

# 西藏日喀则蛇绿岩中石榴角闪岩的矿物、岩石地球化学特征\*

张鑫 李旭平\*\* 王泽利 赵令权 史同强 段文勇

ZHANG Xin, LI XuPing\*\*, WANG ZeLi, ZHAO LingQuan, SHI TongQiang and DUAN WenYong

山东科技大学地球科学与工程学院, 山东省沉积成矿作用实验室, 青岛 266590

Shandong Provincial Key Laboratory of Depositional Mineralization & Sedimentary Minerals, College of Earth Science & Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

2016-05-01 收稿, 2016-08-29 改回.

Zhang X, Li XP, Wang ZL, Zhao LQ, Shi TQ and Duan WY. 2016. Mineralogical and petrogeochemical characteristics of the garnet amphibolites in the Xigaze ophiolite, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 32(12):3685–3702

**Abstract** Within the Xigaze ophiolitic mélangé of the central Yalung Zangpo Suture Zone, we found garnet amphibolites of the metamorphic sole, and investigated the mineral chemistry, metamorphic  $P$ - $T$  condition and geochemistry of garnet amphibolites. On the basis of mineral assemblages, four metamorphic stages of garnet amphibolites were distinguished as  $Am_1 + Pl_1 + Ep_1 + Ttn$  (M1);  $Grt-c + Cpx-e + Ep_2 + Pl_2 + Rt$  (M2);  $Grt-r + Ep_3/Czo_3 + Cpx-l + Am_3 + Pl_3 + Ttn$  (M3) and  $Prh + Ab + Czo + Chl + Cal$  (M4), respectively. In light of the  $P$ - $T$  pseudosection in the SAFMCNHO system, combined with traditional geothermobarometer, the garnet amphibolites were proposed to have experienced pre-peak metamorphism with  $P$ - $T$  conditions of 560 ~ 620°C/9.1 ~ 9.8kbar; peak metamorphism 830 ~ 870°C/18.0 ~ 22.0kbar, retrograde stage 640 ~ 680°C/10.7 ~ 14.9kbar, and finally ended within sub-green schist facies, figuring out an anticlockwise  $P$ - $T$  path. Major elements show that rocks are low-K tholeiitic, with low  $TiO_2$  (0.92% ~ 1.29%),  $K_2O$  (<0.26%) and  $Na_2O$  (0.24% ~ 2.46%). The chondrite-normalized Rare Earth Elements (REEs) and primitive mantle-normalized multi-element patterns are similar to N-MORB, with depletion in light of REEs, but they show significant enrichment of large ion lithophile elements (LILEs, Rb, Ba, U) and partly depleted in high field strength elements (HFSEs, Nb, Ti, Zr and Hf). Geochemical studies indicate that investigated rocks have affinities with N-MORB and arc-related components where is sourced from Supra Subduction Zone (SSZ) environment. The existence of the Bailang garnet amphibolite presents that the Xigaze ophiolite has been emplaced soon after it formed within an intra-oceanic subduction/emplacement.

**Key words** Garnet amphibolites; Petrology;  $P$ - $T$  path; Geochemistry; Xigaze ophiolite

**摘要** 西藏雅鲁藏布蛇绿岩带中段日喀则地区的白朗蛇绿混杂岩中,存在作为变质底板的石榴角闪岩。本文对其进行了矿物学、变质温压条件和岩石地球化学研究。根据岩相学和矿物化学研究,日喀则石榴角闪岩经历了四个变质阶段,矿物组合分别为: $Am_1 + Pl_1 + Ep_1 + Ttn$  (M1);  $Grt-c + Cpx-e + Ep_2 + Pl_2 + Rt$  (M2);  $Grt-r + Ep_3/Czo_3 + Cpx-l + Am_3 + Pl_3 + Ttn$  (M3) 和  $Prh + Ab + Czo + Chl + Cal$  (M4)。根据 SAFMCNHO 体系矿物组合演化的视剖面图,结合传统的地质温压计,估算出峰期前的温压条件为 560 ~ 620°C/9.1 ~ 9.8kbar; 峰值为 830 ~ 870°C/18.0 ~ 22.0kbar, 退变质阶段保留了 640 ~ 680°C/10.7 ~ 14.9kbar 的温压条件,最终止于葡萄石-绿纤石的前绿片岩相变质条件;得出一条逆时针的  $P$ - $T$  轨迹。白朗变质底板的岩性可分为三类,即石榴角闪岩、角闪辉石岩和单辉角闪岩。三种岩性具有相似的地球化学性质:主量元素具有低钛(0.92% ~ 1.29%)、低钾(<0.26%)、低钠(0.24% ~ 2.46%)的特征。稀土元素和微量元素特征与 N-MORB 相似,富集大离子亲石元素(Rb、Ba、U),亏损部分高场强元素(Nb、Ti、Zr、Hf),表现出白朗蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩等与洋中脊玄武岩有亲缘性,且叠

\* 本文受国家自然科学基金项目(41572044)、中国科学院战略性先导科技专项(XDB03010201)和校创新团队项目(2015TDJH101)联合资助。

第一作者简介:张鑫,男,1987年生,博士生,矿物岩石学专业,E-mail: Zhangxin\_sdust@126.com

\*\* 通讯作者:李旭平,女,1959年生,博士,教授,主要从事矿物岩石学研究,E-mail: lixuping@sdust.edu.cn

加有俯冲上板片 SSZ 环境特征。白朗石榴角闪岩的存在表明日喀则蛇绿岩在形成后不久就发生了构造就位,体现了大洋内部俯冲/侵位事件。

**关键词** 日喀则蛇绿岩;石榴角闪岩;岩石学;*P-T* 轨迹;地球化学

**中图法分类号** P588.346

## 1 引言

雅鲁藏布江蛇绿岩带是喜马拉雅新特提斯洋残留,横跨青藏高原南端的最年轻的缝合带,是我国出露规模最大的蛇绿岩带之一;喜马拉雅-青藏高原造山带也是地球上最重要的造山带之一,因此受到众多中外地质学家的广泛关注。前人的研究表明:由于印度板块与欧亚板块相向运动,在侏罗纪和白垩纪之间新特提斯洋至少发生了两次俯冲。其中一次是洋内俯冲,其北向俯冲导致形成岛弧和弧后盆地扩张脊的产生(Zhou *et al.*, 1996; Hébert *et al.*, 2003; Guilmette *et al.*, 2008; Bezard *et al.*, 2011);此外,白垩纪期间新特提斯大洋岩石圈沿着西藏活动大陆边缘向北俯冲,引起广泛的钙碱性岩浆的侵入(Allègre *et al.*, 1984; Coulon *et al.*, 1986; Murphy *et al.*, 1997; Wu *et al.*, 2010)。晚白垩纪-古近纪时印度板块与欧亚板块碰撞、新特提斯洋的消失导致大洋岩石圈南缘向南俯冲到印度被动大陆边缘之上,之后又向北回推(Nicolas *et al.*, 1981; Tapponnier *et al.*, 1981a, b; Allègre *et al.*, 1984; Bédard *et al.*, 2009),将雅江带的蛇绿岩夹持于印度板块与欧亚板块之间断续分布。

雅鲁藏布江蛇绿岩带整体上可分为三段,即东段(曲水-墨脱)、中段(昂仁-仁布)和西段(萨嘎以西至中印边境),白朗位于雅江带中段的日喀则地区。日喀则蛇绿岩是雅江带中段新特提斯规模最大的出露,被认为形成于洋内扭张盆地边缘北向俯冲过程中的弧后盆地环境(Göpel *et al.*, 1984; Aitchison *et al.*, 2000; Dubois-Côté *et al.*, 2005; Bédard *et al.*, 2009; Bezard *et al.*, 2011);或形成于洋中脊环境(Nicolas *et al.*, 1981; 肖序常和高延林, 1981; Girardeau *et al.*, 1985a, b; Girardeau and Mercier, 1988; Agrinier *et al.*, 1988);或形成于俯冲上板片环境(Aitchison *et al.*, 2000; Hébert *et al.*, 2003, 2012)。

白朗的石榴角闪岩与萨嘎、桑桑的石榴角闪岩的研究表明,其原岩在形成后不久就很快发生了构造就位,因而被认为是雅江带蛇绿岩构造侵位过程中由于自身的高温、上覆火山岩的高温 and 构造摩擦作用而产生的高温变质岩(Guilmette *et al.*, 2008, 2009, 2012; Bédard *et al.*, 2009; Bezard *et al.*, 2011; Hébert *et al.*, 2012; 吴福元等, 2014)。由此形成的变质岩被称之为变质底板(Metamorphic Sole)或热动力变质底板(Dynamothermal Sole)。这类岩石一般位于地幔橄榄岩底部,支撑着蛇绿岩体的侵位过程,经受角闪岩相-绿片岩相的变质作用,因而有着特殊的地质意义。变质底板的出现是蛇绿岩形成于初始俯冲阶段的重要标志(Wakabayashi and

Dilek, 2003; Çelik *et al.*, 2006; Bortolotti *et al.*, 2013; 吴福元等, 2014)。前人的研究表明雅江带的变质底板形成于大洋内部俯冲/侵位环境(Bédard *et al.*, 2009; Bezard *et al.*, 2011; Hébert *et al.*, 2003, 2012; Guilmette *et al.*, 2009, 2012),记载了逆时针 *P-T* 轨迹(Hall, 1991; Dilek and Whitney, 1997; Guilmette *et al.*, 2008)。

白朗地区石榴角闪岩变形强烈、与变形的异剥钙榴岩和硅质岩一起以团块的形式出现在日喀则蛇绿岩增生杂岩体中,我们的研究已经表明,石榴角闪岩在蛇绿岩侵位、变质底板形成的过程中,记录了 830 ~ 870°C 的峰期温度,在相同的压力条件下,比苏鲁大别和西天山造山带的岩石经历的峰期温度都高(Li *et al.*, 2004, 2007, 2010, 2011, 2014; Zhang *et al.*, 2002, 2003; Yang, 2003, 2006; Liu *et al.*, 2009; Liu and Liou, 2011),表现出与之不同的构造属性。因此,在大洋内部,作为变质底板的石榴角闪岩的形成记录了特有的 *P-T* 轨迹和动力学模式,其地球化学特征也表现出与白朗地区未变质的蛇绿岩中的基性岩有相同的构造属性,这对探讨在这种特定环境下的变质演化机制以及洋壳形成演化有着重要的意义。

## 2 区域地质概况

石炭-三叠时期,在欧亚板块与印度板块之间曾经存在一个巨大的洋——特提斯洋(Gaetani and Garzanti, 1991)。侏罗纪和白垩纪的两次俯冲作用,促使印度板块向欧亚板块拼合,最终导致了特提斯洋的闭合(Zhou *et al.*, 1996; Hébert *et al.*, 2001, 2003; Aitchison *et al.*, 2000; McDermid *et al.*, 2002; Huot *et al.*, 2002; Dubois-Côté *et al.*, 2005; Dupuis *et al.*, 2005, 2006)。随着新特提斯洋的消亡,以及在喜马拉雅地区与冈底斯陆壳发生碰撞,代表大洋残片的蛇绿岩因受强烈的挤压,其中一部分与沉积岩一起被从消减板块上刮下来,形成蛇绿构造混杂岩;经过后期构造作用如逆冲断层、走滑断层的改造,逐步演化为现在雅鲁藏布江缝合带中出露的断续分布的蛇绿岩残片以及构造杂岩体(Molnar and Tapponnier, 1975; Tapponnier *et al.*, 1981a, b; Allègre *et al.*, 1984)。

