

# 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄欖岩成因及构造意义\*

李源<sup>1</sup> 杨经绥<sup>1\*\*</sup> 刘钊<sup>2</sup> 贾毅<sup>3</sup> 徐向珍<sup>1</sup>

LI Yuan<sup>1</sup>, YANG JingSui<sup>1\*\*</sup>, LIU Zhao<sup>2</sup>, JIA Yi<sup>3</sup> and XU XiangZhen<sup>1</sup>

1. 大陆构造与动力学国家重点实验室,北京 100037

2. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

3. 中国测绘科学研究院,北京 100830

1. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Beijing 100037, China

2. School of the Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Surveying & Mapping, Beijing 100830, China

2011-06-03 收稿, 2011-09-27 改回.

Li Y, Yang JS, Liu Z, Jia Y and Xu XZ. 2011. The origins of Baer ophiolitic peridotite and its implication in the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (11): 3239 – 3254

**Abstract** The Baer ophiolite crops out in the western segment of the Yarlung-Zangbo suture zone (YZSZ), about 1200km west of Lhasa. It extends more than 40km, in an E-W and is 3 ~ 4km wide. The Baer peridotites consist of cpx-harzburgites and minor lherzolites. According to the texture and structure characteristics in peridotites, the mineral assemblage can be divided into three generations: (1) The first generation, the mineral assemblage of the residual mantle, includes olivine, orthopyroxene and clinopyroxene porphyroclast; (2) The second generation includes olivine, orthopyroxene, clinopyroxene and spinel. They are always along the first generations mineral porphyroclasts. They are the products of partial melting and melt-peridotites reaction in the peridotites. (3) The third generation is amphibole, which are the products of mantle metasomatism. Three generation mineral assemblages are interpreted to suggest that the Baer peridotites experienced a two-stage evolution. At first, they were formed at a MOR (mid-ocean ridge) setting and subsequently entered a SSZ (super-subduction zone) setting. Compared to the characteristics of the YZSZ peridotites, we argue that there are two type ophiolites in the YZSZ. The peridotites in the middle section in the YZSZ may be formed in a complex SSZ setting, where the peridotites in the west and east section maybe formed in MOR setting but reconstructed by SSZ. Such tectonic evolutions features maybe attribute to the heterogeneity and complexity of tectonic evolution along the Neo-Tethys Ocean.

**Key words** Yarlung Zangbo suture zone; Ophiolites; Mantle peridotite; Mineral assemblage; Tectonic evolution

**摘要** 巴尔蛇绿岩属于雅鲁藏布江缝合带的西延部分,距拉萨约 1200km,主要由地幔橄欖岩、少量的橄长堆晶岩和玄武岩组成。地幔橄欖岩主体为含单斜辉方辉橄欖岩,少量为二辉橄欖岩。根据巴尔蛇绿岩地幔橄欖岩的结构构造特征,将矿物组合划分为 3 个世代,第一世代残余地幔矿物组合:橄欖石 + 斜方辉石 + 单斜辉石;第二世代部分熔融及熔-岩反应矿物组合:橄欖石 + 斜方辉石 + 单斜辉石 + 尖晶石;第三世代地幔交代作用矿物组合,主要为含水矿物角闪石。将 3 个世代的矿物组合归并为 2 个演化阶段:第一阶段,包括第一世代和第二世代矿物组合,形成于 MOR (mid-ocean ridge) 构造环境下的洋脊扩张阶段;第二阶段,为第三世代矿物角闪石,形成于 SSZ (super-subduction zone) 环境下的俯冲阶段。对比雅鲁藏布江缝合带不同区段蛇绿岩中地幔橄欖岩的特征,发现雅鲁藏布江缝合带存在 MOR 和 SSZ 两种类型的蛇绿岩,其中中段的蛇绿岩主要以典型的 SSZ 型地幔橄欖岩为主,而东、西段则以受到不同程度 SSZ 环境改造的 MOR 型地幔橄欖岩为主,认为雅鲁藏布江缝合带蛇

\* 本文受国家自然科学基金重点项目(40930313)、国家行业专项(201011059)、中国地质调查局项目(1212011121263)、中国地质调查局项目(1212011121272)和创新研究群体科学基金项目(40921001)联合资助。

第一作者简介:李源,1973 年生,男,博士生,岩石学专业,E-mail:liyuan@126.com

\*\* 通讯作者:杨经绥,男,1950 年生,研究员,岩石学专业,从事青藏高原和造山带的岩石大地构造研究,E-mail:yangjingsui@yahoo.com.cn

绿岩地幔橄辉岩演化分段性的特征,与新特提斯洋沿弧方向上板块活动的动力学机制的不均一有关。

**关键词** 雅鲁藏布江缝合带; 蛇绿岩; 地幔橄辉岩; 矿物组合; 构造演化

**中图法分类号** P588.125

## 1 引言

地幔橄辉岩是蛇绿岩超镁铁岩石中的主要岩石类型。作为原始地幔的残余,蛇绿岩中的地幔橄辉岩可以形成于 MOR 和 SSZ 等不同的构造环境 (Pearce *et al.*, 1984; Batanova and Sobolev, 2000; Choi *et al.*, 2008)。在蛇绿岩形成和构造成就的过程中,地幔橄辉岩还会受到部分熔融作用、熔体淬取、熔-岩反应及地幔交代等多种地质作用的改造 (Ionov *et al.*, 1997; Pearce, 2000; Seyler *et al.*, 2001; Coltorti *et al.*, 2004; Paulick *et al.*, 2006)。不同的地质作用会产生相应的矿物组合,使蛇绿岩地幔橄辉岩的成因呈现出多阶段的演化特征 (Seyler *et al.*, 2001; Simon *et al.*, 2008; Sanjeeva *et al.*, 2010)。详细研究地幔橄辉岩不同世代矿物组合的特征,有利于我们了解地幔橄辉岩的性质和成因,对于恢复蛇绿岩的形成和演化至关重要。

雅鲁藏布江缝合带在我国境内呈近东西向断续延伸近 2000km,是印度和欧亚两大板块在晚侏罗-白垩纪汇聚后,新特提斯洋洋壳和岩石圈的残留 (Nicolas *et al.*, 1981; Tapponnier *et al.*, 1981; Allègre *et al.*, 1984; Girardeau *et al.*, 1985a)。作为印度和欧亚板块之间最重要的 1 条缝合带,早期的研究者倾向于认为雅鲁藏布江缝合带形成于 MOR 环

境,与现代大洋岩石圈的层序基本一致 (Nicolas *et al.*, 1981; Girardeau *et al.*, 1985a,b)。而近年来,研究者更多地提出了一些与 SSZ 环境有关的成因模型 (Aitchison *et al.*, 2000; Wang *et al.*, 2000; Guilmette *et al.*, 2008; Bédard *et al.*, 2009; Liu *et al.*, 2010)。

从前人的研究来看,雅鲁藏布江缝合带的地质特征复杂,不同的蛇绿岩体显示出多成因、多阶段演化及沿东西向分段的特征 (图 1)。潘桂棠等 (1997) 根据蛇绿岩的空间展布特征,将雅鲁藏布江缝合带自西向东分为 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 (图 2b)。限于地理条件等原因,以往的研究多集中在雅鲁藏布江的东段和中段,而西段的研究程度仍然很低,制约了对新特提斯洋构造演化的认识。位于西藏阿里地区扎达县附近的巴尔蛇绿岩岩体是雅鲁藏布江缝合带西段最西端 1 个较大的岩体,距离拉萨约 1200km,主要由地幔橄辉岩组成,其次还出露少量橄长堆晶岩和玄武岩。详细研究其地幔橄辉岩成因,对雅鲁藏布江缝合带不同区段蛇绿岩体之间的对比、解释雅鲁藏布江缝合带的性质和演化过程、深化新特提斯洋的演化的认识、完善西藏新特提斯古构造格局具有重要的意义。

## 2 地质背景

雅鲁藏布江缝合带北邻拉萨地块,南接喜马拉雅构造

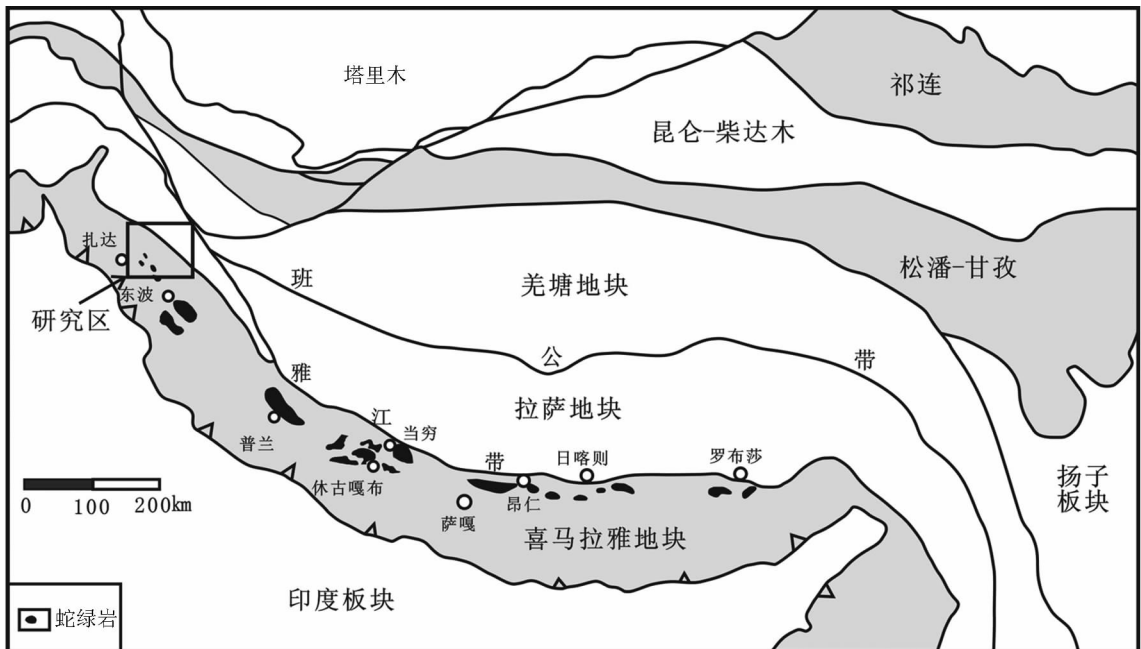


图 1 青藏高原构造格架和雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的分布简图

Fig. 1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau showing major tectonic units and the location of the the YZSZ ophiolites

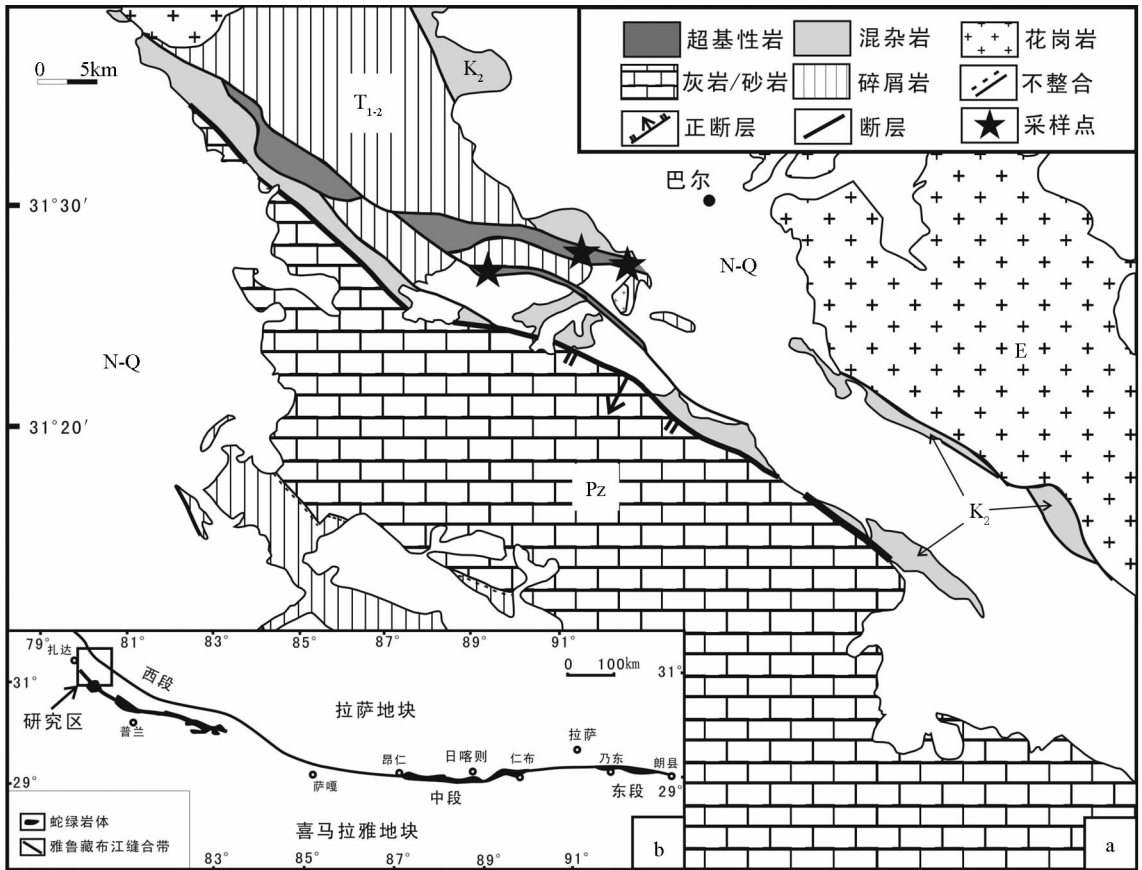


图2 雅鲁藏布江缝合带西段巴尔蛇绿岩的地质简图(a,据河北省地质调查院,2004<sup>①</sup>简化;b,据潘桂棠等,1997)

