

# 西藏雅鲁藏布江缝合带西段南北亚带蛇绿岩的成因探讨\*

刘飞<sup>1</sup> 杨经绥<sup>1\*\*</sup> 连东洋<sup>2</sup> 赵慧<sup>3</sup> 张岚<sup>3</sup> 张利<sup>3</sup> 黄健<sup>3</sup>

LIU Fei<sup>1</sup>, YANG JingSui<sup>1\*\*</sup>, LIAN DongYang<sup>2</sup>, ZHAO Hui<sup>3</sup>, ZHANG Lan<sup>3</sup>, ZHANG Li<sup>3</sup> and HUANG Jian<sup>3</sup>

1. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心,中国地质科学院地质研究所,北京 100037

2. 中国地质大学地球科学学院,武汉 430074

3. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

1. CARMA, State Key Laboratory of Continental Tectonic and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Department of Geology and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2015-05-20 收稿, 2015-09-15 改回.

**Liu F, Yang JS, Lian DY, Zhao H, Zhang L and Huang J. 2015. Genesis and characteristics of the western part of the Yarlung Zangbo ophiolites, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12):3609–3628**

**Abstract** The tectonic setting and relationship between the Daba-Xiugugabu (Southern belt) and Dajiweng-Saga (Northern belt) ophiolitic sub-belts divided from Saga in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone are the subject of debate. This paper imposes some restrictions on the genesis and relationship between the southern and northern sub-belts based on the construction of geological sections across from the Gangdise island arc, Southern sub-belt, Zhada-Zhongba terrane, Northern sub-belt and Tethys Himalayan formation, comparative analyses of rocks association, geochronology and geochemistry of the mafic dikes and the mineral compositions of their wall rock harzburgites in two sub-belts. The mafic dikes from the Cuobuzha, Jianabeng and Baer ophiolites in the northern belt are characterized by high Si, Al contents and low Ti, K, P contents. They plot as members of the calc-alkaline basalt series and in-situ analyses of the zircon grains yielded ages of 125~128 Ma. However, the mafic dikes from the Dongbo, Purang and Xiugugabu ophiolites in the southern belt are characterized by high Mg, Ti contents and low Si, K contents, so belonging to a low potassium tholeiite series, and the zircon grains yielded ages 120~130 Ma. The Southern and Northern ophiolite sub-belts are interpreted as having formed in a similar fore-arc tectonic setting of the supra-subduction zone, because both mafic dikes share similar occurrences, the zircon dating gives overlapping ages (120~130 Ma), show N-MORB type REE patterns normalized by chondrite and noticeable Nb, Ta and Ti negative anomalies in N-MORB normalized spider diagrams, which indicate that they have a fore-arc basin or back arc basin affinity in a supra-subduction environment. The wall rocks harzburgites of mafic dikes have geochemical compositions of both fore-arc and abyssal peridotites. Combined with the absence of any island arc, but showing a southward tectonic emplacement direction in the southern belt, detrital zircon geochronology and Hf isotope detail Permian clastic rocks suggest that, during the Paleozoic period, the Zhada-Zhongba terrane was a part of the Qiangtang-Greater India-Tethyan Himalaya system. Those lines of evidence indicate that both ophiolitic sub-belts probably represent the same Neo-Tethys ocean lithosphere in the same tectonic setting.

**Key words** Ophiolite; Geochemistry; Geochronology; Yarlung Zangbo Suture Zone; Tibet

**摘要** 雅鲁藏布江蛇绿岩带自萨嘎以西分为达巴-休古嘎布(南亚带)和萨嘎-达机翁(北亚带)两个亚带,但两者的关系和构造环境还存在争论。本文在实测剖面的基础上,对比南北亚带蛇绿岩产出和岩石组成,以及对比基性岩脉和围岩方辉橄

\* 本文受中国地质调查局地质调查项目(12120115026801、12120115027201、201511022)、国际科技合作专项(2014DFR21270)和国家重点实验室自主课题(Z1301-a20)联合资助。

第一作者简介:刘飞,男,1982年生,博士,近年来主要开展西藏雅鲁藏布江缝合带西段蛇绿岩的研究工作,E-mail: lfhy112@126.com

\*\* 通讯作者:杨经绥,男,1950年生,研究员,博士生导师,岩石学专业,E-mail: yangjsui@163.com

橄榄岩的地球化学和年代学特征,探讨两个带的关系和构造环境。北带错不扎、加纳崩和巴尔基性岩脉具有高 Si、Al, 低 K、Ti、P 特征, 属钙碱性玄武质成分, 锆石 U-Pb 年龄为 125~128 Ma; 南亚带东波、普兰、休古嘎布基性岩具有高 Mg、Ti, 低 Si、K 特征, 为低钾拉斑玄武质成分, 锆石 U-Pb 年龄为 120~130 Ma。南北带基性岩具有类似产状和年代学, 球粒陨石标准化曲线与 N-MORB 一致; N-MORB 标准化蛛网图中显示 Nb、Ta、Ti 负异常, 指示洋内俯冲带弧前或弧后环境。此外, 两带基性岩围岩方辉橄榄岩中橄榄石、辉石、尖晶石具有类似的矿物成分特征, 地球化学成分兼有弧前和深海地幔橄榄岩的特点, 指示南北亚带蛇绿岩形成于俯冲带弧前环境。结合区域对比, 南亚带蛇绿岩不发育沟-弧-盆体系, 具有从北到南的构造侵位特征, 南北亚带之间的仲巴微地体具有特提斯喜马拉雅的亲缘性, 指示南北蛇绿岩亚带可能为相同大洋岩石圈的不同残余。

**关键词** 蛇绿岩; 地球化学; 地质年代学; 雅鲁藏布江缝合带; 西藏

**中图法分类号** P588.124; P588.125; P597.3

## 1 引言

蛇绿岩作为大洋地壳和上地幔的残余, 是重建板块构造和探讨深部地球动力学的重要载体(Bronniart, 1813; Dilek and Furnes, 2011; Pearce, 2014; Yang *et al.*, 2014; 吴福元等, 2014; 张旗, 2014)。虽然前人提出的多种蛇绿岩分类尚存在争议, 但从底部的地幔橄榄岩、深成杂岩、熔岩和岩脉到上部沉积物, 蛇绿岩所有端元均可用于限定过去大洋的构造环境和源区特征(Dilek and Furnes, 2014; Pearce, 2014)。

青藏高原南部的雅鲁藏布江缝合带(雅江带)普遍被认为是印度板块和欧亚板块的界线(Xu *et al.*, 2015; 吴福元等, 2014), 自萨嘎以西被分为达机翁-萨嘎蛇绿岩带(北亚带)和达巴-休古嘎布蛇绿岩带(南亚带)两个带(图 1)。对于南、北亚带的成因和构造关系, 前人的认识分歧很大, 主要有 3 种不同看法:(1) 南亚带蛇绿岩是由北亚带向南逆冲推覆于特提斯地台之上的残余(甘塞尔, 1983; Xu *et al.*, 2015; 刘飞等, 2015); (2) 南、北亚带分别代表两个不同时代的蛇绿岩, 北亚带形成于晚三叠世-早侏罗世, 南亚带为晚侏罗世-早白垩世(郭铁鹰等, 1991); (3) 北亚带蛇绿岩代表早三叠世拉张的新特提斯主洋盆, 南亚带蛇绿岩代表晚三叠世陆缘小洋盆(黄圭成等, 2006; 潘桂棠等, 1997)。总之, 争论的焦点在于南北亚带蛇绿岩的形成时代和构造环境, 以及它们隶属于两个不同的洋盆, 或者是一个洋盆的两块不同残余。该问题的解决, 关键是要查明南北亚带蛇绿岩的岩石组合、构造背景和形成时代。为此, 本文在实测剖面的基础上, 开展 YSZ 南北亚带蛇绿岩的岩石组成、形成时代和构造背景的对比, 结合北亚带巴尔角闪辉长岩的地球化学和锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨两个带的关系和构造背景。

## 2 区域地质背景

青藏高原是一个长约 2500 km, 宽约 1000 km 的巨型造山带, 经历了自晚古生代以来多陆块、多岛弧俯冲向北拼合到欧亚板块南缘的过程(Yin and Harrison, 2000; 许志琴等, 2006)。雅鲁藏布江缝合带是青藏高原上规模最大最年轻的缝合带, 代表新特提斯洋的残余(Dubois-Côté *et al.*, 2005;

Pearce and Deng, 1988; Tappognier *et al.*, 1981; 吴福元等, 2014), 主体由古生界混杂岩和晚侏罗-早白垩统深海相-次深海相碎屑岩、火山岩和蛇绿岩组成, 晚白垩统碎屑岩复理石沉积及第三系磨拉石分别不整合于其上(万晓樵等, 2007)。混杂岩中出露少量三叠系放射虫硅质岩(Matsuoka *et al.*, 2002)和晚泥盆统辉长岩(Dai *et al.*, 2011a)。缝合带北边为新特提斯洋俯冲形成的冈底斯洋-陆转换带, 包含冈底斯岩基、拉萨地体及南边的保山陆块等; 南边为印度-澳大利亚板块北缘洋-陆转换带形成的大陆增生楔(杨文采和于常青, 2014)。

根据空间分布, 雅江带分为三段, 即东段(芒康-曲水)、中段(昂仁-仁布)和西段(萨嘎至中印边境)(图 1a)。中、东段蛇绿岩带的北部与日喀则弧前盆地和冈底斯岩浆弧构造接触或沉积覆盖, 南部为特提斯喜马拉雅构造单元(Girardeau *et al.*, 1985; Tappognier *et al.*, 1981; Yin and Harrison, 2000)。日喀则弧前盆地在拉萨以东由于冈底斯岩浆弧逆冲到雅江带之上而消失, 以西延伸到仁布以西(Yin, 2006), 主要包括白垩系至古近系浊积岩复理石地层, 复理石是晚白垩世新特提斯洋向欧亚板块俯冲的产物, 中间包含大量冈底斯岩浆弧物质(Dürr, 1996; Wang *et al.*, 2012)。完整层序的彭罗型蛇绿岩(Dilek and Furnes, 2011)主要分布在雅江带中段日喀则地区的吉定、昂仁、大竹卡、冲堆、德吉、白朗等(Chen and Xia, 2008; Nicolas *et al.*, 1981; Pearce and Deng, 1988; Tappognier *et al.*, 1981; 牛晓露等, 2006; 周云生等, 1982), 从上到下包括放射虫硅质岩等海相沉积物、枕状熔岩、席状岩墙群、堆晶岩、构造地幔橄榄岩, 洋壳厚度小于 3 km(Girardeau *et al.*, 1985; Girardeau and Mercier, 1988; Nicolas *et al.*, 1981; Pearce and Deng, 1988; Xia *et al.*, 2003)。

特提斯喜马拉雅构造带主体为一套古生界以来的海相沉积-火山岩序列, 从二叠系至白垩系连续沉积, 自北到南包括大陆边缘浊积岩、碳酸盐质复理石和碳酸盐地台等(Burg and Chen, 1984)。靠近雅江带的部分, 以定日-岗巴断裂为界分为南带(北喜马拉雅带)和北带(拉轨岗日带), 南带由古生界浅海台地相碳酸盐岩、碎屑岩系和中新生界浅海相碳酸盐岩、碎屑岩系组成; 北带主要由前寒武系和晚古生界和中新生界地层组成: 前寒武系为拉轨岗日群变质岩系、奥陶系大理岩、片岩; 少量石炭系大理岩、结晶灰岩和板

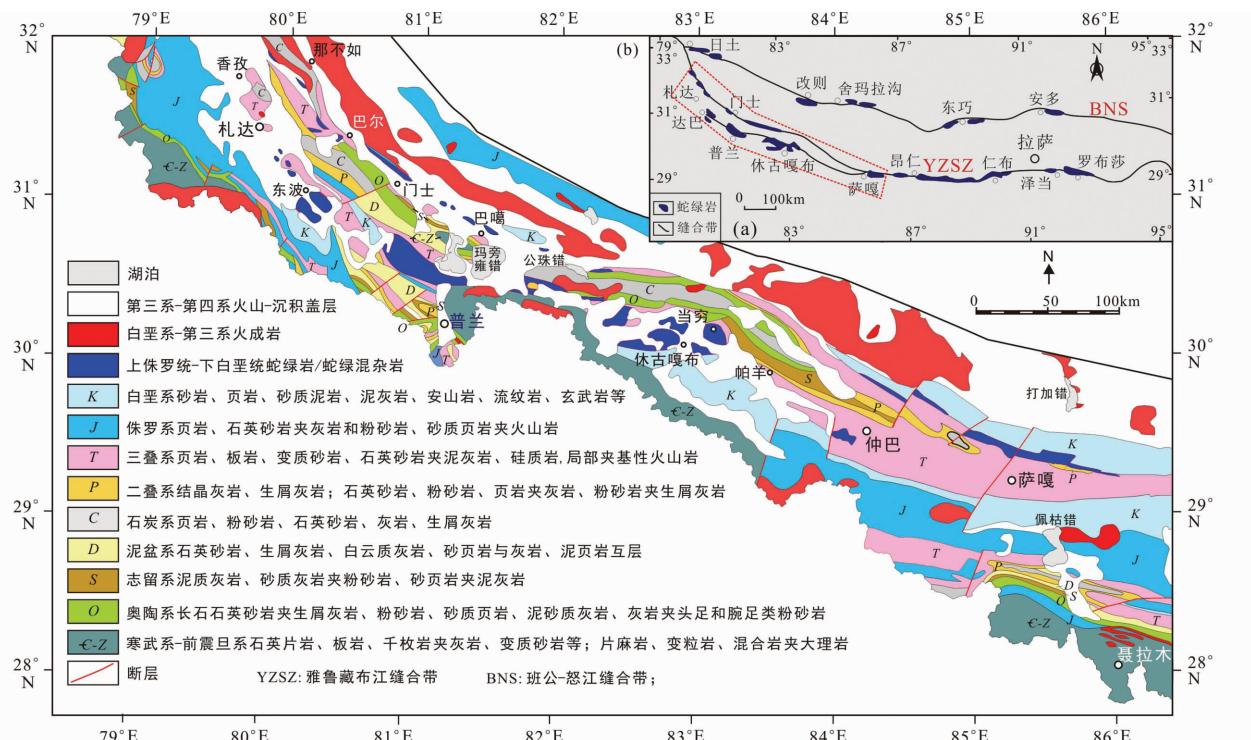


图1 西藏南部雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)和班公-怒江缝合带(BNS)分布简图(a)和雅鲁藏布江缝合带西段区域地质简图(b,据宜昌地质矿产研究所,2006<sup>①</sup>修改)

Fig. 1 Distribution of the ophiolites along the YarlungZangbo Suture zone (YZSZ) and Bangong-Nujiang Suture zone (BNSZ) in Tibet (a) and simplified geological map of the western part of the YZSZ, Tibet (b)

岩;二叠系砂质板岩、含砾板岩、变质石英砂岩,发育大量火山岩。三叠系地层以羊八井-琼堆断裂(或江孜-浪卡子)为界,出现东西分异,西段为构造混杂堆积的修康群,东段上三叠统郎杰学群为一套绿片岩相浅变质岩系,其古水流和物源来自YZSZ北侧造山带(李祥辉等,2004;徐文礼等,2011)。侏罗系至古近系海相地层普遍发生低级变质作用,并发育中基性火山岩(王根厚等,2000;朱弟成等,2004)。

雅江带西段蛇绿岩带呈 NWW 走向,自萨嘎以西分为两支,即达机翁-萨嘎蛇绿岩带(北亚带)和达巴-休古嘎布蛇绿岩带(南亚带),中间被仲巴微地体分隔(图1、图2)。以下将通过实测剖面,介绍仲巴微地体的地层特征,同时开展其与特提斯喜马拉雅构造单元的地层对比,为限定南北亚带蛇绿岩的关系提供区域证据。