雅鲁藏布蛇绿岩呈东西向分布,长约 2000km。它西起狮泉河以南,经日喀则向东经郎县延至东构造结附近,主体走向与雅鲁藏布江一致(图 1a)。雅鲁藏布江缝合带是直接同雅鲁藏布江(新特提斯)洋盆的消减、闭合及碰撞过程有关的逆冲推覆构造,总体表现为北倾向南逆冲系,北侧出露有冈底斯岩基中新生代的中-酸性侵入岩。日喀则地区位于雅

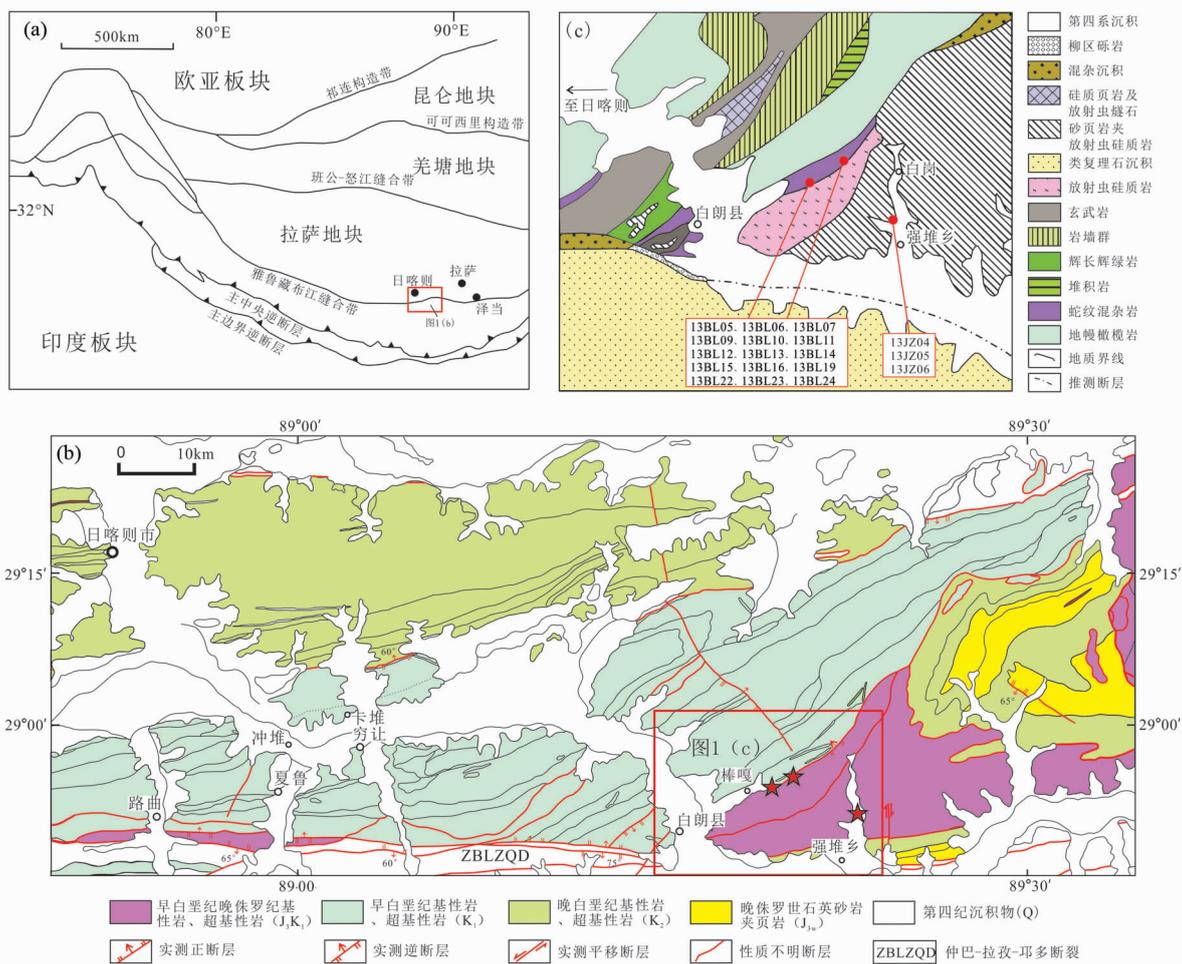


图1 喜马拉雅-青藏高原构造框架图(a, 据 Huot *et al.*, 2002 改绘)、日喀则地区地质简图(b, 据潘桂棠和丁俊, 2004 改绘)和雅鲁藏布江蛇绿混杂岩白朗地区地质图(c, 据夏斌等, 2012 改绘)

Fig.1 Schematic tectonic map of the Himalayas-Tibetan Plateau (a, modified after Huot *et al.*, 2002), simplified map of Xigaze area (b, modified after Pan and Ding, 2004) and geological sketch map of the Yarlung Zangbo ophiolitic mélange near Bailang County (c, after Xia *et al.*, 2012)

鲁藏布江缝合带中段(图1b),其北部出露有日喀则群( $K_2$ )弧前盆地沉积及晚白垩纪( $K_2$ )基性-超基性岩岩体。最南部的断裂为仲巴-拉孜-耶多断裂(ZBLZQD)的一个分支断裂,也为北倾向南逆冲断裂;在该断裂以北为蛇绿岩、蛇绿混杂岩、嘎学群( $J_3-K_1$ )海相复理石沉积、放射虫硅质岩和基性-超基性熔岩( $K_1$ )所组成的构造单元(潘桂棠和丁俊, 2004)。位于雅鲁藏布江缝合带中段的日喀则地区(图1b),蛇绿岩出露最好,研究较为深入,根据前人研究,日喀则蛇绿岩形成时代主要是120~130Ma(Göpel *et al.*, 1984; Malpas *et al.*, 2003; Wang *et al.*, 2006; 王冉等, 2006)。晚于西段拉昂错、普兰蛇绿岩130~152Ma(Miller *et al.*, 2003; 李建峰等, 2008; 刘钊等, 2011)和东段罗布莎及朗县蛇绿岩163~191Ma(Zhou *et al.*, 2002; 钟立峰等, 2006; 张万平等, 2011)的年龄。导致各段蛇绿岩年龄不一致的原因,是代表

新特提斯洋岩石圈的雅鲁藏布江缝合带空间宽广、发育时间长,不同地区的蛇绿岩代表了大洋岩石圈不同的残余部分。

典型的日喀则蛇绿岩岩石序列从下到上为:①构造方辉橄榄岩;②蛇纹岩化地幔橄榄岩以及侵入其中的铁镁质岩石;③铁镁质岩墙群;④枕状玄武岩;⑤沉积岩盖层(Nicolas *et al.*, 1981)。本次研究的露头位于白朗县城附近,此处蛇绿岩大致沿北东-南西方向展布。在距县城东5km的棒嘎村附近,蛇绿岩与 $J_3-K_1$ 岩层之间存在一层蛇绿混杂岩,主要有地幔橄榄岩、异剥钙榴岩、石榴角闪岩、辉绿玢岩、玄武岩及放射虫硅质岩岩块组成,其中石榴角闪岩呈透镜状产于该蛇绿混杂岩之中,与其围岩(地幔橄榄岩)呈断层接触关系,在此处采集了部分石榴角闪岩样品。另外在白朗县城以东12km的强堆乡冲沟内的蛇绿混杂岩中发现了团块状石榴角闪岩露头,取样点位置见图1b, c。

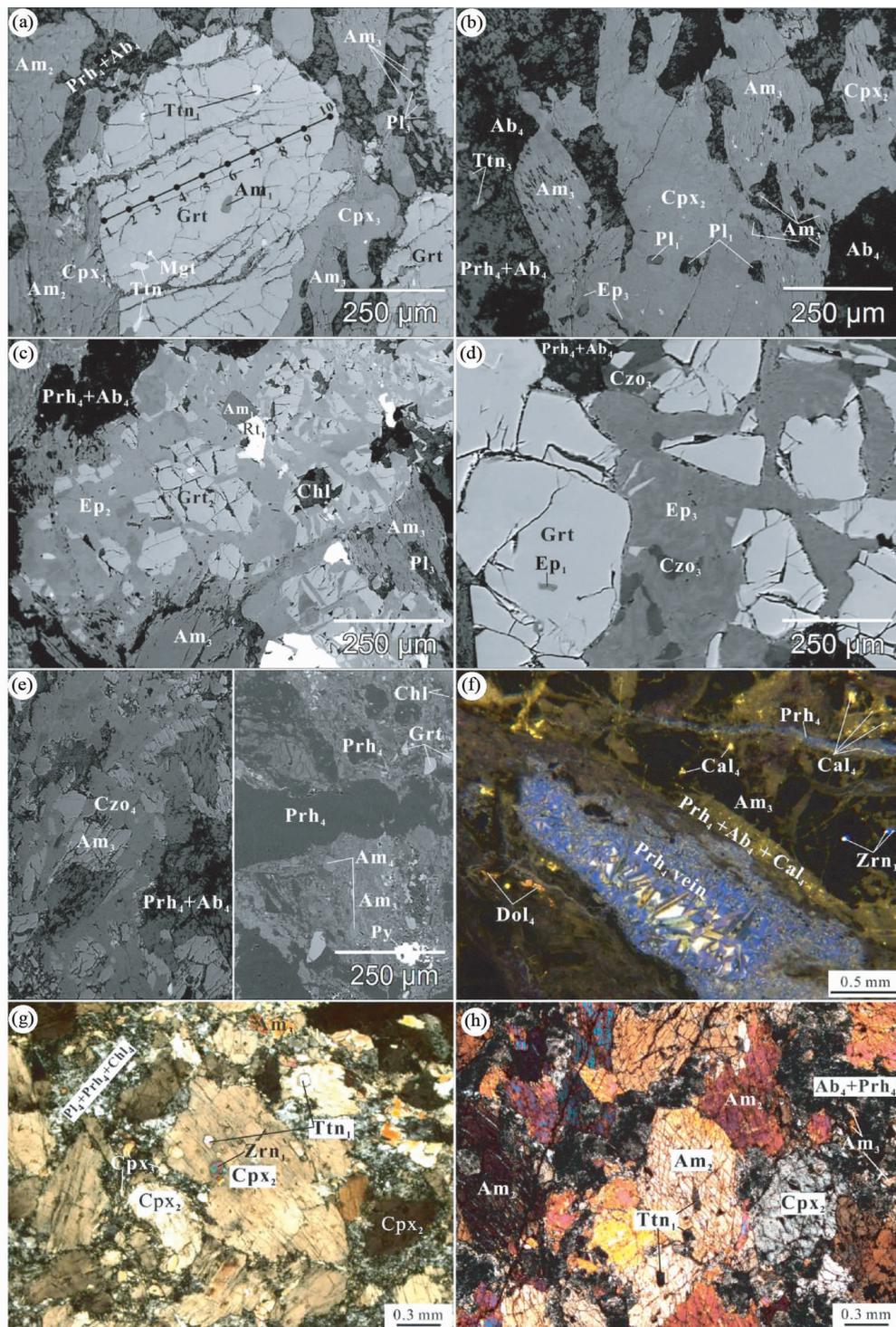


图2 日喀则基性变质岩显微结构图

(a) 单辉石榴角闪岩(背散射图), 见有石榴石变斑晶及其边缘角闪石和斜长石的后成合晶, 石榴石中见有早期角闪石、榴石和磁铁矿包裹体; (b) 单辉石榴角闪岩(背散射图), 见有角闪石和辉石的变斑晶, 斜长石退变成成为 Prh + Ab 的矿物组合; (c) 单辉石榴角闪岩(背散射图), 石榴石被绿帘石替代, 石榴石呈孤岛状残留; (d) 单辉石榴角闪岩(背散射图), 石榴石被绿帘石脉穿过, 斜长石/近斜长石处形成黝帘石; (e) 单辉石榴角闪岩(背散射图), 见有晚期斜黝帘石脉(左), 葡萄石脉(右); (f) 单辉石榴角闪岩 CL 图, 见有葡萄石脉, 方解石和高镁方解石; (g) 角闪辉石岩(正交偏光), 单斜辉石中见有榴石和锆石的包裹体; (h) 单辉角闪石岩(正交偏光)