E-早第三纪;K<sub>2</sub>-晚白垩世;N-晚第三纪;Pz-古生代;Q-第四纪;T<sub>1,2</sub>-三叠纪

Fig. 2 Detailed geological map of the Baer ophiolites in the YZSZ

E-Eogene; K<sub>2</sub>-Upper Cretaceous; N-Neogene; Pz-Paleozoic; Q-Quaternary; T<sub>1,2</sub>-Triassic

带,为青藏高原最新、最南端的1条缝合带,是印度板块和欧亚板块的分界线(Nicolas *et al.*, 1981; Tapponnier *et al.*, 1981; Allègre *et al.*, 1984)(图1)。雅鲁藏布江缝合带北侧发育一套早白垩世蛇绿岩洋壳建造,南侧出露一套千枚岩、板岩、放射虫燧石、变基性火山岩和变辉绿岩为主的浅变质硅质-火山岩建造(王希斌和鲍佩生, 1987)。研究表明,雅鲁藏布江缝合带中的罗布莎岩体、日喀则岩体及普兰岩体等各个不同的岩体之间,乃至同一个岩体不同岩石单元的形成时代、构造背景等都表现出不同的演化特征(Zhou *et al.*, 2002; Miller *et al.*, 2003; Dupuis *et al.*, 2005; Guilmette *et al.*, 2008; Yamamoto *et al.*, 2009; Bédard *et al.*, 2009; Liu *et al.* 2010)。

巴尔蛇绿岩是我国境内雅鲁藏布江蛇绿岩带西段最西端1个较大的蛇绿岩体,位于札达县城南约50km,呈北北西向断续延展约40km,宽约3~4km,主要由地幔橄辉岩、少量的堆晶橄长岩和玄武岩组成。巴尔蛇绿岩体多被新近系-第四系沉积物不整合覆盖,岩体两侧出露有早三叠-中三叠系

海相碳酸盐岩、碎屑岩、绢云母片岩、砂质板岩夹薄层灰岩,不同岩性岩石与蛇绿岩体均呈断层接触(图2d)。巴尔蛇绿岩中的地幔橄辉岩单元呈构造岩块产出,出露于地表的地幔橄辉岩常因风化作用而呈黄褐色-黑褐色(图3a, c)。地幔橄辉岩的主体为含单辉方辉橄辉岩,局部的地幔橄辉岩岩体顶部出露有的少量纯橄岩薄层(图3c)。巴尔蛇绿岩的基性岩单元包括堆晶橄长岩与玄武岩,主要出露在地幔橄辉岩体的边部(图3b)。

### 3 地幔橄辉岩岩石学

巴尔蛇绿岩中的地幔橄辉岩表面多为黄褐-黑褐色,受矿物的差异风化,辉石常呈骰状突起。岩石新鲜面为灰绿色,中-粗粒块状构造。根据岩石中单斜辉石的含量,可将地幔橄辉岩分为2类:(1)含单辉方辉橄辉岩,其单斜辉石含量约1%~2%,为巴尔地幔橄辉岩的主体;(2)二辉橄辉岩,其

① 河北省地质调查院. 2004. 中华人民共和国地质图1/25万札达县幅

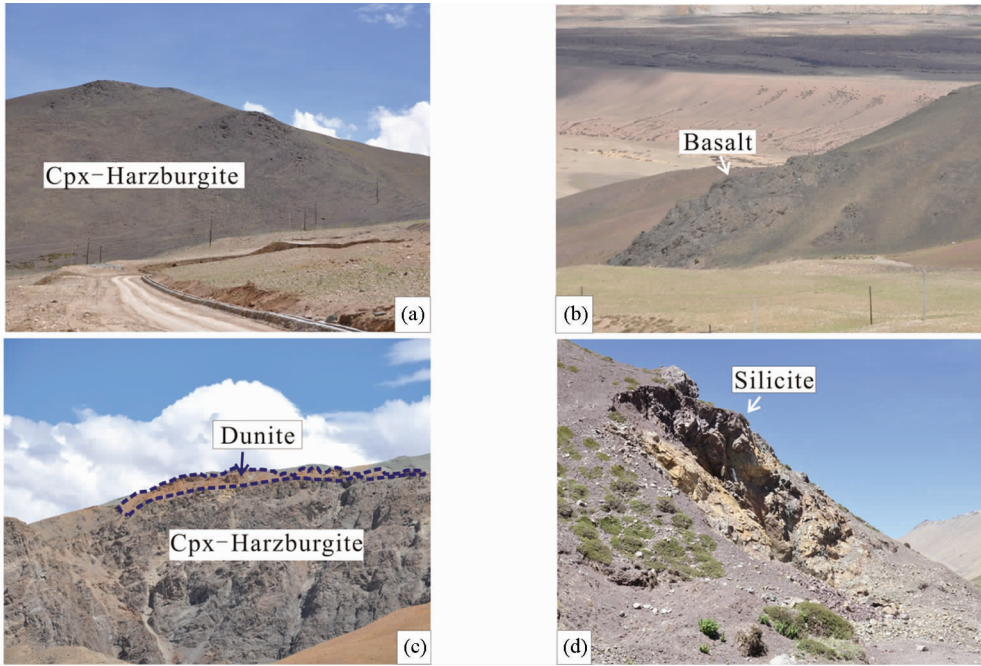


图3 巴尔蛇绿岩野外照片

(a)-巴尔蛇绿岩的含单辉方辉橄榄岩;(b)-出露在巴尔岩体边部的玄武岩;(c)-透镜体状的纯橄岩出露在含单辉方辉橄榄岩岩体顶部;(d)-出露在地幔橄榄岩边部的硅质岩. Cpx-Harzburgite-含单辉方辉橄榄岩;Basalt-玄武岩;Dunite-纯橄岩

Fig. 3 Outcrops of the Baer ophiolite in the YZSZ

(a)-Cpx-harzburgite in the Baer ophiolites; (b)-basalts from the the Baer ophiolites; (c)-dunites lens in Cpx-harzburgite; (d)-silicite in the margins of Baer ophiolites

单斜辉石含量在5%~7%之间,仅在巴尔岩体局部有零星出露。由于岩体的风化,未见2类地幔橄榄岩的接触界线。

受部分熔融、熔体-岩石反应和地幔交代等作用的影响,地幔橄榄岩的原始结构和组成会被改造,因此区分不同作用形成的矿物组合对于恢复地幔橄榄岩成因和蛇绿岩演化过程至关重要。通过对巴尔蛇绿岩两种类型地幔橄榄岩结构构造特征的研究,识别出3个世代的矿物组合:(1)第一世代地幔残余矿物组合:橄榄石+斜方辉石,其主要特征是具有残斑晶结构;(2)第二世代部分熔融及残余熔体重结晶矿物组合:橄榄石+斜方辉石+单斜辉石+尖晶石,主要沿第一世代残斑晶矿物的边部分布,矿物的粒径明显小于第一世代矿物,它们的共同点是具有典型的岩浆作用特征;(3)第三世代为地幔交代作用形成含水矿物角闪石。以下分别对巴尔蛇绿岩的2种地幔橄榄岩中不同世代矿物组合进行描述和分析。

### 3.1 含单辉方辉橄榄岩

含单辉方辉橄榄岩为块状构造,中粗粒结构、残斑晶结构和熔融残余结构等。矿物组合包括镁橄榄石(含量约70%~75%),斜方辉石(含量约15%~20%),单斜辉石(含量约1%~2%),尖晶石(约1%~2%)。蚀变矿物主要为蛇纹石。

第一世代残余地幔矿物组合,为橄榄石( $Ol^1$ ) + 斜方辉石( $Opx^1$ ) + 单斜辉石(Dis-Cpx)。橄榄石( $Ol^1$ )在含单辉方辉橄榄岩中保存较少,多呈自形粒状紧密镶嵌或残斑晶状,粒径约在0.2~0.5mm之间,常保留有波状消光和肯克带等变形现象(图4a)。斜方辉石( $Opx^1$ )都已被熔蚀为残斑晶状,粒径一般在1~3mm之间。残斑晶的波状消光及解理缝弯曲等变形现象非常普遍,且内部普遍含有单斜辉石出熔体条纹(图4b)。单斜辉石(Dis-Cpx),以细密的针状(粒径一般在1~3 $\mu m$ 之间)或浸染状出溶条纹出现在斜方辉石中(图4b),它们记录了地幔橄榄岩就位过程中,所处环境温压条件的变化(Nabelek *et al.*, 1987)。

第二世代部分熔融及残余熔体重结晶矿物组合,为橄榄石( $Ol^2$ ) + 斜方辉石( $Opx^2$ ) + 单斜辉石( $Cpx^2$ ) + 尖晶石(Sp),它们是地幔橄榄岩在就位过程中发生过岩浆作用的证据。橄榄石( $Ol^2$ )颗粒细小,往往沿着第一世代斜方辉石残斑晶的边部分布(图4b),是熔体与残余地幔橄榄岩相互作用的结果(Niu and Hékinian, 1997; Pearce, 2000)。斜方辉石( $Opx^2$ )主要与尖晶石(Sp)形成共生组合。与第一世代橄榄石( $Ol^1$ )和斜方辉石( $Opx^1$ )不同,第二世代的橄榄石( $Ol^2$ )和斜方辉石( $Opx^2$ )光性均一,内部极少出现针状矿物出溶现象。单斜辉石( $Cpx^2$ )在薄片含量很低(<1%),且分布很不均匀,以不连续的他形晶与细粒尖晶石形成共生组合,填隙在橄榄石颗粒之间(图4c),这种结构特征表明它们的形



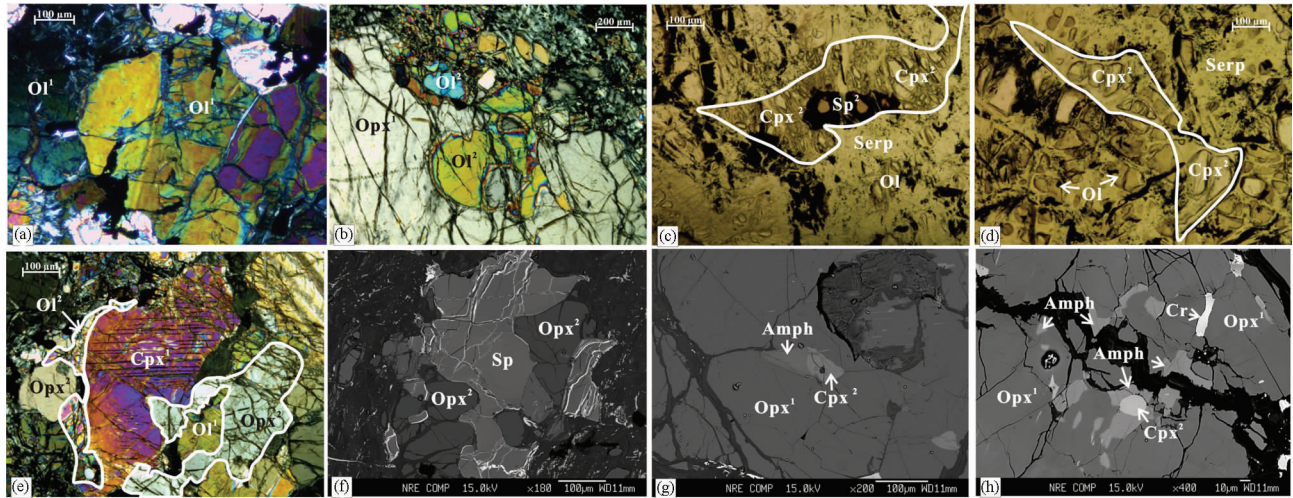


图4 巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩显微照片和背散射图像

(a)-Cpx-Harzburgite 中第一世代橄辉石扭折带; (b)-Cpx-Harzburgite 的第一世代斜方辉石的残斑晶 ( $Opx^1$ ), 边部和内部常被他形细粒的第二世代橄辉石 ( $Ol^2$ ) 取代; (c)-Cpx-Harzburgite 中沿蛇纹石化的橄辉石颗粒之间分布的单斜辉石 ( $Cpx^2$ ) + 尖晶石 (Sp) 共生组合; (d)-Lherzolite 中的沿蛇纹石化的橄辉石颗粒之间分布的单斜辉石 ( $Cpx^2$ ); (e)-Lherzolite 中的第一世代单斜辉石残斑晶, 边部被第二世代橄辉石 ( $Ol^2$ ) 和斜方辉石 ( $Opx^2$ ) 取代; (f)-Cpx-Harzburgite 中的第二世代斜方辉石 ( $Opx^2$ ) + 尖晶石 (Sp) 共生组合; (g)-Cpx-Harzburgite 中分布在单斜辉石 ( $Cpx^2$ ) 边部的角闪石; (h)-Lherzolite 中分布在单斜辉石 ( $Cpx^2$ ) 边部的角闪石.  $Ol^1$ -第一世代橄辉石;  $Ol^2$ -第二世代橄辉石;  $Opx^1$ -第一世代斜方辉石;  $Opx^2$ -第二世代斜方辉石;  $Cpx^1$ -第一世代单斜辉石;  $Cpx^2$ -第二世代单斜辉石; Sp-尖晶石; Amph-角闪石