### 3 雅江带西段地层对比

探讨雅江带西段南、北亚带蛇绿岩的关系,离不开夹持于两者之间的仲巴微地体的物质组成和归属,即探讨其与南侧特提斯喜马拉雅地层的关系。

仲巴微地体是指东起于萨嘎县查藏一带,向西到中印边界,受南侧札达-仲巴-查藏断裂和北侧穷果-门士断裂控制,东西长近 1000km,南北宽 20~50km 不等(李祥辉等,2014),为一套缺少前寒武系大陆基底,以震旦系至白垩系的海相沉积岩为主的地质体。目前在仲巴微地体中发现最老的地层为震旦系-寒武系齐吾贡巴群,出露在拉昂错附近(图1),由一套钙质片岩、石英片岩等中浅变质岩组成,与特提斯喜马拉雅的肉切村群和科加群可对比(郭铁鹰等,1991)。

我们实测了 NE-SW 走向的东波-曲龙-门士剖面(底图据河北省地质调查院,2005<sup>②</sup>)(图2b、图3),该剖面切穿了仲巴微地体早古生界至中生界的主要地层,岩性包括志留系德泥塘嘎群生屑灰岩夹泥质粉砂岩,两者互层产出,产状  $40^{\circ} \angle 45^{\circ}$ ,与聂拉木一带的石器坡群碳酸盐岩与陆源碎屑混积岩可以对比(郭铁鹰等,1991)。泥盆系为变质石英砂岩、变质长石石英砂岩夹灰黑色亮晶灰岩,砂岩中可见明显的平行层理和交错层理,“A型”褶皱发育,褶皱枢纽面产状  $35^{\circ} \angle 45^{\circ}$ ,岩性与特提斯喜马拉雅同期地层(陆源碎屑岩为主,在上部夹生屑灰岩)类似。

仲巴微地体的石炭系-二叠系为滨浅海陆棚相环境的混积岩,未显示有冰海杂砾岩组合特征,与特提斯喜马拉雅的

① 宜昌地质矿产研究所. 2006. 西藏雅鲁藏布江西段地质矿产图(1:100万)

② 河北省地质调查院. 2005. 中华人民共和国地质图-札达县幅(1:25万, H44C001002)

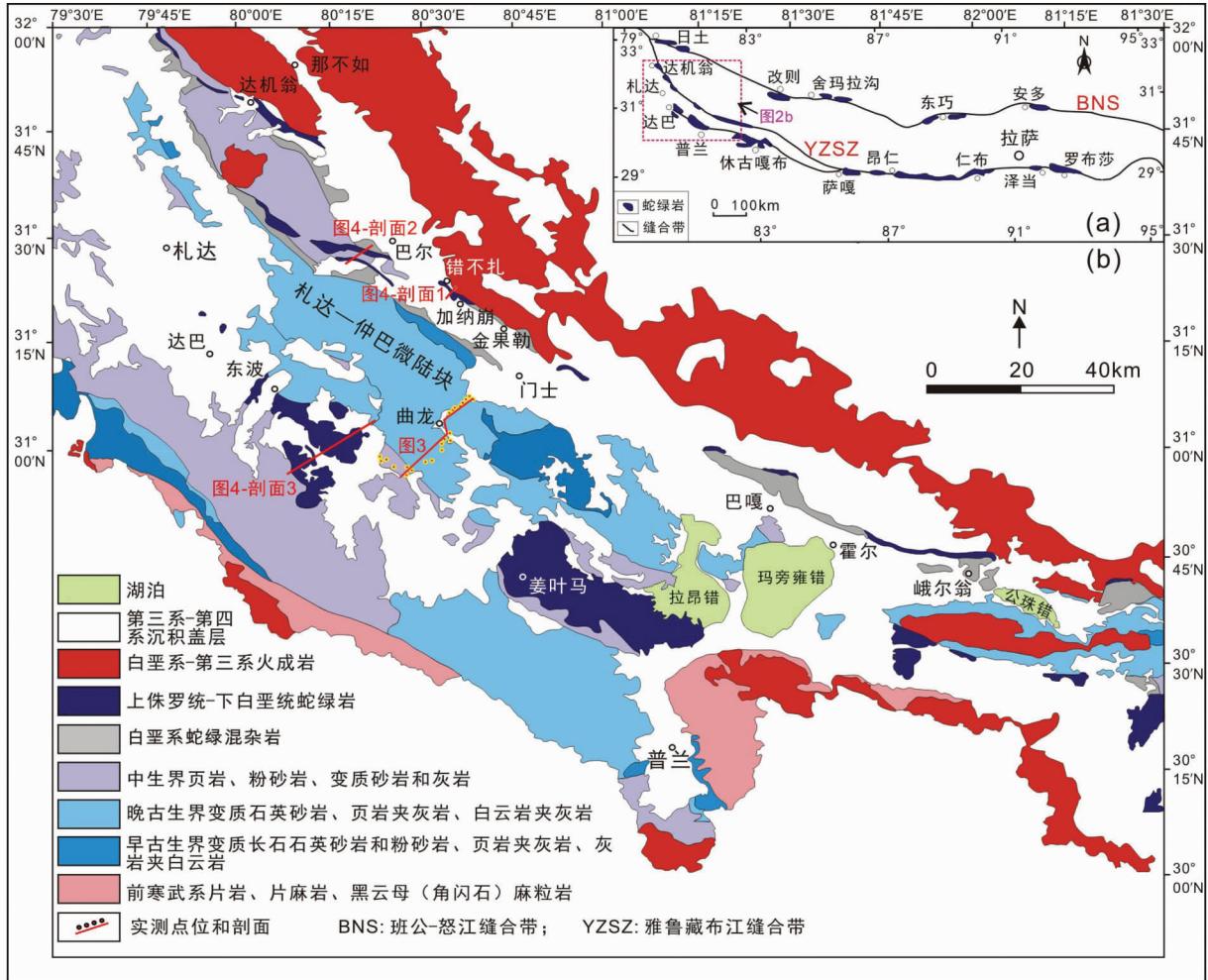


图2 雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)和班公-怒江缝合带(BNS)上主要蛇绿岩分布图(a)和雅鲁藏布江缝合带西段地质简图(b)

Fig. 2 Distribution of the ophiolites along the YZSZ and BNSZ in Tibet (a) and simplified geological map of the western part of the YZSZ, Tibet (b)

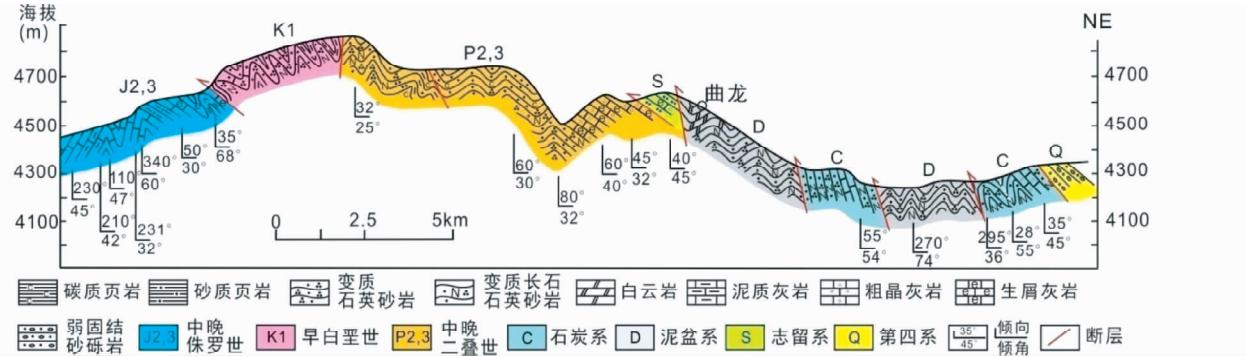


图3 东波-曲龙-门士实测地质剖面图

Fig. 3 The Dongbo-Qulong-Menshi geological section across the Zhongba microterrane

冰海杂砾岩有一定差别(李祥辉等, 2014)。石炭系包括变质长石石英砂岩、变质石英砂岩夹粉砂岩和板岩, 其中变质长石石英砂岩, 微细粒结构, 白云母定向排列明显, 沉积层理明显, 平行层理和交错层理共生, 产状 $10^{\circ} \angle 30^{\circ}$ , 微小褶曲发

育。粉砂岩变形较弱, 其中泥质含量较高的薄层理揉皱变形强烈, 宽约20cm的糜棱岩带的变形指示顺时针变形。二叠系包括含云母变质石英砂岩、变质长石石英砂岩、千枚岩化石英片岩夹碳质板岩、生屑灰岩、亮晶灰岩、细晶白云岩等,

可见砂岩直接覆盖在生屑灰岩之上,两者过渡的部位泥质砂岩与灰岩互层产出。其中砂岩呈红褐色,中粗粒结构,块状构造, $80^\circ \angle 32^\circ$ ;灰岩呈块状构造,粒径 $1\sim1.2\text{mm}$ 为主, $60^\circ \angle 35^\circ$ ,灰岩中可见明显的凹坑纹,表面网络状裂纹发育,其中含有大量斑点状黄色泥屑和生物残屑;接触带上可见砂岩和灰岩的混合,内部硅质成分较多,宽约50m。张振利等(2007)报道了与中上二叠统曲嘎组整合接触的才巴弄组玄武岩具有大陆裂谷火山岩特征,形成于活动陆棚裂陷盆地环境。剖面中未见三叠系地层,但根据李祥辉等(2014)认为仲巴微地体的三叠系穷果群自下往上的屯具沟组、屯具日组、尼多曲组与特提斯喜马拉雅的同期沉积岩性(如土隆群)差别较大,沉积环境也不同。

仲巴微地体侏罗系和白垩系碳酸盐岩和陆源碎屑岩地层与特提斯喜马拉雅的地层可对比(河北省地质调查院,2005)。侏罗系地层出露在剖面南端,主要岩性为深灰色和灰黑色泥晶灰岩、亮晶灰岩夹砂岩、粉砂岩、泥页岩。灰岩沉积层理明显,呈厚层状,表面凹坑发育,宽缓褶皱发育,可见 $210^\circ \angle 42^\circ$ 和 $105^\circ \angle 110^\circ \angle 40^\circ \sim 52^\circ$ 不同产状特征,菊石化石发育。局部灰岩夹页岩互层产出,层厚在8~20cm之间,内部发育强烈的褶皱,倒转同斜褶皱的枢纽端产状 $30^\circ \angle 68^\circ$ 。白垩系粉砂岩、页岩,千枚岩化变形强烈,片理面产状 $55^\circ \sim 60^\circ \angle 46^\circ$ ,层理厚度细小(图3)。总之,仲巴微地体拉的地层与特提斯喜马拉雅构造单元的地层整体可对比,其中石炭系至二叠系地层略有不同,三叠系地层岩性和沉积环境存在较大差异,特提斯喜马拉雅地层自二叠纪至白垩纪均出露大量拉张环境的火山岩(朱弟成等,2004),而目前仲巴微地体中有报道二叠系大陆裂陷型火山岩(张振利等,2007),三叠系至白垩系类似火山岩少见。

#### 4 雅江带西段蛇绿岩产出对比

北亚带蛇绿岩呈北西-北西西走向的不规则条带状断续分布,受到中新生代以来多期构造事件的影响,岩石肢解破碎严重,多以蛇绿混杂岩的形式产出,经历了较强的变质变形(图2a)。北亚带新鲜的地幔橄榄岩主要出露在达机翁、卡站、巴尔、错不扎、峨尔翁等(图2b)。岩石组合主要包括地幔橄榄岩、堆晶辉长岩和最上部的玄武质熔岩或碎屑岩、凝灰岩、硅质岩和硅质灰岩的火山-沉积岩盖层。地幔橄榄岩以方辉橄榄岩为主,含少量含单斜方辉橄榄岩和纯橄岩透镜体,二辉橄榄岩不发育。堆晶辉长岩主要分布于峨尔翁和达机翁蛇绿混杂岩中,堆晶结构明显。地幔橄榄岩普遍弱蛇纹石化,其上部被含翠绿色斑点的橙红色石英菱镁岩覆盖,其内部可见少量纯橄岩和辉长岩、辉绿岩呈长透镜状或脉状产出,走向北西,宽 $1\sim5\text{m}$ 不等,加纳崩辉长岩和错不扎辉绿岩的锆石U-Pb年龄分别为 $127.0 \pm 0.5\text{ Ma}$ 和 $125.8 \pm 2.6\text{ Ma}$ (刘飞等,2015)。目前北亚带的达机翁、巴尔和错不扎蛇绿岩中发现块状和浸染状铬铁矿,铬铁矿及其围岩方辉橄榄岩

和纯橄岩普遍发生弱磁铁矿化和蛇纹石化,铬铁矿宽 $2\sim4\text{m}$ ,长 $5\sim10\text{m}$ 不等,走向北西。

北亚带整体向北逆冲推覆到冈底斯岩基之上,然而随着露头的变化,蛇绿岩与冈底斯岩基之间夹持的岩石类型不同,主要分为两类:(1)第三系的复理石沉积岩,岩性主要为泥页岩夹薄层砂岩、岩屑长石石英砂岩、砾岩夹砂岩,以达机翁为代表,可见蛇纹石化地幔橄榄岩向北直接逆冲推覆到复理石地层之上;(2)晚白垩统的中性火山碎屑岩夹细粒砂质泥页岩和砂岩,火山碎屑岩锆石U-Pb年龄为 $83.5 \pm 0.3\text{ Ma} \sim 94.2 \pm 0.4\text{ Ma}$ (作者,待发表),以错不扎-金果勒为代表(图2b)。

从错不扎实测剖面(图4a)可以看出,中粗粒火山碎屑岩、火山凝灰岩夹砂质页岩组成的火山-沉积岩位于红色硅质岩和冈底斯岩基之间,近东西走向,宽 $200\sim400\text{m}$ 不等,局部被含有主要为闪长岩和辉长岩砾石的火山角砾岩所覆盖。冈底斯岩基南缘岩性为闪长岩和花岗闪长岩,靠近火山-沉积岩的接触部分,闪长岩中角闪石和黑云母等矿物定向排列明显,宽 $200\sim300\text{m}$ ,内部可见多条花岗细晶岩(宽 $2\sim3\text{m}$ )、辉绿岩和辉石脉(宽 $60\sim100\text{m}$ 不等),北西走向( $320^\circ \sim 340^\circ$ );而远离接触带矿物弱变形或不变形。这些火山-沉积岩地层与达金海相碎屑岩(闫臻等,2006)和冈仁波齐砾岩一起组成日喀则弧前盆地沉积单元,并与南侧的北亚带蛇绿混杂岩和北侧的冈底斯岛弧组成沟-弧-盆体系。

火山-沉积岩南侧为硅质岩,沉积层理发育,褶皱变形明显,宽 $100\sim150\text{m}$ ,两者构造接触;硅质岩上部为灰白色硅质灰岩,下部为红褐色或灰绿色泥页岩和灰绿色火山碎屑岩夹碱性玄武质熔岩。其中碱性玄武岩,走向 $310^\circ$ ,宽 $25\sim30\text{m}$ ,南缘被第四系沉积物覆盖,整体较新鲜,风化面棕褐色,新鲜面灰绿色,主体为含自身角砾的玄武质碎屑岩和玄武质熔岩,斑状结构,斑晶主要为单斜辉石,与南亚带东波碱性玄武岩的产出类似(刘飞等,2013a),为残余海山的岩石组成。

从巴尔兵站向南,可见北亚带巴尔蛇绿岩与仲巴微地体地层的接触关系(图4b)。巴尔蛇绿岩被分为南北两支,两带宽 $0.15\sim1.0\text{km}$ 不等,均由地幔橄榄岩和基性岩脉组成,未见典型的堆晶岩和枕状熔岩。北支蛇绿岩中地幔橄榄岩普遍蛇纹石化和强烈片理化,局部可见较新鲜的残留块体,宽 $150\sim200\text{m}$ ,岩性为方辉橄榄岩,其内部发育辉长岩脉(图5a)。地幔橄榄岩南、北边缘被含翠绿色斑点的棕黄色石英菱镁岩覆盖(图5b),后者可见定向明显的石英脉或透镜体,指示南西-北东顺时针旋转,局部包含蛇纹石化方辉橄榄岩岩块,粒径 $10\sim200\text{cm}$ 不等,磨圆度较好。其北侧围岩为灰黑色三叠系碳质页岩,变形和破碎强烈,南侧围岩为早白垩世( $100.8 \pm 1.9\text{ Ma}$ ,作者,待发表)火山碎屑凝灰岩,灰绿色,沉积层理发育,产状 $50^\circ \angle 55^\circ$ ,向南产状趋于平缓,并逐渐南倾,产状变为 $175^\circ \sim 215^\circ \angle 34^\circ \sim 47^\circ$ 。南支蛇绿岩由地幔橄榄岩和基性岩脉组成,分别与南侧的早白垩统火山凝灰岩和北侧三叠系板岩和变质砂岩(图5c, d)构造接触,接触部位均发生强烈的蛇纹石化和片理化,地幔橄榄岩为方辉橄榄