Fig. 2 Photographs showing typical textures of the Xigaze meta-mafic rocks

(a) Cpx-Grt amphibolite (BSC image), Grt porphyroblast and retrogressive Am-Pl symplectite, Am<sub>1</sub>, Mgt and Ttn inclusions within garnet grain; (b) Cpx-Grt amphibolite (BSC image), Am and Cpx porphyroblasts, Pl retrograded to Prh + Ab; (c) Cpx-Grt amphibolite (BSC image) garnet replaced by epidote showing isolated islands; (d) Cpx-Grt amphibolite (BSC image) garnet cut by epidote vein, close to plagioclase forming zoisite; (e) Cpx-Grt amphibolite (BSC image), Czo and Prh veins developed in late stage; (f) CL photo of Grt amphibolite, Prh vein and Cal and Mg-Cal minerals; (g) Am pyroxenite (under cross-polarized light), Ttn, Zrn inclusions within Cpx grain; (h) Cpx amphibolite (under cross-polarized light)

### 3 岩相学研究

研究区的石榴角闪岩及其共生的变质基性岩以带状和团块状出现在蛇绿杂岩中,根据矿物组合及百分含量可以将研究区岩石分为以下三种岩性:

(1) 单斜石榴石角闪岩: 主要矿物为普通角闪石(65%~75%)、单斜辉石(5%~10%)、石榴石(10%~15%)和后期形成的长石、绿帘石、葡萄石、方解石等矿物(10%~15%)(图2a-f)。角闪石有三种类型,一种是包含在石榴石变晶中的包裹体( $Am_1$ ,图2a);另一种是单偏光下棕黄色,颗粒有变形拉长现象,粒径主要集中在0.5~1mm,内有榴石和长石包裹体的变斑晶( $Am_2$ );再一种是交代单斜辉石后的绿色细小颗粒的角闪石,保留有辉石假象( $Am_3$ ,图2b)。单斜辉石,单偏光下近于无色,微带绿色或淡棕色,粒径0.5~2mm,见有两种结构,一为大颗粒变晶结构( $Cpx_2$ ),另一种为生长在石榴石变斑晶边缘的晚期结构( $Cpx_3$ ,图2a)。石榴石多呈他形,粒度变化较大,小者0.1~0.3mm,大者1~2mm,内部含有早期角闪石、榴石、绿帘石、磁铁矿和金红石等矿物包体(图2a, d),构成变质前矿物组合;石榴石周围见有绿色角闪石、绿帘石和长石等组成的冠状物,构成了峰期变质后的矿物组合。岩石中斜长石皆已分解为葡萄石和钠长石(图2a-e),与葡萄石脉和方解石脉一起构成最后阶段的前绿片岩相变质矿物组合。副矿物见有榴石、磁铁矿、黄铁矿和锆石。

(2) 角闪辉石岩: 岩石不含石榴石矿物,主要由发生明显变形的单斜辉石(55%~70%)、角闪石组成(20%~30%),粒径较粗大2~4mm;其他矿物(10%~15%),见有斜长石、绿帘石、葡萄石以及副矿物榴石和锆石(图2g)。单斜辉石有两期,早期大颗粒变晶( $Cpx_2$ )为呈淡棕绿色、半自形晶,内含长石和榴石的包裹体,晚期呈小颗粒他形晶( $Cpx_3$ )(图2g);角闪石淡绿色,也有早晚两期,早期大颗粒变斑晶呈自形-半自形晶,晚期颗粒细小(<0.3mm)(图2h)。岩石中斜长石多已退变为葡萄石和钠长石微晶(0.05~0.1mm),最后阶段的前绿片岩相形成的葡萄石脉和钠长石脉也有出现。

(3) 单斜角闪岩: 岩石主要由角闪石(60%~70%)、单斜辉石(10%~15%)、斜长石(10%~15%)以及葡萄石和绿帘石(5%)等矿物组成;副矿物为榴石、磷灰石、钛铁矿,有时镜下可见金红石和锆石(图2h)。早期角闪石( $Am_2$ )为棕黄色、自形-半自形晶,部分发生弯曲变形,粒径1~2mm,粗粒的可达3~5mm,晚期角闪石( $Am_3$ )他形晶颗粒细小(<0.5mm),分布在基质中;单斜辉石,半自形,粒径1~2mm;斜长石主要分布于角闪石、辉石大矿物颗粒间隙中,大多已分解成具有斜长石假象的细小的葡萄石-钠长石后成合晶(图2h),也可见晚期葡萄石和钠长石脉体。

### 4 分析方法

矿物的电子探针分析数据是在德国 Ruhr University

Bochum 电子探针实验室完成,仪器型号 Cameca SX50;分析条件:加速电压 15kV,束流 15nA。用天然矿物硬玉(Si)、镁橄榄石(Mg)、铁铝榴石(Fe)、钠长石(Na, Al)、金红石(Ti)、锰铝榴石(Mn)、透长石(K)和  $Cr_2O_3$ (Cr)做标准样品。

主微量元素在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学重点实验室完成。主量元素采用 PW4400 型 X 荧光仪全岩分析,测定 10 种元素氧化物含量;微量元素采用 ICP-MS 电感耦合等离子体质谱分析仪进行测试,ICP-MS 由日本东京安捷伦公司制造,型号为 Agilent 7700x,分析方法如 Liang and Grégoire (2000)。根据对标准样品 GBPC-1de 分析结果,分析误差 <5%。文中使用的矿物代号引自 Kretz (1983)。

### 5 矿物化学特征

白朗地区石榴角闪岩主要由石榴石、单斜辉石、角闪石、长石、绿帘石和葡萄石等组成;此外还有榴石、黄铁矿和磷灰石等副矿物,也见有钛铁矿和金红石。我们将石榴石内部残留的矿物定义为 M1 阶段,与石榴石变晶和单斜辉石变晶平衡的矿物组合定义为 M2 阶段,与退变质后成合晶平衡的组合定义为 M3 阶段,晚期的葡萄石、方解石和钠长石脉为 M4 阶段。

石榴角闪岩中,石榴石颗粒的成分比较均匀,只在边部与核幔部有些差异,比较明显的变化表现为退变质过程中钙铝榴石组分有所降低,镁铝榴石组分的轻微增加(表1、图3)。电子探针矿物组分分析表明石榴石核部(M2)的成分为  $Alm_{43.25-44.59} Py_{28.08-28.69} Spe_{1.12-1.19} A_{dr}_{3.63-5.97} Grs_{20.64-22.03} Urv_{0.21-1.08}$ ,而石榴石边部(M3)的成分为  $Alm_{43.82-44.18} Py_{28.69-29.58} Spe_{1.16-1.82} A_{dr}_{4.22-5.49} Grs_{19.43-20.57} Urv_{0.21-0.28}$ 。由此可见,在石榴石生长过程中,石榴石的镁铝榴石成分和  $Mg^{\#}$  略微增加,钙铝榴石成分有轻微的减少,而其他端员成分变化不大或没有规律(图3)。这种石榴石成分变化不明显的特征是雅江带石榴角闪岩中常见的情况(Guilmette *et al.*, 2009, 2012)。基质中的细小石榴石,视为 M3 阶段,或许是

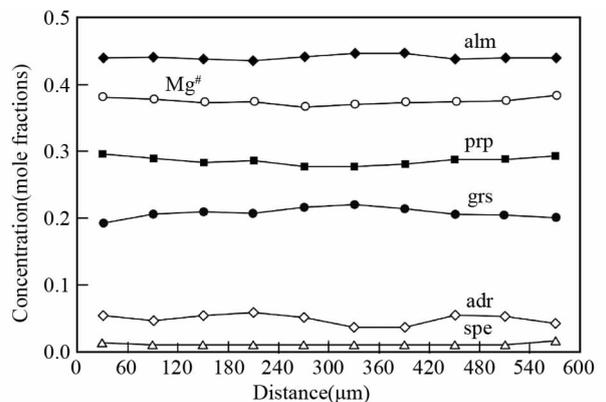


图3 石榴石变斑晶的成分环带图

Fig. 3 Garnet profile showing compositional zoning

表1 日喀则地区代表性石榴石的矿物化学成分特征(wt%)

Table 1 EPMA analyses of representative garnet compositions in garnet amphibolites from the Xigaze ophiolite (wt%)