Fig. 4 Photomicrographs and back-scattered electron (BSE) images of the peridotites from Baer ophiolite

(a)-the first generation of olivine with Kink belt in clinopyroxene (Cpx) harzburgite; (b)-orthopyroxene (Opx) porphyroclast with irregular and diffuse boundaries against the interstitial olivine (Ol) matrix; (c)-interstitial clinopyroxene and spinel at junction of serpentinized olivine crystals in Cpx-harzburgite; (d)-interstitial clinopyroxene at junction of serpentinized olivine crystals in lherzolite; (e)-the first generation of Clinopyroxene (Cpx) with irregular and diffuse boundaries against olivine ( $Ol^2$ ) and orthopyroxene ( $Opx^2$ ); (f)-spinal and orthopyroxene ( $Opx^2$ ) in Cpx-harzburgite; (g)-amphibole (Amph) replaces clinopyroxene (Cpx) in the middle of an orthopyroxene (Opx) porphyroclast in Cpx-harzburgite; (h)-disseminated amphibole (Amph) and clinopyroxene in lherzolite

成世代明显晚于包围它的橄辉石。Seyler *et al.* (2001) 将这种产状的单斜辉石 ( $Cpx^2$ ) + 尖晶石 (Sp) 共生组合解释为地幔橄辉岩在熔体抽取过程中, 残余熔体重结晶的结果。

第三世代矿物为角闪石, 主要以补丁状分布在单斜辉石出熔体边部 (图 4g), 表明其形成于单斜辉石出溶之后, 为消耗单斜辉石而来, 是地幔交代作用的产物 (Ionov *et al.*, 2002; Moine *et al.*, 2001; Coltorti *et al.*, 2004), 而不是后期蚀变作用的结果。

### 3.2 二辉橄辉岩

二辉橄辉岩为块状构造, 中粗粒结构, 残斑晶结构和熔融残余结构等。矿物组成为镁橄辉石 (含量约 65% ~ 70%), 斜方辉石 (含量约 15% ~ 20%), 单斜辉石 (含量约 5% ~ 7%), 尖晶石 (约 5% ~ 7%)。蚀变矿物主要为蛇纹石。

第一世代残余地幔矿物组合包括橄辉石 ( $Ol^1$ ) + 斜方辉石 ( $Opx^1$ ) + 单斜辉石 ( $Cpx^1$ )。橄辉石 ( $Ol^1$ ) 和斜方辉石 ( $Opx^1$ ) 的产状与含单辉方辉橄辉岩第一世代矿物组合相似, 区别在于橄辉石 ( $Ol^1$ ) 的含量明显增高。单斜辉石 ( $Cpx^1$ ) 粒

径在 0.2 ~ 1mm 之间, 残斑晶结构, 边部常被他形的第二世代橄辉石 ( $Ol^2$ ) 和斜方辉石 ( $Opx^2$ ) 取代 (图 4e)。

第二世代部分熔融及残余熔体重结晶矿物组合, 包括橄辉石 ( $Ol^2$ ) + 斜方辉石 ( $Opx^2$ ) + 单斜辉石 ( $Cpx^2$ ) + 尖晶石 (Sp)。它们的产状与含单辉方辉橄辉岩第二世代矿物组合的产状类似 (图 4d, h)。

第三世代矿物为角闪石 (图 4h), 其产状也类似于含单辉方辉橄辉岩角闪石的产状。

## 4 地幔橄辉岩地球化学

对巴尔蛇绿岩的含单辉方辉橄辉岩进行了全岩地球化学测试, 对含单辉方辉橄辉岩和二辉橄辉岩进行了矿物电子探针分析。全岩主量元素分析采用 X 荧光光谱仪, 微量元素分析采用等离子质谱方法, 测试工作由国家地质实验测试中心完成。矿物电子探针在东华理工学院核资源与环境教育部重点实验室完成, 分析仪器为 JOE-8100 电子探针, 分析加速电压为 15kV, 分析电流为 20nA。矿物分析结果按照各个矿物的标准氧法对矿物化学式进行计算 (橄辉石  $O=4$ , 斜方

表1 雅鲁藏布江缝合带巴尔蛇绿岩方辉橄榄岩岩石化学成分(主量元素:wt%;微量元素和稀土元素:×10<sup>-6</sup>)

Table 1 Chemical composition of harzburgite from Baer ophiolites in YZSZ (Major elements: wt%; trace element: ×10<sup>-6</sup>)

样品号	09y-669	09y-670	09y-671	09y-672	09y-673
SiO <sub>2</sub>	42.23	42.50	41.56	41.26	41.62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.12	2.07	1.71	1.81	2.08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.22	2.53	2.39	2.39	2.42
FeO	5.53	5.23	5.55	5.55	5.19
CaO	2.41	2.35	1.60	2.01	2.56
MgO	38.08	38.06	39.87	40.05	37.71
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	<0.01	<0.01	0.01
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.10	0.02	0.03	0.02
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.03	0.03	0.01	0.03
MnO	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	6.44	5.94	6.92	5.78	6.84
CO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.12	0.21	0.12	0.21	0.30
Total	99.40	99.16	99.90	99.23	98.91
La	0.07	0.07	0.06	0.07	0.13
Ce	0.15	0.14	0.08	0.09	0.22
Pr	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03
Nd	0.08	0.08	0.05	0.05	0.13
Sm	0.05	0.05	0.02	0.02	0.04
Eu	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
Gd	0.11	0.12	0.07	0.07	0.09
Tb	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02
Dy	0.23	0.25	0.12	0.14	0.19
Ho	0.05	0.07	0.04	0.04	0.05
Er	0.19	0.18	0.11	0.12	0.14
Tm	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02
Yb	0.21	0.23	0.15	0.14	0.18
Lu	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
ΣREE	1.26	1.32	0.78	0.83	1.27
LR/HR	0.44	0.41	0.42	0.43	0.77
Y	1.39	1.51	0.89	0.98	1.10
Ni	2019	2012	2076	2110	1970
Cr	2620	2512	2542	2974	3134
V	66.88	67.51	55.43	60.43	67.42
Zr	0.34	0.40	0.22	0.18	0.66
Rb	0.26	0.31	0.11	0.16	0.56
Sr	1.30	1.44	1.16	1.75	2.26
Ba	1.67	1.57	1.75	3.07	2.38
Th	0.05	0.05	0.01	0.02	0.05
U	0.01	0.01	0.01	0.05	0.03
Pb	0.06	0.64	0.04	0.11	0.18
Nb	0.05	0.06	0.02	0.02	0.09
Hf	0.03	0.03	0.01	0.01	0.03
Ta	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02

辉石和单斜辉石 O=6,角闪石 O=23,尖晶石 O=32)。

#### 4.1 全岩地球化学

从雅鲁藏布江缝合带巴尔蛇绿岩方辉橄榄岩全岩化学成分(表1)可以看到,巴尔蛇绿岩的含单辉方辉橄榄岩遭受了一定程度的蛇纹石化(LOI:5.6%~6.9%),与显微镜观察一致。为了便于对比,在以下讨论中,主量元素的含量均为扣除挥发组分后的归一化值。

含单辉方辉橄榄岩强烈亏损易熔元素 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1.71%~2.12%)、CaO(1.72%~2.79%)、Na<sub>2</sub>O(0.02%~0.11%)和 TiO<sub>2</sub>(0.01%~0.04%),含量均明显低于原始地幔的平均值(McDonough and Sun, 1995)。含单辉方辉橄榄岩富集过渡族元素 Ni(1970×10<sup>-6</sup>~2110×10<sup>-6</sup>)和 Cr(2512×10<sup>-6</sup>~3134×10<sup>-6</sup>),Mg<sup>#</sup>[100Mg<sup>2+</sup>/(Mg<sup>2+</sup>+Fe<sup>2+</sup>)]值稳定(变化于90~90.3之间),与Oman蛇绿岩的地幔橄榄岩相近(Godard *et al.*, 2000)。

巴尔蛇绿岩含单辉方辉橄榄岩的(La/Yb)<sub>N</sub>、(La/Sm)<sub>N</sub>和(Eu/Yb)<sub>N</sub>分别变化于0.01~0.53、0.98~2.02和0.13~0.24之间。在球粒陨石标准化图解中,表现出LREE相对MREE富集的“勺状”曲线特征(图5a)。研究表明,地幔橄榄岩的LREE在蛇纹石化的过程中基本保持稳定,LREE的富集主要受熔体/流体与地幔橄榄岩之间的反应控制(Niu, 2004; Paulick *et al.*, 2006)。巴尔地幔橄榄岩的LREE相对富集的特征,表明岩石受到了后期熔体/流体的改造,这与含单辉方辉橄榄岩地幔橄榄岩包含少量由粒间熔体重结晶形成的单斜辉石(图4c, d)和交代角闪石(图4g, h)的岩相学特征一致。Niu(2004)对采自现代洋脊的深海橄榄岩(abysal peridotite)的研究显示,地幔橄榄岩的全岩HREE含量主要受岩石中单斜辉石含量的控制,而在后期蛇纹石化及地幔交代作用中基本保持稳定,认为可以用HREE来定量模拟地幔橄榄岩的部分熔融程度。巴尔含单辉方辉橄榄岩利用HREE模拟的部分熔融程度约为15%~25%之间(图5a)。与Oman蛇绿岩的地幔橄榄岩相比,巴尔含单辉方辉橄榄岩微量元素丰度较高,但二者的原始地幔标准化配分曲线整体上相互平行(图5b),表明两者存在成因上的可比性。巴尔含单辉方辉橄榄岩明显的Nb亏损,可能是受到了后期富挥发份的小体积分异熔体交代作用造成的(Bodinier *et al.*, 1997)。

#### 4.2 矿物化学

##### 4.2.1 橄欖石

橄欖石电子探针分析结果见表2。巴尔蛇绿岩2种地幔橄欖岩2个不同世代的橄欖石化学成分非常相近。二辉橄欖岩中橄欖石的Fo值变化于89.7~90.5之间,整体上略低于含单辉方辉橄欖岩橄欖石的Fo值(90~90.7)。2种地幔橄欖岩的NiO稳定,在0.36%~0.45%之间。

##### 4.2.2 斜方辉石

斜方辉石电子探针分析结果见表3。巴尔蛇绿岩2种地幔橄欖岩中的斜方辉石均属顽火辉石。含单辉方辉橄欖岩第一世代斜方辉石残斑晶Mg<sup>#</sup>变化于90.6~91.0之间,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>变化于2.6%~3.2%之间,Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>在0.67%~0.83%之间变动。与含单辉方辉橄欖岩相比,二辉橄欖岩中第一世代斜方辉石残斑晶具有较低的Mg<sup>#</sup>和Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(分别变化于89.6~90.2和0.26%~0.55%之间),较高的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(变化于3.3%~4.9%之间)。2种地幔橄欖岩中,与尖晶石接触共生

表2 雅鲁藏布江缝合带巴尔地幔蛇绿岩地幔橄辉岩橄榄石电子探针分析结果 (wt%)

Table 2 Electron microprobe analyses of olivine in peridotites from Baer ophiolites in YZSZ (wt%)

