related hydrous melts and the source of Purang pyrolites could be a sub-arc mantle which had been experienced the intra-ocean subduction process.

**Keywords:** The Yarlung—Zangbo suture zone; pyrolite; subduction process; arc mantle; Purang

收稿日期: 2021-08-16

基金项目: 第二次青藏高原综合科学考察研究 (编号: 2019QZK0806); 国家杰出青年基金 (编号: 41425011)

\* 通讯作者, E-mail: zhonghong@vip.gyig.ac.cn

蛇绿岩被认为是构造侵位于大陆边缘的古大洋岩石圈<sup>[1-2]</sup>, 是追寻已消失大洋和确定板块边界最可靠的依据<sup>[3]</sup>。蛇绿岩在恢复古洋陆格局、反演大洋岩石圈岩浆演化、解密地幔源区特征等方面有着重要的意义<sup>[3-4]</sup>。同时, 蛇绿岩也含有丰富的铬铁矿, 具有非常重要的经济价值。蛇绿岩型豆荚状铬铁矿在全球工业级铬铁矿石的供应中占相当大的比例。目前普遍认为, 蛇绿岩的构造环境主要为洋中脊扩张环境 (MOR)<sup>[3, 5-6]</sup>和汇聚型板块边界俯冲带环境 (supra-subduction zone)<sup>[7-8]</sup>。与之对应, 蛇绿岩分为 MOR 型和 SSZ 型<sup>[9]</sup>。位于青藏高原南部的雅鲁藏布江缝合带出露我国面积最大、幔源岩性单元保存完好、岩石新鲜度高的蛇绿岩, 代表了新特提斯洋大洋岩石圈残片, 在国际上享有较高知名度<sup>[3]</sup>。对于雅江蛇绿岩的构造环境, 目前存在 2 种观点: 1) 形成于慢速-超慢速洋中脊扩张环境<sup>[3, 5, 10-12]</sup>, 即 MOR 蛇绿岩, 通过拆离断层构造就位于现今位置<sup>[3, 11-12]</sup>。主要依据是相比于巨量的超基性地幔岩, 雅江蛇绿岩严重缺乏壳层镁铁质基性岩, 如基性辉长岩、玄武质熔岩等, 这种壳幔解耦特征被认为是慢速-超慢速洋中脊下岩浆供应不足的结果, 并与大西洋和西南印度洋底出露的海洋核杂岩具有类似的形成机制<sup>[3, 11]</sup>。另外, 某些岩体的地球化学特征仅显示了熔体抽取后残余的特征, 并没有显示出俯冲流体的叠加<sup>[10]</sup>。2) 形成于俯冲带环境, 即 SSZ 蛇绿岩。主要依据是雅江蛇绿岩带上某些岩体反映了岛弧的性质, 地幔橄榄岩和 Izu-Bonin-Mariana 弧前橄榄岩类似, 并形成于洋内俯冲环境<sup>[13-16]</sup>。

普兰蛇绿岩位于雅江缝合带西部, 出露面积约 800 km<sup>2</sup><sup>[11]</sup>, 岩体主要由新鲜的地幔岩组成, 壳层基性镁铁质岩石少见, 常见基性岩脉侵入至基底地幔层序中。目前对普兰地幔的性质还存在争议, 主要存在以下 3 种观点: 1) Miller 等<sup>[17]</sup>, Li 等<sup>[11]</sup>和刘钊等<sup>[18]</sup>对侵入至地幔橄榄岩中的基性岩脉 (辉长苏长岩、辉长岩) 进行了详细的地球化学分析, 认为这些岩脉具有 MORB 特征, 因此认为普兰地幔为 MOR 型地幔, 现今保存的地幔岩通过拆离断层剥露至洋底; 2) Gong 等<sup>[19]</sup>在普兰地幔岩中发现了特殊的尖晶石-辉石集合体, 被认为是石榴石破碎分解后的产物, 并提出普兰地幔为古老的大陆岩石圈地幔。这和雅江缝合带上罗布莎岩体相似<sup>[10]</sup>; 3) Liu 等<sup>[20]</sup>在普兰地区发现了斜长橄榄岩, 认为是俯冲流体与亏损尖晶石橄榄岩反应的产物, 因此普兰地幔是与俯冲相关的 SSZ 型地幔。但具体是洋-洋俯冲的洋内弧 (intra-ocran arc) 地幔, 还是洋-陆俯冲的大陆边缘弧 (continental arc) 地幔尚未可知。本文对普兰地幔岩展开精细的岩石学、矿物学和地球化学研究, 进一步了解普兰地幔的性质和地幔过程。

## 1 区域地质背景

雅鲁藏布江缝合带位于青藏高原南部, 沿北纬 29° 西起东坡—普兰, 途经仲巴—萨嘎, 东至泽当—罗布莎, 延伸近 2000 km (图 1a)。沿雅鲁藏布江缝合带广泛出露的蛇绿岩被认为是确定亚欧板块和印度板块边界的岩石学标志, 代表了已消亡的新特提斯大洋岩石圈的残片<sup>[3-5, 16]</sup>。雅鲁藏布江缝合带西藏板块分为南北两部分, 南侧为喜马拉雅地块, 代表了印度板块的被动大陆边缘, 北侧为冈底斯成矿带, 代表了新特提斯洋岩石圈的俯冲作用。与世界上其他典型的蛇绿岩相比 (如阿曼、塞浦路斯等), 雅江蛇绿岩最为突出的特征是其沿着雅鲁藏布江呈不连续的线状分布<sup>[21]</sup>。如图 1a 所示, 西部岩体规模较大且分散, 如东波 (>400 km<sup>2</sup>)、普兰 (约 800 km<sup>2</sup>); 中部岩体比较连续 (桑桑—大竹曲) 但是规模较小 (<200 km<sup>2</sup>); 东部岩体以泽当—罗布莎为代表, 岩体规模最小 (如罗布莎仅约 70 km<sup>2</sup>)。雅江蛇绿岩另外一个重要的特点就是地幔岩高度亏损<sup>[14, 21, 32]</sup>。Dubois-Côté 等<sup>[39]</sup>对吉定、大竹曲、白朗等七个小岩体进行了地幔岩岩石学和地球化学分析。结果表明, 中东部岩体 (大竹曲、白朗) 具有非常高的尖晶石 Cr<sup>#</sup> [Cr<sup>#</sup> = 100x<sub>Cr</sub>/(x<sub>Cr</sub> + x<sub>Al</sub>), x 为氧化物的摩尔数] (高达 82), 全岩 REE 含量表明其经历了 20%~30% 的高程度部分熔融。Zhou 等<sup>[13]</sup>和 Dai 等<sup>[14]</sup>分别对东部罗布莎和中部仲巴岩体进行了详细的全岩主微量地球化学和矿物地球化学分析, 并认为这些高 Fo [Fo = 100x<sub>Mg</sub>/(x<sub>Mg</sub> + x<sub>Fe2+</sub>), x 为氧化物的摩尔数] 橄榄石和高 Cr<sup>#</sup> 尖晶石的地幔岩 (橄榄石 Fo>90, 尖晶石 Cr<sup>#</sup>>50) 形成于岛弧环境, 在高程度

部分熔融后再次经历了玻安质岩浆的熔岩反应,显著提高了地幔岩的亏损程度。

普兰蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带西段,构造上属于喜马拉雅被动大陆边缘和冈底斯活动大陆边缘,即印度板块北部、欧亚大陆南侧。地理位置为东经  $80^{\circ}40' \sim 81^{\circ}20'$ , 北纬  $30^{\circ}30' \sim 30^{\circ}51'$  (图 1b), 距离阿里地区普兰县城北部约 40 km。岩体大致呈北西-南东向沿拉昂错南岸向西北延伸至姜叶马 (图 1b), 其东边为休古嘎布岩体, 西边为东波岩体, 总面积达  $800 \text{ km}^2$ 。尽管蛇绿岩为幔源和壳源岩石的组合物, 但是普兰岩体主要为地幔橄榄岩, 包括方辉橄榄岩、二辉橄榄岩和少量纯橄岩、透辉状铬铁矿, 缺少壳层基性岩<sup>[3, 11, 17-19]</sup>, 但偶见基性岩脉侵入至地幔层序中<sup>[17-19]</sup>。岩体与围岩呈断层接触, 且围岩倾向于岩体, 各岩石组合片理发育, 片理走向与岩体展布方向一致, 大部分为

西南向倾斜, 个别为西北向倾斜<sup>[21]</sup>。西部北侧为二叠系海相碎屑岩 (图 1b,  $P_{2,3}$ ); 中部为侏罗系—白垩系的砂、板岩、硅质岩及中基性火山岩组成的混杂岩带 (图 1b,  $K_2$ 、 $J$ ); 最北侧为石炭系—泥盆系变质的浅海陆棚—滨海碳酸盐相碎屑沉积岩 (图 1b, C、D); 东部南侧以前寒武结晶岩系为主。

## 2 普兰地幔岩岩相学特征

方辉橄榄岩是普兰地幔橄榄岩的主体部分, 出露面积占 80% 以上。方辉橄榄岩具中粗粒状结构、块状构造, 橄榄石具有肯克带 (图 2a), 表现一定程度的塑性变形。偶见新鲜的橄榄石微粒包裹于斜方辉石和铬尖晶石中 (图 2b)。粗粒的斑状斜方辉石常被细粒的硅酸盐矿物包围, 形成地幔岩典型的碎斑结构。部分斜方辉石含有出溶的单斜辉石片晶 (图 2b)。单斜辉石含量少, 呈它形粒状充填分布于粗粒

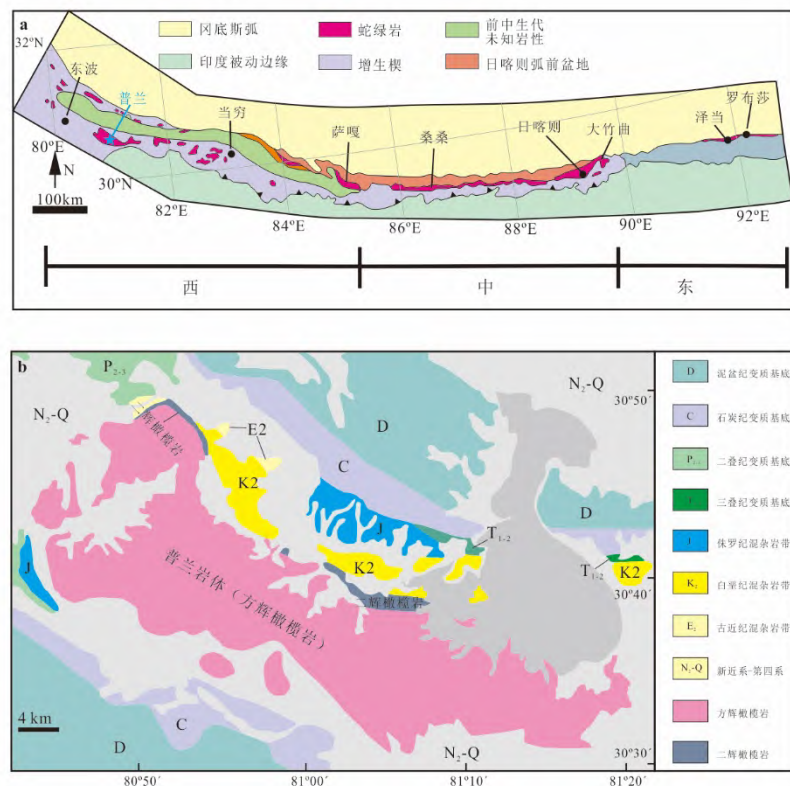


图 1 a. 雅鲁藏布江缝合带及出露的蛇绿岩 (修改自 Griffin 等<sup>[21]</sup>): 雅江蛇绿岩沿着缝合带不连续出露, 分布极不均匀, 西部大岩体较多 (如东波, 普兰面积均大于  $400 \text{ km}^2$ ), 而东部岩体规模小 (如罗布莎仅  $70 \text{ km}^2$ ); b. 普兰蛇绿岩体区域地质简图 (修改自 Gong 等<sup>[19]</sup>): 普兰岩体主要以方辉橄榄岩为主, 次为二辉橄榄岩, 且地壳单元较少出露