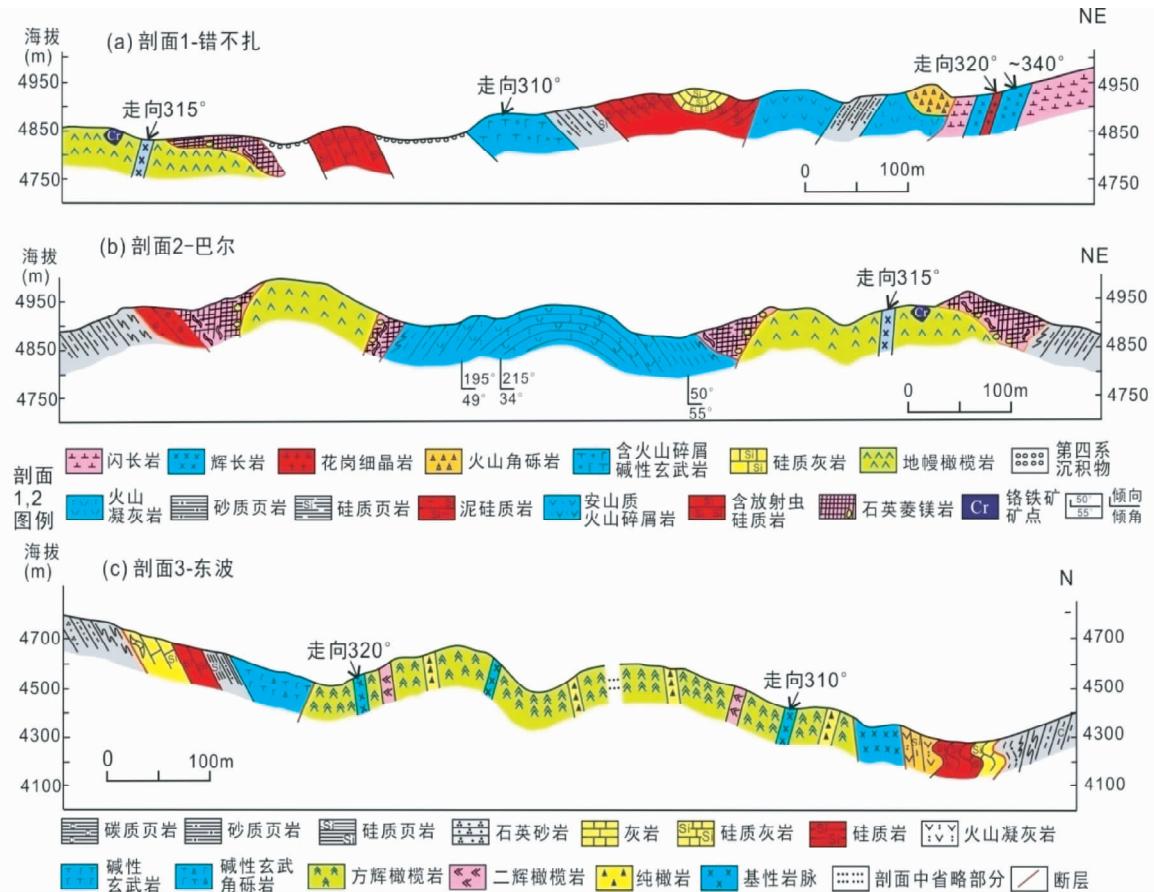


图4 雅鲁藏布江缝合带西段实测地质剖面图

(a) 错不扎剖面: 冈底斯岩基至北亚带蛇绿岩; (b) 巴尔剖面: 北亚带蛇绿岩-仲巴微地体; (c) 东波剖面: 南亚带蛇绿岩-特提斯喜马拉雅地层区

Fig. 4 The geological sections across from the Gangdese island arc, northern ophiolitic belt, southern ophiolitic belt and Tethyan Himalayan Formation

岩,其南北两侧普遍被含翠绿色斑点的棕黄色石英菱镁岩覆盖,内部被NW走向的长透镜状辉绿岩脉侵入,这些特征与北支的产出一致(图4b)。

南亚带蛇绿岩沿达巴-普兰-休古嘎布-仲巴一线展布,NWW延长约400km,宽10~35km,出露东波(400km<sup>2</sup>)、普兰(650km<sup>2</sup>)、休古嘎布(600km<sup>2</sup>)和当穷(260km<sup>2</sup>)等多个大型的蛇绿岩(Bezard et al., 2011; Li et al., 2015; 徐向珍等, 2011; 杨经绥等, 2011)(图1b)。该蛇绿岩带由三部分组成,即地幔橄榄岩、基性岩脉(Bezard et al., 2011; Chan et al., 2015; 黄圭成等, 2006; 刘飞等, 2013b; 徐德明等, 2006)和上覆火山-沉积盖层,缺失或不发育典型的堆晶岩和枕状熔岩等洋壳端元(Liu et al., 2015)。在普兰和东波发现多个块状和浸染状铬铁矿点,呈透镜状分布于方辉橄榄岩中,局部发育纯橄岩薄壳。矿体与围岩接触关系截然,矿体一般长2~5m,厚0.5~3m不等,矿体延伸方向与蛇绿岩构造线方向(北西)一致(熊发辉等, 2013)。

从东波蛇绿岩剖面可知(图4c),地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩和含单斜方辉橄榄岩组成,含少量二辉橄榄岩和纯橄岩;后两者主要呈透镜状或脉状分布于方辉橄榄岩中,接触关系通常截然,有些为渐变,走向以北西为主。基性岩脉包括辉石岩、辉绿岩、辉长岩和橄榄辉长岩等,以脉状或透镜状侵入到地幔橄榄岩中,沿蛇绿岩的主构造线NW方向分布,宽数十厘米至几米不等,数厘米宽也可见(刘飞等, 2013b; 熊发辉等, 2011)。基性岩的锆石U-Pb年龄为128~130Ma(Chan et al., 2015; Zhang et al., 2005; 熊发辉等, 2011)。火山-沉积盖层的岩石组成在岩体南、北缘略有不同,在岩体南缘,从上到下主要由鲕粒灰岩、硅质灰岩、红色硅质岩、粉砂质/硅质泥页岩、玄武岩和玄武质火山碎屑岩组成,玄武岩普遍具有OIB和少量EMORB特征,硅质岩的放射虫时代为晚侏罗世-早白垩世,其物源具有活动大陆边缘和海山的痕迹(Liu et al., 2015; 刘飞等, 2013a)。在岩体北缘,角闪辉长岩厚100~120m不等,与下部的蛇纹石化方辉橄榄岩构造接触,其上部被灰绿色微细粒火山凝灰岩夹薄层灰绿色硅质岩和粉砂岩覆盖,凝灰岩厚约20~25m,硅质岩

从东波蛇绿岩剖面可知(图4c),地幔橄榄岩主要由方

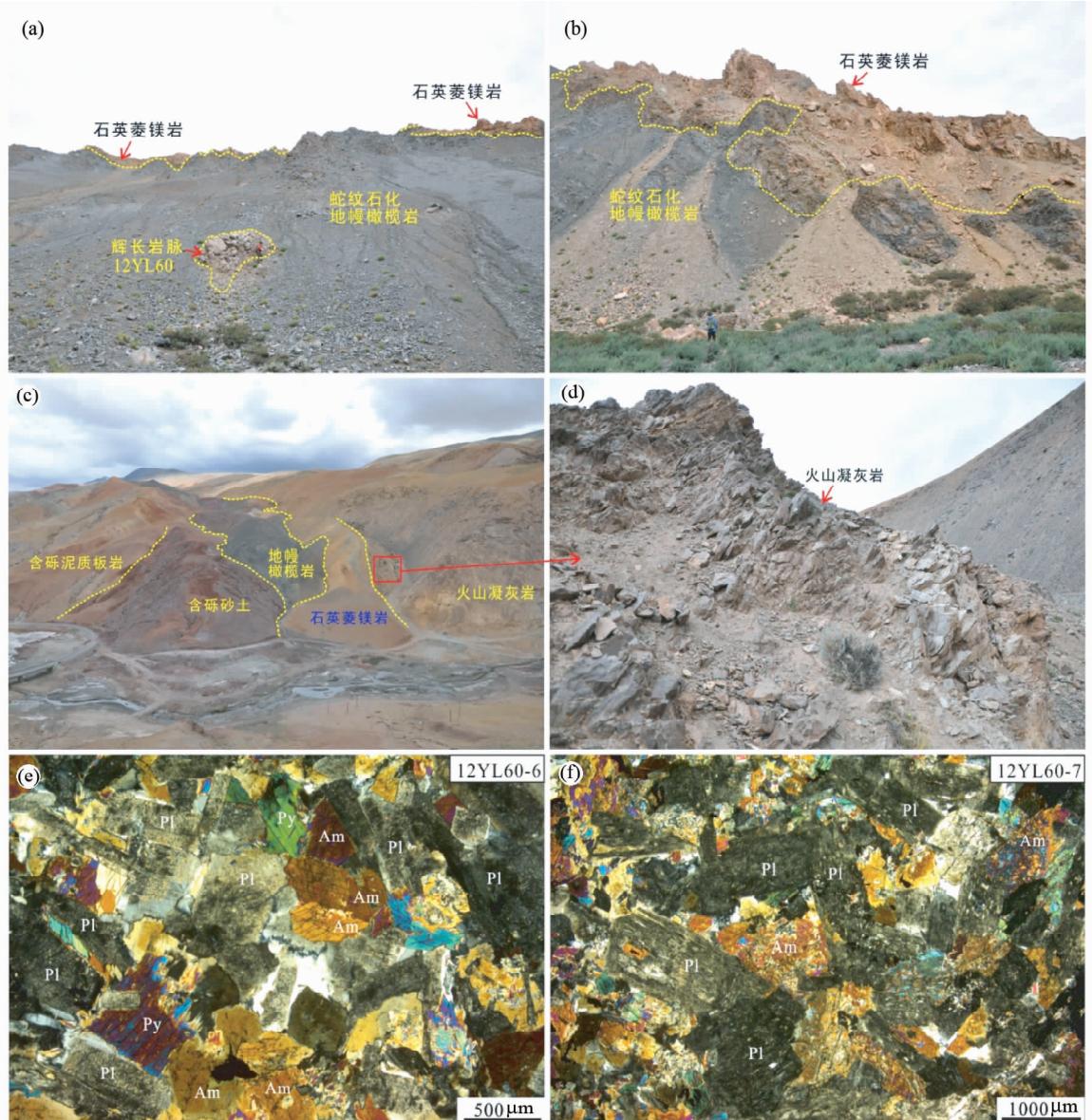


图5 北亚带巴尔蛇绿岩野外特征和显微镜下照片

(a,b) 巴尔蛇绿岩北支(图2b);(c,d)巴尔蛇绿岩南支;(e,f)图a中角闪辉长岩显微镜下正交光照片. Am-角闪石;Cpx-单斜辉石;Pl-斜长石  
Fig. 5 Field pictures of the Baer ophiolite and Micropictures of gabbro in the northern belt of the western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

和粉砂岩薄层呈长透镜断续产出,层厚5~15cm不等,最厚达2m;凝灰岩上部为红褐色硅质岩夹硅质泥岩薄层、灰白色硅质灰岩,彼此整合接触,沉积层理发育,揉皱变形强烈。该火山-沉积单元与北部的三叠系碳质页岩、砂岩以及南侧的白垩系长石石英砂岩构造接触(图4c),不发育类似冈底斯岩基的岛弧和类似日喀则弧前盆地大规模沉积岩,沟-弧-盆体系不发育。

总之,南北亚带蛇绿岩产出的相同点有:(1)地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩组成,含少量纯橄岩和铬铁矿透镜体;(2)NW走向的基性岩脉普遍侵入方辉橄榄岩中;(3)地幔橄榄岩上部普遍可见海相火山沉积盖层,成分包括硅质灰岩、硅

质岩、中酸性凝灰岩、泥页岩、OIB型玄武岩和火山碎屑岩等;(4)未见或不发育典型的枕状熔岩、席状岩墙群;(5)呈构造岩片与周围地层接触;(6)接触部位可见石英菱镁岩化。两带不同点:(1)南亚带出露多个大型的浑圆状地幔橄榄岩块,而北亚带地幔橄榄岩呈断续狭窄条带状产出;(2)南亚带地幔橄榄岩含有少量透镜状的二辉橄榄岩,尤其普兰蛇绿岩东部和公珠错蛇绿岩,而北亚带不发育;(3)北亚带峨尔翁蛇绿混杂岩中出露大于1km宽的堆晶辉长岩,而南亚带不发育;(4)南亚带不发育沟-弧-盆体系,而北亚带沟-弧-盆体系发育。

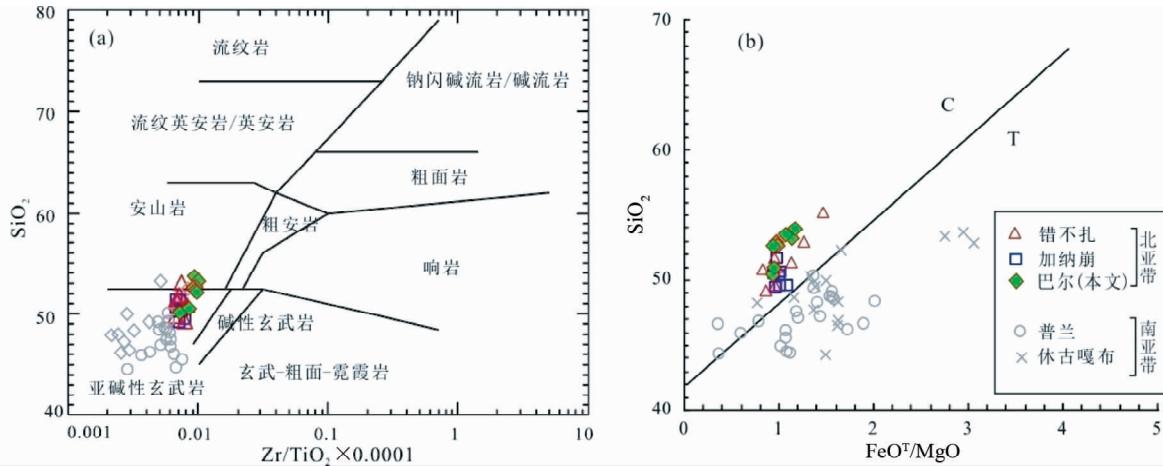


图6 巴尔蛇绿岩中角闪辉长岩的  $\text{SiO}_2$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  (a, 据 Winchester and Floyd, 1977) 和  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  (b, 据 Miyashiro, 1974) 分类图解

C-钙碱性系列; T-拉斑玄武岩系列。数据来源:普兰(Liu et al., 2010; Miller et al., 2003; 刘飞等, 2013b; 刘钊等, 2011); 休古嘎布(Bezard et al., 2011); 错不扎和加纳崩(刘飞等, 2015)

Fig. 6 The  $\text{SiO}_2$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  (a, after Winchester and Floyd, 1977) and  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  (b, after Miyashiro, 1974) diagrams for amphibole gabbros in the Baer ophiolite, Tibet

## 5 基性岩脉地球化学和年代学对比

### 5.1 北亚带巴尔角闪辉长岩

巴尔角闪辉长岩呈脉状侵入于蛇纹石化方辉橄榄岩中, 宽4~6m, 长约10~15m, 走向310°左右(图5a), 采样位置N31°27'53", E80°22'11", 4748m。中粗粒辉长辉绿结构, 块状构造, 主要由斜长石(50%~55%)、角闪石(45%~50%)和少量辉石组成, 斜长石普遍高岭土化和少量绿帘石化, 角闪石呈半自形粒状和短柱状, 具有浅黄和浅绿两种多色性, 辉石发生绿泥石化和少量磁铁矿化(图5e, f)。