测点号	岩石类型	矿物世代	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	Fo	Fa	Tp
09Y-638.55	二辉橄 榄岩	第一 世代	41.22	0.00	0.01	0.04	9.49	48.72	0.13	0.02	0.02	0.00	0.36	0.04	100.05	90.0	9.84	0.13
09Y-638.56			41.31	0.01	0.00	0.00	9.87	48.69	0.13	0.01	0.00	0.01	0.39	0.01	100.41	89.7	10.2	0.13
09Y-638.57			41.05	0.00	0.00	0.01	9.87	48.69	0.15	0.00	0.02	0.02	0.38	0.00	100.19	89.7	10.2	0.15
09Y-638.58			41.18	0.01	0.00	0.00	9.88	49.01	0.16	0.01	0.00	0.00	0.37	0.00	100.62	89.7	10.1	0.17
09Y-638.35	二辉橄 榄岩	第二 世代	41.17	0.00	0.00	0.02	8.96	48.81	0.13	0.05	0.03	0.00	0.42	0.00	99.59	90.5	9.33	0.14
09Y-638.36			41.15	0.00	0.02	0.01	9.55	48.37	0.13	0.02	0.00	0.00	0.45	0.02	99.72	89.9	9.96	0.14
09Y-643.32	方辉橄 榄岩	第一 世代	41.01	0.00	0.05	0.00	8.98	49.00	0.12	0.02	0.00	0.00	0.42	0.00	99.59	90.6	9.31	0.12
09Y-643.33			41.08	0.00	0.04	0.01	9.07	49.29	0.12	0.00	0.00	0.00	0.38	0.04	100.04	90.5	9.35	0.13
09Y-643.34			41.40	0.00	0.00	0.03	9.19	49.19	0.14	0.01	0.00	0.00	0.37	0.02	100.35	90.4	9.47	0.15
09Y-643.35			41.07	0.00	0.04	0.00	9.06	49.23	0.05	0.03	0.00	0.00	0.41	0.03	99.91	90.6	9.35	0.06
09Y-643.36			41.14	0.01	0.00	0.00	9.05	49.14	0.17	0.02	0.01	0.00	0.37	0.00	99.91	90.5	9.35	0.18
09Y-643.54		41.53	0.02	0.02	0.00	9.26	49.94	0.11	0.00	0.00	0.02	0.37	0.00	101.28	90.5	9.41	0.11	
09Y-643.55		41.74	0.00	0.01	0.00	9.60	49.49	0.17	0.02	0.00	0.01	0.39	0.00	101.42	90.0	9.80	0.18	
09Y-643.56		41.47	0.00	0.00	0.04	9.27	49.53	0.13	0.01	0.00	0.00	0.37	0.00	100.81	90.4	9.48	0.14	
09Y-643.57		41.22	0.19	0.00	0.12	9.41	49.28	0.11	0.03	0.00	0.00	0.37	0.00	100.73	90.2	9.66	0.12	
09Y-643.6		方辉橄 榄岩	第二 世代	41.38	0.01	0.00	0.04	9.23	49.10	0.12	0.02	0.03	0.02	0.43	0.00	100.37	90.4	9.52
09Y-643.7	41.15			0.01	0.01	0.00	9.09	49.18	0.11	0.01	0.02	0.01	0.41	0.00	100.00	90.5	9.38	0.12
09Y-643.8	41.16			0.00	0.01	0.02	9.02	48.78	0.12	0.02	0.01	0.00	0.40	0.02	99.57	90.5	9.39	0.13
09Y-643.9	41.31			0.00	0.01	0.00	9.27	49.28	0.15	0.01	0.01	0.01	0.46	0.02	100.52	90.3	9.53	0.15
09Y-643.10	41.43			0.00	0.00	0.00	9.34	48.87	0.15	0.00	0.00	0.01	0.38	0.00	100.18	90.2	9.67	0.15
09Y-643.12	41.34			0.00	0.01	0.02	9.07	49.23	0.11	0.03	0.00	0.00	0.43	0.01	100.24	90.5	9.36	0.12
09Y-643.13	40.85			0.01	0.00	0.00	8.80	48.68	0.09	0.02	0.01	0.00	0.38	0.00	98.85	90.7	9.20	0.09

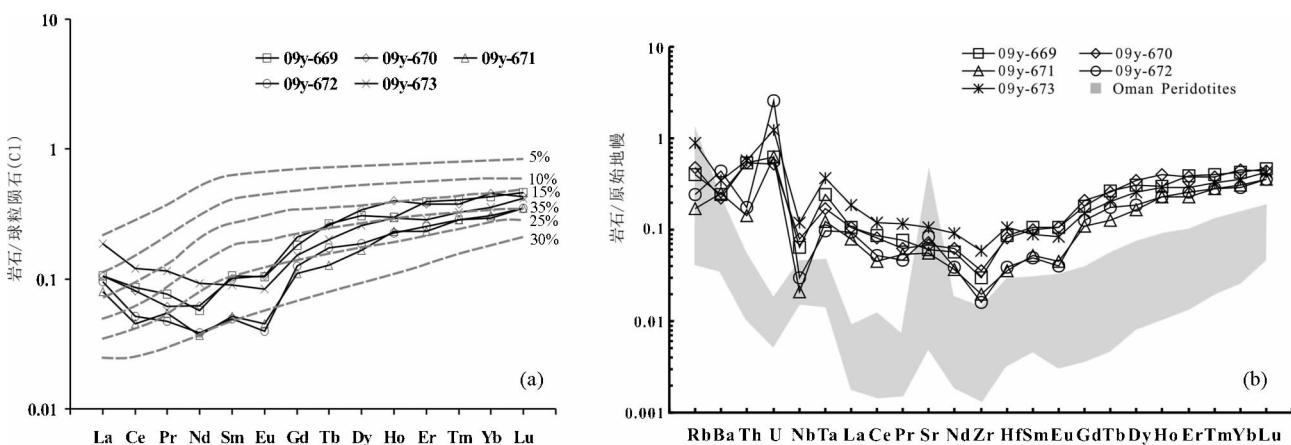


图5 巴尔蛇绿岩含单辉方辉橄辉岩稀土元素球粒陨石标准化图解与微量元素原始地幔标准化图解(球粒陨石值据 Boynton, 1984; 原始地幔值据 Sun and McDonough, 1989)

(a) 图中灰色虚线代表部分熔融曲线(Niu and Hékinian, 1997); (b) 图中灰色区域代表 Oman 蛇绿岩的地幔橄辉岩微量元素原始地幔标准化的变化范围(Godard *et al.*, 2000)

Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns and primitive mantle-normalized trace elements patterns for the Cpx-harzburgite from Baer ophiolite (chondrite value after Boynton, 1984; primitive mantle value after Sun and McDonough, 1989)

In Fig. 5a; melting model is from Niu and Hékinian (1997); in Fig. 5b; Oman peridotites mantle-normalized trace elements patterns is from Godard *et al.* (2000)

的第二世代斜方辉石的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量均低于第一世代斜方辉石残斑晶的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 表明尖晶石的形成影响了斜方辉石的成分。

#### 4.2.3 单斜辉石

2种地幔橄辉岩的单斜辉石具有不同产状:(1)单斜辉石出熔体(Dis-Cpx), 主要以细密的针状或浸染状出现在斜

表3 雅鲁藏布江缝合带巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩斜方辉石电子探针分析结果(wt%)

Table 3 Electron microprobe analyses of orthopyroxene in peridotites from Baer ophiolites in YZSZ (wt%)

测点号	岩石类型	矿物世代	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	Mg <sup>#</sup>	En	Fs	Wo
09Y-638.15			55.28	4.85	0.08	0.50	6.54	0.15	32.24	0.61	0.07	0.00	0.07	0.01	100.40	89.8	88.7	10.1	1.21
09Y-638.16			55.81	4.33	0.05	0.55	6.39	0.16	32.37	0.50	0.01	0.00	0.06	0.00	100.22	90.0	89.1	9.88	0.98
09Y-638.17			55.86	4.29	0.05	0.50	6.40	0.16	32.26	0.72	0.03	0.00	0.06	0.00	100.34	89.9	88.7	9.88	1.43
09Y-638.18			55.51	4.52	0.11	0.49	6.33	0.16	31.64	1.01	0.07	0.00	0.08	0.06	99.98	89.9	88.1	9.89	2.01
09Y-638.21			55.54	4.19	0.13	0.41	6.35	0.14	32.18	0.63	0.04	0.01	0.04	0.00	99.65	90.0	88.9	9.84	1.26
09Y-638.89			54.96	4.42	0.10	0.50	6.50	0.15	32.44	0.75	0.06	0.00	0.12	0.00	99.98	89.9	88.6	9.95	1.46
09Y-638.90			55.36	4.37	0.07	0.44	6.39	0.17	32.40	0.74	0.00	0.02	0.08	0.02	100.05	90.0	88.7	9.81	1.46
09Y-638.91			56.13	4.30	0.11	0.43	6.30	0.18	32.60	0.61	0.03	0.00	0.10	0.00	100.80	90.2	89.1	9.66	1.21
09Y-638.96		二辉橄	54.85	4.81	0.00	0.60	7.14	0.11	30.49	2.33	0.08	0.00	0.08	0.01	100.49	88.4	84.3	11.1	4.63
09Y-638.97		橄岩	54.52	5.22	0.04	0.65	7.08	0.12	31.17	0.82	0.04	0.00	0.15	0.00	99.81	88.7	87.2	11.1	1.65
09Y-638.98		条纹	54.96	4.65	0.02	0.52	7.38	0.14	32.06	0.43	0.00	0.00	0.12	0.00	100.26	88.6	87.8	11.3	0.84
09Y-638.99			54.39	5.23	0.03	0.58	7.46	0.15	31.13	0.51	0.01	0.00	0.10	0.00	99.59	88.1	87.3	11.7	1.03
09Y-638.100			54.37	5.38	0.04	0.71	7.35	0.13	31.39	0.57	0.04	0.00	0.08	0.00	100.04	88.4	87.4	11.5	1.14
09Y-638.89			54.96	4.42	0.10	0.50	6.50	0.15	32.44	0.75	0.06	0.00	0.12	0.00	99.98	89.9	88.6	9.95	1.46
09Y-638.90		二辉橄	55.36	4.37	0.07	0.44	6.39	0.17	32.40	0.74	0.00	0.02	0.08	0.02	100.05	90.0	88.7	9.81	1.46
09Y-638.91		橄岩	56.13	4.30	0.11	0.43	6.30	0.18	32.60	0.61	0.03	0.00	0.10	0.00	100.80	90.2	89.1	9.66	1.21
09Y-643.1			56.40	2.73	0.05	0.74	6.09	0.18	33.22	0.86	0.00	0.00	0.06	0.03	100.35	90.7	89.2	9.17	1.65
09Y-643.2			56.03	3.08	0.03	0.75	5.97	0.21	33.18	0.67	0.00	0.01	0.10	0.00	100.02	90.8	89.6	9.05	1.30
09Y-643.3			55.50	3.17	0.01	0.79	6.00	0.13	32.81	0.86	0.00	0.00	0.11	0.00	99.38	90.7	89.2	9.15	1.68
09Y-643.4		方辉橄	56.27	2.66	0.00	0.79	5.89	0.08	33.31	0.65	0.00	0.00	0.07	0.03	99.76	91.0	89.8	8.91	1.25
09Y-643.5		橄岩	56.03	2.78	0.02	0.77	5.98	0.19	33.01	0.78	0.01	0.00	0.08	0.02	99.65	90.8	89.4	9.08	1.52
09Y-643.11			55.61	2.62	0.03	0.68	5.83	0.13	32.55	1.07	0.04	0.00	0.12	0.00	98.68	90.9	89.0	8.93	2.11
09Y-643.14			55.88	2.76	0.03	0.72	5.99	0.12	32.29	0.91	0.00	0.00	0.12	0.00	98.80	90.5	88.9	9.25	1.80
09Y-643.22			56.02	3.00	0.00	0.69	5.95	0.12	32.49	0.91	0.00	0.00	0.08	0.00	99.26	90.7	89.1	9.15	1.78
09Y-641.29			57.40	1.74	0.02	0.33	6.44	0.14	33.99	0.48	0.01	0.00	0.05	0.00	100.57	90.4	89.6	9.51	0.90
09Y-641.42		方辉橄	57.70	2.06	0.01	0.56	6.35	0.18	34.23	0.46	0.01	0.00	0.07	0.03	101.66	90.6	89.8	9.34	0.87
09Y-641.44		橄岩	57.19	2.27	0.04	0.66	6.35	0.14	33.76	0.65	0.01	0.00	0.06	0.00	101.13	90.5	89.3	9.43	1.23



表4 雅鲁藏布江缝合带巴尔地幔绿岩带斜辉石电子探针分析结果(wt%)  
Table 4 Electron microprobe analyses of clinopyroxene in peridotites from Baer ophiolites in YZSZ (wt%)