Fig. 1. (a) The distribution of the Yarlung-Zangbo suture zone and locations of outcropped ophiolites (modified after Griffin et al. 2016<sup>[21]</sup>). Ophiolites are discontinuously and unevenly distributed along the Yarlung-Zangbo suture zone. Overall, relatively more large sized massifs are distributed in the western part of the Yarlung-Zangbo suture zone (e.g., areas of the Dongpo and Purang massifs  $>400 \text{ km}^2$ ), while small sized massifs are outcropped in the eastern part (e.g., area of the Luobusa massif is about  $70 \text{ km}^2$ ); (b) Simplified geological map of the Purang ophiolite massif (modified after Gong et al., 2016<sup>[19]</sup>). The Purang massif consists of dominated mantle harzburgite and minor lherzolite. The strata are limitedly outcropped.

矿物之间。铬尖晶石多为黑褐色，呈自形一半自形粒状分布于橄榄石和斜方辉石颗粒中（图 2c）。

二辉橄榄岩在普兰地幔橄榄岩体中出露较少，主要呈透镜状分布。二辉橄榄岩以等粒结构为主，硅酸盐矿物颗粒大小相对均一，偶见粗粒的斜方辉石和橄榄石碎斑。橄榄石可见波状消光以及肯克带（图 2d）。斜方辉石颗粒边部常被溶蚀交代而形成港湾状，并被新鲜的微粒橄榄石填充（图 2d）。单斜辉石常呈他形粒状间隙分布，或者呈新鲜的包裹体出现于斜方辉石中（图 2e）。铬尖晶石含量较少，多为黑褐色，呈自形-半自形粒状分布于橄榄石和斜方辉石颗粒中，或呈蠕虫状分布（图 2f）。

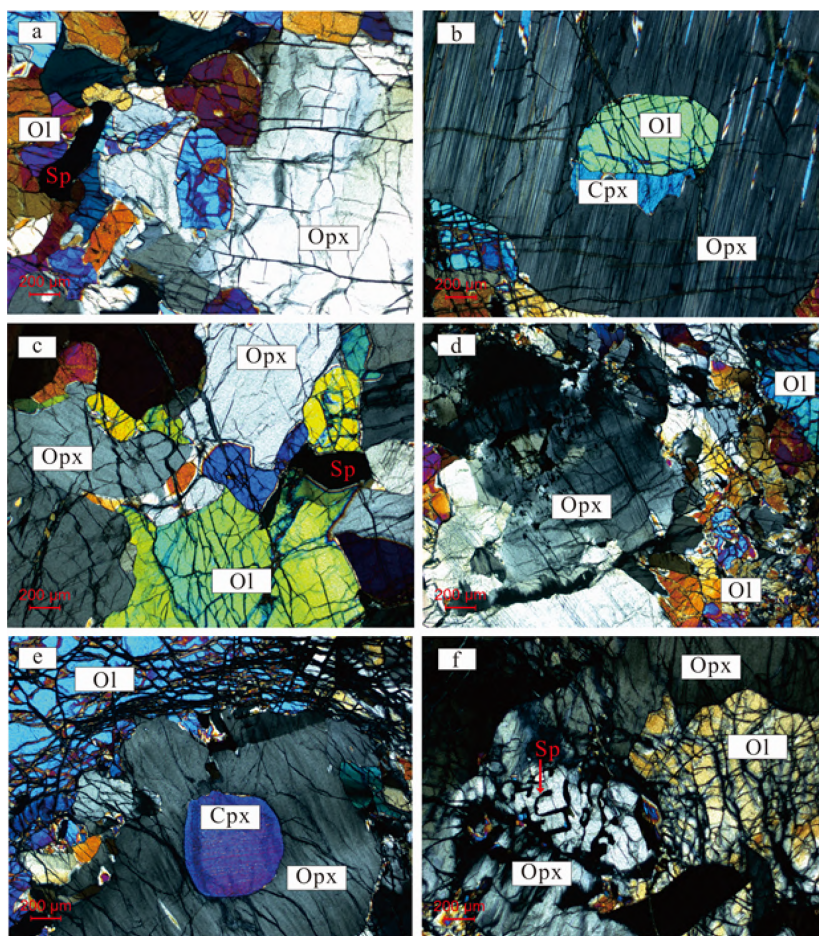
### 3 分析方法

分析测试均在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室完成。全岩主量元素分析采用 X 射线荧光光谱法 (XRF)，分析误差优于 0.5%，包括 15 件方辉橄榄岩和 8 件二辉橄榄岩样品。地幔橄榄岩微量元素分析采用电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS) 测试。为确保测试的准确性，采用 BCR-1、AVG-2 和 GBPG-1 作为标样，并设置 3 组平行样，大部分微量元素组成误差不超过 10%。单矿物（尖晶石、橄榄石、辉石）的主量元素组成采用电子探针分析 (EPMA)，仪器为 JXA8530F-plus 型场发射电子探针。分析条件：15 kV 加速电压、20 nA 束斑电流，束斑直径在 5~10  $\mu\text{m}$ 。

### 4 分析结果

#### 4.1 普兰地幔岩全岩地球化学特征

全岩地球化学数据见表 1。方辉橄榄岩较为新鲜，烧失量在 0.45%~5.05%，含有 42.02%~44.32%的  $\text{SiO}_2$ ，41.2%~44.37%的  $\text{MgO}$ ，少量的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (0.28%~1.14%) 和  $\text{CaO}$  (0.41%~1.8%)。二辉橄榄岩蚀变程度相对较高，烧失量在 2.27%~9.44%。与方辉橄榄岩相比，二辉橄榄岩具有类似



Ol-橄榄石; Opx-斜方辉石; Cpx-单斜辉石; Sp-尖晶石

a. 斜方辉石与橄榄石波状消光; b. 斜方辉石中的单斜辉石出溶片晶以及橄榄石包裹体; c. 半自形粒状的铬尖晶石; d. 斜方辉石的溶蚀边界; e. 斜方辉石中的单斜辉石包裹体; f. 蠕虫状尖晶石

图 2 普兰地幔橄榄岩岩相学特征 (a~c 方辉橄榄岩; d~f 二辉橄榄岩)

Fig. 2. Petrographic characteristics of the Purang mantle peridotites (a~c, harzburgite; d~f, lherzolite).

的 SiO<sub>2</sub> 含量 (40.15%~43.77%), 稍低的 MgO (38.63%~41.93%), 稍高的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1.05%~1.89%) 和 CaO (1.46%~1.96%)。

表 1 普兰地幔橄榄岩全岩数据 (主量元素: w<sub>B</sub>/%; 微量和稀土元素: w<sub>B</sub>/10<sup>-6</sup>)