#### 5.1.1 北亚带巴尔角闪辉长岩地球化学

主微量元素测试在国土资源部国家地质实验测试中心完成。主元素用X射线荧光光谱仪(XRF-PW4400)测试, FeO采样重铬酸钾标准溶液滴定法测量, 分析精度小于10%; 稀土微量元素采用等离子质谱仪(ICPMS-PE300D)测试, 含量大于 $10 \times 10^{-6}$ 的元素的测试精度为5%, 而小于 $10 \times 10^{-6}$ 的元素的分析精度为10%。测试结果见表1。

巴尔角闪辉长岩  $\text{SiO}_2$  含量为50.40%~53.87%, 平均52.47%;  $\text{TiO}_2$  为0.69%~0.85%, 平均0.77%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为15.90%~16.82%, 平均16.50%;  $\text{MgO}$  平均6.57%;  $\text{Na}_2\text{O}$  平均4.32%;  $\text{K}_2\text{O}$  平均0.48%; 总体具有高Si、Al、Na、Mg, 低Ti、K、P、Fe的特征。在  $\text{SiO}_2$ - $\text{Zr}/\text{TiO}_2$  岩石分类图解中, 研究区角闪辉长岩主体位于亚碱性玄武岩区域(图6a), 在  $\text{SiO}_2$ - $\text{FeO}^T/\text{MgO}$  图解中落入钙碱性玄武岩系列, 与南亚带错不扎和加纳崩基性岩脉类似, 而与北亚带普兰、休古嘎布基性岩不同, 后者主体属于拉斑玄武岩范围(图6b)。

角闪辉长岩的稀土总量分别为 $28.71 \times 10^{-6}$ ~ $41.35 \times 10^{-6}$ , 平均 $35.62 \times 10^{-6}$ , 低于N-MORB的 $39.11 \times 10^{-6}$ 值(Sun and McDonough, 1989), 轻重稀土分馏较弱,  $(\text{La/Yb})_N$ 平均值为0.80;  $\delta\text{Eu}$ 平均值为0.98(表1), 指示没有斜长石的分离结晶作用。球粒陨石标准化曲线均为LREE略亏损的近水平模式, 与典型N-MORB成分一致(图7a), N-MORB标准化微量元素蛛网图中, Nb、Ta强烈负异常, Ti弱负异常, Rb、Ba、Sr等LILE强烈富集, 与岛弧玄武岩(IAT)和南亚带普兰和休古嘎布基性岩脉的分布样式相似(图7b)。在N-MORB标准化不活泼元素蛛网图中显示Nb和Ti的负异常, 以及微弱Hf负异常, 与北亚带错不扎辉绿岩(刘飞等, 2015)和俯冲板片近端玄武岩(Pearce, 2014)类似, 而不同于Ti和Hf无异常的加纳崩辉长岩和俯冲板片远端玄武岩(Pearce, 2014)(图7c)。俯冲板片近端和远端是指靠近俯冲带海沟的距离, 以及受其影响的程度, 近端是指靠近俯冲带海沟且明显受到其影响; 远端则远离俯冲带, 受其影响较小, 两者均可形成于弧前或弧后盆地。南亚带的普兰和休古嘎布基性岩具有明显的Nb负异常, 以及Ti和Hf弱负至正异常的复杂特征, 显示俯冲板片近端至俯冲板片远端玄武岩的过渡特征(图7d)。

#### 5.1.2 北亚带巴尔角闪辉长岩年代学

锆石分选在廊坊市宇恒矿岩技术服务有限公司完成。锆石U-Pb测年在中国地质科学院北京离子探针中心SHRIMP II型离子探针仪上完成。标准锆石TEM校正元素间的分馏, 标准锆石SL13标定样品的U、Th、Pb含量, 详细实验原理和流程见(宋彪等, 2002)。测试结果见表2。

巴尔角闪辉长岩的锆石U-Pb协和年龄图和加权年龄图

表 1 北亚带巴尔蛇绿岩中角闪辉长岩主量元素( wt% )和微量元素(  $\times 10^{-6}$  )含量Table 1 Major ( wt% ) and trace elements (  $\times 10^{-6}$  ) contents for amphibole gabbro from the Baer ophiolite , Tibet

样品号	12YL60-1	12YL60-6	12YL60-7	12YL60-9	12YL60-10	12YL60-11	12YL60-12	12YL60-18
SiO <sub>2</sub>	50.81	52.60	52.57	50.40	53.46	53.19	52.86	53.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.33	16.79	16.82	15.90	16.76	16.69	15.93	16.74
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.19	1.20	0.75	1.12	1.36	0.94	1.22	1.27
FeO	5.96	5.41	5.78	5.93	5.57	6.13	5.95	5.91
CaO	10.28	8.96	8.62	11.39	7.77	8.33	8.69	7.53
MgO	7.52	6.80	6.92	7.53	6.47	6.24	7.39	6.11
Na <sub>2</sub> O	3.86	4.39	4.33	3.42	4.90	4.37	4.30	4.97
K <sub>2</sub> O	0.07	0.38	0.67	0.27	0.48	0.69	0.66	0.64
TiO <sub>2</sub>	0.78	0.72	0.69	0.75	0.80	0.83	0.76	0.85
MnO	0.13	0.12	0.12	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.08	0.07	0.07	0.09	0.09	0.08	0.10
LOI	2.76	2.45	2.17	2.52	2.26	2.00	2.05	1.85
Total	99.76	99.90	99.51	99.43	100.05	99.63	100.02	99.97
Mg <sup>#</sup>	69.43	69.35	68.30	69.56	67.65	64.69	69.09	65.05
Cr	164	177	172	168	176	143	183	131
Co	30.6	27.7	28.5	31.6	27.4	27.2	30.9	28.3
Ni	69.6	67.9	65.5	76.9	68.4	58.6	72.5	52.4
V	200	164	167	204	173	172	196	164
Sc	32.0	28.1	29.3	32.4	28.9	27.2	32.6	28.0
Cu	19.1	38.6	54.8	13.0	33.5	38.0	57.7	94.8
Zn	50.0	48.1	48.4	48.5	49.5	49.7	52.8	47.6
Ga	14.80	14.40	14.50	13.00	14.00	14.60	14.20	15.10
La	2.41	2.70	2.42	2.11	2.83	2.90	2.48	3.02
Ce	6.94	7.61	6.90	5.87	8.11	8.74	7.16	8.67
Pr	1.31	1.38	1.29	1.11	1.52	1.66	1.38	1.65
Nd	6.38	6.63	6.46	5.42	7.43	7.96	6.67	8.13
Sm	2.20	2.30	2.21	2.01	2.55	2.81	2.33	2.77
Eu	0.80	0.87	0.86	0.73	1.01	1.01	0.89	1.02
Gd	3.12	3.23	3.05	2.67	3.40	3.71	3.19	3.79
Tb	0.55	0.57	0.53	0.47	0.59	0.64	0.57	0.66
Dy	3.69	3.76	3.65	3.23	4.08	4.30	3.78	4.54
Ho	0.77	0.80	0.75	0.67	0.82	0.90	0.76	0.91
Er	2.43	2.48	2.37	2.04	2.55	2.86	2.43	2.91
Tm	0.33	0.33	0.31	0.28	0.35	0.37	0.32	0.38
Yb	2.13	2.18	2.07	1.83	2.38	2.49	2.15	2.51
Lu	0.33	0.34	0.32	0.27	0.36	0.38	0.34	0.39
Rb	1.92	5.47	9.05	3.89	6.63	8.63	9.17	8.43
Ba	6.17	22.20	27.60	27.50	30.80	27.10	26.30	25.80
Sr	89.5	189	253	258	272	203	224	209
U	0.04	0.05	0.05	0.04	0.05	0.08	0.05	0.06
Th	0.10	0.11	0.11	0.08	0.11	0.13	0.12	0.13
Nb	0.71	0.75	0.74	0.60	0.88	0.91	0.76	0.92
Ta	0.06	0.06	0.06	<0.05	0.07	0.07	0.06	0.08
Zr	66.10	70.10	68.30	54.30	79.40	78.40	71.30	77.90
Hf	1.79	1.85	1.77	1.44	2.00	2.19	1.87	2.09
Ti	4465	4238	4055	4478	4830	4707	4419	4832
Y	21.40	22.10	21.70	19.40	25.10	24.50	22.40	26.00
$\Sigma$ REE	33.39	35.18	33.19	28.71	37.98	40.73	34.45	41.35
LREE/HREE	1.50	1.57	1.54	1.51	1.61	1.60	1.54	1.57
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.77	0.84	0.79	0.78	0.81	0.79	0.78	0.82
$\delta$ Eu	0.93	0.97	1.01	0.96	1.05	0.95	1.00	0.96

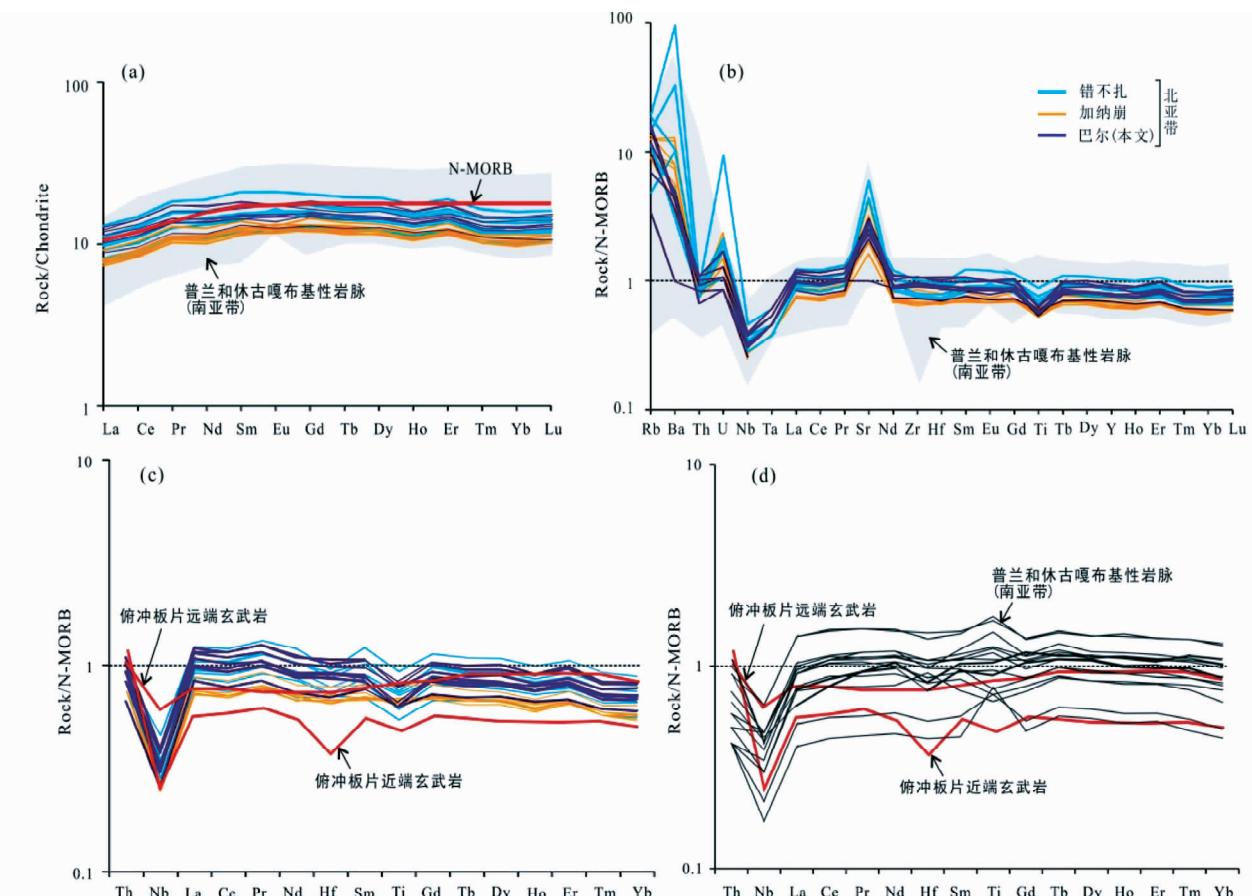


图 7 南北亚带基性岩的稀土和微量元素配分曲线

图 c, d 中 Ti 含量为  $MgO = 8\%$  的含量。数据来源:错不扎和加纳崩基性岩脉(刘飞等, 2015);普兰(Miller *et al.*, 2003; 刘飞等, 2013b; 刘钊等, 2011);休古嘎布(Bezard *et al.*, 2011)

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns and N-MORB normalized rare elements diagrams for mafic dikes from the southern and northern sub-belts in the western part of the YZSZ, Tibet

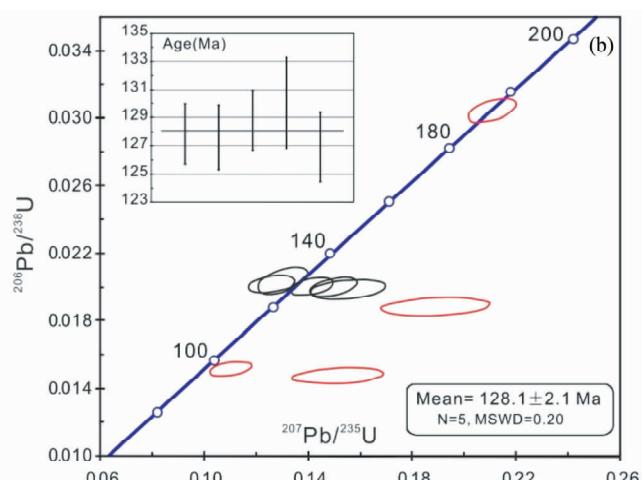
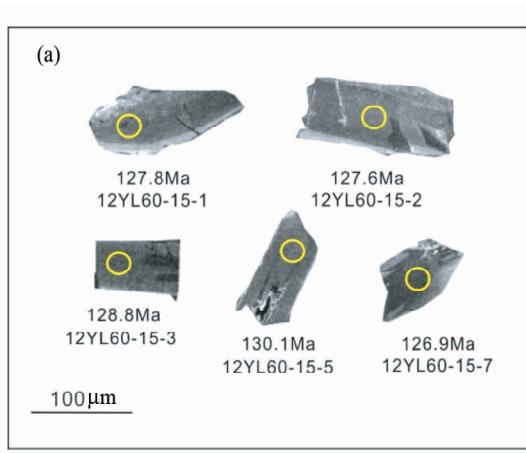


图 8 巴尔角闪辉长岩(12YL60-15)锆石阴极发光图像和 SHRIMP 测点结果(a)及锆石 U-Pb 年龄协和图(b)

Fig. 8 CL images of zircon grains from the Baer amphibole gabbro (12YL60-15) showing the texture and corresponding spots analyzed by SHRIMP (a) and U-Pb concordia diagram and weighted average result (b)

表 2 巴尔蛇绿岩中角闪辉长岩脉 SHRIMP 锆石 U-Pb 测年数据

Table 2 SHRIMP zircon U-Pb dating result of amphibole gabbro from the Baer ophiolite in Tibet

测点号	元素( $\times 10^{-6}$ )		Th/U	同位素比值				年龄结果(Ma)			
	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
12YL60-15-1	493	318	1.55	0.0512	3.4	0.1414	3.8	0.02003	1.7	127.8	2.1
12YL60-15-2	470	848	0.55	0.0544	3.5	0.1498	3.9	0.01999	1.8	127.6	2.3
12YL60-15-3	567	113	5.02	0.0453	4.4	0.1262	4.7	0.02019	1.7	128.8	2.1
12YL60-15-4	388	288	1.35	0.0745	7.3	0.1520	7.6	0.01475	2.0	94.4	1.9
12YL60-15-5	531	329	1.61	0.0464	4.2	0.1304	4.9	0.02038	2.5	130.1	3.2
12YL60-15-6	466	507	0.92	0.0528	4.3	0.1105	4.7	0.01517	1.9	97.1	1.8
12YL60-15-7	382	429	0.89	0.0566	5.9	0.1552	6.2	0.01988	2.0	126.9	2.5
12YL60-15-8	119	36	3.31	0.0645	2.6	0.8890	3.2	0.09990	1.8	614.0	10
12YL60-15-9	440	334	1.32	0.0566	1.9	0.7170	2.4	0.09200	1.6	567.2	8.4
12YL60-15-10	131	55	2.38	0.0800	2.6	2.1970	3.1	0.19920	1.8	1171	19
12YL60-15-11	817	348	2.35	0.0502	2.5	0.2108	2.9	0.03046	1.5	193.5	2.9
12YL60-15-12	286	120	2.38	0.0725	1.7	1.1590	2.3	0.11590	1.5	707.0	10
12YL60-15-13	326	1313	0.25	0.0727	7.1	0.1890	7.3	0.01887	1.8	120.5	2.2