| Spot No.                       | 13BL13<br>-gt1   | 13BL13<br>-gt2 | 13BL13<br>-gt3 | 13BL13<br>-gt4 | 13BL13<br>-gt5 | 13BL13<br>-gt6 | 13BL13<br>-gt7 | 13BL13<br>-gt8 | 13BL13<br>-gt9 | 13BL13<br>-gt10 | 13BL22<br>-Gt37 | 13BL22<br>-Gt38 |
|--------------------------------|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Occurrence                     | Grt-r  | Grt-r          | Grt-c          | Grt-r           | Grt-r           | Grt             |
| Stage                          | M3   | M3             | M2             | M3              | M3              | M3              |
| Position                       | compositional profile of one grain garnet corresponding to Fig. 2a |                |                |                |                |                |                |                |                |                 | in matrix       |                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 38.63  | 38.71          | 38.69          | 38.72          | 38.88          | 38.63          | 38.65          | 38.54          | 38.55          | 38.75           | 39.13           | 39.89           |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.11   | 0.11           | 0.13           | 0.15           | 0.16           | 0.17           | 0.18           | 0.16           | 0.09           | 0.11            | 0.08            | 0.06            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 22.05  | 21.90          | 21.61          | 21.78          | 21.29          | 22.30          | 22.13          | 21.98          | 22.02          | 21.91           | 22.50           | 21.71           |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.08   | 0.09           | 0.10           | 0.08           | 0.07           | 0.25           | 0.37           | 0.08           | 0.09           | 0.07            | 0.08            | 0.10            |
| FeO                            | 22.02  | 21.96          | 21.99          | 22.03          | 22.23          | 21.68          | 21.42          | 21.68          | 22.14          | 21.85           | 20.70           | 20.13           |
| MnO                            | 0.645  | 0.567          | 0.563          | 0.546          | 0.54           | 0.52           | 0.51           | 0.51           | 0.53           | 0.83            | 0.27            | 0.72            |
| MgO                            | 7.67   | 7.53           | 7.37           | 7.459          | 7.19           | 7.20           | 7.32           | 7.62           | 7.10           | 7.23            | 7.45            | 8.53            |
| CaO                            | 9.082  | 9.252          | 9.68           | 9.733          | 9.75           | 9.55           | 9.40           | 9.584          | 9.78           | 9.34            | 10.31           | 9.28            |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.02   | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.02           | 0.03           | 0.00           | 0.00           | 0.04            | 0.01            | 0.01            |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00   | 0.01           | 0.00           | 0.001          | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00            | 0.01            | 0.00            |
| Total                          | 100.29   | 100.14         | 100.13         | 100.50         | 100.11         | 100.33         | 100.01         | 100.14         | 100.30         | 100.12          | 100.53          | 100.43          |
| O                              | 12   |                |                |                |                |                |                |                |                |                 |                 |                 |
| Si                             | 2.95   | 2.96           | 2.96           | 2.95           | 2.98           | 2.95           | 2.96           | 2.94           | 2.95           | 2.97            | 2.97            | 3.02            |
| Al                             | 1.98   | 1.97           | 1.95           | 1.96           | 1.93           | 2.00           | 1.99           | 1.98           | 1.98           | 1.98            | 2.01            | 1.94            |
| Ti                             | 0.01   | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01            | 0.00            | 0.00            |
| Cr                             | 0.00   | 0.01           | 0.01           | 0.00           | 0.00           | 0.02           | 0.02           | 0.00           | 0.01           | 0.00            | 0.00            | 0.01            |
| Fe <sub>3</sub>                | 0.11   | 0.10           | 0.11           | 0.12           | 0.10           | 0.08           | 0.07           | 0.12           | 0.11           | 0.09            | 0.04            | 0.01            |
| Fe                             | 1.29   | 1.31           | 1.30           | 1.28           | 1.31           | 1.31           | 1.31           | 1.29           | 1.30           | 1.30            | 1.27            | 1.26            |
| Mg                             | 0.87   | 0.86           | 0.84           | 0.85           | 0.82           | 0.82           | 0.83           | 0.85           | 0.85           | 0.86            | 0.84            | 0.96            |
| Mn                             | 0.04   | 0.04           | 0.04           | 0.04           | 0.04           | 0.03           | 0.03           | 0.03           | 0.03           | 0.05            | 0.02            | 0.05            |
| Ca                             | 0.74   | 0.76           | 0.79           | 0.80           | 0.80           | 0.78           | 0.77           | 0.78           | 0.77           | 0.74            | 0.84            | 0.75            |
| Na                             | 0.00   | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.01            | 0.00            | 0.00            |
| K                              | 0.00   | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00            | 0.00            | 0.00            |
| Alm                            | 43.82  | 44.18          | 43.70          | 43.25          | 44.01          | 44.55          | 44.59          | 43.63          | 43.92          | 43.97           | 42.85           | 41.69           |
| Pyr                            | 29.58  | 28.98          | 28.32          | 28.58          | 27.69          | 27.80          | 28.08          | 28.69          | 28.79          | 29.29           | 28.37           | 31.87           |
| Spe                            | 1.41   | 1.24           | 1.23           | 1.19           | 1.19           | 1.15           | 1.12           | 1.12           | 1.16           | 1.82            | 0.58            | 1.54            |
| Adr                            | 5.49   | 4.72           | 5.42           | 5.97           | 5.16           | 3.66           | 3.63           | 5.68           | 5.32           | 4.22            | 2.01            | 0.75            |
| Grs                            | 19.43  | 20.57          | 20.99          | 20.74          | 21.72          | 22.03          | 21.38          | 20.64          | 20.50          | 20.48           | 25.92           | 23.82           |
| Uvr                            | 0.23   | 0.28           | 0.30           | 0.24           | 0.21           | 0.73           | 1.08           | 0.22           | 0.28           | 0.21            | 0.25            | 0.31            |
| Sch                            | 0.02   | 0.03           | 0.03           | 0.03           | 0.02           | 0.08           | 0.12           | 0.02           | 0.03           | 0.02            | 0.03            | 0.03            |

注:Grt-c 代表石榴石核部成分;Grt-r 代表边缘的成分

峰期 Grt-c 退变后的残留产物,应该相当于石榴石变晶边缘 Grt-r (M3) 的性质,但因其细小,与基质中其它晚期矿物平衡后,其化学成分有所变化: Alm<sub>41.96-42.85</sub> Pyr<sub>28.37-31.87</sub> Spe<sub>0.58-1.54</sub> Adr<sub>0.75-2.01</sub> Grs<sub>23.82-25.92</sub> Urv<sub>0.25-0.31</sub> ○

单斜辉石也可分为两个生长阶段,皆为透辉石,由于没有发现石榴石内部的单斜辉石包体,大颗粒变晶单斜辉石代表 M2 阶段(图 2b),表示早期变质阶段;与石榴石接触边缘的单斜辉石代表 M3 阶段(图 2a),与基质中的矿物组合平衡。从 M2 阶段到 M3 阶段,辉石成分中 MgO 的含量增加, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的含量减少(表 2),晚期的单斜辉石近乎端元的透辉石成分。

角闪石可以明确划分出三个阶段,即石榴石晶体中的残留的早期角闪石包裹体(M1)(图 2a, c); 基质中交代单斜辉

石并保留有单斜辉石假象的大颗粒角闪石(M3)(图 2b),及其大颗粒角闪石边缘或基质中后期形成的细小颗粒角闪石(M4)(图 2b, e)。显微结构显示 M3 阶段的角闪石也出现在石榴石分解形成的后合成晶结构中(图 2b)。根据 Leake *et al.* (1997) 的分类, M1 和 M3 阶段的角闪石为非闪石和镁普通角闪石, M4 阶段基质中与葡萄石同时结晶的细小颗粒角闪石是普通角闪石(表 2)。

长石主要为斜长石和钠长石(表 3)。石榴石晶体中的残留的斜长石包裹体代表 M1 阶段,其成分为中长石 An<sub>37.70-39.62</sub> Ab<sub>60.32-62.06</sub> Or<sub>0.06-0.24</sub> (图 2b); M2 阶段没有测到合适的长石化学成分,但应该存在,只是在后期分解为 Ab + Prh, 仍然保留了斜长石的假象(图 2b-d); M3 阶段以石榴石分解形成的后合成晶结构中的中长石为代表 An<sub>38.78-43.82</sub> Ab<sub>60.93-56.03</sub>

表2 日喀则地区代表性辉石和角闪石的矿物化学成分特征 (wt%)

Table 2 EPMA analyses of representative clinopyroxene and amphibole compositions in garnet amphibolites from the Xigaze ophiolite

(wt%)

| Spot No.                       | 13BL13-30 | 13BL13-33 | 13BL13-29 | 13BL13-61 | 13BL13-28 | 13BL13-63 | 13BL13-40           | 13BL13-41 | 13BL13-1         | 13BL13-2 | 13BL13-3 | 13BL13-4          | 13BL13-6 | 13BL13-16 | 13BL22-6           | 13BL22-12 |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------------|-----------|------------------|----------|----------|-------------------|----------|-----------|--------------------|-----------|
| Occurrence                     | Cpx-e     |           |           |           | Cpx-l     |           | Am inclusion in Grt |           | Am porphyroblast |          |          | Am in symplectite |          |           | small Am in matrix |           |
| Stage                          | M2        |           |           |           | M3        |           | M1                  |           | M3               |          |          | M3                |          |           | M4                 |           |
| SiO <sub>2</sub>               | 47.85     | 47.78     | 48.33     | 48.23     | 51.30     | 51.13     | 42.95               | 42.40     | 40.89            | 40.07    | 41.39    | 47.71             | 45.67    | 48.83     | 50.67              | 49.53     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.71      | 0.59      | 0.66      | 0.82      | 0.26      | 0.29      | 1.72                | 0.49      | 0.96             | 1.36     | 1.39     | 0.48              | 0.72     | 0.40      | 0.13               | 0.34      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.31      | 7.12      | 9.36      | 6.85      | 2.87      | 3.30      | 14.90               | 15.03     | 15.03            | 14.23    | 14.27    | 7.16              | 9.74     | 7.22      | 7.18               | 7.12      |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.03      | 0.09      | 0.04      | 0.09      | 0.05      | 0.06      | 0.15                | 0.12      | 0.10             | 0.04     | 0.06     | 0.07              | 0.00     | 0.15      | 0.01               | 0.12      |
| FeO                            | 7.34      | 7.37      | 7.67      | 8.33      | 5.69      | 5.87      | 11.71               | 12.43     | 15.08            | 11.86    | 12.49    | 12.83             | 12.87    | 11.50     | 8.22               | 9.51      |
| MnO                            | 0.13      | 0.09      | 0.16      | 0.11      | 0.09      | 0.10      | 0.14                | 0.17      | 0.28             | 0.20     | 0.23     | 0.22              | 0.27     | 0.25      | 0.09               | 0.22      |
| MgO                            | 12.86     | 12.87     | 11.61     | 13.31     | 14.43     | 14.33     | 12.98               | 13.00     | 13.14            | 12.84    | 13.28    | 14.97             | 14.01    | 14.79     | 17.42              | 17.28     |
| CaO                            | 22.12     | 22.55     | 21.29     | 20.75     | 24.14     | 24.06     | 11.37               | 11.62     | 9.84             | 11.89    | 12.07    | 12.85             | 12.84    | 13.83     | 12.78              | 12.60     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.84      | 0.81      | 0.69      | 0.75      | 0.47      | 0.50      | 2.16                | 2.72      | 2.21             | 2.53     | 2.45     | 1.30              | 1.54     | 1.04      | 1.36               | 1.09      |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01      | 0.01      | 0.02      | 0.03      | 0.01      | 0.01      | 0.12                | 0.11      | 0.15             | 0.13     | 0.13     | 0.05              | 0.04     | 0.05      | 0.05               | 0.05      |
| Total                          | 99.19     | 99.29     | 99.83     | 99.27     | 99.31     | 99.65     | 98.18               | 98.06     | 97.66            | 97.99    | 97.75    | 97.65             | 97.72    | 98.06     | 97.90              | 97.85     |
| O                              | 6         |           |           |           | 23        |           |                     |           |                  |          |          |                   |          |           |                    |           |
| Si                             | 1.80      | 1.80      | 1.79      | 1.81      | 1.91      | 1.90      | 6.23                | 6.20      | 6.06             | 6.07     | 6.10     | 6.98              | 6.70     | 7.07      | 7.19               | 7.09      |
| Al                             | 0.32      | 0.32      | 0.41      | 0.30      | 0.13      | 0.14      | 2.55                | 2.59      | 2.63             | 2.54     | 2.48     | 1.24              | 1.68     | 1.23      | 1.20               | 1.20      |
| Ti                             | 0.02      | 0.02      | 0.02      | 0.02      | 0.01      | 0.01      | 0.19                | 0.05      | 0.11             | 0.15     | 0.15     | 0.05              | 0.08     | 0.04      | 0.01               | 0.04      |
| Cr                             | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.02                | 0.01      | 0.01             | 0.01     | 0.01     | 0.01              | 0.00     | 0.02      | 0.00               | 0.01      |
| Mg                             | 0.72      | 0.72      | 0.64      | 0.74      | 0.80      | 0.79      | 2.81                | 2.83      | 2.90             | 2.90     | 2.92     | 3.27              | 3.06     | 3.19      | 3.68               | 3.69      |
| Fe                             | 0.23      | 0.23      | 0.24      | 0.26      | 0.18      | 0.18      | 1.42                | 1.52      | 1.87             | 1.50     | 1.54     | 1.57              | 1.58     | 1.39      | 0.97               | 1.14      |
| Mn                             | 0.00      | 0.00      | 0.01      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.02                | 0.02      | 0.04             | 0.03     | 0.03     | 0.03              | 0.03     | 0.03      | 0.01               | 0.03      |
| Ca                             | 0.89      | 0.91      | 0.85      | 0.83      | 0.96      | 0.96      | 1.77                | 1.82      | 1.56             | 1.93     | 1.91     | 2.01              | 2.02     | 2.14      | 1.94               | 1.93      |
| Na                             | 0.06      | 0.06      | 0.05      | 0.05      | 0.03      | 0.04      | 0.61                | 0.77      | 0.64             | 0.74     | 0.70     | 0.37              | 0.44     | 0.29      | 0.37               | 0.30      |
| K                              | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.00      | 0.02                | 0.02      | 0.03             | 0.02     | 0.02     | 0.01              | 0.01     | 0.01      | 0.01               | 0.01      |
| Mg <sup>#</sup>                | 0.76      | 0.76      | 0.73      | 0.74      | 0.82      | 0.81      | 0.66                | 0.65      | 0.61             | 0.66     | 0.65     | 0.68              | 0.66     | 0.70      | 0.79               | 0.76      |
| Wo                             | 0.48      | 0.49      | 0.49      | 0.45      | 0.50      | 0.49      |                     |           |                  |          |          |                   |          |           |                    |           |
| En                             | 0.39      | 0.39      | 0.37      | 0.40      | 0.41      | 0.41      |                     |           |                  |          |          |                   |          |           |                    |           |
| Fs                             | 0.13      | 0.12      | 0.14      | 0.14      | 0.09      | 0.09      |                     |           |                  |          |          |                   |          |           |                    |           |