Table 1. Whole-rock compositions of the Purang mantle peridotites

样品	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	LOI	SUM		
方辉橄榄岩																
PL-02	42.75	0.85	7.98	42.02	0.74	0.1	0.01	0.13	0.02	0.03	0.37	0.01	4.67	99.68		
PL-03	43.13	0.81	8.96	42.68	1.11	0.52	0.02	0.14	0.03	0.01	0.36	0.04	2.55	100.36		
PL-04	41.73	1.03	9.12	42.69	1.37	0.59	0.02	0.14	0.03	0.02	0.38	0.04	3.52	100.68		
PL-05	41.42	1.02	8.83	42.72	1.48	0.53	0.02	0.13	0.04	0.05	0.36	0.05	3.48	100.12		
PL-06	41.2	0.95	9.34	44.19	1.3	0.73	0.02	0.14	0.02	0.04	0.41	0.03	2.15	100.52		
PL-07	42.43	0.84	9.48	43.13	1.2	0.54	0.02	0.14	0.04	0.02	0.34	0.04	2.49	100.71		
PL-08	43.6	0.43	9.26	44.24	0.6	1.24	0.04	0.14	0.04	0.02	0.29	0.04	0.98	100.92		
PL-09	43.76	0.37	9.25	44.32	0.61	0.85	0.03	0.14	0.04	0.02	0.41	0.03	0.66	100.49		
PL-10	42.94	0.38	8.94	43.77	0.59	1.31	0.03	0.14	0.03	0.04	0.37	0.03	1.99	100.57		
PL-11	43.03	0.89	8.52	44.01	1.01	1.05	0.03	0.13	0.04	0.06	0.43	0.04	0.75	99.99		
PL-12	44.37	0.78	9.33	42.77	1.18	0.92	0.03	0.14	0.04	0.05	0.36	0.04	0.45	100.46		
PL-13	43.11	0.28	8.19	42.05	0.41	0.1	-	0.14	0.02	0.01	0.4	-	5.05	99.76		
PL-18	42.63	1.05	9	42.14	0.87	0.9	0.03	0.13	0.04	0.05	0.31	0.04	3.63	100.82		
PL-21a	42.67	1.14	9.61	42.53	0.89	0.48	0.02	0.14	0.04	0.03	0.34	0.05	2.4	100.34		
二辉橄榄岩																
PL-14	38.63	1.23	7.9	40.15	1.58	0.1	0.01	0.13	0.02	0.04	0.32	0.01	9.44	99.56		
PL-15	39.95	1.05	8.69	40.64	1.46	0.4	0.02	0.13	0.04	0.02	0.36	0.04	7.75	100.55		
PL-16	41.41	1.48	9.06	43.4	1.76	0.65	0.02	0.14	0.04	0.04	0.37	0.05	2.27	100.68		
PL-17	41.32	1.45	9.14	42.85	1.62	0.65	0.02	0.14	0.04	0.02	0.34	0.05	3.19	100.83		
PL-19	40.55	1.89	8.45	43.77	1.89	0.18	-	0.14	0.02	0.02	0.4	0.04	2.92	100.27		
PL-20	40.37	1.36	9.08	42.71	1.8	0.51	0.02	0.14	0.04	0.02	0.37	0.05	4.01	100.48		
PL-22	40.41	1.59	8.61	43.42	1.96	0.59	0.01	0.14	0.01	0.03	0.28	0.04	3.12	100.21		
PL-24	41.93	1.24	8.61	42.74	1.55	0.92	0.02	0.13	0.04	0.04	0.35	0.05	3.27	100.88		
样品	Rb	Ba	Th	U	Nb	Pb	Sr	Zr	Hf	Y	Sc	V	Cu	Ni	Co	Zn
方辉橄榄岩																
PL-02	0.28	0.39	0.04	0.01	0.1	0.1	2	0.2	0.01	0.16	8.4	36	9.4	2191	121	49
PL-03	0.24	0.23	0.03	0.01	0.09	0.07	1.8	0.17	0.01	0.15	11	47	15	2305	131	48
PL-04	0.29	0.5	0.03	0.01	0.08	0.19	2.6	0.19	0.01	0.23	12	56	20	2229	136	51
PL-05	0.21	0.29	0.02	0.01	0.07	0.07	1.7	0.13	0.01	0.25	12	54	27	2210	131	50
PL-06	0.23	1.6	0.02	0.01	0.09	0.2	3	0.17	0.01	0.24	12	58	25	2229	150	52
PL-07	0.23	1.3	0.02	0.01	0.08	0.08	2.3	0.17	0.01	0.22	11	51	21	2295	143	52
PL-08	0.19	0.87	0.02	0.02	0.09	0.06	2.1	0.21	0.01	0.1	9.4	34	4.6	2314	153	50
PL-09	0.16	0.46	0.02	0.01	0.08	0.07	2.2	0.21	0.01	0.09	8.3	34	2.9	2352	151	51
PL-10	0.18	0.33	0.01	0.01	0.06	0.06	1.8	0.17	0.01	0.09	8.4	32	5.2	2333	133	49
PL-11	0.26	1.2	0.03	0.01	0.14	0.07	2.4	0.38	0.01	0.19	11	49	16	2191	153	52
PL-12	0.14	0.34	0.02	0.01	0.1	0.11	1.7	0.19	0.01	0.24	10	44	20	2324	148	52
PL-13	0.15	0.26	0.01	0.01	0.06	0.07	4	0.14	0.01	0.06	6.5	26	4.4	2144	132	48
PL-18	0.13	0.32	0.01	0.01	0.05	0.08	2	0.11	0.01	0.26	7.7	37	8.6	2116	126	50
PL-21a	0.21	1.04	0.03	0.01	0.09	0.09	2.1	0.3	0.01	0.33	9.6	48	8.1	2097	132	59
二辉橄榄岩																
PL-14	0.36	0.19	0.02	0.01	0.05	0.07	1.8	0.15	0.01	0.35	11	53	20	1927	103	44
PL-15	0.33	0.21	0.01	0.01	0.6	0.08	1.9	0.19	0.01	0.29	11	50	21	2059	113	49
PL-16	0.15	0.14	0.01	0.02	0.06	0.07	2	0.15	0.01	0.51	12	59	12	2125	129	48
PL-17	0.17	0.21	0.01	0.01	0.05	0.1	1.8	0.11	0.01	0.45	12	60	18	2125	129	49
PL-19	0.13	0.16	0.01	0.02	0.05	0.09	1.8	0.12	0.01	0.59	12	66	42	2088	127	49
PL-20	0.19	0.18	0.01	0.01	0.05	0.07	1.7	0.14	0.01	0.57	12	59	23	2021	123	50
PL-22	0.12	0.4	0.01	0.03	0.07	0.09	1.7	0.19	0.01	0.75	13	65	16	2050	138	47
PL-24	0.16	0.2	0.01	0.01	0.05	0.07	1.9	0.21	0.01	0.65	9.4	45	13	2116	122	49

续表 1

样品	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/HREE
方辉橄榄岩																
PL-02	0.059	0.083	0.009	0.024	0.004	-	0.005	0.001	0.012	0.005	0.021	0.004	0.042	0.008	0.28	1.83
PL-03	0.043	0.059	0.005	0.016	0.002	-	0.004	0.001	0.014	0.005	0.02	0.005	0.041	0.008	0.22	1.28
PL-04	0.045	0.069	0.006	0.02	0.005	0.001	0.007	0.003	0.028	0.009	0.036	0.007	0.058	0.01	0.3	0.92
PL-05	0.179	0.241	0.02	0.055	0.007	0.001	0.008	0.003	0.028	0.009	0.035	0.007	0.058	0.011	0.66	3.16
PL-06	0.049	0.079	0.009	0.034	0.007	0.004	0.011	0.003	0.027	0.009	0.033	0.007	0.053	0.011	0.34	1.18
PL-07	0.061	0.082	0.007	0.024	0.004	-	0.009	0.002	0.025	0.008	0.03	0.006	0.048	0.01	0.32	1.29
PL-08	0.038	0.056	0.005	0.02	0.005	-	0.008	0.001	0.011	0.003	0.013	0.002	0.023	0.004	0.19	1.91
PL-09	0.056	0.082	0.006	0.021	0.003	-	0.006	0.001	0.01	0.003	0.012	0.002	0.022	0.004	0.23	2.8
PL-10	0.028	0.04	0.004	0.013	0.003	-	0.004	0.001	0.009	0.003	0.012	0.002	0.021	0.004	0.14	1.57
PL-11	0.074	0.126	0.013	0.045	0.008	0.001	0.009	0.002	0.02	0.007	0.026	0.006	0.045	0.009	0.39	2.15
PL-12	0.031	0.051	0.005	0.021	0.006	0.001	0.011	0.003	0.029	0.008	0.03	0.006	0.047	0.009	0.26	0.8
PL-13	0.033	0.048	0.005	0.014	0.003	-	0.004	0.001	0.006	0.002	0.007	0.001	0.014	0.003	0.14	2.71
PL-18	0.018	0.028	0.002	0.008	0.004	0.001	0.012	0.004	0.034	0.009	0.036	0.006	0.049	0.009	0.22	0.38
PL-21a	0.053	0.097	0.01	0.036	0.009	0.002	0.013	0.003	0.036	0.012	0.043	0.008	0.067	0.013	0.4	1.06
二辉橄榄岩																
PL-14	0.035	0.049	0.005	0.019	0.004	0.001	0.013	0.004	0.041	0.012	0.045	0.008	0.068	0.012	0.32	0.56
PL-15	0.03	0.04	0.003	0.012	0.003	0.001	0.012	0.003	0.034	0.01	0.037	0.007	0.056	0.011	0.26	0.52
PL-16	0.042	0.063	0.005	0.02	0.007	0.002	0.024	0.006	0.063	0.017	0.064	0.011	0.088	0.017	0.43	0.48
PL-17	0.031	0.043	0.004	0.013	0.006	0.001	0.02	0.005	0.056	0.016	0.059	0.011	0.079	0.014	0.36	0.38
PL-19	0.05	0.065	0.006	0.017	0.009	0.002	0.028	0.007	0.079	0.021	0.075	0.013	0.101	0.017	0.49	0.44
PL-20	0.021	0.038	0.004	0.015	0.007	0.003	0.023	0.007	0.069	0.018	0.066	0.012	0.09	0.015	0.39	0.29
PL-22	0.028	0.048	0.005	0.02	0.013	0.005	0.036	0.01	0.092	0.025	0.087	0.015	0.113	0.019	0.52	0.3
PL-24	0.021	0.039	0.005	0.023	0.01	0.005	0.034	0.009	0.081	0.022	0.079	0.013	0.098	0.016	0.46	0.29

普兰地幔橄榄岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(图 3a) 总体呈现出左高右低的趋势。普兰地幔橄榄岩稀土元素含量均较低, 其中稀土总量( $\Sigma\text{REE}$ ) 在  $0.141 \times 10^{-6} \sim 0.662 \times 10^{-6}$ , 平均为  $0.332 \times 10^{-6}$ , 远低于原始地幔值, 表明其经历较高级别的部分熔融。方辉橄榄岩  $\Sigma\text{REE}$  平均为  $0.292 \times 10^{-6}$ , 低于二辉橄榄岩 ( $0.401 \times 10^{-6}$ )。方辉橄榄岩的 LREE/HREE 平均比值高于二辉橄榄岩 (3.164 对比 0.293)。普兰方辉橄榄岩和二辉橄榄岩具有相似的“V”型原始地幔标准化稀土元素配分曲线图(图 3b), 明显富集轻稀土元素(LREE)。二辉橄榄岩相对于方辉橄榄岩富集重稀土元素。除了 LREE, 普兰地幔岩明显富集大离子亲石元素富集(LILE), 如 Rb、Sr, 以及高场强元素(HFSE), 如 U、Pb 和 Hf。同时 Pb 表现出明显正异常(图 3a)。

#### 4.2 普兰地幔岩矿物地球化学特征

橄榄石分析结果见表 2。方辉橄榄岩的橄榄石 Fo 值平均为 90.36,  $w(\text{NiO})$  为 0.34%~0.45%。二辉橄榄岩中橄榄石 Fo 值稍低, 平均为 89.91。  $w(\text{NiO})$  在 0.37%~0.44%。  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和 CaO 含量在方辉橄榄岩和二辉橄榄岩中均低于检测线。

斜方辉石分析结果见表 3。普兰地幔岩中的斜方辉石以顽火辉石为主, En 为 85.95~90.91, 平均为 89.1。方辉橄榄岩中的斜方辉石  $Mg^\#$  [ $Mg^\# = 100X_{Mg}/(X_{Mg} + X_{Fe^{2+}})$ , X 为氧化物的摩尔数] 平均值为 90.53,  $w(\text{CaO})$  为 0.4%~2.13%,  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$  为 0.32%~0.87%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 0.82%~3.88%。二辉橄榄岩中的斜方辉石具有稍高的  $Mg^\#$  (平均值为 91.31) 以及稍高的 CaO (1.20%~2.95%)、 $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (0.77%~0.94%)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  (2.93%~4.04%) 含量, 不相容元素 Na、Ti 含量几乎低于检测限。二辉橄榄岩中的斜方辉石具有深海残余的特征, 而方辉橄榄岩中的斜方辉石具有弧橄榄岩的特征(图 4a~c)。

单斜辉石分析结果见表 4。单斜辉石为透辉石为主 (En = 47.28~53.55, 平均为 49.50)。方辉橄榄岩中的单斜辉石  $Mg^\#$  值在 91.4~94.8, 平均为 93.45。  $w(\text{CaO})$  为 21.2%~24.1%,  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$  为 0.37%~