解见图 8。13 个被测锆石的粒径主要在  $100 \sim 150 \mu\text{m}$  之间, 分为粉红色和浅粉色两类, 前者磨圆度较好, 核边结构发育, 为继承锆石, 年龄在  $193.5 \sim 1171.0 \text{ Ma}$  之间(表 2); 第二类浅粉色锆石呈半自形, CL 图像不发育韵律环带(图 8a), 其中部分样品(年龄分别为  $120.5 \text{ Ma}$ 、 $97.1 \text{ Ma}$ 、 $94.4 \text{ Ma}$ )可能由于锆石破裂或蚀变, 导致 U-Pb 丢失, 而偏离协和线, 然而其中 5 个测点的 Th/U 比值平均 1.93, 指示岩浆成因的特征(一般  $> 0.4$ ), 平均年龄为  $128.1 \pm 2.1 \text{ Ma}$ (图 8b)。虽然被测锆石数量较少, 但该年龄与南亚带东波辉长岩( $128.1 \pm 1.1 \text{ Ma}$ , 熊发挥等, 2011)、普兰辉长岩( $130 \pm 3 \text{ Ma}$ , 刘钊等, 2011), 以及北亚带加纳崩辉长岩( $127.0 \pm 0.5 \text{ Ma}$ , 刘飞等, 2015)的野外产状、锆石颜色、CL 形态、Th/U 比值等一致, 说明该年龄可以作为巴尔辉长岩的结晶年龄。

## 5.2 南北亚带基性岩地球化学和年代学对比

基性岩脉的产状、年龄和地球化学成分在南北蛇绿岩亚带中相似。野外产出方面, 均呈脉状或长透镜状侵入地幔橄榄岩中, 走向北西。辉长岩和辉绿岩脉一般宽  $0.5 \sim 2 \text{ m}$ , 少量可达  $5 \sim 8 \text{ m}$ , 长度断续延伸十几至几十米。辉石岩脉通常较窄, 数厘米至数十厘米不等, 翠绿色, 粒状镶嵌结构, 单斜辉石可达  $80\% \sim 85\%$  以上, 含少量斜方辉石和橄榄石, 副矿物有尖晶石、磁铁矿、锆石等。

两带的基性岩脉锆石 U-Pb 年龄基本一致, 只是南亚带年龄范围稍大, 为  $120 \sim 130 \text{ Ma}$ , 而北亚带为  $126 \sim 128 \text{ Ma}$ (表 3)。

南北亚带基性岩的地球化学成分略有不同。南亚带基性岩  $\text{SiO}_2$  含量  $48.99\%$  (平均值, 下同),  $\text{K}_2\text{O}$  为  $0.11\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  为  $2.65\%$ , 分别低于北亚带基性岩的含量( $51.31\%$ 、 $0.39\%$ 、 $4.01\%$ ), 但南亚带的  $\text{TiO}_2$ (平均  $1.02\%$ ) 和  $\text{MgO}$ (平均  $7.73\%$ , 未计算东波辉石岩的  $25.79\%$ ) 含量, 显著高于北亚带对应元素的含量( $0.78\%$ 、 $6.84\%$ ), 而  $\text{P}_2\text{O}_5$  和 REE 的

含量相当。两带的基性岩球粒陨石标准化曲线均呈 LREE 略亏损的近水平模式, 与典型 N-MORB 成分一致(图 7a), N-MORB 标准化微量元素蛛网图中, Nb、Ta 强烈负异常, Ti 弱负异常, Th 微亏损, Rb、Ba、Sr、U 强烈富集(图 7b), 指示均具有俯冲带岛弧玄武岩特征。虽然在  $\text{SiO}_2-\text{Zr}/\text{TiO}_2$  岩石分类图解中, 两带基性岩均属于亚碱性系列(图 6a), 然而在  $\text{SiO}_2-\text{FeO}'/\text{MgO}$  图解中北亚带为钙碱性玄武岩系列, 而南亚带属于拉斑玄武岩范围(图 6b)。

在 N-MORB 标准化高场强元素蛛网图中, 北亚带错不扎和巴尔基性岩具有 Nb 和 Ti 的负异常, 以及微弱 Hf 负异常, 与俯冲板片近端玄武岩(Pearce, 2014)类似, 而加纳崩辉长岩 Hf/Ti 异常不明显, 具有俯冲板片远端玄武岩的特点(图 7c), 错不扎和加纳崩基性岩的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值( $t = 128 \text{ Ma}$ )为  $+3.4 \sim +4.3$ (刘飞等, 待发表), 指示源自一般亏损的地幔源区; 南亚带普兰和休古嘎布基性岩具有俯冲板片近端玄武岩和俯冲板片远端玄武岩的混合特征(图 7d), 普兰辉绿岩和玄武质岩脉的  $\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$  值为  $+8.6 \sim +8.9$ , 指示源自一种强烈亏损的地幔源区(Miller et al., 2003; 刘飞等, 2013b)。此外, 南北亚带基性岩脉均由角闪石和斜长石组成辉长辉绿结构, N-MORB 标准化蛛网图中均明显富集大离子亲石元素, 指示岩浆源区富含水。

总之, 南北亚带基性岩具有岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩的混合特征, 岩浆源区富水, 可能为富水流体交代地幔楔, 使亏损地幔再部分熔融的产物。南北亚带基性岩均具有俯冲板片近端和远端玄武岩混合成分特征, 说明基性岩浆与俯冲板片的距离存在差异。南北带基性岩的主成分和 Nd 同位素地球化学的差异可能与流体交代俯冲带上板片地幔橄榄岩的位置差异导致岩浆源区不同引起的。

## 6 方辉橄榄岩矿物成分对比

地幔橄榄岩的矿物成分能够保存地幔部分熔融和交代

表 3 雅鲁藏布江缝合带南北亚带基性岩脉产状、年龄和成分特征

Table 3 The occurrence, age and compositions of mafic dikes from the southern and northern ophiolitic sub-belts in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

亚带 地点 岩性	南亚带						北亚带			N-MORB
	东波		普兰			休古嘎布	巴尔	错不扎	加纳崩	
	辉石岩	辉长岩	辉长岩	辉绿岩	玄武质岩脉	辉长岩	角闪辉长岩	辉绿岩	辉长岩	
资料来源	熊发挥等, 2011		刘钊等, 2011	刘飞等, 2013b	Miller <i>et al.</i> , 2003	Bezard <i>et al.</i> , 2011	本文	刘飞等, 2015		Sun and McDonough, 1989
SiO <sub>2</sub> (%)	53.65	50.20	47.47	45.66	49.02	47.91	52.47	51.00	50.46	48.77
TiO <sub>2</sub> (%)	0.10	0.95	1.42	1.01	1.26	1.37	0.77	0.87	0.71	1.15
MgO (%)	25.79	7.45	7.25	7.82	8.11	8.02	6.57	7.38	6.57	9.67
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	0.05	0.07	0.11	0.07	0.12	0.12	0.08	0.08	0.07	0.09
K <sub>2</sub> O (%)	0.02	0.09	0.15	0.14	0.19	0.09	0.48	0.44	0.25	
Na <sub>2</sub> O (%)	0.09	3.34	2.92	4.59	2.78	2.16	4.32	3.59	4.11	
REE ( $\times 10^{-6}$ )	29.64	30.6	44.55	30.2	37.28	43.09	35.62	35.14	27.34	39.11
锆石 U-Pb 年龄 (Ma)	130 ± 0.5	128.1 ± 1.1	130 ± 3	120.2 ± 2.3 <sup>a)</sup>	147 ± 25 <sup>b)</sup>	122.3 ± 2.4 <sup>c)</sup>	128.1 ± 2.1	125.8 ± 2.6	127.0 ± 0.5	
产状 走向	NW	NW		310°			310°	310°	320°	
$\left(\frac{^{143}\text{Nd}}{^{144}\text{Nd}}\right)_t$				0.512904 ~ 0.513095 ~	0.512909 0.513131		0.512663 ~ 0.512648 ~	0.512672 <sup>d)</sup> 0.512654 <sup>d)</sup>		
$\varepsilon_{\text{Nd}}(t)$				+8.6 ~	+8.6 ~		+3.9 ~	+3.4 ~		
				+8.7	+9.1		+4.3 <sup>d)</sup>	+3.5 <sup>d)</sup>		

注:a)据李建峰等, 2008); b)据 Sm-Nd 等值线法;c)据韦振权等, 2006;d)据刘飞等, 待发表

富集等信息, 其矿物组合的地球化学成分对反演蛇绿岩的成因和构造环境具有重要作用(Arai and Ishimaru, 2008; Dilek and Furnes, 2011), 地幔橄榄岩中 Mg、Ni 和 Cr 元素为在地幔熔融过程中为相容元素, 其含量能够反映源区特征(牛耀龄, 2013)。由于北亚带地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩组成, 含少量纯橄岩脉体, 几乎未见二辉橄榄岩, 南亚带也以方辉橄榄岩为主体。因此, 本文在总结前人发表数据的基础上, 只对比两带方辉橄榄岩的矿物地球化学成分特征, 即开展雅江带西段南亚带的东波、普兰、休古嘎布蛇绿岩和北亚带的达机翁、巴尔和错不扎蛇绿岩(图 2b)中方辉橄榄岩的橄榄石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石成分的对比研究, 探讨两个带的关系。

南北亚带方辉橄榄岩中橄榄石通常具有三种产出类型:(1)粗粒残斑晶橄榄石, 呈半自形-他形粒状, 粒径 2 ~ 6mm 不等, 普遍具有应力变形的痕迹, 发育扭折带、波状消光、裂理面弯曲等现象;(2)被包含的橄榄石, 呈他形不规则状或浑圆状包裹于斜方辉石和铬尖晶石中;(3)矿物粒间的细小橄榄石, 通常呈半自形, 少量自形分布于较大辉石或橄榄石边部, 或填隙状分布于矿物颗粒之间。这三类产状的橄榄石均为镁橄榄石, Fo 值在 89 ~ 92.5 之间。橄榄石的 NiO 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量较为接近, 南北亚带橄榄石的 NiO 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 分别为 0.34% ~ 0.42% 和 0.35% ~ 0.40%, 0.01% ~ 0.06% 和 0.01% ~ 0.02% (表 4), 说明两带方辉橄榄岩中橄榄石的

MgO、NiO、Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量类似。

斜方辉石也具有三种产出类型:(1)残斑晶状, 呈半自形-他形粒状或短柱状、不规则港湾状, 粒径主要为 1 ~ 3mm, 应力变形使晶体常见波状消光、解理面和内部出熔的辉石条带发生明显的挠曲, 局部港湾被细粒橄榄石、辉石和铬尖晶石充填;(2)细粒状, 呈他形不规则状、填隙状分布于粗粒残斑晶橄榄石、斜方辉石和单斜辉石晶体边部或矿物颗粒之间;(3)出熔状, 主要沿单斜辉石的解理面或裂理面出熔, 呈不规则状和弯曲条带状产出。三类产状斜方辉石的 En 含量除普兰(En = 85.15 ~ 91.18)(周文达等, 2014)外, 其它蛇绿岩的 En(顽火辉石)含量均位于 88 ~ 92 之间, 为斜顽辉石。斜方辉石的 NiO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量类似, 分别为 0.07% ~ 0.10% 和 0.06% ~ 0.09%, 1.53% ~ 3.64% 和 1.25% ~ 3.06%, 0.55% ~ 0.69% 和 0.41% ~ 0.69% (表 4)。此外, 除休古嘎布稍高(91 ~ 93)外, 其它蛇绿岩中斜方辉石的 Mg<sup>#</sup> 值接近(90.64 ~ 91.87)。

单斜辉石含量较少, 主要呈(1)残斑晶状;(2)细粒填隙状;(3)出熔条纹状或半自形-他形的出熔晶体分布于斜方辉石中。三类单斜辉石主要为透辉石, 少量为顽透辉石和普通辉石, 具有类似的 Mg<sup>#</sup> 值、NiO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量, 南北带分别为 92.76 ~ 94.00 和 92.38 ~ 94.35, 0.04 ~ 0.05 和 0.03 ~ 0.05, 0.71 ~ 1.05 和 0.53 ~ 1.00, 1.94 ~ 3.93 和 1.24 ~ 3.78(表 4), 说明南北带方辉橄榄岩具有类似的单斜辉石含量。

表 4 雅鲁藏布江缝合带西段南北亚带方辉橄榄岩中矿物成分特征( wt% )

Table 4 Representative compositions of different minerals in harzburgites from the southern and northern ophiolitic sub-belts in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet (wt%)

亚带	南亚带				北亚带			
	地点	东波 <sup>a)</sup>	普兰 <sup>b)</sup>	休古嘎布 <sup>c)</sup>	仲巴 <sup>d)</sup>	达机翁 <sup>e)</sup>	巴尔 <sup>f)</sup>	错不扎 <sup>g)</sup>
<b>橄榄石</b>								
NiO	0.36	0.34	0.42	0.41	0.36	0.40	0.35	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.06	0.00	0.01	0.01	0.02	0.01	
Fo	90.30	90.70	90.50	91.00	91.30	90.40	90.50	
<b>斜方辉石</b>								
En	88~91	85~91	89~92	—	89~91	89~90	88~90	
Mg <sup>#</sup>	90.77	90.86	91.93	91.3	91.87	90.9	90.64	
NiO	0.07	0.07	0.07	0.10	0.06	0.09	0.06	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55	0.69	0.66	0.68	0.41	0.69	0.54	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.53	2.53	3.64	2.67	1.25	2.73	3.06	
<b>单斜辉石</b>								
En	47~49	47~55	47~49	—	47~51	47~50	46~52	
Mg <sup>#</sup>	93.53	92.76	94.00	93.30	94.35	93.16	92.38	
NiO	0.05	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.71	1.05	0.87	0.82	0.53	0.87	1.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.94	3.12	3.93	2.77	1.24	2.84	3.78	
<b>尖晶石</b>								
Cr <sup>#</sup>	51.50	44.07	45.41	42.00	63.35	43.29	31.67	
Mg <sup>#</sup>	57.20	62.55	64.16	64.00	53.96	57.37	65.86	
NiO	0.07	0.12	0.12	0.11	0.06	—	0.20	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40.85	36.13	38.67	35.82	47.78	36.13	27.38	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.96	31.26	31.19	32.90	18.60	31.73	39.81	
TiO <sub>2</sub>	0.04	0.05	0.03	0.02	0.06	0.04	0.19	

注: Fo 值 = 100Mg/( Mg + Fe<sup>2+</sup> ); Mg<sup>#</sup> = 100Mg/( Mg + Fe<sup>2+</sup> ), 其中 Fe<sup>2+</sup> 为 FeO 中的 Fe; Cr<sup>#</sup> = 100Cr/( Cr + Al )。 a) 据 Niu et al. , 2015; 杨经绥等, 2011; b) 据 Miller et al. , 2003; 徐向珍等, 2011; 周文达等, 2014; c) 据 Bezard et al. , 2011; d) 据 Dai et al. , 2011a, b; e) 据连东洋等, 2014; f) 据李源等, 2011; g) 据冯光英等, 2015

铬尖晶石以副矿物的形式产出, 呈(1)包裹体状, 主要以他形-半自形包裹于斜方辉石和橄榄石中;(2)粒间填隙状, 呈半自形-他形产于橄榄石和辉石矿物颗粒之间。方辉橄榄岩中的铬尖晶石 Cr 和 Al 存在广泛的类质同象替换, Cr<sup>#</sup>值和 Mg<sup>#</sup>值可以反映地幔橄榄岩的熔融程度、源区亏损程度以及结晶压力等信息(Dick and Bullen, 1984)。两带方辉橄榄岩中铬尖晶石具有类似的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO 和 TiO<sub>2</sub> 的含量。南北亚带尖晶石的 Cr<sup>#</sup>值和 Mg<sup>#</sup>值分别为 42.00~51.5 和 31.67~63.35, 57.20~64.16 和 53.96~65.86, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量分别为 35.82%~40.85% 和 27.38%~47.47%, 26.96%~32.90% 和 18.60%~39.81%, NiO 和 TiO<sub>2</sub> 的含量分别为 0.07%~0.12% 和 0.06%~0.20%, 0.02%~0.05% 和 0.04%~0.19% (表 4)。总之, 南北亚带方辉橄榄岩中铬