测点号	岩石类型	矿物世代	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total	Mg <sup>#</sup>	En	Fs	Wo
09Y-638.6			55.69	4.01	0.07	0.41	6.19	0.16	32.36	0.50	0.02	0.00	0.08	0.00	99.50	90.3	89.4	9.60	1.00
09Y-638.9			55.99	3.52	0.10	0.28	6.46	0.17	32.88	0.62	0.01	0.00	0.06	0.00	100.07	90.1	89.0	9.81	1.20
09Y-638.14			55.80	4.07	0.03	0.48	6.34	0.18	32.41	0.51	0.01	0.00	0.06	0.00	99.87	90.8	89.2	9.79	1.00
09Y-638.15	二辉橄	第一世代	55.28	4.85	0.08	0.50	6.54	0.15	32.24	0.61	0.07	0.00	0.07	0.01	100.40	89.8	88.7	10.1	1.21
09Y-638.16	橄辉岩		55.81	4.33	0.05	0.55	6.39	0.16	32.37	0.50	0.01	0.00	0.06	0.00	100.22	90.0	89.1	9.88	0.98
09Y-638.17			55.86	4.29	0.05	0.50	6.40	0.16	32.26	0.72	0.03	0.00	0.06	0.00	100.34	89.9	88.7	9.88	1.43
09Y-638.18			55.51	4.52	0.11	0.49	6.33	0.16	31.64	1.01	0.07	0.00	0.08	0.06	99.98	89.9	88.1	9.89	2.01
09Y-638.21			55.54	4.19	0.13	0.41	6.35	0.14	32.18	0.63	0.04	0.01	0.04	0.00	99.65	90.0	88.9	9.84	1.26
09Y-638.89			54.96	4.42	0.10	0.50	6.50	0.15	32.44	0.75	0.06	0.00	0.12	0.00	99.98	89.9	88.6	9.95	1.46
09Y-638.90			55.36	4.37	0.07	0.44	6.39	0.17	32.40	0.74	0.00	0.02	0.08	0.02	100.05	90.0	88.7	9.81	1.46
09Y-638.91			56.13	4.30	0.11	0.43	6.30	0.18	32.60	0.61	0.03	0.00	0.10	0.00	100.80	90.2	89.1	9.66	1.21
09Y-638.96	二辉橄	第一世代	54.85	4.81	0.00	0.60	7.14	0.11	30.49	2.33	0.08	0.00	0.08	0.01	100.49	88.4	84.3	11.1	4.63
09Y-638.97	橄辉岩	代出溶 条纹	54.52	5.22	0.04	0.65	7.08	0.12	31.17	0.82	0.04	0.00	0.15	0.00	99.81	88.7	87.2	11.1	1.65
09Y-638.98			54.96	4.65	0.02	0.52	7.38	0.14	32.06	0.43	0.00	0.00	0.12	0.00	100.26	88.6	87.8	11.3	0.84
09Y-638.99			54.39	5.23	0.03	0.58	7.46	0.15	31.13	0.51	0.01	0.00	0.10	0.00	99.59	88.1	87.3	11.7	1.03
09Y-638.100			54.37	5.38	0.04	0.71	7.35	0.13	31.39	0.57	0.04	0.00	0.08	0.00	100.04	88.4	87.4	11.5	1.14
09Y-638.89	二辉橄	第二世代	54.96	4.42	0.10	0.50	6.50	0.15	32.44	0.75	0.06	0.00	0.12	0.00	99.98	89.9	88.6	9.95	1.46
09Y-638.90	橄辉岩		55.36	4.37	0.07	0.44	6.39	0.17	32.40	0.74	0.00	0.02	0.08	0.02	100.05	90.0	88.7	9.81	1.46
09Y-638.91			56.13	4.30	0.11	0.43	6.30	0.18	32.60	0.61	0.03	0.00	0.10	0.00	100.80	90.2	89.1	9.66	1.21
09Y-643.1			56.40	2.73	0.05	0.74	6.09	0.18	33.22	0.86	0.00	0.00	0.06	0.03	100.35	90.7	89.2	9.17	1.65
09Y-643.2			56.03	3.08	0.03	0.75	5.97	0.21	33.18	0.67	0.00	0.01	0.10	0.00	100.02	90.8	89.6	9.05	1.30
09Y-643.3	方辉橄	第一世代	55.50	3.17	0.01	0.79	6.00	0.13	32.81	0.86	0.00	0.00	0.11	0.00	99.38	90.7	89.2	9.15	1.68
09Y-643.4	橄辉岩		56.27	2.66	0.00	0.79	5.89	0.08	33.31	0.65	0.00	0.00	0.07	0.03	99.76	91.0	89.8	8.91	1.25
09Y-643.11			55.61	2.62	0.03	0.68	5.83	0.13	32.55	1.07	0.04	0.00	0.12	0.00	98.68	90.9	89.0	8.93	2.11
09Y-643.14			55.88	2.76	0.03	0.72	5.99	0.12	32.29	0.91	0.00	0.00	0.12	0.00	98.80	90.5	88.9	9.25	1.80
09Y-643.22			56.02	3.00	0.00	0.69	5.95	0.12	32.49	0.91	0.00	0.00	0.08	0.00	99.26	90.7	89.1	9.15	1.78
09Y-641.29	方辉橄	第二世代	57.40	1.74	0.02	0.33	6.44	0.14	33.99	0.48	0.01	0.00	0.05	0.00	100.57	90.4	89.6	9.51	0.90
09Y-641.42	橄辉岩		57.70	2.06	0.01	0.56	6.35	0.18	34.23	0.46	0.01	0.00	0.07	0.03	101.66	90.6	89.8	9.34	0.87
09Y-641.44			57.19	2.27	0.04	0.66	6.35	0.14	33.76	0.65	0.01	0.00	0.06	0.00	101.13	90.5	89.3	9.43	1.23
09Y-643.43			52.70	0.04	3.17	1.09	2.27	0.08	16.67	23.35	0.10	0.00	0.05	0.00	99.51	92.9	48.0	3.67	48.3
09Y-643.44	方辉橄	第一世代	52.24	0.06	3.61	1.06	2.35	0.10	16.43	23.64	0.13	0.01	0.06	0.03	99.71	93.0	47.3	3.79	48.9
09Y-643.45	橄辉岩	代出溶 条纹	52.30	0.05	3.12	0.93	2.24	0.10	16.23	23.96	0.06	0.00	0.05	0.00	99.04	92.8	46.8	3.61	49.6
09Y-643.46			52.30	0.07	3.29	1.04	2.85	0.08	17.43	22.27	0.07	0.00	0.08	0.00	99.49	92.3	49.8	4.57	45.7
09Y-641.17			54.67	0.01	1.87	0.48	2.18	0.09	17.55	23.92	0.13	0.00	0.05	0.02	100.96	93.5	48.8	3.40	47.8
09Y-641.22			54.26	0.04	1.92	0.44	2.12	0.10	17.27	24.06	0.10	0.00	0.04	0.02	100.35	93.6	48.3	3.33	48.4
09Y-641.23			53.80	0.06	2.56	0.68	2.18	0.05	17.06	23.51	0.14	0.00	0.04	0.01	100.08	93.3	48.5	3.47	48.0
09Y-641.24	二辉橄	第二世代	53.92	0.08	2.47	0.66	2.08	0.05	16.99	24.04	0.14	0.00	0.03	0.00	100.47	93.6	47.9	3.29	48.8
09Y-641.25		代粒间	53.87	0.04	2.68	0.75	2.36	0.07	16.92	23.53	0.14	0.00	0.03	0.00	100.38	92.7	48.1	3.76	48.1
09Y-641.26			54.08	0.07	2.57	0.81	2.33	0.09	17.06	24.07	0.14	0.00	0.07	0.00	101.28	92.9	47.8	3.67	48.5
09Y-641.30		第二世代	54.92	0.07	1.20	0.36	1.94	0.08	17.91	23.92	0.08	0.00	0.06	0.03	100.56	94.3	49.5	3.01	47.5
09Y-641.21		代Hb	53.72	0.08	2.66	0.80	2.01	0.09	16.45	23.93	0.13	0.00	0.01	0.00	99.86	93.6	47.3	3.24	49.5
09Y-641.27		交代	53.95	0.04	2.06	0.64	2.15	0.08	17.07	24.17	0.12	0.01	0.06	0.00	100.34	93.4	47.9	3.39	48.7

表5 雅鲁藏布江缝合带巴尔蛇绿岩地幔橄榄岩尖晶石电子探针分析结果 (wt%)

Table 5 Electron microprobe analyses of spinel in peridotites from Baer ophiolites in YZSZ (wt%)

测点号	岩石类型	矿物世代	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Total	Mg <sup>#</sup>	Cr <sup>#</sup>
09Y-638.19	二辉橄 榄岩	第二 世代	0.00	55.71	0.05	13.26	11.06	19.12	0.16	0.00	0.02	0.00	99.38	75.5	0.14
09Y-638.20			0.00	55.53	0.02	13.89	11.19	19.17	0.14	0.01	0.01	0.01	99.96	75.3	0.14
09Y-638.28			0.01	57.27	0.00	11.20	11.44	18.81	0.14	0.00	0.06	0.00	98.93	74.6	0.12
09Y-638.83			0.02	57.40	0.08	11.99	11.31	19.48	0.14	0.00	0.03	0.00	100.44	75.4	0.12
09Y-638.84			0.01	56.03	0.00	13.52	11.55	19.06	0.16	0.00	0.00	0.00	100.33	74.6	0.14
09Y-643.15	方辉橄 榄岩	第二 世代	0.00	33.29	0.01	35.65	17.74	13.90	0.24	0.00	0.00	0.00	100.83	58.3	0.42
09Y-643.16			0.00	32.95	0.02	34.78	17.80	13.80	0.29	0.00	0.00	0.01	99.65	58.0	0.41
09Y-643.17			0.01	32.30	0.04	35.66	18.34	13.09	0.25	0.00	0.00	0.01	99.70	56.0	0.43
09Y-643.18			0.02	32.14	0.00	34.94	18.11	13.83	0.25	0.00	0.02	0.00	99.30	57.6	0.42
09Y-643.20			0.00	31.37	0.09	36.69	18.13	13.77	0.22	0.00	0.03	0.00	100.28	57.5	0.44
09Y-643.21			0.00	28.24	0.05	39.38	18.38	13.09	0.31	0.01	0.03	0.00	99.50	55.9	0.48

表6 雅鲁藏布江缝合带巴尔蛇绿岩地幔橄榄岩角闪石电子探针分析结果 (wt%)

Table 6 Electron microprobe analyses of amphibole in peridotites from Baer ophiolites in YZSZ (wt%)

测点号	岩石类型	矿物世代	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MgO	MnO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	NiO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Total		
09Y-638.40	二辉橄 榄岩	第三 世代	42.84	15.08	1.57	1.25	3.38	0.07	16.85	11.94	3.92	0.00	0.10	0.01	97.01		
09Y-638.41			42.26	14.98	1.54	1.37	3.32	0.07	16.79	13.01	3.77	0.00	0.06	0.02	97.18		
09Y-638.42			43.03	14.75	1.53	1.34	3.27	0.04	17.07	12.32	3.82	0.00	0.08	0.00	97.24		
09Y-638.43			42.78	15.06	1.51	1.36	3.43	0.03	17.00	12.20	3.69	0.00	0.10	0.05	97.21		
09Y-638.44			42.92	14.92	1.39	1.38	3.37	0.11	17.14	12.01	3.88	0.00	0.18	0.02	97.31		
09Y-638.51			42.67	15.51	1.41	1.41	3.38	0.09	16.85	11.99	3.80	0.00	0.13	0.05	97.28		
09Y-638.52			42.97	15.15	1.60	1.47	3.30	0.04	16.96	12.09	3.81	0.00	0.09	0.00	97.47		
09Y-638.53			42.82	15.30	1.36	1.42	3.38	0.07	17.35	12.02	3.83	0.00	0.12	0.00	97.67		
09Y-638.54			42.99	14.92	1.35	1.35	3.37	0.08	16.87	12.07	3.83	0.01	0.09	0.06	96.98		
09Y-638.61			43.12	15.00	1.90	1.08	3.51	0.04	17.11	11.73	3.97	0.00	0.12	0.03	97.59		
09Y-638.62			43.11	14.96	1.86	1.02	3.44	0.07	17.04	12.06	3.73	0.02	0.11	0.00	97.41		
09Y-641.20			方辉橄 榄岩	第三 世代	46.51	12.96	0.27	1.91	3.17	0.06	17.95	12.83	2.09	0.20	0.10	0.00	98.04
09Y-641.31					48.80	11.14	0.26	1.67	2.86	0.06	18.55	12.75	1.48	0.03	0.13	0.04	97.76
09Y-641.33	49.57	10.50			0.26	1.61	2.83	0.04	18.93	12.56	1.45	0.04	0.07	0.00	97.87		

方辉石中;(2)橄榄石粒间填隙状单斜辉石(Inter-Cpx),以不连续的他形晶与细粒尖晶石接触共生;(3)与角闪石接触共生的单斜辉石(Hb-Cpx);(4)单斜辉石残斑晶(Por-Cpx)主要分布在二辉橄榄岩中。对这些单斜辉石分别分析以电子探针测定了成分(表4),结果显示2种地幔橄榄岩中的单斜辉石都属于透辉石。