注: Cpx-e 代表早期单斜辉石成分; Cpx-l 代表晚期单斜辉石成分

表3 日喀则地区代表性长石的矿物化学成分特征 (wt%)

Table 3 EPMA analyses of representative plagioclase compositions in garnet amphibolites from the Xigaze ophiolite (wt%)

| Spot No.                       | 13BL13-Pl10         | 13BL13-Pl50 | 13BL13-Pl12       | 13BL13-Pl13 | 13BL13-Pl43 | 13BL13-Pl49 | 13BL13-Ab14      | 13BL22-Ab21 | 13BL22-Ab44 |  |
|--------------------------------|---------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|--|
| Occurrence                     | Pl inclusion in Grt |             | Pl in symplectite |             |             |             | Ab in the matrix |             |             |  |
| Stage                          | M1                  |             | M3                |             |             |             | M4               |             |             |  |
| SiO <sub>2</sub>               | 60.14               | 57.49       | 57.31             | 58.33       | 56.59       | 57.99       | 67.27            | 67.85       | 65.29       |  |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.02                | 0.00        | 0.01              | 0.01        | 0.03        | 0.01        | 0.00             | 0.00        | 0.02        |  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 21.61               | 23.10       | 22.99             | 21.68       | 22.63       | 22.25       | 19.51            | 19.71       | 20.56       |  |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.02                | 0.00        | 0.01              | 0.00        | 0.03        | 0.00        | 0.01             | 0.00        | 0.03        |  |
| FeO                            | 0.06                | 1.04        | 1.17              | 0.325       | 1.36        | 0.61        | 0.19             | 0.03        | 0.88        |  |
| MnO                            | 0.03                | 0.06        | 0.08              | 0.021       | 0.10        | 0.04        | 0.00             | 0.00        | 0.01        |  |
| MgO                            | 0.01                | 0.79        | 1.06              | 0.01        | 1.47        | 0.32        | 0.01             | 0.04        | 0.30        |  |
| CaO                            | 9.67                | 8.87        | 9.15              | 11.01       | 9.51        | 10.15       | 0.44             | 0.29        | 0.47        |  |
| Na <sub>2</sub> O              | 8.13                | 8.06        | 7.95              | 7.78        | 7.71        | 7.89        | 11.78            | 11.79       | 11.63       |  |
| K <sub>2</sub> O               | 0.01                | 0.05        | 0.06              | 0.031       | 0.08        | 0.04        | 0.12             | 0.13        | 0.10        |  |
| Total                          | 99.70               | 99.46       | 99.79             | 99.195      | 99.51       | 99.30       | 99.32            | 99.84       | 99.28       |  |
| O                              | 8                   |             |                   |             |             |             |                  |             |             |  |
| Si                             | 2.72                | 2.63        | 2.62              | 2.67        | 2.61        | 2.66        | 2.97             | 2.98        | 2.90        |  |
| Al                             | 1.15                | 1.25        | 1.24              | 1.17        | 1.23        | 1.20        | 1.02             | 1.02        | 1.08        |  |

续表 3

Continued Table 3

| Spot No.   | 13BL13-P110         | 13BL13-P150 | 13BL13-P112       | 13BL13-P113 | 13BL13-P143 | 13BL13-P149 | 13BL13-Ab14      | 13BL22-Ab21 | 13BL22-Ab44 |
|------------|---------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|-------------|-------------|
| Occurrence | Pl inclusion in Grt |             | Pl in symplectite |             |             |             | Ab in the matrix |             |             |
| Stage      | M1                  |             | M3                |             |             |             | M4               |             |             |
| Ti         | 0.00                | 0.00        | 0.00              | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.00             | 0.00        | 0.00        |
| Cr         | 0.00                | 0.00        | 0.00              | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.00             | 0.00        | 0.00        |
| Ba         | 0.00                | 0.00        | 0.00              | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.00             | 0.00        | 0.00        |
| Mg         | 0.00                | 0.00        | 0.01              | 0.00        | 0.01        | 0.00        | 0.00             | 0.00        | 0.02        |
| Fe         | 0.00                | 0.03        | 0.04              | 0.00        | 0.06        | 0.01        | 0.00             | 0.00        | 0.03        |
| Mn         | 0.00                | 0.04        | 0.05              | 0.01        | 0.05        | 0.02        | 0.01             | 0.00        | 0.00        |
| Ca         | 0.47                | 0.43        | 0.45              | 0.54        | 0.47        | 0.50        | 0.02             | 0.01        | 0.02        |
| Na         | 0.71                | 0.72        | 0.71              | 0.69        | 0.69        | 0.70        | 1.01             | 1.00        | 1.00        |
| K          | 0.00                | 0.00        | 0.00              | 0.00        | 0.00        | 0.00        | 0.01             | 0.01        | 0.01        |
| An         | 39.62               | 37.70       | 38.78             | 43.82       | 40.37       | 41.47       | 2.00             | 1.33        | 2.18        |
| Ab         | 60.32               | 62.06       | 60.92             | 56.03       | 59.23       | 58.35       | 97.35            | 97.95       | 97.28       |
| Or         | 0.06                | 0.24        | 0.30              | 0.15        | 0.40        | 0.18        | 0.65             | 0.72        | 0.54        |

表 4 日喀则地区绿帘石/斜黝帘石和其他矿物的化学成分特征 (wt%)

Table 4 EPMA analyses of representative epidote/clinozoisite and other mineral compositions in garnet amphibolites from the Xigaze (wt%)

| Spot No.                       | 13BL13-2<br>-Ep15 | 13BL13<br>-Ep1 | 13BL13<br>-Ep2 | 13BL22<br>-Ep1 | 13BL13<br>-2-Ep16 | 13BL13-2<br>-czo17 | 13BL13-2<br>-czo18 | 13BL13-2<br>-czo19 | 13BL13-2<br>-czo27 | 13BL13<br>-Prh | 13BL13<br>-Prh | 13BL13<br>-Chl |
|--------------------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|
| Stage                          | M1                | M2             | M2             | M3             | M3                | M3                 | M3                 | M4                 | M4                 | M4 (6) *       | M4 (2) *       | M4 (2) *       |
| SiO <sub>2</sub>               | 38.04             | 37.70          | 37.63          | 37.63          | 38.18             | 38.87              | 39.16              | 39.21              | 38.99              | 41.92          | 42.70          | 24.31          |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.05              | 0.08           | 0.09           | 0.09           | 0.07              | 0.00               | 0.01               | 0.00               | 0.02               | 0.01           | 0.07           | 0.01           |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 26.28             | 26.04          | 25.78          | 25.91          | 26.15             | 29.93              | 29.48              | 29.01              | 29.20              | 24.54          | 23.14          | 19.25          |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.01              | 0.03           | 0.03           | 0.03           | 0.02              | 0.00               | 0.00               | 0.01               | 0.01               | 0.01           | 0.02           | 0.13           |
| FeO                            | 8.60              | 7.99           | 8.58           | 8.39           | 8.00              | 2.54               | 2.08               | 1.89               | 2.33               | 1.02           | 0.02           | 0.11           |
| MnO                            | 0.10              | 0.25           | 0.13           | 0.19           | 0.14              | 0.06               | 0.17               | 0.10               | 0.23               | 0.06           | 0.16           | 7.43           |
| MgO                            | 0.10              | 1.17           | 1.02           | 0.98           | 0.04              | 0.04               | 0.04               | 0.01               | 0.00               | 0.65           | 1.30           | 36.00          |
| CaO                            | 23.33             | 23.93          | 23.96          | 23.96          | 23.81             | 23.99              | 24.16              | 25.13              | 24.36              | 25.33          | 26.46          | 0.29           |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.00              | 0.01           | 0.01           | 0.01           | 0.01              | 0.01               | 0.03               | 0.01               | 0.10               | 0.31           | 0.05           | 0.02           |
| K <sub>2</sub> O               | 0.00              | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.01              | 0.03               | 0.01               | 0.00               | 0.00               | 0.01           | 0.00           | 0.01           |
| Total                          | 96.52             | 97.20          | 97.22          | 97.19          | 96.42             | 95.46              | 95.13              | 95.37              | 95.23              | 93.85          | 93.93          | 87.57          |
| O                              |                   |                | 12.5           |                |                   |                    |                    | 12.5               |                    |                | 11             | 14             |
| Si                             | 2.44              | 2.93           | 2.93           | 2.93           | 2.43              | 2.76               | 2.73               | 2.68               | 2.70               | 2.94           | 2.99           | 2.38           |
| Al                             | 0.00              | 2.39           | 2.37           | 2.38           | 0.00              | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 2.03           | 1.91           | 2.22           |
| Ti                             | 0.00              | 0.00           | 0.01           | 0.01           | 0.00              | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| Cr                             | 0.55              | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.54              | 0.15               | 0.12               | 0.17               | 0.19               | 0.00           | 0.00           | 0.01           |
| Mg                             | 0.01              | 0.14           | 0.12           | 0.11           | 0.00              | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.07           | 0.14           | 5.25           |
| Fe                             | 0.01              | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00              | 0.01               | 0.02               | 0.00               | 0.00               | 0.06           | 0.00           | 0.01           |
| Mn                             | 0.01              | 0.02           | 0.01           | 0.01           | 0.01              | 0.00               | 0.01               | 0.01               | 0.02               | 0.00           | 0.01           | 0.61           |
| Ca                             | 1.97              | 2.00           | 2.00           | 2.00           | 2.01              | 2.01               | 2.03               | 2.11               | 2.05               | 1.91           | 1.99           | 0.03           |
| Na                             | 0.00              | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00              | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.02               | 0.04           | 0.01           | 0.00           |
| K                              | 0.00              | 0.00           | 0.00           | 0.00           | 0.00              | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00               | 0.00           | 0.00           | 0.00           |

注: M4 (6) \* 表示 6 个测点的平均值

Or<sub>0.30-0.15</sub> (图 2a); 此外, 还有基质中代表 M4 前绿片岩阶段的钠长石 Ab<sub>97.28-97.95</sub> (图 2b-d)。