尖晶石的成分类似。

以上对比表明, 南北亚带方辉橄榄岩中橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和铬尖晶石具有类似的成分范围。

## 7 雅江带西段构造环境对比

基性岩中 Nb、Zr、Th、Y、HREE 等高场强元素一般不受热液蚀变和低于角闪岩相变质作用的影响, 是示踪岩浆源区、判别不同构造环境最有效的判别因子(Dilek and Furnes, 2011, 2014; Pearce, 2014)。包括巴尔角闪辉长岩在内的南北亚带基性岩脉经历不同程度的绿片岩化作用, 因此可以使用高场强元素图解对比源区特征和构造环境。在 Ti-Zr-Y 图解(图 9a)中, 北亚带基性岩均落入大洋海底玄武岩、钙碱性玄武岩和低钾拉斑玄武岩范围, 而南亚带普兰和休古嘎布基性岩具有大洋海底玄武岩和低钾拉斑玄武岩的特点, 与主量元素判别结果类似(图 6b)。在 Zr/Y-Zr 图解(图 9b)中, 两带基性岩落入岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩过渡范围内, 具有岛弧玄武岩和洋中脊玄武岩的混合特征, 与稀土元素具有 N-MORB 的配分模式, 而微量元素蛛网图显示岛弧玄武岩特征(图 7)相一致。在 Th/Yb-Nb/Yb 图解(图 9c)中, 基性岩成分位于大洋岛弧和地幔成分阵列区(MORB-OIB array)之间, 具有超俯冲带环境的痕迹, 也显示岛弧玄武岩(IAB)和洋中脊玄武岩的特点。进一步使用 V-Ti 图解(图 9d), 基性岩分布于 MORB 或俯冲板片远端的弧后玄武岩和弧前玄武岩区域(Pearce, 2014), Ti/V 比值均位于 20~30 之间, 落入洋中脊玄武岩和岛弧玄武岩的混合区间(Dilek and Furnes, 2011)。以上图解总体反映了南北亚带基性岩脉叠加了岛弧和洋中脊两种构造环境特征。

那么, 具有 MORB 和 IAB 两种特征的南北带基性岩脉是先形成于洋中脊环境后受到超俯冲带(SSZ)环境改造呢, 还是均形成于 SSZ 环境, 从大洋岛弧演化成具有洋中脊特征的弧前或弧后盆地环境? 该问题需要考虑基性岩脉的野外产状、岩浆源区特征以及围岩构造环境。

野外产状上, 南北亚带蛇绿岩中的辉长岩、辉绿岩和辉石岩等基性岩呈脉状或长透镜状侵入地幔橄榄岩中, 接触面平直截然, 局部接触部位可见 15~20cm 的冷凝边(刘飞等, 2013b), 数厘米至数十厘米不等宽的翠绿色辉石岩脉向围岩方辉橄榄岩过渡部位, 可见岩-熔反应形成的二辉橄榄岩, 指示基性岩脉的成岩时间晚于围岩。基性岩脉普遍北西走向, 与蛇绿岩的构造线方向一致, 该走向近垂直于印度板块向欧亚板块俯冲挤压方向。

岩浆源区特征上, 如上文所述, 基性岩具有岛弧玄武岩的地球化学特征, N-MORB 型稀土元素配分曲线和亏损的 Nd 同位素成分指示基性岩浆源自亏损地幔。发育大量原生角闪石, 富集 Rb、Ba、Sr 和 U 等元素, 暗示岩浆源区富水。两带基性岩可能为富水流体交代俯冲上板片地幔楔, 使上板片地幔部分熔融的产物。

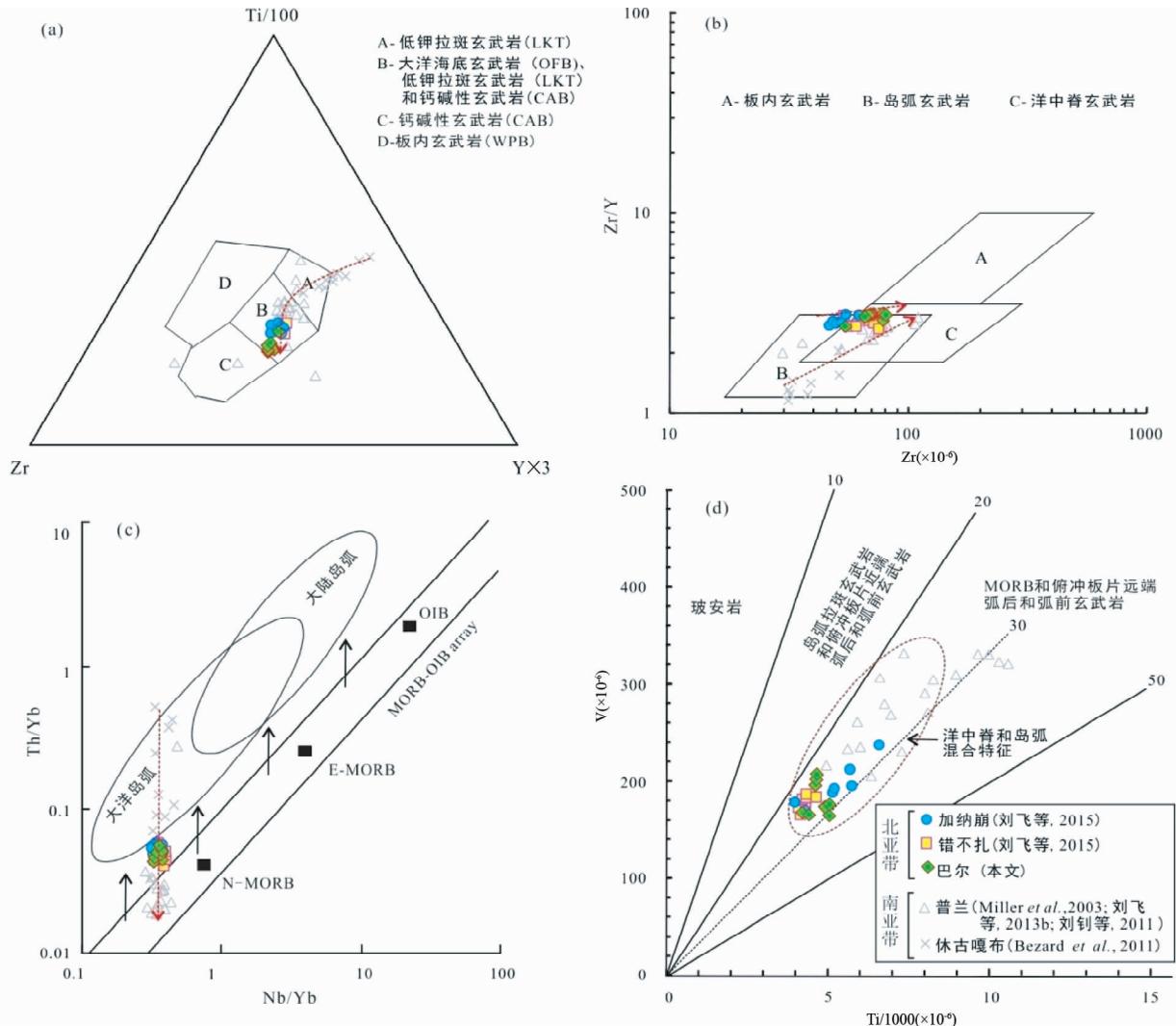


图9 南北亚带基性岩脉的构造判别图解

(a) 据 Pearce and Cann, 1973; (b) 据 Pearce and Norry, 1979; (c,d) 据 Dilek and Furnes, 2011; Pearce, 2014

Fig. 9 Discriminations diagrams for the mafic dikes in the southern and northern sub-belts, Tibet

基性岩脉的围岩方辉橄榄岩的构造环境上,南北亚带的方辉橄榄岩全岩地球化学普遍低 Al、Ca, 高 Mg、REE 和 Os 含量明显低于原始地幔,指示方辉橄榄岩经历了较高程度的部分熔融(Dai et al., 2011b; 李源等, 2011; 连东洋等, 2015; 牛晓露等, 2013; 熊发挥等, 2011; 徐向珍等, 2011; 杨经绥等, 2011; 周文达等, 2014);然而,部分橄榄岩含有韭闪石(Liu et al., 2010; 李源等, 2011),相对富集 LREE、Rb、Ba、Zr、Hf、Ta 等元素(Liu et al., 2010; 徐向珍等, 2011; 杨经绥等, 2011),铬尖晶石的 Cr<sup>#</sup>值分布较大范围(18~75)(Liu et al., 2012; 徐向珍等, 2011; 杨经绥等, 2011),铂族元素(PGE)总含量高于原始地幔,指示地幔橄榄岩历了富硫化物、富不相容元素和高 PGE 熔体/流体的交代(Liu et al., 2010; 连东洋等, 2015; 牛晓露等, 2013)。以上特征表明,南北带地幔橄榄岩经历了亏损部分融合和流体/熔体交代作用的两个过程。

方辉橄榄岩的橄榄石、斜方辉石、单斜辉石和铬尖晶石地球化学能够记录岩石熔融过程以及流体富集交代过程(O'Reilly and Griffin, 2013)。一般随着熔融程度的增加,橄榄岩中单斜辉石和斜方辉石的含量以及辉石中的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 含量逐渐降低,橄榄石的 Fo 值、NiO 含量、辉石的 Mg<sup>#</sup> 和 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量、铬尖晶石的 Cr<sup>#</sup> 值逐渐升高(Bédard, 1999; Dick and Bullen, 1984; Elthon, 1992; O'Reilly and Griffin, 2013)。南北亚带方辉橄榄岩中橄榄石的 Fo 值在 90.3~91.3 之间,NiO 含量为 0.34%~0.42%,指示较高程度部分熔融(表 4),在橄榄石 Fo-NiO 图解中,指示深海地幔橄榄岩向弧前地幔橄榄岩过渡的特征(图 10a);斜方辉石和单斜辉石具有高的 Mg<sup>#</sup> 值(分别为 90.64~93.00 和 92.38~94.35)和较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(分别为 1.25%~3.64% 和 1.24%~3.93%),也说明方辉橄榄岩经历了较高程度的部分熔融;在斜方辉石 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup> 图解(图 10b)和单斜辉石 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Mg<sup>#</sup> 图解(图 10c)

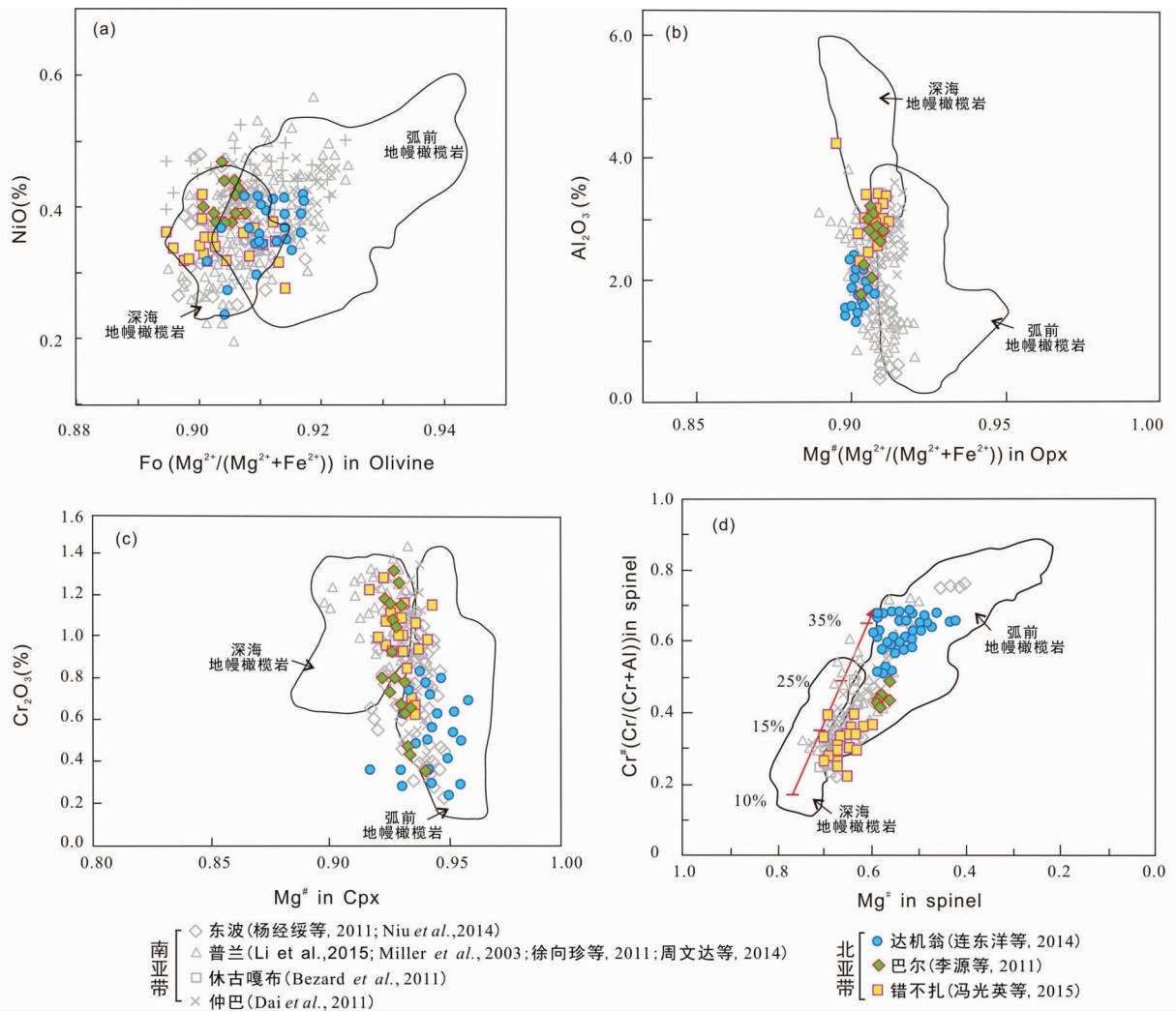


图 10 雅鲁藏布江缝合带西段南北蛇绿岩亚带中方辉橄榄岩的矿物成分图解

(a) 橄榄石的  $\text{NiO}$ - $\text{Fo}$  图解; (b) 斜方辉石的  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{Mg}^{\#}$  图解; (c) 单斜辉石的  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ - $\text{Mg}^{\#}$  图解; (d) 铬尖晶石的  $\text{Cr}^{\#}$ - $\text{Mg}^{\#}$  图解, 底图引自 Dubois-Côté et al., 2005, 部分熔融曲线引自 Hirose and Kawamoto, 1995。深海地幔橄榄岩引自 Dick and Bullen, 1984; Juteau et al., 1990; 弧前地幔橄榄岩引自 Ishii et al., 1992

Fig. 10 Compositional variations of olivines, orthopyroxenes, clinopyroxenes and spinels from the southern and northern sub-belts in the western YZSZ, Tibet

中, 两带的斜方和单斜辉石成分位于深海和弧前地幔橄榄岩的区域内; 铬尖晶石的  $\text{Cr}^{\#}$  值- $\text{Mg}^{\#}$  值图解(图 10d)中, 部分熔融程度多集中在 15% ~ 35% 之间, 显示方辉橄榄岩经历了范围较大部分熔融过程, 主体形成于弧前地幔橄榄岩范围内, 少量具有深海地幔橄榄岩的特点。该特征与橄榄石和辉石, 以及全岩地球化学数据反映的规律一致, 指示南北带方辉橄榄岩具有弧前和深海地幔橄榄岩的双重特点。结合区域地质, 雅江带蛇绿岩中发育三叠纪放射虫 (Matsuoka et al., 2002) 和早侏罗世朗县辉绿岩 (张万平等, 2011), 以及冈底斯中部安第斯型雄村铜金多金属矿床的时代为晚侏罗世 (唐菊兴等, 2010), 指示雅鲁藏布江新特提斯洋在三叠纪-早侏罗世已经存在。Hébert et al. (2012) 认为雅江带蛇绿岩类似