从图6中可以看出,二辉橄榄岩中单斜辉石的不相容元素Ti<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O含量及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO明显高于含单辉方辉橄榄岩。含单辉方辉橄榄岩3种不同产状单斜辉石的Mg<sup>#</sup>值和Na<sub>2</sub>O变化范围相近,而单斜辉石出熔体(Dis-Cpx)的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>和Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>均明显高于另外2种单斜辉石(Inter-Cpx和Hb-Cpx)。2种地幔橄榄岩单斜辉石整体上具有相近的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Mg<sup>#</sup>值变化范围,而不同产状的单斜辉石不相容元素Ti<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Na<sub>2</sub>O及Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/CaO呈现出明显的线性相关。

#### 4.2.4 尖晶石

尖晶石电子探针分析结果见表5。含单辉方辉橄榄岩尖晶石Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>分别变化于34.78%~39.38%和28.24%~33.29%之间,Cr<sup>#</sup>变化于41.8~48.3之间。二辉橄榄岩尖晶石Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量分别为11.2%~13.89%和55.17%~57.4%,Cr<sup>#</sup>值在11.6~14.6之间变动。地幔橄榄岩中尖晶石的形成主要受地幔橄榄岩部分熔融以及环境压力的控制(Dick and Bullen, 1984),利用尖晶石Cr<sup>#</sup>和橄榄石的Mg<sup>#</sup>的关系可以推测其寄主岩石形成环境、部分熔融的程度及形成的大致压力(Arai, 1994; Sobolev and Batanova, 1995; Pearce, 2000)。从图7中可以看出,含单辉方辉橄榄岩和二辉橄榄岩的样品全部落在了橄榄石-尖晶石地幔趋势(OSMA)区域内,与深海橄榄的成分区间相似。其中含单辉方辉橄榄岩的部分熔融程度约为20%,与利用全岩HREE所模拟的结果基本一致,形成压力约为10~15kbar。二辉橄榄

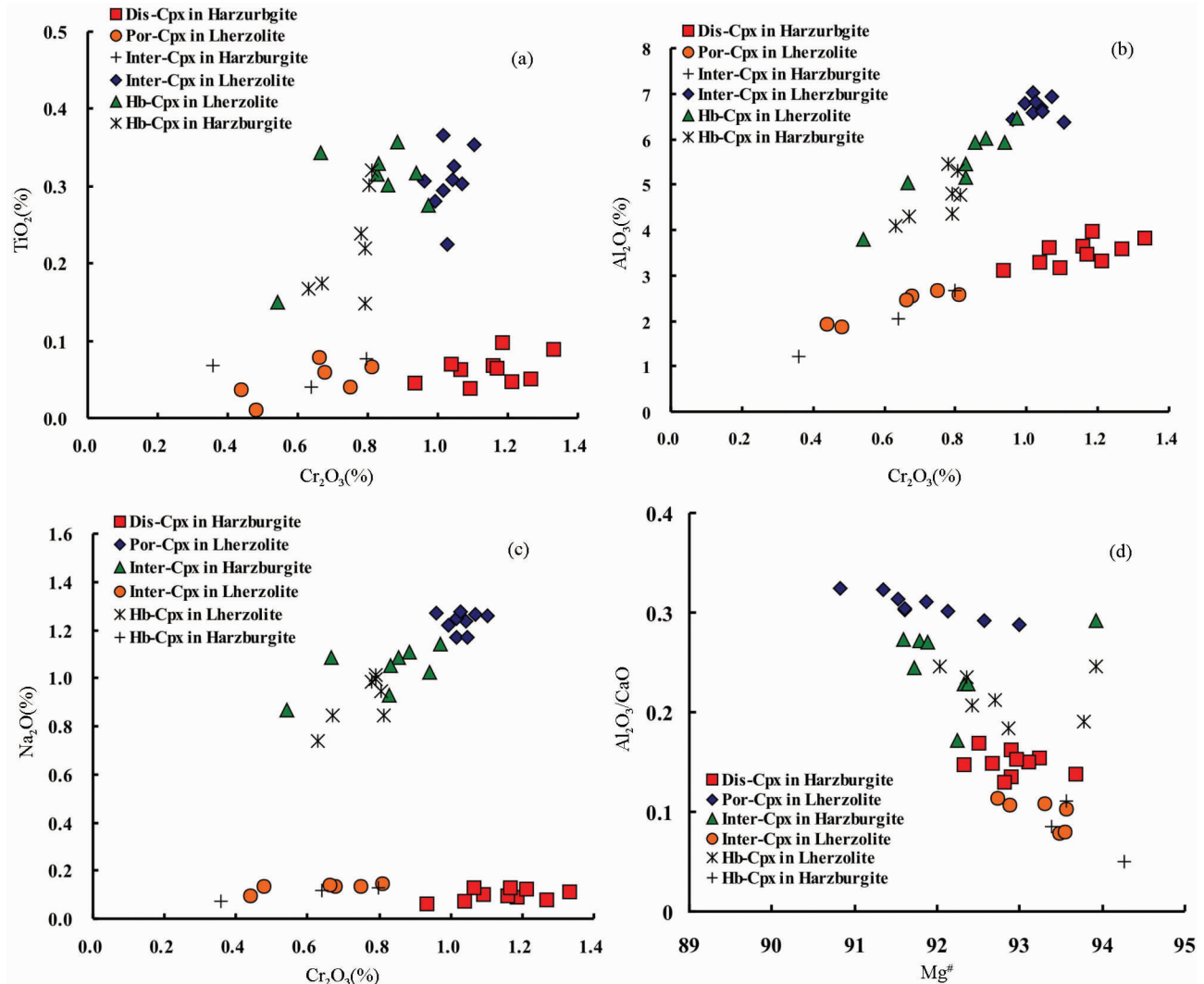


图6 巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩单斜辉石图解

(a)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  图解; (b)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  图解; (c)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  图解; (d)  $\text{-Mg}^\#\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  图解. Dis-Cpx-单斜辉石出熔体; Inter-Cpx-粒间单斜辉石; Hb-Cpx-与角闪石形成合晶的单斜辉石; Por-Cpx-第一代单斜辉石残斑晶; Cpx-Harzburgite-含单辉方辉橄辉岩; Lherzolite-二辉橄辉岩

Fig. 6 A plot of compositional variations of clinopyroxenes in two peridotite samples from the Baer ophiolite

(a)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  diagram; (b)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  diagram; (c)  $\text{-Cr}_2\text{O}_3\text{-Na}_2\text{O}$  diagram; (d)  $\text{-Mg}^\#\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$  diagram. Dis-Cpx-exsolved clinopyroxenes; Inter-Cpx-interstitial clinopyroxenes; Hb-Cpx-clinopyroxenes associate with Amphibole; Por-Cpx-clinopyroxenes porphyroclast; Cpx-Harzburgite-clinopyroxenes bearing harzburgite

岩熔融程度约5%,明显低于含单辉方辉橄辉岩,而形成压力明显高于含单辉方辉橄辉岩。

#### 4.2.5 角闪石

根据 Leake *et al.* (1997) 对角闪石的分类,含单辉方辉橄辉岩中角闪石为浅闪石,二辉橄辉岩中角闪石为韭闪石。含单辉方辉橄辉岩中浅闪石  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量在 9.8% ~ 12.95% 之间,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量分别在 0.26% ~ 0.28% 和 1.35% ~ 2.08% 之间。二辉橄辉岩中韭闪石  $\text{Mg}^\#$  变化于 90.7 ~ 96.2 之间,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  变化于 13.92% ~ 15.39% 之间,  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  分别变化于 0.94% ~ 1.38% 和 3.49% ~ 3.97% 之间(表 6),明

显高于含单辉方辉橄辉岩中浅闪石的  $\text{TiO}_2$  和  $\text{Na}_2\text{O}$  含量。

## 5 讨论

### 5.1 巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩的成因与演化

巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩多世代矿物组合的结构特征清楚地表明它们成因的复杂性和多阶段演化的特征。2 种地幔橄辉岩第一代矿物组合的结构特征,如橄辉石的波状消光、斜方辉石和单斜辉石残斑晶、解理弯曲等,是蛇绿岩地幔橄辉岩的常见结构,这些结构保留了残余地幔的岩石信息,

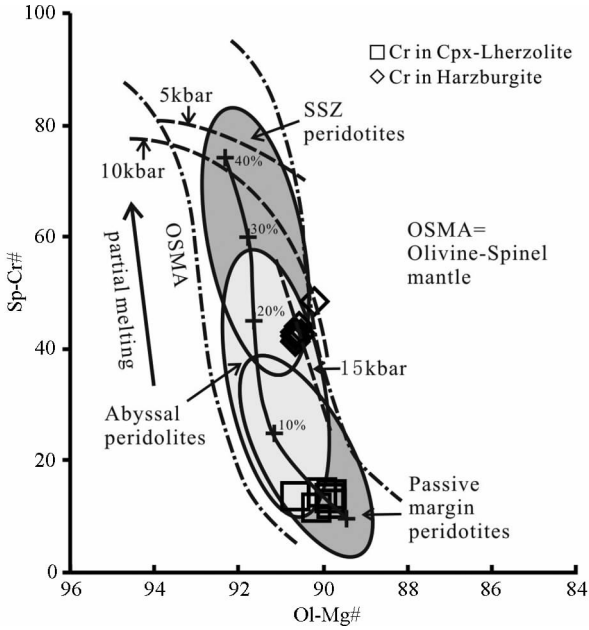


图7 巴尔蛇绿岩地幔橄榄岩橄榄石  $Mg^{\#}$  与尖晶石  $Cr^{\#}$  图解(据 Pearce, 2000)

图中5kbar和10kbar压力曲线据 Sobolev and Batanova (1995), 15kbar压力曲线据 Jaques and Green (1980). Abyssal Peridotites-深海橄榄岩; OSMA-橄榄石尖晶石地幔演化趋势; Passive margin Peridotites-被动大陆边缘地幔橄榄岩; SSZ Peridotites-SSZ型地幔橄榄岩; Cpx-Harzburgite-含单辉方辉橄榄岩; Lherzolite-二辉橄榄岩

Fig. 7 A plot of olivine- $Mg^{\#}$  against spinel- $Cr^{\#}$  for Baer peridotites (after Pearce, 2000)

The 5kbar and 10kbar curves are from Sobolev and Batanova (1995), and the 15kbar curve is from Jaques and Green(1980)

是地幔橄榄岩经历过高温变形作用的记录 (Mercier *et al.*, 1975)。

与第一代矿物组合不同,巴尔蛇绿岩2种地幔橄榄岩中的第二代矿物组合具有明显的岩浆作用特征。其中尖晶石作为地幔橄榄岩中常见的副矿物,对其产状和成分的研究是恢复地幔橄榄岩演化过程的重要手段 (Sobolev and Batanova, 1995; Zhou *et al.*, 1996; Pearce, 2000)。巴尔蛇绿岩2种地幔橄榄岩中的尖晶石主要与斜方辉石形成共生组合,对于这种共生组合的成因主要有3种观点:(1)认为尖晶石与斜方辉石共生组合是在地幔橄榄岩抬升过程中,由于温度的降低,原来在橄榄石晶格内稳定的  $Cr^{3+}$  和  $Fe^{3+}$  沿晶格方向形成的出熔体 (Moseley, 1984),这种机制显然不能解释巴尔地幔橄榄岩尖晶石和斜方辉石共生组合的结构形态特征;(2)认为尖晶石和斜方辉石共生组合是由石榴石橄榄岩相中石榴石分解而来,其形成机制可以表示为:石榴石+橄榄石 $\rightarrow$ 斜方辉石+单斜辉石+尖晶石 (Falus *et al.*, 2007)。巴尔地幔橄榄岩中没有石榴石的残留,无论是在尖晶石和斜方辉石共生组合边缘或者内部,总是缺少单斜辉

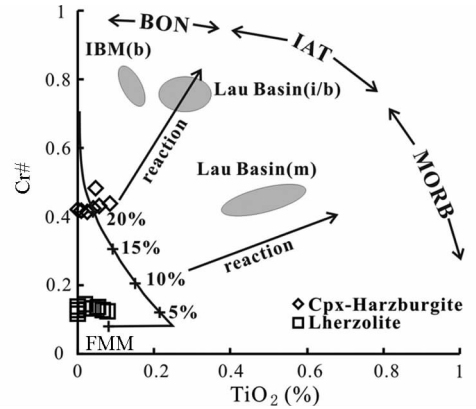


图8 巴尔蛇绿岩地幔橄榄岩尖晶石  $TiO_2$ - $Cr^{\#}$  图解(据 Pearce, 2000)

FMM-富集地幔; BON-玻安岩; IAT-洋岛型拉斑玄武岩; MORB-洋中脊拉斑玄武岩; Cpx-Harzburgite-含单辉方辉橄榄岩; Lherzolite-二辉橄榄岩

Fig. 8 A plot of  $TiO_2$  against  $Cr^{\#}$  for spinel from Baer peridotites (after Pearce, 2000)