绿帘石族矿物, 有绿帘石和斜黝帘石两种, 形成于各个变质阶段; M1 阶段绿帘石被包裹在石榴石中 (图 2d); M2 阶段绿帘石与石榴石平衡共存, 石榴石被绿帘石替代, 石榴石

呈孤岛状残留 (图 2c); M3 阶段见绿帘石, 也有斜黝帘石, 是穿插在石榴石裂隙中的脉体 (图 2d), 靠近石榴石处形成绿帘石, 近斜长石处形成斜黝帘石。事实上, 绿帘石在 M2 和 M3 阶段在结构和成分上都是很难区分的, 但确与这两个阶段的矿物组合平衡相处; 这与视剖面图中 M2、M3 阶段矿

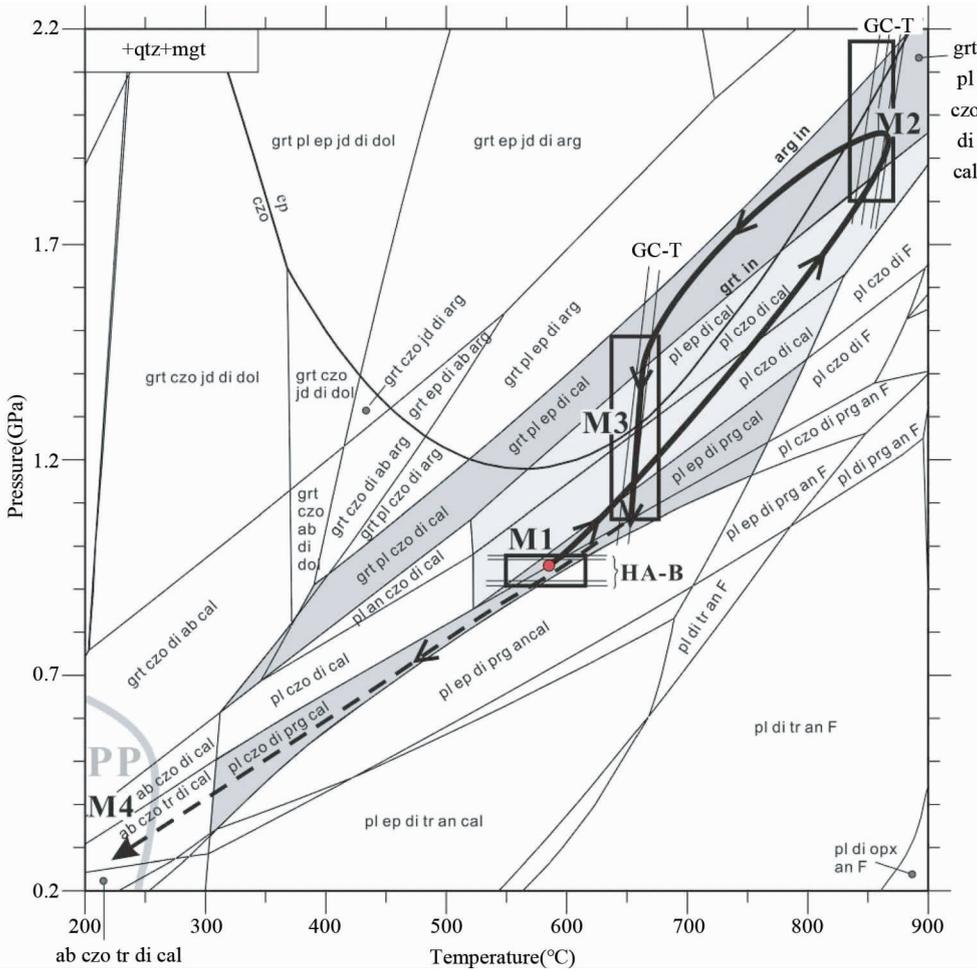


图4 日喀则白朗地区石榴角闪岩的  $P$ - $T$  轨迹

GC-T 表示 Ravna (2000) Cpx-Grt 温度计计算出的温度范围; HA-B 表示 Schmidt (1992) 的角闪分子中 Al 含量压力计计算出的等压线; PP 代表葡萄石-绿帘石相; F 表示流体相, 其他矿物代号取自 Kretz (1983)

Fig. 4 Estimated  $P$ - $T$  path of Bailang garnet amphibolites in the Xigaze ophiolite

GC-T for temperature range calculated by Ravna (2000) Cpx-Grt geothermometer; HA-B for isobar lines calculated by Schmidt (1992) geobarometer; PP represented for prehnite-pumpellyite facies; F for fluid, other mineral symbols after Kretz (1983)

物组合的变化是一致的(图4); M4 阶段是黝帘石, 与葡萄石一样形成于晚期脉状体, 穿过 M3 阶段的角闪石矿物(图2e)。不同变质阶段的绿帘石和斜黝帘石在化学成分上没有表现出很大差别(表4)。

其他矿物如葡萄石、绿泥石与钠长石一起形成于变质作用的第四阶段 M4——葡萄石-绿帘石阶段(表4、图2e, f)。榴石既可作为包裹体出现在石榴石中经历 M1 阶段的变质作用(图2a), 也在 M3 阶段稳定存在(图2b)。

综上所述, 岩石中保留了四个阶段的变质矿物组合。第一个阶段(M1): 石榴石和单斜辉石中保留有早期变质矿物组合  $Am_1 + Pl_1 + Ep_1 + Ttn$ (图2a, b); 第二个阶段(M2): 峰期变质阶段的 Grt 核部、Cpx 和 Ep, 有的样品中见有金红石(图2c), 这一阶段的主要矿物组合为 Grt-c(石榴石核部) + Cpx-e(早期单斜辉石) +  $Ep_2 + Rt$ 。第三个阶段(M3): 退变质过程中, 角闪石交代单斜辉石(图2b), Grt 退变分解为

Am-Pl 的后成合晶矿物组合(图2a), 矿物组合为 Grt-r(石榴石变晶的边部) +  $Am_3 + Pl_3 + Cpx-l$ (晚期单斜辉石) +  $Ep_3/Czo_3 + Ttn$ 。第四个阶段(M4): 最终斜长石分解为细小的钠长石和葡萄石, 斜黝帘石脉, 其矿物组合为  $Prh + Ab + Czo_4 + Chl + Cal$ (图2b-d)。

## 6 温压条件计算及 $P$ - $T$ 轨迹特征

根据单斜石榴角闪岩的主元素化学成分, 利用 Theriak 计算程序和 Holland and Powell (1998) 的热力学数据, 计算出 SAFMCNHO 体系岩石矿物组合演化的 PT 视剖面图。岩石矿物成分采用样品 13BL05 的主元素 XRF 成分, 将视剖面图选用的氧化物成分, 换算成 100% 后为  $SiO_2$  (46.19)、 $Al_2O_3$  (13.45)、 $Fe_2O_3$  (12.23)、 $MgO$  (9.63)、 $CaO$  (15.38)、 $Na_2O$  (1.15)、 $H_2O$  (1.96), 根据体系阴阳离子平衡, 计算出  $O = 157.5$ ,

表5 日喀则石榴角闪岩各变质阶段温压估算

Table 5 Summary of temperature and pressure condition during each metamorphic stage of Xigaze garnet amphibolite

| Metamorphic stage | mineral assemblage                 | $P$ (kb)    | $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ ) | thermobarometer                                     | references   |
|-------------------|------------------------------------|-------------|----------------------------|---|--|
| M1                | Am inclusions in garnet            | 9.1 ~ 9.8   |                            | BA-B Hbl-Al borometer                               | Hollister <i>et al.</i> , 1993; Schmidt (1992)                                   |
|                   | Cpx-e-Grt-c                        |             | 830 ~ 870                  | GC-T Cpx-Grt thermometer                            | Ravna (2000)   |
| M2                | 视剖面矿物组合稳定域                         | 18.0 ~ 22.0 |                            | Grt-Di-Ep-Pl-Cal 矿物组合                               | 利用 Domino 软件, Holland and Powell, 1998 热力学数据库计算得出的视剖面稳定域                         |
|                   | Cpx <sub>r</sub> -Grt <sub>r</sub> |             | 640 ~ 680                  | GC-T Cpx-Grt thermometer                            | Ravna (2000)   |
| M3                | 视剖面矿物组合稳定域                         | 10.7 ~ 14.9 |                            | ① Pl-Ep-Di-cal; ② Pl-czo-di cal; ③ Pl-Ep-Di-Prg-Cal | 根据岩相学矿物反应结构(图 2a-d), 结合利用 Domino 软件, Holland and Powell (1998) 热力学数据库计算得出的视剖面稳定域 |
| M4                | Prh-Ab-Czo-Chl-cal                 | <6          | <205                       |   | 根据葡萄石相-绿纤石相的矿物组合   |

将该数字输入计算程序得出视剖面图。各矿物组合稳定域中都有石英和磁铁矿出现。首先确定出研究样品矿物组合所在的范围(图 4, 灰色区域), 再根据图 2 揭示的矿物反应结构、前面所述的不同变质阶段的矿物组合, 利用传统的温度压力计, 确定不同阶段的温压条件(表 5、图 4)。

M1 阶段的矿物组合为  $\text{Am}_1 + \text{Pl}_1 + \text{Ep}$ , 根据视剖面中这一矿物组合的稳定域范围, 再结合石榴石中角闪石包体的成分  $\text{Am}_1$ , 利用 Hollister *et al.* (1987) 和 Schmidt (1992) 的角闪分子中 Al 含量压力计, 计算出 M1 阶段的等压线 HA-B, 从而得出 M1 阶段的温压为  $560 \sim 620^{\circ}\text{C}/9.1 \sim 9.8 \text{ kbar}$ 。

M2 阶段的矿物组合为  $\text{Grt-c} + \text{Cpx-e} + \text{Pl}_2 + \text{Ep}_2 + \text{Rt}$ , 根据 Ravna (2000) Cpx-Grt 温度计分别计算出 M2 阶段的近等温线 GC-T。由于这一阶段没有检测到  $\text{Pl}_2$  的化学成分, 没有找到代表性的矿物估算压力, 利用视剖面图中的矿物组合稳定域, 上限受  $\text{Cal} \rightarrow \text{Arg}$  反应方程的控制(图 4)。通过显微镜下鉴定, 结合彩色 CL 图像研究, 所研究的岩石中没有发现文石(图 2d)。文石的彩色 CL 图像的颜色应该为淡绿色, Mg-方解石的 CL 色为橘黄色, 普通方解石为淡黄色(Schertl and Sobolev, 2013; Schertl *et al.*, 2015)。石榴石进入反应是该稳定域的下限, 因此形成的压力要高于这一反应, 但低于  $\text{Cal} \rightarrow \text{Arg}$  是方解石转化为文石的反应。因此 M2-峰期变质阶段的温压为  $830 \sim 870^{\circ}\text{C}/18.0 \sim 22.0 \text{ kbar}$ 。

M3 阶段的矿物组合为  $\text{Grt-r} + \text{Cpx-l} + \text{Am}_3 + \text{Pl}_3 + \text{Ttn}$ 。根据 Ravna (2000) Cpx-Grt 温度计分别计算出 M3 阶段的近等温线 GC-T。压力仍然根据视剖面图中的矿物组合稳定域。这一阶段是一等温降压过程, 跨越了几个变质反应, 表现在跨越几个视剖面的矿物组合稳定域, 由于快速折返的近等温减压过程, 没有必要再细分阶段, 所跨越的矿物组合稳定域包括①Pl-Ep-Di-cal; ②Pl-czo-di-cal; ③Pl-Ep-Di-Prg-Cal, 图 2(c, d) 的反应结构也说了这个快速的等温减压过程, 这