于汤加-马里亚纳岛弧系统, 经历了至少五次的洋内俯冲, 形成于 SSZ 的弧前-弧-弧后环境。因此, 我们认为在 130Ma 左右的雅江带西段地幔橄榄岩形成于一定规模的弧前盆地环境。此外, 由橄榄石和尖晶石矿物对计算出的氧逸度较低, 指示地幔橄榄岩形成于还原环境 (连东洋等, 2014), 反映了弧前洋盆具有一定规模, 雅江带西段地幔橄榄岩可能均形成于 SSZ 环境, 后期叠加了弧前盆地洋中脊扩张过程中的改造。

总之, 通过基性岩的产状、锆石 U-Pb 年龄, 以及基性岩和围岩方辉橄榄岩的矿物和岩石地球化学对比分析, 南北亚带基性岩脉类似的成岩时代 (120 ~ 130 Ma)、源自类似的亏损地幔和富水岩浆源区, 围岩方辉橄榄岩具有类似的矿物组

成和弧前地幔橄榄岩的特征,指示两带基性岩脉形成于一定规模的弧前盆地环境。结合区域地质,北亚带北侧出露大面积的冈底斯岛弧岩基和复理石沉积形成沟-弧-盆岩石组合,而南亚带两侧直接与沉积地层构造接触,不发育类似于冈底斯的岛弧(图2b);仲巴微地体中上二叠统碎屑岩的物源和继承锆石年龄特征与特提斯喜马拉雅类似,而不同于拉萨陆块(孙高远和胡修棉,2012),以及南亚带普兰和东波蛇绿岩具有从北到南的构造侵位特征(Xu et al., 2015),说明两者可能来自相同大洋岩石圈两个残余,即在蛇绿岩侵位过程中,新特提斯洋壳和岩石圈地幔向南逆冲推覆到特提斯喜马拉雅构造单元之上,形成了南北两个蛇绿岩亚带。

然而需要注意的是,南亚带两侧的仲巴微地体与特提斯喜马拉雅构造单元的石炭系-二叠系地层存在差异,三叠系地层的岩性和沉积环境差别较大,尤其特提斯喜马拉雅的地层中自二叠纪至白垩纪均出露大量拉张环境的火山岩(朱弟成等,2004),而仲巴微地体中仅二叠系大陆裂陷型火山岩(张振利等,2007)有报道,三叠系至白垩系地层类似火山岩少见,说明自晚古生代至中生代,仲巴微地体与特提斯喜马拉雅构造带可能不是铁板一块。那么,这种火山-沉积岩组合的差异性是不是与南亚带洋盆的裂解打开的响应,或者与青藏高原南部其它洋盆的形成有关?此外,南亚带蛇绿岩分布多个大型的超镁铁岩体,如果南亚带是从北亚带逆冲推覆而来的,它具有怎样的动力学机制?南亚带的普兰东段至公珠错南缘的地幔橄榄岩发育较多二辉橄榄岩和含Cpx的方辉橄榄岩,这种岩石类型与北亚带明显不同,岩石的差异性是否指示构造环境的不同?这些区域地质问题,还不能用南亚带是从北亚带逆冲推覆而来的模型来解释,还需要大量细致的工作去探索。

## 8 结论

通过实测从北到南涉及冈底斯岩基南缘、北亚带蛇绿岩、仲巴微地体、南亚带蛇绿岩和特提斯喜马拉雅构造单元北缘地层的地质剖面,对比南北亚带蛇绿岩产出、岩石组成和构造环境。两个带蛇绿岩包括地幔橄榄岩、基性岩脉、玄武岩、凝灰岩夹砂页岩、硅质岩和硅质灰岩,未见典型的枕状熔岩。北亚带与北侧冈底斯岩基之间被晚白垩统-第三系火山碎屑岩夹砂页岩和砂岩和复理石沉积岩相隔,与南侧的仲巴微地体构造接触,接触部位蛇纹石化、片理化和石英菱镁岩化;南亚带蛇绿岩的南北两侧分别出露海山地层与特提斯喜马拉雅构造单元和仲巴微地体构造接触。

北亚带巴尔蛇绿岩的角闪辉长岩为钙碱性玄武岩,N-MORB 标准化曲线表现为 Nb、Ta 的亏损,指示俯冲带弧前或弧后盆地特征,与北亚带错不扎和加纳崩基性岩脉类似。SHRIMP 锆石 U-Pb 测年为  $128.1 \pm 2.1$  Ma,该年龄与北亚带错不扎辉绿岩( $125.8 \pm 2.6$  Ma)和加纳崩( $127.0 \pm 0.5$  Ma)辉长岩的锆石 U-Pb 年龄一致。对比南北亚带蛇绿岩中类似产

状(NW 走向,侵入方辉橄榄岩中)的基性岩脉及其围岩方辉橄榄岩,两带基性岩脉具有相同时代( $120 \sim 130$  Ma)、类似的含水且亏损地幔的源区,均形成于洋内弧前环境。结合南亚带蛇绿岩不发育沟-弧-盆体系,南北亚带之间的仲巴微地体具有特提斯喜马拉雅的亲缘性,以及南亚带东波和普兰蛇绿岩具有从北到南的构造侵位特征,说明雅江带西段南北亚带蛇绿岩可能属于相同 SSZ 构造环境下的不同残余,在构造侵位过程中形成了南北两个蛇绿岩亚带。

**致谢** 野外和室内工作得到了许志琴院士的指导,中国地质科学院地质研究所 Ahmed Masoud 博士、吴魏伟博士生给予了帮助;迈阿密大学的解艳雪博士生、中国地质大学(武汉)的周文达、李奇维,中国地质大学(北京)赵一珏、王云鹏、高健、杨艳参与了野外工作;两位审稿人孟繁聪研究员和李旭平教授提出了非常宝贵的评审意见,在此一并表示真挚的谢意。

## References

- Arai S and Ishimaru S. 2008. Insights into petrological characteristics of the lithosphere of mantle wedge beneath arcs through peridotite xenoliths: A review. *Journal of Petrology*, 49(4): 665–695.
- Bédard JH. 1999. Petrogenesis of boninites from the Betts Cove ophiolite, Newfoundland, Canada: Identification of subducted source components. *Journal of Petrology*, 40(12): 1853–1889.
- Bezard R, Hébert R, Wang CS, Dostal J, Dai J and Zhong HT. 2011. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet. *Lithos*, 125(1–2): 347–367.
- Brongniart A. 1813. *Essai D'une Classification Minéralogique Des Roches Mélangées*. Paris: Bossande, 190–199.
- Burg JP and Chen GM. 1984. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China. *Nature*, 311(5983): 219–223.
- Chan GHN, Aitchison JC, Crowley QG, Horstwood MSA, Searle MP, Parrish RR and Chan JS. 2015. U-Pb zircon ages for Yarlung Tsangpo suture zone ophiolites, southwestern Tibet and their tectonic implications. *Gondwana Research*, 27(2): 719–732.
- Chen GW and Xia B. 2008. Platinum-group elemental geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Xigaze ophiolite, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 406–422.
- Dai JG, Wang CS, Hébert R, Li YL, Zhong HT, Guillaume R, Bezard R and Wei YS. 2011a. Late Devonian OIB alkaline gabbro in the Yarlung Zangbo Suture Zone: Remnants of the Paleo-Tethys? *Gondwana Research*, 19(1): 232–243.
- Dai JG, Wang CS, Hébert R, Santosh M, Li YL and Xu JY. 2011b. 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. *Chemical Geology*, 288(3–4): 133–148.
- Dick HJB and Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(1): 54–76.
- Dilek Y and Furnes H. 2011. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere. *Geological Society of America Bulletin*, 123(3–4): 387–411.
- Dilek Y and Furnes H. 2014. Ophiolites and their origins. *Elements*, 10(2): 93–100.

- Dubois-Côté V, Hébert R, Dupuis C, Wang CS, Li YL and Dostal J. 2005. Petrological and geochemical evidence for the origin of the Yarlung Zangbo ophiolites, southern Tibet. *Chemical Geology*, 214 (3–4) : 265 – 286
- Dürr SB. 1996. Provenance of Xigaze fore-arc basin clastic rocks (Cretaceous, South Tibet). *Geological Society of America Bulletin*, 108 (6) : 669 – 684
- Elthon D. 1992. Chemical trends in abyssal peridotites: Refertilization of depleted suboceanic mantle. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B6) : 9015 – 9025
- Feng GY, Yang JS, Xiong FH, Liu F, Niu XL, Lian DY, Wang YP and Zhao YJ. 2015. Petrology, geochemistry and genesis of the Cuobuzha peridotite in the western Yarlung Zangbo suture zone. *Geology in China*, 42 (5) : 1337 – 1353 (in Chinese with English abstract)
- Gansser A. 1983. Suture Zone of Indian-circling. In: Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences (Trans.). *Geology of Tethys Structural Belt*. In the Proceedings of the 26<sup>th</sup> International Geological Congress (IGC). Beijing: Geological Publishing House, 58 – 67 (in Chinese)
- Girardeau J, Mercier JCC and Zao YG. 1985. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications. *Tectonics*, 4(3) : 267 – 288
- Girardeau J and Mercier JCC. 1988. Petrology and texture of the ultramafic rocks of the Xigaze ophiolite (Tibet): Constraints for mantle structure beneath slow-spreading ridges. *Tectonophysics*, 147 (1–2) : 33 – 58
- Guo TY, Liang DY, Zhang YZ and Zhao ZH. 1991. *Geology of Ngari Tibet (Xizang)*. Beijing: China University of Geosciences Press, 1 – 464 (in Chinese)
- Hébert R, Bezzard R, Guilmette C, Dostal J, Wang CS and Liu ZF. 2012. The Indus-Yarlung Zangbo ophiolites from Nanga Parbat to Namche Barwa syntaxes, southern Tibet: First synthesis of petrology, geochemistry, and geochronology with incidences on geodynamic reconstructions of Neo-Tethys. *Gondwana Research*, 22 : 377 – 397
- Huang GC, Mo XX, Xu DM, Lei YJ and Li LJ. 2006. Origination and evolution of Daba-Xiugugabu ophiolite belt in the southwestern Tibet. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3) : 1 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Hirose K and Kawamoto T. 1995. Hydrous partial melting of lherzolite at 1GPa: The effect of H<sub>2</sub>O on the genesis of basaltic magmas. *Earth and Planetary Science Letters*, 133 (3–4) : 463 – 473
- Ishii T, Robinson PT, Maekawa H and Fiske R. 1992. Petrological studies of peridotites from diapiric serpentinite seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana forearc, LEG125. In: Fryer P, Pearce JA, Stokking LB *et al.* (eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. College Station, TX, 125 : 445 – 485
- Juteau T, Berger E and Cannat M. 1990. Serpentized, residual mantle peridotites from the M. A. R. Median Valley, ODP hole 670A (21°10'N, 45°02'W, LEG 109): Primary mineralogy and geothermometry. In: Detrick R, Honnorez J, Bryan WB *et al.* (eds.). *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*. College Station, TX, 106(109) : 27 – 45
- Li JF, Xia B, Liu LW, Xu LF, He GS, Wang H, Zhang YQ and Yang ZQ. 2008. SHRIMP U-Pb zircon dating of diabase in the La'nga Co ophiolite, Burang, Tibet, China, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 27 (10) : 1739 – 1743 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Zeng QG, Wang CS and Xie YW. 2004. Provenance analysis of the Upper Triassic Langjixue Group in the southern Tibet, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22 (4) : 553 – 559 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Wang CS, Li YL, Wei YS and Chen X. 2014. Definition and composition of the Zhongba microterrane in Southwest Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 88 (8) : 1372 – 1381 (in Chinese with English abstract)
- Li XP, Chen HK, Wang ZL, Wang LJ, Yang JS and Robinson P. 2015. Spinel peridotite, olivine websterite and the textural evolution of the Purang ophiolite complex, western Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110 : 55 – 71
- 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 (in Chinese with English abstract)
- Lian DY, Yang JS, Xiong FH, Liu F, Wang YP, Zhou WD and Zhao YJ. 2014. Composition characteristics and tectonic setting of the Dajiweng peridotite in the western Yarlung-Zangbo ophiolitic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (8) : 2164 – 2184 (in Chinese with English abstract)
- Lian DY, Yang JS, Xiong FH, Liu F and Wang YP. 2015. Platinum-group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. *Geology in China*, 42 (2) : 525 – 546 (in Chinese with English abstract)
- 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 (3–4) : 413 – 422
- Liu CZ, Wu FY, Chu ZY, Ji WQ, Yu LJ and Li JL. 2012. Preservation of ancient Os isotope signatures in the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibet) after subduction modification. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53 : 38 – 50
- Liu F, Yang JS, Chen SY, Liang FH, Niu XL, Li ZL and Lian DY. 2013a. Ascertainment and environment of the OIB-type basalts from the Dongbo ophiolite in the western part of Yarlung Zangbo Suture Zone. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (6) : 1909 – 1932 (in Chinese with English abstract)
- Liu F, Yang JS, Chen SY, Li ZL, Lian DY, Zhou WD and Zhang L. 2013b. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra-oceanic supra-subduction within the Neo-Tethys. *Geology in China*, 40 (3) : 361 – 374 (in Chinese with English abstract)
- Liu F, Yang JS, Dilek Y, Xu ZQ, Xu XZ, Liang FH, Chen SY and Lian DY. 2015. Geochronology and geochemistry of basaltic lavas in the Dongbo and Purang ophiolites of the Yarlung-Zangbo Suture zone: Plume-influenced continental margin-type oceanic lithosphere in southern Tibet. *Gondwana Research*, 27 (2) : 701 – 718
- Liu F, Yang JS, Lian DY, Zhao H, Zhao YJ and Zhang L. 2015. The genesis and tectonic significance of mafic dikes in the western part of the Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet. *Acta Geoscientifica Sinica*, 36 (4) : 443 – 456 (in Chinese with English abstract)
- Liu Z, Li Y, Xiong FH, Wu D and Liu F. 2011. Petrology and geochronology of MOR gabbro in the Purang ophiolite of western Tibet, China. *Acta Petrologica Sinica*, 27 (11) : 3269 – 3279 (in Chinese with English abstract)
- Matsuoka A, Yang Q, Kobayashi K, Takei M, Nagahashi T, Zeng Q and Wang Y. 2002. Jurassic – Cretaceous radiolarian biostratigraphy and sedimentary environments of the Ceno-Tethys: records from the Xialu Chert in the Yarlung-Zangbo Suture Zone, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20 (3) : 277 – 287
- 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 (3–4) : 155 – 172
- Miyashiro A. 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274 (4) : 321 – 355
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupre B, Wang XB, Cao YG, Zheng HX and Xiao XC. 1981. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere. *Nature*, 294 (5840) : 414 – 417
- Niu XL, Zhao ZD, Mo XX, Depaolo DJ, Dong GC, Zhang SQ, Zhu DC and Guo TY. 2006. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry for basic rocks from Decun-Angren ophiolites in Xigaze area, Tibet: Implications for the characteristics of the Tethyan upper mantle domain. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (12) : 2875 – 2888 (in Chinese with English abstract)