石,而且尖晶石和斜方辉石共生组合的形态不具有石榴石假象的形态,而显示出明显的岩浆作用的特征。因此这种观点也无法解释尖晶石和斜方辉石共生组合的成因;(3)认为尖晶石和斜方辉石由地幔橄榄岩部分熔融形成的熔体重结晶形成 (Dick and Bullen, 1984; Zhou *et al.*, 1996)。从图4f中可以看出,尖晶石和斜方辉石光性均一,不具有变形现象和出溶结构,显示出明显从岩浆结构的特征,与第一代残斑晶矿物形成鲜明的对比,此观点可以较好地解释尖晶石和斜方辉石共生组合的产状和成因。进一步研究表明,地幔橄榄岩中尖晶石的  $Cr^{\#}$  和  $TiO_2$  会受到后期熔体-岩石反应的影响而变化 (Edwards and Malpas, 1996; Pearce, 2000),当有俯冲带熔体作用的影响时,会造成尖晶石  $Cr^{\#}$  和  $TiO_2$  变化而偏离部分熔融曲线,尖晶石的  $Cr^{\#}$  和  $TiO_2$  关系能够较好的区分熔体-岩石相互作用与部分熔融作用对地幔橄榄岩的影响 (Pearce, 2000)。从图8中可以看出,巴尔蛇绿岩的两种地幔橄榄岩尖晶石  $TiO_2$  全部落在了地幔橄榄部分熔融趋势线附近,表明巴尔2种地幔橄榄岩尖晶石和斜方辉石共生组合主要是受到部分熔融作用的控制,几乎没有受到后期俯冲带熔体的影响。地幔橄榄岩在就位过程中,部分熔融作用产生的熔体会与残留的地幔岩石发生反应,单斜辉石的结构构造和化学组成特征常被用来解释这些作用的性质 (Mckenzie and Bickle, 1988; Johnson *et al.*, 1990; Selyer *et al.*, 2001; Pearce, 2000; Simon *et al.*, 2008; Sanjeewa *et al.*, 2010)。在巴尔蛇绿岩两种地幔橄榄岩中,第二代的由熔体重结晶而来的单斜辉石 (Inter-Cpx) 主要存在于橄榄石颗粒之间的空隙中。从图6中可以看出,2种地幔橄榄岩第二代单斜辉石与第一代残斑晶单斜辉石及单斜辉石出熔体在成分上有显著的区别,不相容元素  $Ti_2O$ 、 $Al_2O_3$ 、 $Na_2O$  及  $Al_2O_3/$

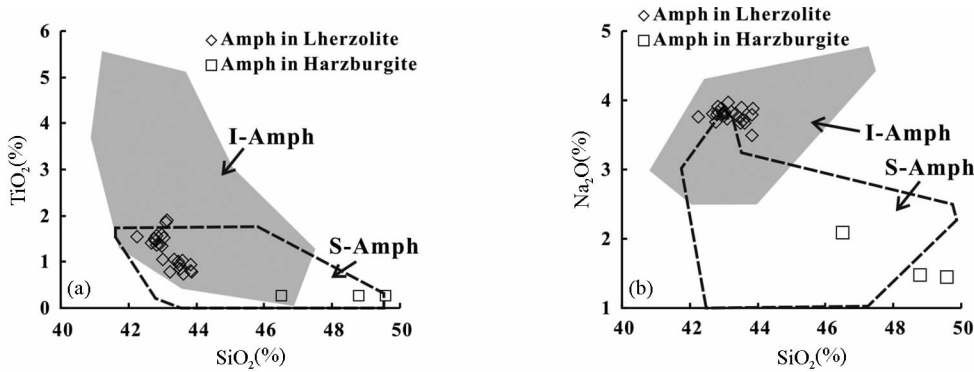


图9 巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩中角闪石  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  (a)、 $\text{SiO}_2$ - $\text{Na}_2\text{O}$  (b)图解(据 Coltorti *et al.*, 2007)

图中灰色区域代表板内环境下形成的角闪石的成分区域,虚线包围的区域为俯冲带地幔楔环境形成的角闪石的成分区域. I-Amph-板内环境成因角闪石,板内环境包括大陆内部、洋岛及洋脊环境;S-Amph-俯冲带环境成因角闪石,主要指俯冲带上部的地幔楔(Coltorti *et al.*, 2007)

Fig. 9 Plots of  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{TiO}_2$  (a) and  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{Na}_2\text{O}$  (b) for amphibole from Baer peridotites (after Coltorti *et al.*, 2007)

I-Amph-Intraplate amphiboles; S-Amph-Subduction amphiboles

CaO 呈现出明显的线性相关,表明单斜辉石的化学组成特征主要受到部分熔融和熔体/流体-岩石反应的控制(Godard *et al.*, 2000; Seyler *et al.*, 2001)。第二世代的单斜辉石可能是地幔橄辉岩在洋脊环境下发生部分熔融后熔体抽取不完全,残留在地幔橄辉岩空隙间的熔体与地幔橄辉岩残余相互作用的产物(Seyler *et al.*, 2001; Coltorti *et al.*, 2004; Simon *et al.*, 2008)。综上所述,认为巴尔地幔橄辉岩第二世代矿物组合形成于洋脊的构造环境。

含水矿物角闪石的出现,表明地幔橄辉岩受到了地幔交代作用的改造(Ionov *et al.*, 1997, Coltorti *et al.*, 2004, 2007)。巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩角闪石总是围绕单斜辉石生长,这种结构特征在含角闪石地幔橄辉岩中比较常见,表明角闪石的形成是消耗单斜辉石而来(Moine *et al.*, 2001; Ionov *et al.*, 2002; Coltorti *et al.*, 2004)。角闪石的成分虽不能完全代替交代介质,但是却能够很好地反映交代介质的性质及形成的构造环境,对不同构造环境地幔捕虏体中交代成因角闪石的研究表明,来自俯冲带之上地幔楔(suprasubduction amphibole)捕虏体中的角闪石具有较高的  $\text{SiO}_2$  含量,较低的  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$ ,与板内环境(intraplate amphibole)捕虏体中的角闪石有较大的区别(Coltorti *et al.*, 2007)。在图9中,巴尔蛇绿岩两种不同地幔橄辉岩的角闪石成分差异明显,二辉橄辉岩角闪石落在了板内环境的成分区域,而含单辉方辉橄辉岩角闪石落在了俯冲带环境的区域内。尽管交代介质准确的化学性质还不能完全确定,但是巴尔蛇绿岩二辉橄辉岩角闪石具有相对较高的  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  的含量与 MORB 的  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  的含量类似(Sun and McDonough, 1989)。而含单辉方辉橄辉岩的角闪石所代表的交代介质具有相对较低的  $\text{Na}_2\text{O}$  和  $\text{TiO}_2$  含量,与岛弧玄武岩成分类似,推断二辉橄辉岩受到了洋脊环境下交代作用影响,而含单辉方辉橄辉岩的交代作用更可能是受到了俯冲带

流体的交代作用的影响。

综上所述,巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩3个世代矿物组合特征显示巴尔蛇绿岩的地幔橄辉岩经历了2阶段的演化。二辉橄辉岩3个世代的矿物组合、含单辉方辉橄辉岩第一和第二世代矿物组合的矿物学特征显示巴尔蛇绿岩地幔橄辉岩的主体形成于洋脊的构造环境。之后随着新特提斯洋的关闭,仰冲板块的所携带的橄辉岩在俯冲板块脱水流体的作用下发生交代作用,形成了含单辉方辉橄辉岩的第三世代矿物组合,与之对应形成于 MOR 地幔橄辉岩最终也被烙上了 SSZ 的印记。

## 5.2 构造意义

迄今对雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的研究表明,不同的蛇绿岩体显示出多成因、多阶段演化及形成时代非均一的特征。Zhou *et al.* (2002) 获得雅鲁藏布江缝合带东段罗布莎蛇绿岩辉长岩全岩和矿物 Sm-Nd 等时线年龄为  $177 \pm 31\text{Ma}$ , 并根据辉长岩的 Nd 和 Pb 同位素特征认为其形成于洋脊的构造环境。Shi *et al.* (2007) 获得罗布莎蛇绿岩铁矿中 Ru-Os-Ir 矿物 Re-Os 同位素模式年龄为  $234 \pm 3\text{Ma}$ 。Yamamoto *et al.* (2009) 在罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中发现了纳米级柯石英和单斜辉石出熔体,认为豆荚状铬铁矿携带了地幔橄辉岩在洋中脊演化之前的物质信息,进而提出罗布莎蛇绿岩在洋脊形成的年龄约为  $177\text{Ma}$ ,在约  $120\text{Ma}$  受到了 SSZ 环境的岩浆作用的改造。Göpel *et al.* (1984) 获得雅鲁藏布江缝合带中段日喀则蛇绿岩中斜长花岗岩单颗粒锆石的年龄为  $120 \pm 10\text{Ma}$ ; Chan *et al.* (2007) 获得日喀则蛇绿岩中伟晶辉长岩的 U-Pb 年龄为  $132 \pm 2.9\text{Ma}$ 。Guilmette *et al.* (2008) 认为日喀则蛇绿岩岩体形成于 SSZ 环境下的弧前盆地。Malpas *et al.* (2003) 获得雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩体(Yungbwa 蛇绿岩)中拉斑玄武岩 Sm-Nd 等时线年龄和 Ar-Ar



年龄分别为  $147 \pm 25\text{Ma}$  和  $152 \pm 33\text{Ma}$ , 认为普兰蛇绿岩体的地幔橄榄岩形成于 MOR 环境; Liu *et al.* (2010) 在普兰蛇绿岩体地幔橄榄岩中发现了  $An = 99$  的斜长石, 认为拉昂错岩体在洋脊形成后, 还经历了 1 个 SSZ 的演化阶段。对雅鲁藏布江缝合带形成的构造背景及时代不均一原因, 迄今还存在着很大的争论。Bédard *et al.* (2009) 提出雅鲁藏布江缝合带的形成经历了 2 次洋内俯冲, 第一次洋内俯冲发生在  $150 \sim 130\text{Ma}$  期间, 第二次洋内俯冲约为  $130 \sim 115\text{Ma}$ ; 夏斌等 (2008) 认为雅鲁藏布江缝合带不同岩体年龄的多样性表现了东特提斯洋盆东早西晚的发育特征。

蛇绿岩不仅可以形成于大洋扩张脊 (MOR 型)、板块俯冲消减带上的岛弧及大陆边缘小洋盆等多种构造环境中 (SSZ 型) (Pearce *et al.*, 1984), 而且不同类型的地幔橄榄岩可以并存于一套蛇绿岩中 (Batanova and Sobolev, 2000; Choi *et al.*, 2008; Aldanmaz *et al.*, 2009)。综合前人对雅鲁藏布江缝合带不同蛇绿岩体地幔橄榄岩的研究, 发现雅鲁藏布江缝合带也存在 2 种类型的地幔橄榄岩, 第一种为形成于典型的 SSZ 环境的弧前盆地, 这种类型的蛇绿岩主要发育在雅鲁藏布江缝合带中段, 以日喀则蛇绿岩体的地幔橄榄岩 (Dupuis *et al.*, 2005; Guilmette *et al.*, 2008)、萨嘎和桑桑蛇绿岩的地幔橄榄岩 (Bédard *et al.*, 2009) 为代表; 第二种地幔橄榄岩主体形成于 MOR 环境, 但是受到了不同程度 SSZ 环境的改造, 这种类型的地幔橄榄岩主要位于雅鲁藏布江缝合带的东段和西段, 以雅鲁藏布江缝合带东部罗布莎蛇绿岩体的地幔橄榄岩 (Yang *et al.*, 2007; Yamamoto *et al.*, 2009) 及西部普兰蛇绿岩的地幔橄榄岩 (Miller *et al.*, 2003; Liu *et al.*, 2010) 为代表。本文所讨论的巴尔蛇绿岩的地幔橄榄岩也属于第二种类型。不同区段地幔橄榄岩的特征暗示雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的演化可能具有分段性, 不同区段的蛇绿岩形成于不同的构造背景。雅鲁藏布江缝合带形成与演化复杂、非均一的特点, 可能与新特提斯洋沿弧方向上板块活动的动力学机制的不均一有关。

## 6 结论

(1) 巴尔蛇绿岩属于西藏雅鲁藏布江缝合带西段, 地幔橄榄岩单元主体为含单辉方辉橄榄岩, 局部有少量二辉橄榄岩和纯橄岩出露, 基性岩单元包括堆晶橄长岩与玄武岩, 主要出露在地幔橄榄岩体的边部。

(2) 根据地幔橄榄岩矿物学特征, 将巴尔蛇绿岩地幔橄榄岩 3 个世代的矿物组合归并为 2 阶段演化, 即地幔橄榄岩主体形成于 MOR 构造环境, 但在就位过程中受到了 SSZ 环境的改造。