1.21%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 0.88%~4.32%。二辉橄榄岩中的单斜辉石具有稍低的  $\text{Mg}^\#$  值(平均为 92.73)。 $w(\text{CaO})$  为 19.9%~23.5%,  $w(\text{Cr}_2\text{O}_3)$  为 0.66%~1.31%,  $w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  为 2.41%~5.09%, 不相容元素 Na、Ti 含量在普兰地幔岩中很低。根据普兰地幔岩中的单斜辉石地球化学组成(图 5a~c), 发现二辉橄榄岩具有深海橄榄岩的特征, 而方辉橄榄岩具有弧橄榄岩的性质。

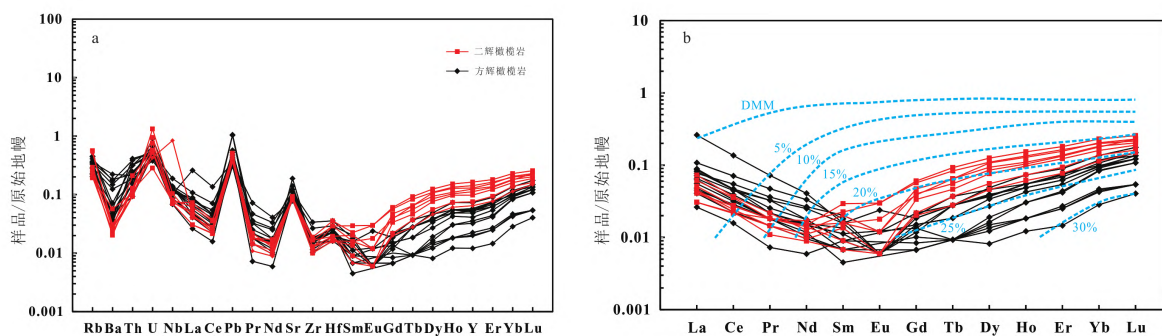
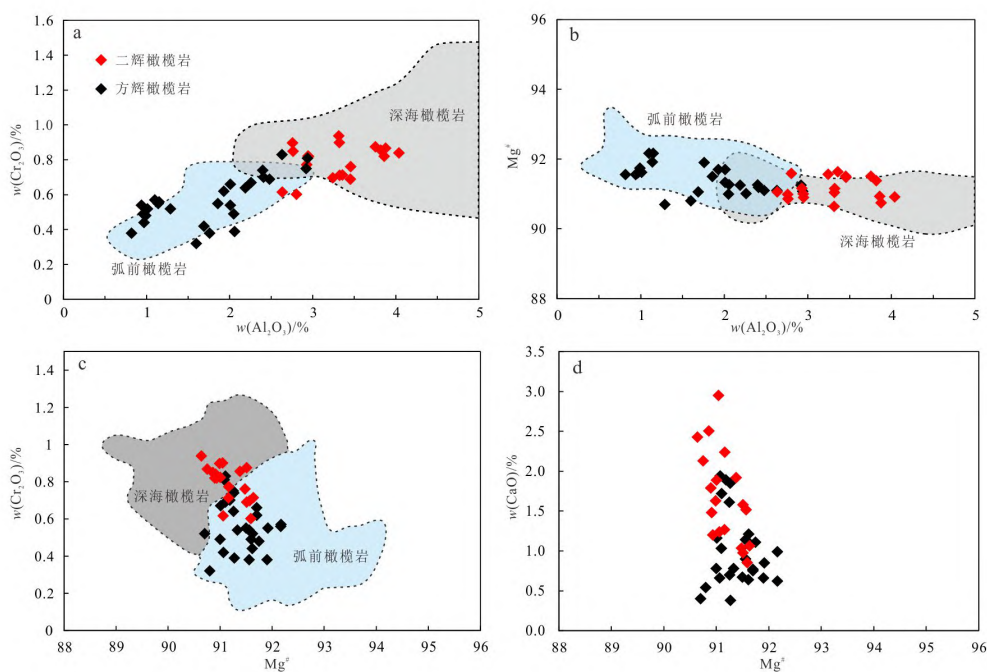


图 3 a. 普兰地幔橄榄岩原始地幔标准化微量元素蛛网图: 普兰地幔岩明显富集轻稀土元素(LREE), 高场强元素(Hf、U、Pb), 大离子亲石元素(Rb、Sr), 表明普兰地幔受到含水熔体的交代富集作用; b. CI 球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图及部分熔融(分离熔融)程度模拟(底图据 Niu 等<sup>[28]</sup>, 原始地幔标准数值引自 Sun 和 McDonough<sup>[38]</sup>)

Fig. 3. (a) Primitive mantle-normalized trace elements patterns of the Purang mantle peridotites. The Purang mantle peridotites are significantly enriched in incompatible trace elements, such as LREE, HFSE (U, Pb and Hf), LILE (Rb and Sr), suggesting that the mantle was metasomatized by hydrous melts; (b) Primitive mantle-normalized REE patterns of the Purang mantle peridotites. The degrees of partial melting (near-fractional melting) of the Purang mantle peridotites are modelled to be 15-20% (according to Niu et al. (2004)<sup>[28]</sup>). Primitive mantle data are from Sun and McDonough (1989)<sup>[38]</sup>.

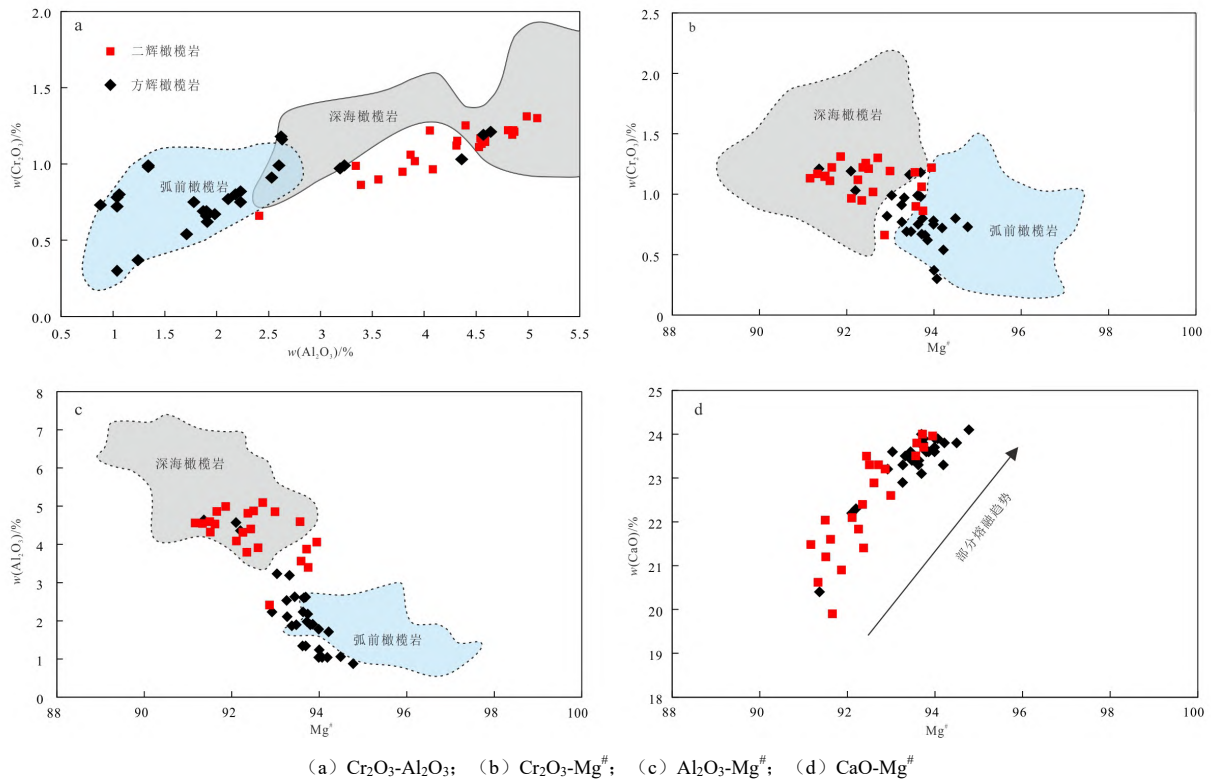


a.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; b.  $\text{Mg}^\#$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; c.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Mg}^\#$ ; d.  $\text{CaO}$ - $\text{Mg}^\#$

普兰地幔岩中, 大多数方辉橄榄岩中的斜方辉石都落在了弧前橄榄岩的区域, 而二辉橄榄岩中的斜方辉石均在深海橄榄岩的范围, 表明普兰地幔(方辉橄榄岩)类似于弧下地幔(弧前橄榄岩和深海橄榄岩引自 Lian 等<sup>[41]</sup>)

图 4 普兰地幔橄榄岩斜方辉石成分变化

Fig. 4. Compositional variations of orthopyroxenes from the Purang mantle peridotites.

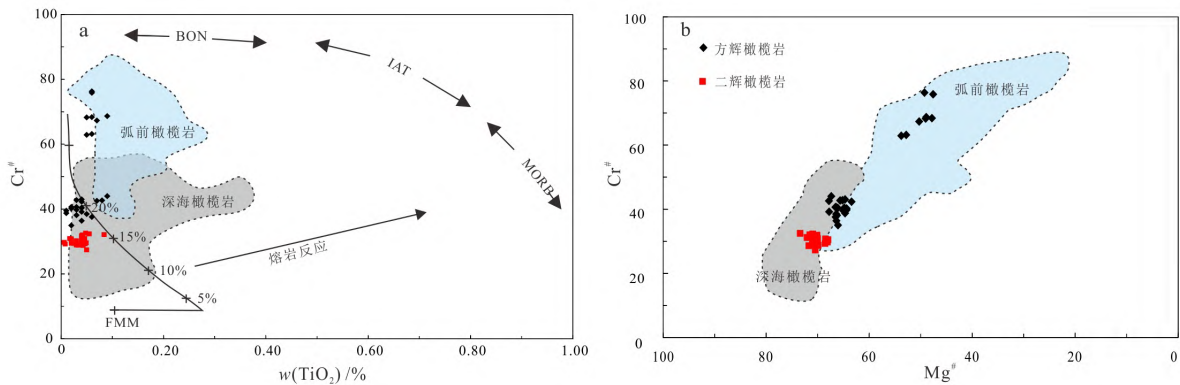


方辉橄榄岩中单斜辉石几乎全部落入弧前橄榄岩的范围, 表明普兰地幔具有弧前地幔的亲缘性; 二辉橄榄岩中单斜辉石落在深海橄榄岩范畴(弧前地幔橄榄岩和深海地幔橄榄岩引自 Lian 等<sup>[41]</sup>)

图5 普兰地幔橄榄岩单斜辉石成分变化

Fig. 5. Compositional variations of clinopyroxenes from the Purang mantle peridotites.