一阶段结束于石榴石分解为  $\text{Am}_3 + \text{Pl}_3$  的后成合晶组合, 与③Pl-Ep-Di-Prg-Cal 矿物组合相吻合; 从而获得 M3 变质阶段的温压为  $640 \sim 680^{\circ}\text{C}/10.7 \sim 14.9 \text{ kbar}$ 。

M4 前绿片岩阶段的矿物组合  $\text{Prh} + \text{Czo} + \text{Ab} + \text{Chl} + \text{Cal}$ , 为典型的葡萄石-绿纤石相矿物组合, 其温压条件  $<205^{\circ}\text{C}/6 \text{ kbar}$ (图 4)。由于没有发现钙长石(An), 从 M3 变质阶段到 M4 阶段的  $P$ - $T$  轨迹可能沿着视剖面中矿物组合 Pl-Ep-Di-Prg-Cal 的稳定域进行( $P$ - $T$  轨迹的虚线部分)。

## 7 地球化学特征

日喀则变质基性岩包括石榴角闪岩、角闪辉石岩和单辉角闪石岩的全岩主量、微量及稀土元素分析结果见表 6。

### 7.1 主量元素特征

日喀则白朗石榴角闪岩、角闪辉石岩和单辉角闪石岩的  $\text{SiO}_2$  含量为  $42.37\% \sim 49.37\%$ , 岩石均较富铁 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$   $8.91\% \sim 14.41\%$ )、富镁 ( $\text{MgO}$   $6.68\% \sim 12.92\%$ ),  $\text{Mg}^{\#}$  ( $\text{Mg}^{\#} = 100 \times \text{Mg}^{2+}/\text{Mg}^{2+} + \text{Fe}^{2+}$ ) =  $42 \sim 50$ ,  $\text{TiO}_2$  ( $0.92\% \sim 1.29\%$ ) 含量较低; 具有低  $\text{K}_2\text{O}$  ( $<0.26\%$ )、低  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $0.24\% \sim 2.46\%$ ) 的特征,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量变化不大 ( $12.28\% \sim 15.85\%$ );  $\text{MnO}$  ( $0.15\% \sim 0.28\%$ ) 和  $\text{P}_2\text{O}_5$  ( $0.06\% \sim 0.10\%$ ) 的含量较低。

TAS 图解中(图 5a), 三种岩石样品几乎全部都落入玄武岩成分范围内, 为亚碱性系列, 少数个别落入苦橄岩成分的范围。AFM 图解中, 所有样品均落在拉斑玄武岩系列的区域内, 呈现出低钾、低钠和富镁、富铁的特征(图 5b)。 $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{SiO}_2$  图解中, 日喀则白朗石榴角闪岩等研究所有样品也皆位于拉斑玄武岩区域(图 5c)。

表6 日喀则石榴石角闪岩及其他变质基性岩的岩石化学成分(主量元素:wt%; 稀土和微量元素:  $\times 10^{-6}$ )Table 6 Chemical compositions of the Xigaze garnet amphibolite and other meta-mafic rocks (major elements: wt%; trace elements:  $\times 10^{-6}$ )

| 样品号   | 13JZ04  | 13JZ05 | 13JZ06 | 13BL05 | 13BL06 | 13BL07 | 13BL13 | 13BL16 | 13BL22 | 13BL10 | 13BL19 | 13BL14 | 13BL15 | 13BL24 |
|---|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 岩性  | 单辉石榴角闪岩 |        |        |        |        |        |        |        |        | 角闪辉石岩  |        | 单辉角闪岩  |        |        |
| SiO <sub>2</sub>                            | 49.37   | 49.25  | 49.07  | 45.32  | 45.27  | 44.11  | 47.09  | 45.33  | 42.37  | 42.51  | 44.56  | 48.57  | 46.15  | 46.52  |
| TiO <sub>2</sub>                            | 1.05    | 1.24   | 1.18   | 1.04   | 1.09   | 0.92   | 0.92   | 1.06   | 1.02   | 1.51   | 1.29   | 0.97   | 1.12   | 0.95   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>              | 13.03   | 12.28  | 12.54  | 13.20  | 14.06  | 13.53  | 15.71  | 14.62  | 15.85  | 13.83  | 13.83  | 14.25  | 12.83  | 14.82  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>T</sup> | 10.20   | 11.21  | 10.39  | 12.00  | 10.88  | 9.19   | 10.30  | 11.00  | 10.40  | 14.41  | 11.38  | 10.16  | 12.75  | 8.91   |
| MnO   | 0.15    | 0.20   | 0.16   | 0.28   | 0.23   | 0.18   | 0.21   | 0.26   | 0.15   | 0.23   | 0.20   | 0.16   | 0.19   | 0.15   |
| MgO   | 8.90    | 8.76   | 8.81   | 9.45   | 8.07   | 7.48   | 9.04   | 9.55   | 8.31   | 11.14  | 9.58   | 9.59   | 12.92  | 6.68   |
| CaO   | 14.36   | 14.75  | 14.99  | 15.10  | 17.24  | 19.78  | 11.41  | 11.95  | 18.04  | 12.55  | 14.97  | 11.03  | 10.52  | 17.57  |
| Na <sub>2</sub> O                           | 1.25    | 0.97   | 1.01   | 1.13   | 0.82   | 0.24   | 2.46   | 2.32   | 0.78   | 1.62   | 1.09   | 2.36   | 1.87   | 0.42   |
| K <sub>2</sub> O                            | 0.06    | 0.05   | 0.05   | 0.06   | 0.11   | 0.04   | 0.26   | 0.17   | 0.09   | 0.11   | 0.09   | 0.08   | 0.12   | 0.07   |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>               | 0.10    | 0.10   | 0.09   | 0.07   | 0.08   | 0.07   | 0.08   | 0.10   | 0.08   | 0.08   | 0.10   | 0.07   | 0.06   | 0.08   |
| LOI   | 1.22    | 1.30   | 1.31   | 1.93   | 2.36   | 3.98   | 2.55   | 2.20   | 2.71   | 1.80   | 2.65   | 2.36   | 1.52   | 3.64   |
| Mg <sup>#</sup>                             | 46.6    | 43.9   | 45.9   | 44.1   | 42.6   | 44.9   | 46.7   | 46.5   | 44.4   | 43.6   | 45.7   | 48.6   | 50.3   | 42.9   |
| Li  | 7.19    | 8.55   | 6.42   | 4.61   | 4.54   | 16.30  | 12.90  | 10.20  | 7.16   | 9.20   | 7.60   | 10.70  | 11.40  | 7.89   |
| Be  | 0.00    | 0.26   | 0.32   | 0.56   | 0.44   | 0.24   | 0.28   | 0.46   | 0.32   | 0.41   | 0.66   | 0.33   | 0.73   | 0.10   |
| Sc  | 41.50   | 45.60  | 41.50  | 39.10  | 35.90  | 36.60  | 35.40  | 38.40  | 34.10  | 50.10  | 39.20  | 35.40  | 36.70  | 34.20  |
| V   | 271     | 308    | 289    | 261    | 262    | 223    | 236    | 273    | 257    | 341    | 286    | 245    | 307    | 230    |
| Cr  | 312     | 288    | 288    | 313    | 227    | 305    | 279    | 321    | 247    | 342    | 276    | 306    | 332    | 111    |
| Co  | 48.70   | 49.30  | 46.60  | 45.20  | 41.80  | 39.50  | 41.80  | 42.70  | 41.30  | 56.00  | 43.80  | 43.40  | 55.80  | 36.50  |
| Ni  | 146.7   | 130.5  | 116.1  | 122.4  | 89.28  | 118.8  | 113.4  | 117.9  | 121.5  | 120.6  | 102.6  | 153.0  | 187.2  | 61.38  |
| Cu  | 86.85   | 84.96  | 64.80  | 51.48  | 106.2  | 78.93  | 128.7  | 130.5  | 46.80  | 106.20 | 212.4  | 95.40  | 22.77  | 66.87  |
| Zn  | 98.40   | 121.6  | 78.08  | 179.2  | 121.6  | 90.40  | 167.2  | 183.2  | 69.36  | 132.0  | 139.2  | 122.4  | 143.2  | 89.60  |
| Ga  | 16.10   | 14.50  | 14.60  | 13.80  | 15.60  | 12.00  | 13.80  | 14.40  | 14.90  | 15.40  | 17.80  | 13.50  | 12.80  | 13.60  |
| Rb  | 0.75    | 0.30   | 0.21   | 0.40   | 3.16   | 0.56   | 2.39   | 1.28   | 0.29   | 0.55   | 0.70   | 0.46   | 0.80   | 1.13   |
| Sr  | 44.4    | 34.1   | 34.5   | 22.1   | 26.2   | 26     | 82.3   | 68.4   | 45.3   | 44.2   | 28.8   | 52.6   | 32.4   | 441    |
| Y   | 25.40   | 31.60  | 26.30  | 27.10  | 26.70  | 21.50  | 22.70  | 27.50  | 23.30  | 31.10  | 28.20  | 23.90  | 18.00  | 21.60  |
| Zr  | 56.7    | 65.5   | 60.8   | 52.1   | 54.3   | 47.8   | 42.4   | 46.8   | 50.0   | 40.3   | 44.4   | 56.1   | 35.3   | 61.2   |
| Nb  | 0.71    | 0.87   | 0.88   | 0.76   | 0.98   | 0.49   | 0.52   | 0.68   | 0.62   | 0.70   | 1.01   | 0.92   | 0.70   | 0.92   |
| Sb  | 0.28    | 0.64   | 0.18   | 0.17   | 0.11   | 0.13   | 0.18   | 0.20   | 0.12   | 0.16   | 0.12   | 0.38   | 0.51   | 0.12   |
| Cs  | 0.03    | 0.06   | 0.02   | 0.03   | 0.14   | 0.07   | 0.11   | 0.05   | 0.03   | 0.06   | 0.10   | 0.05   | 0.06   | 0.11   |
| Ba  | 4.33    | 8.07   | 2.32   | 5.86   | 13.0   | 7.83   | 15.2   | 15.3   | 11.8   | 6.83   | 7.75   | 5.10   | 10.2   | 18.3   |
| La  | 2.41    | 2.37   | 2.40   | 2.21   | 2.20   | 1.61   | 1.92   | 2.04   | 1.83   | 1.07   | 2.06   | 1.89   | 0.49   | 2.41   |
| Ce  | 9.14    | 8.83   | 9.15   | 7.74   | 7.77   | 5.91   | 7.04   | 7.65   | 6.91   | 5.68   | 7.88   | 7.24   | 1.71   | 8.11   |
| Pr  | 1.41    | 1.35   | 1.40   | 1.20   | 1.19   | 0.97   | 1.08   | 1.19   | 1.04   | 1.12   | 1.27   | 1.15   | 0.32   | 1.17   |
| Nd  | 7.51    | 7.59   | 7.74   | 6.53   | 6.02   | 5.53   | 5.69   | 6.62   | 5.73   | 6.71   | 6.77   | 6.26   | 2.21   | 5.80   |
| Sm  | 2.50    | 2.71   | 2.55   | 2.20   | 2.06   | 2.01   | 2.05   | 2.57   | 1.92   | 2.55   | 2.45   | 2.11   | 1.13   | 2.11   |
| Eu  | 1.00    | 1.13   | 1.02   | 0.86   | 0.90   | 0.78   | 0.86   | 1.05   | 0.82   | 1.03   | 0.95   | 0.93   | 0.47   | 0.89   |
| Gd  | 2.97    | 3.38   | 2.99   | 2.68   | 2.65   | 2.33   | 2.38   | 3.10   | 2.37   | 3.36   | 2.96   | 2.49   | 1.75   | 2.28   |
| Tb  | 0.59    | 0.70   | 0.62   | 0.55   | 0.57   | 0.50   | 0.53   | 0.66   | 0.53   | 0.72   | 0.63   | 0.54   | 0.43   | 0.50   |
| Dy  | 4.17    | 4.89   | 4.28   | 4.16   | 3.89   | 3.37   | 3.63   | 4.44   | 3.51   | 5.10   | 4.54   | 3.85   | 2.87   | 3.27   |
| Ho  | 0.94    | 1.19   | 0.97   | 1.01   | 0.97   | 0.76   | 0.79   | 1.04   | 0.81   | 1.13   | 1.04   | 0.93   | 0.70   | 0.75   |
| Er  | 2.41    | 3.14   | 2.57   | 2.75   | 2.73   | 2.12   | 2.21   | 2.70   | 2.23   | 3.03   | 2.79   | 2.49   | 1.88   | 2.10   |
| Tm  | 0.38    | 0.49   | 0.44   | 0.41   | 0.43   | 0.33   | 0.32   | 0.41   | 0.35   | 0.48   | 0.42   | 0.38   | 0.29   | 0.33   |
| Yb  | 2.26    | 3.11   | 2.40   | 2.53   | 2.62   | 1.96   | 1.93   | 2.40   | 2.14   | 2.90   | 2.56   | 2.33   | 1.67   | 1.99   |
| Lu  | 0.35    | 0.49   | 0.38   | 0.38   | 0.39   | 0.31   | 0.32   | 0.35   | 0.33   | 0.41   | 0.40   | 0.35   | 0.27   | 0.31   |
| Hf  | 1.49    | 1.62   | 1.63   | 1.27   | 1.35   | 1.31   | 1.08   | 1.22   | 1.23   | 1.39   | 1.24   | 1.40   | 1.12   | 1.40   |
| Ta  | 0.13    | 0.13   | 0.12   | 0.11   | 0.13   | 0.09   | 0.07   | 0.17   | 0.10   | 0.07   | 0.15   | 0.09   | 0.30   | 0.14   |
| Pb  | 1.84    | 2.90   | 1.44   | 1.31   | 1.10   | 0.86   | 1.76   | 1.33   | 0.65   | 0.73   | 1.39   | 1.96   | 3.45   | 1.33   |
| Bi  | 0.11    | 0.14   | 0.19   | 0.08   | 0.07   | 0.07   | 0.08   | 0.13   | 0.07   | 0.03   | 0.10   | 0.08   | 0.29   | 0.06   |
| Th  | 0.08    | 0.05   | 0.04   | 0.30   | 0.27   | 0.04   | 0.03   | 0.05   | 0.04   | 0.02   | 0.08   | 0.05   | 0.05   | 0.09   |
| U   | 0.02    | 0.03   | 0.01   | 0.02   | 0.06   | 0.04   | 0.02   | 0.04   | 0.03   | 0.01   | 0.05   | 0.02   | 0.04   | 0.03   |