(3) 对比雅鲁藏布江缝合带不同区段蛇绿岩中地幔橄榄岩的特征, 认为雅鲁藏布江缝合带包括 MOR 和 SSZ 2 种类型地幔橄榄岩。其中东、西段以经历了不同程度 SSZ 改造的 MOR 型地幔橄榄岩为主, 中段的主要为典型的 SSZ 型地幔

橄榄岩, 认为雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩形成与演化分段性的特征, 可能与新特提斯洋沿弧方向上板块活动的动力学机制的不均一有关。

**致谢** 西藏地质二队的巴登珠教授级高工在野外工作中给予了大力的支持和帮助; 矿物电子探针实验得到了东华理工大学核资源与环境教育部重点实验室郭国林的指导; 于此深表谢意。

## References

- Aitchison, J.C., Badengzhu, Davis AM, Liu J, Luo H, Malpas J, McDermid I, Wu H, Ziabrev S and Zhou MF. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). *Earth and Planetary Science Letters*, 183: 231–244
- Aldanmaz E, Schmidt MW, Gourgand A and Meisel T. 2009. Mid-ocean ridge and supra-subduction geochemical signatures in spinel-peridotites from the Neotethyan ophiolites in SW Turkey: Implications for upper mantle melting processes. *Lithos*, 113: 691–708
- Allègre CJ, Coutillot V, Tapponnier P, Hirn A, Mattauer M, Coulon C, Jaeger JJ, Achache J, Schärer U, Marcoux J, Burg JP, Girardeau J, Armijo R, Gariépy C, Göpel C, Li T, Xiao X, Chang C, Li G, Lin B, Teng J, Wang N, Chen G, Han T, Wang X, Den W, Sheng H, Cao Y, Zhou J, Qiu H, Bao P, Wang S, Wang B, Zhou Y and Roughua X. 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet Orogenic Belt. *Nature*, 56: 173–184
- Arai S. 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, 113: 191–204
- Batanova VG and Sobolev AV. 2000. Compositional heterogeneity in subduction-related mantle peridotites, Troodos massif, Cyprus. *Geology*, 28: 55–58
- Bédard É, Hébert R, Guilmette C, Lesage G, Wang CS and Dostal BJ. 2009. Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolite massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: Evidence for an arc-back-arc origin. *Lithos*, 113: 48–67
- Bodnier JJ, Dautria JM and Morten L. 1997. Evolution of LILE-enriched small melt fractions in the lithospheric mantle: A case study from the East African Rift. *Earth and Planetary Science Letters*, 153: 67–83
- Boynnton WV. 1984. Geochemistry of the earth elements: Meteorite studies. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63–114
- Chan GH, Crowley Q, Searle M, Aitchison JC and Horstwood M. 2007. U-Pb zircon ages of the Yarlung Zangbo suture zone ophiolites, South Tibet. 22<sup>th</sup> Himalaya-Karakoram-Tibet Workshop, Hong Kong, China. Workshop Abstract Volume, 12
- Choi SH, Shervais JW and Mukasa SB. 2008. Supra-subduction and abyssal mantle peridotites of the coast range ophiolite, California. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 156: 551–576
- Coltorti M, Beccaluva L, Bonadiman C, Faccin B, Ntaflou T and Siena F. 2004. Amphibole genesis via metasomatic reaction with clinopyroxene in mantle xenoliths from Victoria Land, Antarctica. *Lithos*, 75: 115–139
- Coltorti M, Bonadiman C, Faccin B, Grégoire M, O'Reilly SY and Powell W. 2007. Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle. *Lithos*, 99: 68–84
- Dick HJB and Bullen T. 1984. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(1): 54–76

- Dupuis CV, Hébert R, Dubois-Côté V, Guilmette C, Wang CS, Li YL and Li ZJ. 2005. The Yarlung Zangbo suture zone ophiolitic mélange (southern Tibet): New insights from geochemistry of ultra-mafic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25: 937–960
- Edwards SJ and Malpas J. 1996. Melt-peridotite interactions in shallow mantle at the East Pacific rise: Evidence from ODP site 895 (Hess Deep). *Mineral Magazine*, 60: 191–206
- Falus G, Szabo C, Kovacs I, Zoltán Z and Werner H. 2007. Symplectite in spine lherzolite xenoliths from the Little Hungarian plain, Western Hungary: A key for understanding the complex history of the upper mantle of the Pannonian basin. *Lithos*, 94: 230–247
- Girardeau J, Mercier JCC and Wang X. 1985a. Petrology of the mafic rocks of the Xigaze ophiolites, Tibet; Implications for the genesis of the oceanic lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90: 309–321
- Girardeau J, Mercier JCC and Zao Y. 1985b. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications. *Tectonics*, 4: 267–288
- Godard M, Jousset D and Bodinier JL. 2000. Relationships between geochemistry and structure beneath a palaeo-spreading centre: A study of the mantle section in the Oman ophiolite. *Earth and Planetary Science Letters*, 180: 133–148
- Göpel C, Allègre CJ and Xu RH. 1984. Lead isotopic study of the Xigaze ophiolite (Tibet); The problem of the relationship between magmatites (gabbros, dolerites, lavas) and tectonites (harzburgites). *Earth and Planetary Science Letters*, 69: 301–310
- Guilmette C, Hébert R, Dupuis C, Wang C and Li Z. 2008. Metamorphic history and geodynamic significance of high-grade metabasites from the ophiolitic mélange beneath the Yarlung Zangbo suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 423–437
- Ionov DA, Griffin LW and O'Reilly SY. 1997. Volatile-bearing minerals and lithophile trace elements in the upper mantle. *Chemical Geology*, 141: 153–184
- Ionov DA, Bodinier JL, Mukasa SB and Zanetti A. 2002. Mechanisms and sources of mantle metasomatism: Major and trace element compositions of peridotite xenoliths from Spitsbergen in the context of numerical modelling. *Journal of Petrology*, 43: 2219–2259
- Jaques AL and Green DH. 1980. Anhydrous melting of peridotites at 0–15 kbar pressure and the genesis of tholeiitic basalts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 73: 287–310
- Johnson KT, Dick HBJ and Shimizu N. 1990. Melting in the oceanic upper mantle: An ion microprobe study of diopsides in abyssal peridotites. *Journal of Geophysical Research*, 95: 2661–2678
- Leake BE, Woolley AR, Arps SES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD, Hawthorne FC, Kato A, Kisch HJ, Krivovichev VG, Linthout K, Laird J, Mandarino JA, Maresch WV, Nickel EH, Rock NMS, Schumacher JC, Smith DC, Stephenson NCN, Ungaretti L, Whittaker EJW and Guo YZ. 1997. Nomenclature of amphiboles: Report of the Subcommittee on Amphiboles of the International Mineralogical Association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219–246
- Liu CZ, Wu FY, Wilde SA, Yu LJ and Li JL. 2010. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan plateau) formed by hydrous melt metasomatism. *Lithos*, 114: 413–422
- Malpas J, Zhou MF, Robinson PT and Reynolds PH. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolite, southern Tibet. In: Dilek Y and Robinson PT (eds.). *Ophiolites in Earth History*. Geological Society Special Publications, London, 218: 191–206
- McDonough WF and Sun SS. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223–254
- McKenzie D and Bickle MJ. 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology*, 29: 625–679
- Mercier JC. 1975. Olivines and pyroxenes. In: Wenk HR (ed.). *Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analyses*. New York: Academic Press, 407–430
- Miller C, Thöni M, Frank W, Schuster R, Melcher F, Meisel T and Zanetti A. 2003. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet. *Lithos*, 66: 155–172
- Moine BN, Grègoire M, O'Reilly SY, Sheppard SMF and Cottin JY. 2001. High field strength element fractionation in the upper mantle: Evidence from amphibole-rich composite mantle xenoliths from the Kerguelen Islands (Indian Ocean). *Journal of Petrology*, 42: 2145–2167
- Moseley D. 1984. Symplectic exsolution in olivine. *American Mineralogist*, 69: 139–153
- Nabelek PI, Lindsley DH and Bohlen SR. 1987. Experimental examination of two-pyroxene pyroxenes graphical thermometers using natural pyroxenes with application to metaigneous pyroxenes from the Adirondack Mountains. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 97: 66–71
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Duprè B, Wang XB, Cao YG, Zeng HX and Xiao XC. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294:414–417
- Niu Y and Hékinian R. 1997. Spreading rate dependence of the extent of mantle melting beneath ocean ridges. *Nature*, 385:326–329
- Niu Y. 2004. Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath mid-ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45:2423–2458
- Pan GT, Chen ZL and Li XH. 1997. *Geological Tectonic Evolution in the Eastern Tethys*. Beijing: Geological Publishing House, 1–191 (in Chinese)
- Paulick H, Bach W, Godard M, Dehoog JCM, Suhr G and Harvey J. 2006. Geochemistry of abyssal peridotites (Mid-Atlantic Ridge, 15° 20'N, ODP Leg 209): Implications for fluid/rock interaction in slow spreading environments. *Chemical Geology*, 234: 179–210
- Pearce JA, Lippard SJ and Roberts S. 1984. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites. In: Kokelaar BP and Howells MF (eds.). *Marginal Basin Geology*. Geological Society of London Special Publication. London: Blackwell Scientific Publications, 16:77–94
- Pearce JA, Barker PF, Edwards SJ, Parkinson IJ and Leat PT. 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 3653
- Sanjewa PAM, Makishima A and Nakamura E. 2010. Melt-peridotite reactions and fluid metasomatism in the upper mantle, revealed from the geochemistry of peridotite and gabbro from the Horoman peridotite massif, Japan. *Journal of Petrology*, 1–29
- Seyler M, Michael J. Toplis, Lorand JP, Luguet A and Cannat M. 2001. Clinopyroxene microtextures reveal incompletely extracted melts in abyssal peridotites. *Geology*, 29: 155–158
- Shi R, Alard O, Zhi X, O'Reilly SY, Pearson NJ, Griffin WL, Zhang M and Chen X. 2007. Multiple events in the Neo-Tethyan oceanic upper mantle: Evidence from Ru-Os-Ir alloys in the Luobusa and Dongqiao ophiolitic podiform chromitites, Tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 33–48
- Simon NSC, Neumann ER, Bonadiman C, Coltorti M, Delpech G, Goire MG and Widom E. 2008. Ultra-refractory domains in the oceanic mantle lithosphere sampled as mantle xenoliths at ocean islands. *Journal of Petrology*, 49: 1223–1251
- Sobolev AV and Batanova VG. 1995. Mantle lherzolites of the Troodos ophiolite complex, Cyprus: Clinopyroxene geochemistry. *Petrology*, 3: 440–448
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in Ocean Basins*. Geological Society Publication, 42:313–345
- Tapponnier P, Mercier JL, Proust F, Andrieux J, Armijo R, Bassoulet JP, Brunel M, Burg JP, Colchen M, Dupre B, Girardeau J, Marcoux J, Mascle G, Matte P, Nicolas A, Tingdong L, Xiao XC,

- Chang CF, Lin PY, Li GC, Wang NW, Chen GM, Han TL, Wang XB, Den WM, Zhen HX, Sheng HB, Cao YG, Zhou J and Q HR. 1981. The Tibetan side of the India-Eurasia collision. *Nature*, 294: 405 – 410
- Wang CS, Liu Z and Hébert R. 2000. The Yarlung Zangbo paleo-ophiolite, southern Tibet: Implications for the dynamic evolution of the Yarlung Zangbo suture zone. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18: 651 – 661
- Wang XB and Bao PS. 1987. *Tibet Ophiolite*. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 336 (in Chinese)
- Xia B, Li JF, Liu LW, Xu LF, He GS, Wang H, Zhang YQ and Yang ZQ. 2008. SHRIMP U-Pb dating for diabase in Sangsang ophiolite, Xizang, China: Geochronological constraint for development of eastern Tethys basin. *Geochimica*, 37: 399 – 403 (in Chinese with English abstract)
- Yamamoto S, Komiya T, Hirose K and Maruyama S. 2009. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In-situ ultrahigh-pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *Lithos*, 109: 314 – 322
- Yang JS, Dobrzhinetskaya L, Bai WJ, Fang QS, Robinson PT, Zhang JF and Green HW. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10): 875 – 878
- Zhou MF, Robinson PT, Malpas J and Li Z. 1996. Podiform chromitites in the Luobusha ophiolite (southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37: 3 – 21
- Zhou S, Mo XX, Mahony JJ, Zhang SQ, Guo TJ and Zhao ZD. 2002. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusha ophiolite, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 47: 143 – 146

#### 附中文参考文献

- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1 – 191
- 王希斌, 鲍佩声. 1987. 西藏蛇绿岩. 北京: 地质出版社, 1 – 336
- 夏斌, 李建峰, 刘立文, 徐力峰, 何观生, 王洪, 张玉泉, 杨之青. 2008. 西藏桑桑蛇绿岩辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对特提斯洋盆发育的年代学制约. *地球化学*. 37: 399 – 403