尖晶石分析结果见表5。普兰地幔岩中尖晶石主量元素含量变化范围较大: 方辉橄榄岩中的铬尖晶石  $\text{Cr}^\#$  值在 32~76,  $\text{Mg}^\#$  值在 49~70。二辉橄榄岩中的尖晶石  $\text{Cr}^\#$  值在 27~31,  $\text{Mg}^\#$  值在 68~71;  $\text{TiO}_2$  含量在普兰地幔岩中很低, 为 0.01%~0.09%。部分方辉橄榄岩的尖晶石  $\text{Cr}^\# > 50$ 、 $\text{Mg}^\#$  50 左右而落入弧前橄榄岩区域, 而低  $\text{Cr}^\# (< 40)$ 、高  $\text{Mg}^\# (60\sim 80)$  的尖晶石具有深海橄榄岩的特征(图6)。



a.  $\text{Cr}^\#\text{-TiO}_2$  关系图(弧前地幔橄榄岩和深海地幔橄榄岩据 Lian 等<sup>[41]</sup>; 尖晶石的 Ti 含量和  $\text{Cr}^\#$  表明, 二辉橄榄岩类似于深海橄榄岩并经历了约 15% 的部分熔融, 而方辉橄榄岩则具有弧前橄榄岩的性质); b.  $\text{Cr}^\#\text{-Mg}^\#$  关系图(部分方辉橄榄岩中尖晶石位于深海橄榄岩和弧前橄榄岩重叠处, 其他则完全落入弧前橄榄岩区域内; 二辉橄榄岩中尖晶石均在深海橄榄岩范围内)

图6 普兰地幔橄榄岩尖晶石成分变化

Fig. 6. Compositional variations of spinels from the Purang mantle peridotites.



## 5 讨论

### 5.1 普兰地幔的性质

对于普兰地幔的性质, 目前还存在争议。争议的焦点在于普兰地幔是否存在洋内俯冲过程(即弧下地幔亦或大洋地幔)<sup>[17,20]</sup>。Miller 等<sup>[17]</sup>和刘等<sup>[18]</sup>对基性岩脉(辉长岩脉)进行研究, 认为这些岩脉具有 MORB 的亲缘性, 因此将普兰地幔归于洋中脊玄武岩地幔(及大洋地幔)。Liu 等<sup>[11]</sup>以地幔橄榄岩为研究对象, 发现普兰地幔岩中含有斜长石, 并认为是俯冲流体交代地幔岩的产物, 因此普兰地幔具有 SSZ 地幔的性质。由于斜长石是熔岩反应的典型产物, 为次生矿物, 并不能很好地反映原始地幔源区的特征。而且斜长石不仅能形成于弧熔体的交代作用, 也能形成于 MORB 的交代作用, 因此对于示踪交代熔体的性质具有一定的难度。本次研究挑选了不含斜长石的尖晶石橄榄岩样品, 来限定普兰地幔的源区特征。

一般而言, 深海橄榄岩位于洋中脊, 是大洋玄武岩的地幔源区, 这类橄榄岩一般经历了无水熔融, 熔融程度较低(5%~15%)。相反, 弧橄榄岩(包括弧下地幔楔、弧前橄榄岩等)则位于汇聚板块边缘俯冲带, 一般认为是岛弧岩浆的源区, 因为板片释放的流体会导致弧橄榄岩经历含水熔融, 由此显著提高了部分熔融程度(10%~25%)。从矿物地球化学方面来看, 普兰地幔岩中斜方辉石、单斜辉石及尖晶石表明部分橄榄岩(方辉橄榄岩)具有明显的弧橄榄岩的特性(图 4-6): 弧橄榄岩具有更加难熔(亏损)的特征, 表现为高 Mg (Fo)、Ni 橄榄石, 高 Cr<sup>#</sup>低 Ti 尖晶石和高 Mg 低 Al 辉石。从全岩微量元素组成方面来看, 弧橄榄岩也可能体现出强烈的不相容元素的富集, 如 LREE、LILE。因为在俯冲

表 2 普兰地幔橄榄岩橄榄石电子探针分析数据 ( $w_B/\%$ )

Table 2. EPMA results of olivines from the Purang mantle peridotites

样品	Mg <sup>#</sup>	FeO	MnO	NiO	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Total	
PL02-1	90.80	9.09	0.11	0.42	50.00	40.80	0.01	100.43	
PL02-2	90.80	9.07	0.11	0.38	49.70	40.40	-	99.66	
PL02-3	90.70	9.17	0.11	0.41	50.10	40.60	0.02	100.41	
PL03-1	90.50	9.29	0.11	0.41	49.50	40.80	0.03	100.14	
PL03-2	91.50	8.54	0.12	0.43	51.10	40.10	-	100.29	
PL03-3	90.80	9.12	0.11	0.40	49.90	40.80	0.03	100.36	
PL04-1	89.90	9.85	0.12	0.40	49.00	40.70	0.03	100.10	
PL04-2	90.10	9.71	0.11	0.39	49.30	40.50	0.02	100.03	
PL04-3	90.10	9.71	0.13	0.41	49.20	40.40	0.03	99.88	
PL05-1	90.00	9.71	0.12	0.39	48.90	40.70	0.02	99.84	
PL05-2	90.10	9.64	0.10	0.39	49.10	40.30	0.03	99.56	
PL05-3	91.40	8.41	0.09	0.31	49.70	40.80	0.03	99.34	
PL06-1	90.00	9.83	0.12	0.42	49.00	40.90	0.02	100.29	
PL06-2	90.10	9.69	0.13	0.43	49.30	40.60	0.03	100.18	
方辉橄榄岩 (Harz)	PL06-3	90.00	9.74	0.12	0.39	49.00	40.70	0.02	99.97
	PL07-1	90.00	9.74	0.11	0.40	49.00	40.60	0.02	99.87
	PL07-2	90.30	9.51	0.12	0.40	49.30	41.00	0.01	100.34
	PL07-3	90.10	9.71	0.12	0.40	49.40	40.80	0.02	100.45
	PL08-1	90.80	9.09	0.12	0.43	49.90	40.90	0.03	100.47
	PL08-2	90.30	9.63	0.12	0.41	49.70	40.90	0.02	100.78
	PL09-1	90.50	9.34	0.12	0.45	49.30	40.60	0.03	99.84
	PL09-2	90.30	9.56	0.12	0.42	49.50	40.50	0.03	100.13
	PL10-1	90.20	9.57	0.13	0.41	48.80	41.00	0.03	99.94
	PL10-2	90.20	9.58	0.12	0.43	49.30	40.80	0.03	100.26
	PL12-1	90.10	9.70	0.12	0.41	49.40	40.60	0.01	100.24
	PL12-2	90.30	9.59	0.12	0.38	49.60	40.70	0.03	100.42
	PL13-1	90.70	9.10	0.11	0.39	49.20	40.70	0.02	99.52
	PL13-2	91.10	8.80	0.12	0.40	50.10	40.50	0.01	99.93
	PL21a-1	89.80	10.00	0.12	0.34	49.00	40.30	0.03	99.79
	PL21a-2	89.80	9.98	0.12	0.41	49.00	40.50	0.02	100.03
	PL14-1	89.90	9.77	0.14	0.41	48.70	39.90	0.02	98.94
	PL14-2	90.00	9.79	0.11	0.41	49.10	40.70	0.03	100.14
	PL15-1	90.00	9.88	0.13	0.39	49.30	40.70	0.03	100.43
二辉橄榄岩 (Lherz)	PL15-2	89.90	9.87	0.12	0.41	48.70	40.50	0.03	99.63
	PL17-1	89.80	10.00	0.13	0.37	49.00	40.60	0.02	100.12
	PL17-2	90.10	9.68	0.12	0.42	49.20	40.70	0.01	100.13
	PL17-3	89.90	9.89	0.13	0.40	49.00	40.90	0.03	100.35
	PL17-4	89.90	9.79	0.11	0.38	48.80	40.50	0.01	99.59
	PL17-5	89.70	10.00	0.11	0.44	48.50	40.40	0.03	99.48

表 3 普兰地幔橄榄岩斜方辉石电子探针分析数据 ( $w_B/\%$ )

Table 3. EPMA results of orthopyroxenes from the Purang mantle peridotites

样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	NiO	Total	Mg <sup>#</sup>
PL02-1	56.2	0.02	1.76	0.38	5.57	0.13	35.0	0.66	0.02	0.10	99.84	91.90
PL02-2	55.5	0.03	1.93	0.62	5.65	0.12	34.8	0.77	0.04	0.09	99.57	91.70
PL02-3	55.5	0.01	2.01	0.66	5.68	0.12	34.8	0.75	0.01	0.10	99.64	91.70
PL03-1	57.8	0.01	1.29	0.52	6.31	0.13	34.4	0.40	-	0.07	100.93	90.70
PL03-2	55.7	-	1.86	0.55	5.82	0.13	34.7	0.67	-	0.07	99.50	91.50
PL03-3	56.9	-	1.60	0.32	6.20	0.13	34.0	0.54	-	0.09	99.78	90.80
PL04-1	54.6	0.02	2.48	0.69	5.91	0.13	33.6	1.03	-	0.10	98.56	91.10
PL04-2	54.9	0.01	2.40	0.74	5.79	0.11	33.6	1.85	-	0.11	99.51	91.26
PL04-3	54.5	-	2.26	0.67	6.01	0.11	33.8	1.16	-	0.09	98.60	91.01
PL05-1	55.5	0.01	2.01	0.54	5.86	0.12	34.3	0.78	-	0.10	99.22	91.33
PL05-2	54.9	0.02	2.41	0.70	5.76	0.13	33.1	1.89	-	0.09	99.00	91.18
PL05-3	55.0	0.01	2.05	0.49	6.09	0.13	34.2	0.78	-	0.07	98.82	91.00
PL06-1	55.3	-	2.19	0.64	5.90	0.13	34.2	0.70	-	0.09	99.15	91.25
PL06-2	55.6	0.01	1.69	0.42	6.06	0.11	34.3	0.66	-	0.08	98.93	91.06
Harz PL07-1	55.5	0.01	2.06	0.39	5.99	0.13	34.8	0.38	-	0.10	99.36	91.27
PL07-2	54.3	0.05	2.94	0.81	5.82	0.11	33.0	1.94	0.02	0.10	99.09	91.08
PL07-3	54.5	0.02	2.63	0.83	5.82	0.11	33.1	1.72	-	0.09	98.82	91.10
PL07-4	54.3	0.01	2.92	0.75	5.73	0.12	33.2	1.61	-	0.10	98.74	91.25
PL08-1	56.6	-	0.97	0.44	5.80	0.13	35.2	0.64	0.02	0.08	99.88	91.61
PL08-2	56.3	0.01	1.15	0.56	5.37	0.12	35.1	0.99	0.01	0.09	99.70	92.17
PL08-3	56.4	0.01	1.14	0.55	5.54	0.13	35.0	0.85	0.01	0.07	99.70	91.92
PL08-4	56.9	-	1.10	0.57	5.40	0.11	35.3	0.62	0.01	0.08	100.09	92.17
PL09-1	56.6	-	0.82	0.38	5.81	0.14	35.0	0.90	-	0.08	99.73	91.56
PL09-2	56.3	0.01	0.99	0.48	5.62	0.12	34.7	1.11	0.01	0.09	99.43	91.75
PL10-1	56.4	-	1.01	0.52	5.73	0.13	34.8	1.21	-	0.10	99.90	91.62
PL10-2	56.2	0.03	0.96	0.49	5.73	0.12	34.7	1.12	0.03	0.10	99.48	91.60
PL10-3	56.3	-	0.94	0.54	5.76	0.12	34.7	1.14	0.02	0.09	99.61	91.56
PL21a-1	54.2	0.01	2.95	0.82	5.80	0.14	32.6	1.89	0.06	0.10	98.50	91.00
PL21a-2	54.2	0.02	2.76	0.90	5.86	0.12	32.9	1.63	-	0.09	98.41	90.99
PL21a-3	54.3	-	3.88	0.87	5.96	0.12	32.5	2.13	0.05	0.09	99.94	90.75
PL21a-4	54.6	0.04	2.64	0.62	5.95	0.11	33.6	1.24	-	0.10	98.93	91.06
PL21a-5	54.4	0.01	2.76	0.85	5.90	0.12	32.6	2.51	0.01	0.10	99.24	90.86
PL17-1	53.8	0.03	3.32	0.90	5.63	0.12	31.8	2.95	0.01	0.09	98.65	91.05
PL17-2	54.1	0.02	4.04	0.84	5.90	0.12	32.8	1.48	-	0.09	99.39	90.91
Lherz PL17-3	54.6	0.01	3.86	0.82	5.94	0.12	33.1	1.20	-	0.09	99.74	90.93
PL17-4	54.2	0.05	2.93	0.77	5.60	0.11	32.1	2.24	0.02	0.10	98.19	91.16
PL17-5	54.2	0.01	3.32	0.94	5.87	0.12	31.6	2.43	-	0.10	98.50	90.64
PL17-6	54.0	0.02	2.95	0.82	5.85	0.12	32.4	1.79	-	0.11	98.09	90.90
PL14-1	54.3	0.03	3.32	0.71	5.78	0.13	33.1	1.27	-	0.07	98.74	91.16
PL14-2	55.1	0.01	3.76	0.88	5.56	0.13	33.3	1.58	-	0.10	100.35	91.51
PL14-3	55.1	0.04	3.24	0.70	5.62	0.11	33.9	1.52	0.04	0.08	100.34	91.57
PL14-4	55.4	0.02	3.36	0.71	5.54	0.11	33.7	1.06	0.01	0.09	100.04	91.64
PL15-1	55.8	0.02	3.46	0.69	5.73	0.14	34.3	0.97	0.01	0.08	101.17	91.51
PL15-2	55.8	0.01	2.81	0.60	5.62	0.15	34.0	0.85	-	0.07	99.93	91.59
PL15-3	55.1	0.03	3.46	0.76	5.60	0.14	33.4	1.04	-	0.07	99.64	91.48
PL15-4	54.9	0.03	3.82	0.86	5.56	0.11	32.7	1.92	0.04	0.09	100.09	91.38