- Niu XL, Yang JS, Chen SY, Liu F, Xiong FH, Liu Z and Guo GL. 2013. The reformation of the Dongbo ultramafic rock massif in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone by subduction-related fluids: Evidence from the platinum-group elements (PGE). *Geology in China*, 40(3): 756–766 (in Chinese with English abstract)
- Niu XL, Yang JS, Dilek Y, Xu JF, Li J, Chen SY, Feng GY, Liu F, Xiong FH and Liu Z. 2015. Petrological and Os isotopic constraints on the origin of the Dongbo peridotite massif, Yarlung Zangbo Suture Zone, Western Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 110: 72–84
- Niu YL. 2013. Global Tectonics and Geodynamics: A Petrological and Geochemical Approach. Beijing: Science Press, 1–307 (in Chinese)
- O'Reilly SY and Griffin WL. 2013. Mantle metasomatism. Springer Berlin Heidelberg, 471–533
- Pan GT, Chen ZL, Li XZ, Yan AJ, Xu XS, Xu Q, Jiang XS, Wu YL, Luo JN, Zhu TX and Peng YM. 1997. The Geological Tectonic Evolution of the Eastern Tethys. Beijing: Geological Publishing House, 1–218 (in Chinese)
- Pearce JA and Cann JR. 1973. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses. *Earth and Planetary Science Letters*, 19(2): 290–300
- Pearce JA and Norry MJ. 1979. Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y, and Nb variations in volcanic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 69(1): 33–47
- Pearce JA and Deng WM. 1988. The ophiolites of the Tibetan geotraverses, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986). *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 327 (1594): 215–238
- Pearce JA. 2014. Immobile element fingerprinting of ophiolites. *Elements*, 10(2): 101–108
- Song B, Zhang YH and Liu DY. 2002. Introduction to the naissance of SHRIMP and its contribution to isotope Geology. *Journal of Chinese Mass Spectrometry Society*, 23(1): 58–62 (in Chinese with English abstract)
- Sun GY and Hu XM. 2012. Tectonic affinity of Zhongba terrane: Evidences from the detrital zircon geochronology and Hf isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1635–1646 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 42(1): 313–345
- Tang JX, Li FJ, Li ZJ, Zang L, Tang XQ, Deng Q, Lang XH, Huang Y, Yao XF and Wang Y. 2010. Time limit for formation of main geological bodies in Xiongeun copper-gold deposit, Xietongmen County, Tibet: Evidence from zircon U-Pb ages and Re-Os age of molybdenite. *Mineral Deposits*, 29(3): 461–475 (in Chinese with English abstract)
- Tappognier P, Mercier JL, Proust F, Andrieux J, Armijo R, Bassoulet JP, Brunel M, Burg JP, Colchen M, Dupré B, Girardeau J, Marcoux J, Mascle G, Matte P, Nicolas A, Li TD, 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 Qiu HR. 1981. The Tibetan side of the India-Eurasia collision. *Nature*, 294 (5840): 405–410
- Wan XQ, Sun LX, Liu WC and Li GB. 2007. The Strata of the Yarlung-Zangbo Suture Zone, Tibet. Beijing: Geological Publishing House, 1–119 (in Chinese)
- Wang CS, Li XH, Liu ZF, Li YL, Jansa L, Dai J and Wei YS. 2012. Revision of the Cretaceous-Paleogene stratigraphic framework, facies architecture and provenance of the Xigaze forearc basin along the Yarlung Zangbo suture zone. *Gondwana Research*, 22(2): 415–433
- Wang GH, Liang DY, Liu WC, Dong WT and Wang SH. 2000. Extensional movement and extending action in southern Tibet since Hercynian. *Geoscience*, 14(2): 133–139 (in Chinese with English abstract)
- English abstract)
- Wang YJ, Yang Q, Matsuoka A, Kobayashi K, Nagahashi T and Zeng QG. 2002. Triassic radiolarians from the Yarlung Zangbo Suture Zone in the Jinlu area, Zetang County, southern Tibet. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 19(3): 215–227 (in Chinese with English abstract)
- Wei ZQ, Xia B, Zhang YQ, Wang R, Yang ZQ and Wei DL. 2006. Shrimp zircon dating of diabase in the Xiugugabu ophiolite in Tibet and its geological implications. *Geotectonica et Metallogenesis*, 30(1): 93–97 (in Chinese with English abstract)
- Winchester JA and Floyd PA. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20: 325–343
- Wu FY, Liu CZ, Zhang LL, Zhang C, Wang JG, Ji WQ and Liu XC. 2014. Yarlung Zangbo ophiolite: A critical updated view. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 293–325 (in Chinese with English abstract)
- Xia B, Yu HX, Chen GW, Qi L, Zhao TP and Zhou MF. 2003. Geochemistry and tectonic environment of the Dagzhuka ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. *Geochemical Journal*, 37(3): 311–324
- Xiong FH, Yang JS, Liang FH, Ba DZ, Zhang J, Xu XZ, Li Y and Liu Z. 2011. Zircon U-Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3223–3238 (in Chinese with English abstract)
- Xiong FH, Yang JS, Liu Z, Guo GL, Chen SY, Xu XZ, Li Y and Liu F. 2013. High-Cr and high-Al chromitite found in western Yarlung-Zangbo suture zone in Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 29(6): 1878–1908 (in Chinese with English abstract)
- Xu DM, Huang GC, Huang LQ, Lei YJ and Li LJ. 2006. The origin of mantle peridotites in the Daba-Xiugugabu Ophiolite Belt, SW Tibet. *Geology and Mineral Resources of South China*, (3): 10–18 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL, Li XH, Wang Y, Zeng QG, Sun Y and Ni MCR. 2011. Provenance analysis of the Upper Triassic flysch in Renbu area, Southern Tibet. *Geological Journal of China Universities*, 17(2): 220–230 (in Chinese with English abstract)
- Xu XZ, Yang JS, Guo GL and Li JY. 2011. Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung-Zangbo suture zone in Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3179–3196 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Zhang JX, Zeng LS and Jiang M. 2006. The Qinghai-Tibet Plateau and continental dynamics: A review on terrain tectonics, collisional orogenesis, and process and mechanisms for the rise of the plateau. *Geology in China*, 33(2): 221–238 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Dilek Y, Yang JS, Liang FH, Liu F, Ba DZ, Cai ZH, Li GW, Dong HW and Ji SC. 2015. Crustal structure of the Indus-Tsangpo suture zone and its ophiolites in southern Tibet. *Gondwana Research*, 27(2): 507–524
- Yan Z, Fang AM, Pan YS, Li JL, Liu XH and Yu LJ. 2006. Detrital Modal, geochemical characteristics and tectonic setting of the Dajin marine clastic rocks, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 949–960 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xiong FH, Guo GL, Liu F, Liang FH, Chen SY, Li ZL and Zhang LW. 2011. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3207–3222 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Robinson PT and Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites. *Elements*, 10(2): 127–130
- Yang WC and Yu CQ. 2014. Continental collision process revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures (I). *Geological Review*, 60(2): 237–259 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison TM. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-

- Tibetan orogen. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 28 (1): 211–280
- Yin A. 2006. Cenozoic tectonic evolution of the Himalayan orogen as constrained by along-strike variation of structural geometry, exhumation history, and foreland sedimentation. Earth-Science Reviews, 76(1–2): 1–131
- Zhang Q. 2014. Classifications of mafic-ultramafic rocks and their tectonic significance. Chinese Journal of Geology, 49(3): 982–1017 (in Chinese with English abstract)
- Zhang SQ, Mahoney JJ, Mo XX, Ghazi AM, Milani L, Crawford AJ, Guo TY and Zhao ZD. 2005. Evidence for a widespread Tethyan upper mantle with Indian-Ocean-type isotopic characteristics. Journal of Petrology, 46(4): 829–858
- Zhang WP, Mo XX, Zhu DC, Yuan SH and Wang LQ. 2011. Chronology and geochemistry on gabbro and basalt of the ophiolite mélange in Lang County, Tibet, China. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 38(5): 538–548 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZL, Zhuan SP, Li GD, Zhang JD, Sun X, Li X, Wang LJ and Liu HZ. 2007. Discovery of metabasaltic rocks in the Caibanong Formation in the Zhongba stratigraphic area, southern Tibet, China and their significance. Geological Bulletin of China, 26(4): 410–416 (in Chinese with English abstract)
- Zhou WD, Yang JS, Zhao JH, Xiong FH, Ma CQ, Xu XZ, Liang FH and Liu F. 2014. Mineralogical study and the origin discussion of Purang ophiolite peridotites, western part of Yarlung-Zangbo Suture Zone (YZSZ), Southern Tibet. Acta Petrologica Sinica, 30(8): 2185–2203 (in Chinese with English abstract)
- Zhou YS, Wu HR, Zheng XL, Wang DA, Zhang Q, Li DZ and Zhang XM. 1982. Geology of the ophiolite in Xigaze prefecture of the southern Tibet, China. Scientia Geologica Sinica, (1): 30–39 (in Chinese with English abstract)
- Zhu DC, Pan GT, Mo XX, Liao ZL, Jiang XS and Wang LQ. 2004. Permian to Cretaceous volcanic activities in the central segment of the Tethyan Himalayas (I): Distribution characteristics and significance. Geological Bulletin of China, 23(7): 645–654 (in Chinese with English abstract)
- 附中文参考文献
- 甘塞尔 A. 1983. 环印度缝合带. 中国地质科学院地质研究所译. 特提斯构造带地质学—廿六届国际地质大会论文选. 北京: 地质出版社, 58–67
- 冯光英, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 牛晓露, 连东洋, 王云鹏, 赵一珏. 2015. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段错布扎地幔橄榄岩组成特征及岩石成因. 中国地质, 42(5): 1337–1353
- 郭铁鹰, 梁定益, 张宜智, 赵崇贺. 1991. 西藏阿里地质. 北京: 中国地质大学出版社, 1–464
- 黄圭成, 莫宣学, 徐德明, 雷义均, 李丽娟. 2006. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带的形成与演化. 华南地质与矿产, (3): 1–9
- 李建峰, 夏斌, 刘立文, 徐力峰, 何观生, 王洪, 张玉泉, 杨之青. 2008. 西藏普兰地区拉昂错蛇绿岩中辉绿岩的锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及其地质意义. 地质通报, 27(10): 1739–1743
- 李祥辉, 曾庆高, 王成善, 谢尧武. 2004. 西藏南部上三叠统郎杰学群物源分析. 沉积学报, 22(4): 553–559
- 李祥辉, 王成善, 李亚林, 魏玉帅, 陈曦. 2014. 仲巴微地体之定义及构成. 地质学报, 88(8): 1372–1381
- 李源, 杨经绥, 刘钊, 贾毅, 徐向珍. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄榄岩成因及构造意义. 岩石学报, 27(11): 3239–3254
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 王云鹏, 周文达, 赵一珏. 2014. 雅鲁藏布江蛇绿岩带西段达机翁地幔橄榄岩组成特征及其形成环境分析. 岩石学报, 30(8): 2164–2184
- 连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 刘飞, 王云鹏. 2015. 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征. 中国地质, 42(2): 525–546
- 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 梁凤华, 牛晓露, 李兆丽, 连东洋. 2013a. 雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩 OIB 型玄武岩的厘定及其形成环境. 岩石学报, 29(6): 1909–1932
- 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 李兆丽, 连东洋, 周文达, 张岚. 2013b. 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据. 中国地质, 40(3): 361–374
- 刘飞, 杨经绥, 连东洋, 赵慧, 赵一珏, 张岚. 2015. 雅鲁藏布江缝合带西段南北亚带的基性岩成因和构造意义. 地球学报, 36(4): 443–456
- 刘钊, 李源, 熊发挥, 吴迪, 刘飞. 2011. 西藏西部普兰蛇绿岩中的 MOR 型辉长岩: 岩石学和年代学. 岩石学报, 27(11): 3269–3279
- 牛晓露, 赵志丹, 莫宣学, Depaolo DJ, 董国臣, 张双全, 朱弟成, 郭铁鹰. 2006. 西藏日喀则地区德村-昂仁蛇绿岩内基性岩的元素与 Sr-Nd-Pb 同位素地球化学及其揭示的特提斯地幔域特征. 岩石学报, 22(12): 2875–2888
- 牛晓露, 杨经绥, 陈松永, 刘飞, 熊发挥, 刘钊, 郭国林. 2013. 雅鲁藏布江西段东波超镁铁岩体经历了俯冲带流体的改造: 来自铂族元素的证据. 中国地质, 40(3): 756–766
- 牛耀龄. 2013. 全国构造与地球动力学——岩石学与地球动力学方法应用实例. 北京: 科学出版社, 1–307
- 潘桂棠, 陈智梁, 李兴旺, 颜仰基, 许效松, 徐强, 江新胜, 吴应林, 罗建宁, 朱同兴, 彭勇民. 1997. 东特提斯地质构造形成演化. 北京: 地质出版社, 1–218
- 宋彪, 张玉海, 刘敦一. 2002. 微理原位分析仪器 SHRIMP 的产生与锆石同位素地质年代学. 质谱学报, 23(1): 58–62
- 孙高远, 胡修棉. 2012. 仲巴地体的板块亲缘性: 来自碎屑锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素的证据. 岩石学报, 28(5): 1635–1646
- 唐菊兴, 黎风信, 李志军, 张丽, 唐晓倩, 邓起, 郎兴海, 黄勇, 姚晓峰, 王友. 2010. 西藏谢通门县雄村铜金矿主要地质体形成的时限: 锆石 U-Pb、辉钼矿 Re-Os 年龄的证据. 矿床地质, 29(3): 461–475
- 万晓樵, 孙立新, 刘文灿, 李国彪. 2007. 西藏雅鲁藏布江缝合带地层. 北京: 地质出版社, 1–119
- 王根厚, 梁定益刘文灿, 董文彤, 王世洪. 2000. 藏南海西期以来伸展运动及伸展作用. 现代地质, 14(2): 133–139
- 韦振权, 夏斌, 张玉泉, 王冉, 杨之青, 韦栋梁. 2006. 西藏休古嘎布蛇绿岩中辉绿岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义. 大地构造与成矿学, 30(1): 93–97
- 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 张畅, 王建刚, 纪伟强, 刘小驰. 2014. 雅鲁藏布蛇绿岩——事实与臆想. 岩石学报, 30(2): 293–325
- 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 巴登珠, 张健, 徐向珍, 李源, 刘钊. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U-Pb 定年及地质意义. 岩石学报, 27(11): 3223–3238
- 熊发挥, 杨经绥, 刘钊, 郭国林, 陈松永, 徐向珍, 李源, 刘飞. 2013. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段发现高铬型和高铝型豆英状

- 铬铁矿体. 岩石学报, 29(6): 1878–1908
- 徐德明, 黄圭成, 黄陵勤, 雷义均, 李丽娟. 2006. 西藏西南部达巴-休古嘎布蛇绿岩带中地幔橄榄岩的成因. 华南地质与矿产, (3): 10–18
- 徐文礼, 李祥辉, 王尹, 曾庆高, 孙勇, 尼玛次仁. 2011. 西藏仁布地区上三叠统复理石物源分析. 高校地质学报, 17(2): 220–230
- 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 李金阳. 2011. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究. 岩石学报, 27(11): 3179–3196
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 曾令森, 姜枚. 2006. 青藏高原与大陆动力学——地体拼合, 碰撞造山及高原隆升的深部驱动力. 中国地质, 33(2): 221–238
- 闫臻, 方爱民, 潘裕生, 李继亮, 刘小汉, 俞良军. 2006. 西藏达金海相碎屑岩的组成、地球化学特征及其构造背景. 岩石学报, 22(4): 949–960
- 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 刘飞, 梁凤华, 陈松永, 李兆丽, 张隶文. 2011. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体. 岩石学报, 27(11): 3207–3222
- 杨文采, 于常青. 2014. 从地壳上地幔构造看大陆碰撞作用(上). 地质论评, 60(2): 237–259
- 张旗. 2014. 镁铁-超镁铁岩的分类及其构造意义. 地质科学, 49(3): 982–1017
- 张万平, 莫宣学, 朱弟成, 袁四化, 王立全. 2011. 西藏朗县蛇绿混杂岩中变辉绿岩和变玄武岩的年代学和地球化学. 成都理工大学学报(自然科学版), 38(5): 538–548
- 张振利, 专少鹏, 李广栋, 张计东, 孙肖, 李先, 汪立军, 刘鸿章. 2007. 藏南仲巴地层分区才巴弄组变质玄武质火山岩的发现及其意义. 地质通报, 26(4): 410–416
- 周文达, 杨经绥, 赵军红, 熊发挥, 马昌前, 徐向珍, 梁凤华, 刘飞. 2014. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩地幔橄榄岩矿物研究和成因探讨. 岩石学报, 30(8): 2185–2203
- 周云生, 吴浩若, 郑锡澜, 王东安, 张旗, 李达周, 张新民. 1982. 西藏南部日喀则地区蛇绿岩地质. 地质科学, (1): 30–39
- 朱弟成, 潘桂棠, 莫宣学, 廖忠礼, 江新胜, 王立全. 2004. 藏南特提斯喜马拉雅带中段二叠纪-白垩纪的火山活动(I): 分布特点及其意义. 地质通报, 23(7): 645–654