的动力学背景下, 微量元素异常富集的、来自俯冲板片的含水熔体会交代地幔橄榄岩, 导致这些元素的再富集。普兰尖晶石橄榄岩的全岩微量元素组成显示了强烈的 LREE、HFSE (Hf、U、Pb) 和 LILE (Rb、Sr) 富集。这种富集特征很难用 MORB 熔体交代来解释, 尤其是 Rb、Sr、U、Pb 这些流体活动性元素的异常富集, 在深海尖晶石橄榄岩, 甚至斜长橄榄岩中都十分少见 (Niu 等<sup>[28]</sup>), 我们认为最

合理的解释就是含水的俯冲板片熔体的交代作用（详见下文讨论）。综上所述，我们认为普兰地幔是弧地幔，而非纯粹的大洋地幔或者大陆岩石圈地幔。

## 5.2 部分熔融

地幔橄榄岩全岩和矿物地球化学组成可以揭示部分熔融过程<sup>[23-25]</sup>。地幔橄榄岩在部分熔融过程中，易熔组分 SiO<sub>2</sub>、CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 倾向进入熔体中，MgO 则残留下来。因此地幔岩 MgO 含量常被作为亏损程度的岩石学指标<sup>[24, 28]</sup>。普兰地幔橄榄岩 MgO 含量远高于亏损地幔值，而 CaO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量明显低于亏损地幔，表明普兰地幔经历了较大程度的部分熔融。HREE 一般被认为受后期流体交代、固溶体交换的影响较小，因此可以很好地指示部分熔融程度<sup>[28]</sup>。图 3b 反映了普兰二辉橄榄岩的部分熔融程度为 10%~15%，而方辉橄榄岩的部分熔融程度在 15%~20%。

在上地幔无水条件下，地幔橄榄岩中的单斜辉石首先随着部分熔融而被快速消耗，在达到 25% 的熔融程度时，单斜辉石被耗尽<sup>[26]</sup>，易熔组分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O、TiO<sub>2</sub> 首先

表 4 普兰地幔橄榄岩单斜辉石电子探针分析数据 (w<sub>B</sub>/%)

Table 4. EPMA results of clinopyroxenes from the Purang mantle peridotites

样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	NiO	Total	Mg#
PL02-1	53.2	0.08	1.90	0.66	2.11	0.06	17.9	23.6	0.02	0.05	99.58	93.80
PL02-2	53.0	0.08	2.23	0.75	2.17	0.07	17.9	23.4	0.05	0.04	99.69	93.63
PL02-3	52.9	0.07	1.91	0.62	2.09	0.06	17.9	23.6	0.02	0.05	99.22	93.85
PL03-1	53.4	0.05	1.98	0.67	2.09	0.07	17.5	23.8	-	0.05	99.61	93.72
PL03-2	53.5	0.01	1.24	0.37	2.06	0.05	18.1	23.9	0.04	0.05	99.32	94.00
PL03-3	53.0	0.01	1.78	0.75	2.03	0.07	17.8	23.7	0.02	0.04	99.20	93.99
PL04-1	54.7	0.01	1.04	0.30	2.07	0.07	18.4	23.9	0.00	0.04	100.53	94.06
PL04-2	52.9	0.04	2.18	0.80	2.06	0.07	17.3	23.9	0.03	0.05	99.33	93.74
PL04-3	52.3	0.06	2.60	0.99	2.08	0.07	17.2	23.8	-	0.06	99.16	93.65
PL05-1	52.5	0.04	3.23	0.99	2.27	0.07	17.0	23.6	0.02	0.04	99.76	93.03
PL05-2	52.7	0.05	3.19	0.97	2.22	0.07	17.4	23.5	0.01	0.05	100.16	93.32
PL05-3	52.5	0.05	2.53	0.91	2.32	0.07	18.0	22.9	0.04	0.04	99.36	93.26
PL06-1	52.5	0.02	2.23	0.82	2.39	0.08	17.6	23.2	0.10	0.06	99.00	92.92
PL06-2	52.7	0.03	1.87	0.69	2.24	0.07	17.7	23.5	0.11	0.05	98.96	93.37
PL06-3	52.9	0.03	1.90	0.69	2.19	0.08	17.6	23.4	0.15	0.05	98.99	93.47
Harz PL07-1	52.0	0.09	4.36	1.03	2.64	0.09	17.5	22.3	0.00	0.06	100.07	92.20
PL07-2	51.5	0.06	4.64	1.21	3.10	0.10	18.4	20.4	0.12	0.06	99.59	91.36
PL07-3	51.6	0.08	4.57	1.19	2.63	0.08	17.2	22.2	0.13	0.05	99.73	92.10
PL08-1	54.2	0.02	1.34	0.98	2.16	0.08	18.0	23.1	0.26	0.04	100.18	93.69
PL08-2	53.8	0.02	1.34	0.99	2.15	0.07	17.7	23.3	0.23	0.04	99.64	93.62
PL09-1	54.0	0.01	1.04	0.78	2.03	0.07	17.8	23.6	0.24	0.05	99.62	93.99
PL09-2	53.9	0.01	0.88	0.73	1.76	0.07	17.9	24.1	0.14	0.04	99.53	94.77
PL10-1	53.8	-	1.04	0.72	1.98	0.06	18.0	23.3	0.25	0.05	99.20	94.19
PL10-2	53.8	0.02	1.06	0.80	1.86	0.08	17.9	23.8	0.16	0.05	99.53	94.49
PL12-1	53.2	0.02	1.71	0.54	1.97	0.06	18.0	23.8	0.05	0.05	99.40	94.21
PL12-2	52.9	0.03	2.11	0.77	2.24	0.07	17.4	23.3	0.05	0.04	98.91	93.26
PL13-1	51.8	0.07	2.62	1.18	2.04	0.05	17.0	24.0	0.05	0.03	98.84	93.69
PL13-2	52.3	0.04	2.63	1.16	2.14	0.09	17.1	23.6	0.01	0.04	99.11	93.44
PL21a-1	51.6	0.10	4.53	1.11	2.87	0.09	17.6	21.6	0.18	0.04	99.72	91.62
PL21a-2	52.2	0.09	4.32	1.15	2.96	0.10	17.9	21.2	0.16	0.05	100.13	91.51
PL21a-3	51.8	0.11	4.59	1.14	2.84	0.08	17.1	22.0	0.16	0.05	99.99	91.50
PL21a-4	52.6	0.09	4.31	1.12	2.62	0.08	17.5	21.8	0.18	0.04	100.37	92.26
PL21a-5	51.7	0.09	4.54	1.17	3.04	0.09	17.9	20.6	0.16	0.05	99.37	91.33
Lherz PL21a-6	51.7	0.10	4.55	1.13	3.02	0.08	17.5	21.5	0.15	0.05	99.78	91.16
PL21a-7	52.4	0.09	4.08	0.96	2.68	0.09	17.5	22.1	0.11	0.04	100.08	92.11
PL17-1	51.1	0.08	4.99	1.31	2.81	0.09	17.8	20.9	0.08	0.05	99.21	91.86
PL17-2	51.7	0.06	4.86	1.22	3.00	0.11	18.5	19.9	0.04	0.06	99.45	91.66
PL17-3	52.9	0.07	2.41	0.66	2.41	0.09	17.6	23.2	0.04	0.06	99.44	92.86
PL17-4	51.2	0.10	4.59	1.18	2.06	0.06	16.8	23.5	0.08	0.06	99.63	93.56
PL17-5	50.7	0.11	4.87	1.21	2.34	0.09	16.2	23.3	0.06	0.04	98.92	92.50
PL17-6	51.4	0.09	4.81	1.22	2.65	0.09	18.0	21.4	0.08	0.05	99.79	92.37
PL17-7	52.0	0.11	3.87	1.06	2.02	0.07	16.9	24.0	0.10	0.05	100.18	93.71
PL17-8	51.3	0.09	5.09	1.30	2.27	0.08	16.2	23.3	0.13	0.05	99.81	92.71
PL17-9	51.7	0.06	4.85	1.19	2.23	0.08	16.6	22.6	0.13	0.05	99.49	92.99
Lherz PL14-1	52.8	0.09	4.057	1.22	1.95	0.08	17.0	24.0	0.07	0.04	101.25	93.94
PL14-2	52.3	0.05	3.91	1.02	2.45	0.07	17.2	22.9	0.06	0.05	99.95	92.60
PL14-3	53.2	0.07	3.56	0.90	2.09	0.08	17.1	23.8	0.14	0.04	100.99	93.59
PL14-4	52.9	0.08	3.392	0.86	1.99	0.06	16.8	23.7	0.11	0.04	99.90	93.74
PL15-1	49.7	0.09	3.343	0.99	7.53	0.09	17.3	21.6	0.11	0.03	100.70	80.38
PL15-2	52.0	0.09	4.401	1.26	2.36	0.10	16.2	23.5	0.04	0.03	99.94	92.44
PL15-3	52.3	0.06	3.791	0.95	2.63	0.08	17.8	22.4	0.08	0.06	100.14	92.35

表5 普兰地幔橄榄岩尖晶石电子探针分析数据 ( $w_B/\%$ )

Table 5. EPMA results of spinels from the Purang mantle peridotites

样品	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	NiO	Total	Mg#	Cr#
PL02-1	0.09	31.40	36.80	2.61	13.20	0.20	15.30	0.17	99.77	67.38	44.02
PL02-2	0.07	32.30	35.70	2.80	13.10	0.21	15.50	0.12	99.80	67.83	42.58
PL02-3	0.08	32.50	36.10	2.06	13.90	0.20	14.90	0.14	99.88	65.64	42.70
PL03-1	0.02	33.60	34.30	2.80	13.70	0.20	15.20	0.13	99.95	66.41	40.65
PL03-2	0.03	32.00	35.70	2.78	14.00	0.21	14.70	0.12	99.54	65.17	42.80
PL03-3	0.01	34.30	33.40	2.26	14.20	0.20	14.80	0.15	99.32	65.00	39.51
PL04-1	0.03	35.40	32.50	2.38	13.80	0.19	15.20	0.15	99.65	66.25	38.11
PL04-2	0.02	37.90	30.40	1.79	14.10	0.20	15.40	0.15	99.96	66.06	34.98
PL04-3	0.04	36.80	31.40	2.14	13.90	0.19	15.40	0.14	100.01	66.38	36.40
PL05-1	0.04	34.80	33.40	2.20	13.20	0.20	15.60	0.18	99.62	67.80	39.17
PL05-2	0.05	35.30	32.90	1.66	13.70	0.20	15.20	0.14	99.15	66.41	38.47
PL05-3	0.06	36.20	32.50	1.59	13.80	0.20	15.40	0.18	99.93	66.54	37.59
PL06-1	0.04	33.50	33.80	3.23	13.80	0.22	15.10	0.14	99.83	66.10	40.36
PL06-2	0.03	34.10	33.60	2.70	14.50	0.21	14.70	0.17	100.01	64.37	39.80
PL06-3	0.01	34.90	32.90	2.46	14.40	0.19	14.80	0.15	99.81	64.68	38.74
Harz PL06-4	0.04	32.20	35.20	2.44	14.70	0.21	14.30	0.12	99.21	63.42	42.31
PL06-5	0.04	31.90	35.90	2.68	14.30	0.21	14.70	0.14	99.87	64.69	43.02
PL06-6	0.03	33.70	34.40	2.82	13.70	0.22	15.30	0.14	100.31	66.56	40.64
PL08-1	0.05	19.30	48.80	2.53	17.30	0.30	11.30	-	99.58	53.79	62.91
PL08-2	0.06	18.90	48.30	2.88	17.50	0.29	11.00	0.07	99.00	52.83	63.16
PL09-1	0.06	16.10	51.90	2.45	19.10	0.32	9.82	0.00	99.75	47.81	68.38
PL09-2	0.09	15.90	52.00	2.84	18.80	0.32	10.10	0.05	100.10	48.91	68.69
PL10-1	0.07	16.60	51.00	2.86	18.30	0.31	10.40	-	99.54	50.32	67.33
PL10-2	0.05	16.10	51.60	2.70	18.70	0.32	10.10	-	99.57	49.04	68.25
PL12-1	0.02	34.00	34.10	2.14	14.50	0.21	14.70	0.13	99.80	64.37	40.22
PL12-2	0.04	33.90	34.30	2.31	14.30	0.21	14.80	0.14	100.00	64.84	40.43
PL13-1	0.06	11.70	54.80	4.13	18.70	0.32	9.53	-	99.24	47.59	75.86
PL13-2	0.06	11.60	55.80	3.76	18.20	0.34	9.92	0.06	99.74	49.27	76.34
PL21a-1	0.05	40.58	25.44	2.63	12.21	0.17	16.45	0.20	97.73	70.60	29.61
PL21a-2	0.04	38.66	26.26	4.12	11.52	0.14	16.70	0.18	97.61	72.09	31.30
PL21a-3	0.08	40.03	28.21	2.36	12.06	0.16	17.01	0.24	100.16	71.53	32.10
PL21a-4	0.06	40.11	28.58	2.04	12.32	0.18	16.89	0.20	100.36	70.96	32.34
PL21a-5	0.05	41.15	27.43	1.92	12.75	0.18	16.71	0.23	100.40	70.02	30.90
Lherz PL21a-6	0.05	42.03	25.93	1.93	12.62	0.18	16.74	0.20	99.67	70.27	29.28
PL14-1	0.03	41.12	24.85	2.73	12.55	0.16	16.36	0.17	97.98	69.91	28.85
PL14-2	0.03	41.08	25.51	2.95	12.17	0.17	16.75	0.20	98.86	71.05	29.41
PL14-3	0.01	41.10	25.27	2.62	12.24	0.14	16.59	0.166	98.12	70.71	29.20
PL14-4	0.04	41.58	25.03	3.14	11.96	0.16	17.02	0.17	99.10	71.72	28.76
PL14-5	0.01	40.80	25.70	3.22	12.28	0.18	16.68	0.18	99.03	70.77	29.70
PL15-1	0.02	39.93	26.59	2.63	12.10	0.16	16.56	0.16	98.14	70.92	30.88
PL15-2	0.04	39.03	27.39	2.85	12.38	0.17	16.31	0.20	98.37	70.13	32.01
PL15-3	0.05	38.85	27.95	3.35	11.14	0.15	17.25	0.17	98.91	73.41	32.55
PL15-4	0.04	39.52	27.44	2.72	11.99	0.16	16.72	0.18	98.76	71.31	31.78
PL17-1	0.03	42.60	26.10	1.52	12.60	0.15	16.80	0.17	99.97	70.38	29.13
PL17-2	0.03	41.70	26.90	1.67	12.60	0.16	16.70	0.17	99.93	70.25	30.20
PL17-3	0.03	42.70	25.90	1.62	12.70	0.17	16.80	0.20	100.12	70.21	28.92
Lherz PL17-4	0.04	41.70	26.50	1.95	13.50	0.16	16.20	0.15	100.20	68.14	29.89
PL17-5	0.02	42.30	26.30	1.57	13.40	0.16	16.40	0.18	100.33	68.56	29.43
PL17-6	0.05	43.90	24.70	1.76	12.70	0.17	17.00	0.16	100.44	70.46	27.40
PL17-7	0.04	42.00	26.60	1.93	12.60	0.17	16.90	0.20	100.44	70.50	29.82
PL17-8	0.04	41.30	27.10	1.66	13.50	0.18	16.10	0.17	100.05	68.00	30.56
PL17-9	0.02	40.80	27.10	1.78	13.20	0.18	16.10	0.17	99.35	68.49	30.82

被消耗。因此,单斜辉石的体积占比、Al 含量可以揭示地幔橄榄岩亏损程度。另外,橄榄石 Fo 值与部分熔融程度呈正相关。普兰地幔橄榄岩中单斜辉石含量少于 2 % modal,远低于深海橄榄岩(平均 4.19% modal<sup>[27]</sup>),且方辉橄榄岩中单斜辉石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量低于深海橄榄岩(5%~6%<sup>[27]</sup>)和亏损地幔(7.87%<sup>[29]</sup>)。橄榄石 Fo 值明显高于深海橄榄岩<sup>[27]</sup>,说明普兰地幔橄榄岩经历了较高级别的部分熔融。

尖晶石的 Cr<sup>#</sup>能够良好地指示部分熔融程度<sup>[23-25]</sup>。Hellebrand 等<sup>[25]</sup>提出一个经验公式,用以估算深海橄榄岩的部分熔融程度(F): $F=10\ln Cr^{\#}+24$ 。将该公式应用于普兰地幔岩中,计算出二辉橄榄岩经历 10.9%~12.3%部分熔融,方辉橄榄岩经历 12.6%~21.3%部分熔融,这和全岩 HREE 模拟结果(图 3b)具有很好的 consistency。

### 5.3 含水熔体-岩石反应

岩石学特征揭示了普兰地幔岩经历了熔体的交代作用。首先,普兰方辉橄榄岩具有明显的碎斑状结构,粗粒的斜方辉石(次为橄榄石)碎斑被细粒的硅酸盐包围,这种特征在弧前橄榄岩中常见<sup>[24]</sup>;其次,斜方辉石的边界呈港湾状,并被细粒的硅酸盐矿物填充(图 2d),表明斜方辉石被流体/熔体溶蚀,这是典型的经历了熔体-岩石反应的岩石学特征<sup>[27,30]</sup>。另外,我们观察到橄榄石的微小颗粒包裹于斜方辉石(图 2b),这和西南印度洋被熔体交代的深海橄榄岩具有类似特征<sup>[31]</sup>。

Su 等<sup>[40]</sup>对普兰地幔岩中的橄榄石和尖晶石进行了微量元素分析,表明该岩体经历了含水 MORB 熔体的再富集作用。本次研究表明,普兰地幔橄榄岩具有呈“V 型”稀土配分曲线(图 3b),明显富集 LREE,暗示了玻安质岩浆的交代作用。Zhou 等<sup>[32]</sup>对罗布莎一套方辉橄榄岩-纯橄岩-铬铁矿岩石组合进行了精细的全岩地球化学分析,发现纯橄岩具有独特的“U 型”稀土配分曲线,被认为是熔岩反应的有力证据,且交代介质(metasomatic agents)为玻安质熔体,而罗布莎地幔岩也被认为是弧前橄榄岩,记录了初始俯冲过程<sup>[15,31]</sup>。Parkinson 和 Pearce<sup>[24]</sup>认为 IBM (Izu-Bonin-Mariana) 弧前橄榄岩经历了玻安质熔体的交代过程,其全岩的稀土配分曲线和普兰地幔岩具有类似的“V 型”特征。此外,普兰地幔橄榄岩明显富集 HFSE (Hf、U、Pb) 和 LILE (Rb、Sr、Cs) (图 4a),进一步表明俯冲物质加入到普兰地幔源区。Cs、U、Pb、Sr 是流体活跃元素,它们的富集表明交代介质是含水的。因此,从全岩地球化学特征来看,我们认为普兰地幔岩经历了后期含水熔体的交代作用,普兰地幔是一个经历了俯冲过程的 SSZ 地幔,而非 MOR 地幔。在自然界岩浆体系中,具有典型的“V 型”稀土配分曲线的岩浆为玻安质岩浆<sup>[33-34]</sup>。玻安质岩浆以高 MgO、SiO<sub>2</sub> 和低 TiO<sub>2</sub> 为特征,被认为是亏损的方辉橄榄岩(已经历部分熔融和熔体抽取)再次含水(俯冲流体)熔融形成<sup>[33-34]</sup>。因此,玻安岩的存在是岛弧环境的岩石学标志<sup>[32-34]</sup>。研究程度最高的玻安岩来自日本 IBM 弧,被认为是西太平洋板块向菲律宾板块俯冲而形成的洋内弧<sup>[36]</sup>,其岩石学和地球化学特征记录了初始俯冲(subduction initiation)过程<sup>[37]</sup>。普兰地幔岩具有玻安质岩浆叠加改造的地球化学印记,表明普兰地幔可能和 IBM 弧地幔具有相似的性质,因此我们进一步认为普兰地幔是经历了洋-洋俯冲的弧下地幔(sub-arc mantle)。

普兰地幔岩的矿物地球化学特征揭示其经历了玻安质岩浆的交代作用,这是弧前橄榄岩的典型特征,进一步表明普兰地幔是一个弧地幔:1)部分方辉橄榄岩的尖晶石 Cr<sup>#</sup>超过 60,远高于深海橄榄岩(< 60<sup>[27]</sup>),但和弧橄榄岩非常相似<sup>[23-24]</sup>(图 6a)。在自然界岩浆体系中,玻安岩中的尖晶石的 Cr<sup>#</sup>明显高于洋中脊玄武岩(MORB)和岛弧拉斑玄武岩(IAT),但 Ti 含量远低于 MORB 和 IAT(图 6b)。普兰地幔岩中的尖晶石具有高 Cr<sup>#</sup>低 Ti 的特征,反映了地幔岩-玻安质熔体反应过程。2)普兰地幔岩中的部分斜方辉石(图 4a~c)和单斜辉石(图 5a~c)具有岛弧的地球化学特征。3)部分单斜辉石 Al 含量低于 3%,明显偏离深海橄榄岩区域(图 5a、c)。

## 6 结论

1) 普兰地幔岩的矿物地球化学特征显示, 二辉橄榄岩具有深海橄榄岩的特征, 代表了 MOR 环境, 并经历 10%~15% 的部分熔融。方辉橄榄岩与弧前橄榄岩类似, 代表了 SSZ 环境, 并经历 13%~25% 的部分熔融。

2) 普兰地幔岩的全岩地球化学特征显示, 无论是二辉橄榄岩还是方辉橄榄岩, 均具有“V 型”原始地幔标准化稀土配分模式, 显著富集不相容元素, 如轻稀土元素、部分高场强元素 (U、Pb) 和大离子亲石元素 (Rb、Sr)。这种“V 型”配分曲线和 IBM 玻安岩十分类似。结合矿物地球化学组成, 我们认为普兰地幔存在玻安质岩浆的交代作用, 普兰地幔和 IBM 弧地幔具有相似的性质, 并经历了洋内俯冲过程。

## 参考文献:

- [1] Dilek Y, Furnes H. Ophiolites and their origins [J]. *Elements*, 2014, 10(2): 93-100.
- [2] 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: 387-411.
- [3] 吴福元, 刘传周, 等. 雅鲁藏布蛇绿岩—事实与臆想[J]. *岩石学报*, 2013, 30 (2): 293-325.
- [4] Yin A, Harrison TM. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen [J]. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2000, 28: 211-280.
- [5] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang XB, Cao YG, Zheng HX, Xiao XC. The Xigaze ophiolite (Tibet): a peculiar oceanic lithosphere [J]. *Nature*, 1981, 294: 414-417.
- [6] Tribuzio R, Tiepolo M, Vannucci R. Evolution of gabbroic rocks of the Northern Apennine ophiolites (Italy): comparison with the lower oceanic crust from modern slow-spreading ridges [J]. *Geol Soc Am Spec Pap*, 2000, 349: 129-138.
- [7] Whattam SA, Stern RJ. The “subduction initiation rule”: a key for linking ophiolites, intra-oceanic forearcs, and subduction initiation [J]. *Contrib Miner Petrol*, 2011, 162(5): 1031-1045.
- [8] Pearce JA, Lippard SJ, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites [J]. *Geol Soc Lond Spec Publ*, 1984, 16: 77-94.
- [9] Moores EM, Kellogg LH, Dilek Y. Tethyan ophiolites, mantle convection, and tectonic “historical contingency”: a resolution of the “ophiolite conundrum” [J]. *Geological Society of America Special Paper*, 2000, 349: 3-12.
- [10] Zhang C, Liu CZ, Liu T, et al. Evolution of mantle peridotites from the Luobusa ophiolite in the Tibetan Plateau: Sr-Nd-Hf-Os isotope constraints [J]. *Lithos*, 2020, 362/363: 105477.
- [11] Liu CZ, Zhang C, Yang LY, et al. Formation of gabbro-norites in the Purang ophiolite (SW Tibet) through melting of hydrothermally altered mantle along a detachment fault [J]. *Lithos*, 2014, 205: 127-141.
- [12] Liu T, Wu FY, Zhang LL, 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.
- [13] Zhou MF, Robinson PT, Malpas J, Edwards S, Qi L. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet [J]. *Journal of Petrology* 46, 2005, 615-639.
- [14] Dai JG, Wang CS, Hébert R, Santosh M, Li YL, Xu JY. Petrology and geochemistry of peridotites in the Zhongba ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone: Implications for the Early Cretaceous intra-oceanic subduction zone within the Neo-Tethys [J]. *Chemical Geology*, 2011, 288: 133-148.
- [15] Zhang PF, Zhou MF, Robinson PT, et al. Evolution of nascent mantle wedges during subduction initiation: Li-O isotopic evidence from the Luobusa ophiolite, Tibet [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 245: 35-58.
- [16] Aitchison JC, Badengzhu, Davis AM, 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.
- [17] Miller C, Thoni M, Frank W, et al. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet [J]. *Lithos*, 2003, 66 (3): 155-172.
- [18] 刘钊, 李源, 熊发挥, 等. 西藏西部普兰蛇绿岩中的 MOR 型辉长岩: 岩石学和年代学[J]. *岩石学报*, 2011, 27: 3269-3279.
- [19] Gong XH, Shi RD, Griffin WL, et al. Recycling of ancient subduction-modified mantle domains in the Purang ophiolite (southwestern Tibet) [J]. *Lithos*, 2016, 262: 11-26.

- [20] Liu CZ, Wu FY, Chu ZY, et al. Preservation of ancient Os isotope signatures in the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibet) after subduction modification [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 53: 38-50.
- [21] Griffin WL, Afonso JC, Belousova EA, et al. Mantle recycling: Transition zone metamorphism of Tibetan ophiolitic peridotites and its tectonic implications [J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57: 655-684.
- [22] 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辉岩的岩石学研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3179-3196.
- [23] Dick HJB, Bullen T. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in byssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas [J]. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1984, 86(1): 54-76.
- [24] Parkinson JJ, Pearce JA. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting [J]. *Journal of Petrology*. 1998, 39(9): 1577-1618.
- [25] Hellebrand E, Snow JE, Dick HJB, et al. Coupled major and trace elements as indicators of the extent of melting in mid-ocean-ridge peridotites [J]. *Nature*, 2001, 410: 677-681.
- [26] Bizimis, M. Salters, VJM. Bonatti, E. Trace and REE content of clinopyroxenes from supra-subduction zone peridotites. Implications for melting and enrichment processes in island arcs [J]. *Chemical Geology*, 2000, 165(1/2): 67-85.
- [27] Warren JM. Global variations in abyssal peridotite compositions [J]. *Lithos*, 2016, 248/249/250/251:193-219.
- [28] Niu YL. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges [J]. *Journal of Petrology*, 2004 45(12):2423-2458.
- [29] Workman RK, Hart SR. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 231(1):53-72.
- [30] Seyler M, Lorand JP, Dick HJB, Drouin, M. Pervasive melt percolation reactions in ultra-depleted refractory harzburgites at the mid-Atlantic ridge, 15°20'N: ODP hole 1274A [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2007, 153(3): 303-319.
- [31] Seyler M, Cannat M, Mével C. Evidence for major-element heterogeneity in the mantle source of abyssal peridotites from the southwest Indian ridge (52° to 68°E) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(2), 9101.
- [32] Zhou MF, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet [J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46:615-639.
- [33] Taylor RN, Nesbitt RW, Vidal P, et al. Mineralogy, chemistry, and genesis of the boninite series volcanics, Chichijima, Bonin islands, Japan [J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(3): 577-617.
- [34] Crawford AJ, Falloon TJ, Green DH. Classification, petrogenesis and tectonic setting of boninites [M]. London: Unwin Hyman. *In: Crawford AJ (ed) Boninites and related rocks.*, 1989, 1-49.
- [35] Bénard A, Nebel O, Ionov DA, Arculus RJ, Shimizu N, Métrich N. Primary silica-rich picrite and high-Ca boninite melt inclusions in pyroxenite veins from the Kamchatka sub-arc mantle [J]. *Journal of Petrology*, 2016, 57(10): 1955-1982.
- [36] 吴福元, 王建刚, 刘传周, 等. 大洋岛弧的前世今生[J]. *岩石学报*, 2019, 35 (1): 1-15.
- [37] Whattam SA, Shervais JW, Reagan MK, et al. Mineral compositions and thermobarometry of basalts and boninites recovered during IODP expedition 352 to the Bonin forearc[J]. *American Mineralogist*, 2020, 105(10): 1490-1507.
- [38] Sun SS, McDonough, WF. Chemical and isotopic systematics in ocean basalt: implications for mantle composition and processes [J]. London: Geological Society, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [39] Dubois-Côté V, Hébert R, Dupuis C, Wang CS, Li YL, Dostal J. Petrological and geochemical evidence for the origin of theYarlungZangbo ophiolites, southern Tibet [J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 265-286.
- [40] Su BX, Zhou MF, Jing JJ, et al. Distinctive melt activity and chromite mineralization in Luobusa and Purang ophiolites, southern Tibet: constraints from trace element compositions of chromite and olivine [J]. *Science Bulletin*, 2019, 64(2): 108-121.
- [41] Lian DY, Yang J, Robinson PT, et al. Tectonic evolution of the western Yarlung—Zangbo ophiolitic belt, Tibet: Implications from the petrology, mineralogy, and geochemistry of the peridotites [J]. *Journal of Geology*, 2016, 124: 353-376.