续表 6

Continued Table 6

| 样品号                  | 13JZ04  | 13JZ05 | 13JZ06 | 13BL05 | 13BL06 | 13BL07 | 13BL13 | 13BL16 | 13BL22 | 13BL10 | 13BL19 | 13BL14 | 13BL15 | 13BL24 |
|----------------------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 岩性                   | 单辉石榴角闪岩 |        |        |        |        |        |        |        |        | 角闪辉石岩  |        | 单辉角闪石岩 |        |        |
| ΣREE                 | 164.7   | 191.4  | 170.9  | 159.1  | 158.0  | 130.5  | 137.6  | 166.3  | 138.2  | 173.7  | 167.8  | 150.0  | 91.2   | 139.3  |
| Zr/Y                 | 2.23    | 2.07   | 2.31   | 1.92   | 2.03   | 2.22   | 1.87   | 1.70   | 2.15   | 1.30   | 1.57   | 2.35   | 1.96   | 2.83   |
| Nb/Y                 | 0.03    | 0.03   | 0.03   | 0.03   | 0.04   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.03   | 0.02   | 0.04   | 0.04   | 0.04   | 0.04   |
| Ta/Yb                | 0.06    | 0.04   | 0.05   | 0.04   | 0.05   | 0.04   | 0.04   | 0.07   | 0.05   | 0.02   | 0.06   | 0.04   | 0.18   | 0.07   |
| Th/Yb                | 0.04    | 0.02   | 0.02   | 0.12   | 0.10   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.02   | 0.01   | 0.03   | 0.02   | 0.03   | 0.04   |
| δEu                  | 1.12    | 1.14   | 1.13   | 1.09   | 1.18   | 1.10   | 1.19   | 1.13   | 1.18   | 1.07   | 1.07   | 1.24   | 1.02   | 1.23   |
| (La/Yb) <sub>N</sub> | 0.72    | 0.51   | 0.67   | 0.59   | 0.57   | 0.55   | 0.67   | 0.57   | 0.58   | 0.25   | 0.54   | 0.55   | 0.20   | 0.82   |
| (La/Sm) <sub>N</sub> | 0.61    | 0.55   | 0.59   | 0.63   | 0.67   | 0.50   | 0.59   | 0.50   | 0.60   | 0.26   | 0.53   | 0.56   | 0.27   | 0.72   |
| (Gd/Yb) <sub>N</sub> | 1.06    | 0.88   | 1.00   | 0.86   | 0.82   | 0.96   | 0.99   | 1.04   | 0.89   | 0.94   | 0.93   | 0.86   | 0.85   | 0.92   |

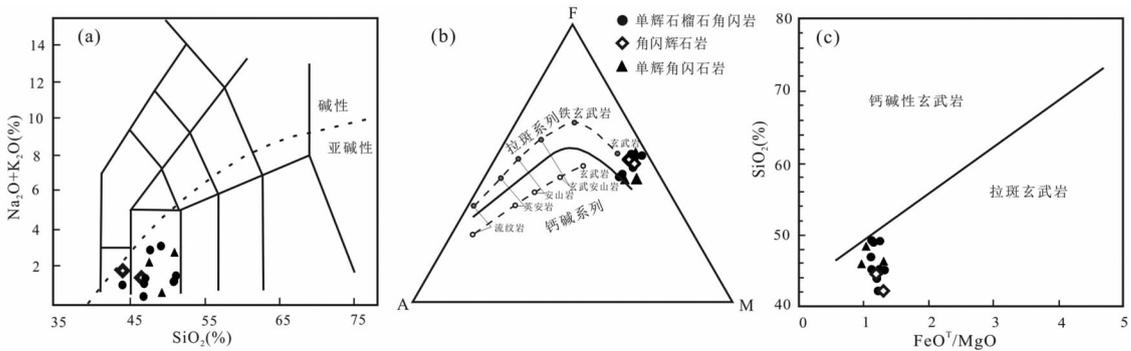


图5 日喀则变质基性岩的TAS图解(a)、AFM图解(b) (据 Rollinson, 1993) 和 FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> 图解(c, 据 Miyashiro, 1975)

Fig. 5 TAS (a), AFM (b) classifications (after Rollinson, 1993) and FeO<sup>T</sup>/MgO-SiO<sub>2</sub> (c, after Miyashiro, 1975) diagrams for the Xigaze meta-mafic rocks

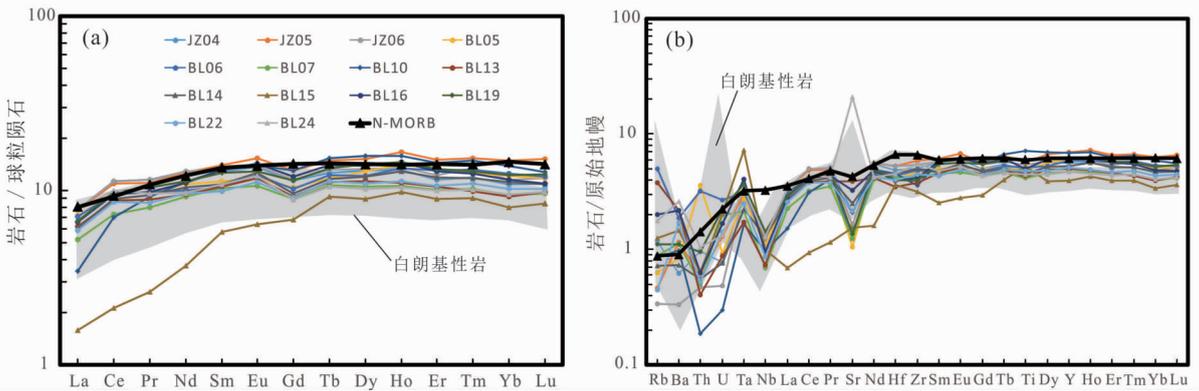


图6 日喀则石榴角闪岩及其他变质基性岩的稀土元素球粒陨石标准化配分图解和微量元素地幔标准化配分图解  
球粒陨石、原始地幔和正常洋中脊玄武岩(N-MORB)值据 Sun and McDonough, 1989; 白朗辉长岩/辉绿岩数据取自李文霞等, 2012

Fig. 6 Chondrite-normalized REE patterns and Primitive mantle-normalized trace elements patterns of the Xigaze garnet amphibolites and other meta-mafic rocks

Chondrite, primitive mantle and N-MORB values from Sun and McDonough, 1989; gabbro/diabase values from Li *et al.*, 2012

7.2 稀土元素特征

在球粒陨石标准化稀土元素配分上(图 6a), 样品总体

显示出平缓、LREE 亏损的分布形态; 球粒陨石标准化后 ΣREE 平均值为 40.56 × 10<sup>-6</sup>, 与 N-MORB 相当; 除样品 13BL15 和 13BL10 < 0.25, 其余样品 (La/Yb)<sub>N</sub> = 0.51 ~

0.82, 显示为弱的轻稀土亏损;  $(La/Sm)_N = 0.26 \sim 0.72$ ,  $(Gd/Yb)_N = 0.82 \sim 1.06$ , 重稀土分布平坦。Eu 没有明显的异常。稀土元素的上述特征皆与典型的正常亏损洋中脊玄武岩 N-MORB 相似。同时选取了与本次研究处于同一地区的未发生变质的基性侵入岩作对比研究(图 6a), 图中的灰色阴影代表了白朗辉长岩/辉绿岩的稀土元素配分形式。本文研究的石榴角闪岩与白朗地区辉长岩/辉绿岩比较, 皆呈现 LREE 亏损, HREE 平坦的配分模式。

### 7.3 微量元素特征

在大多数样品中, 石榴角闪岩、辉石岩和角闪石岩三类岩性的微量元素特征差异不大, 大离子亲石元素(LILE) Rb、Ba、U 和 Sr 的含量变化范围较大, 这与它们受交代变质作用的程度有关。Ni 含量( $61.4 \times 10^{-6} \sim 187.2 \times 10^{-6}$ )总体上低于正常亏损洋中脊玄武岩(N-MORB) ( $Ni = 149.5 \times 10^{-6}$ ; Hofmann, 1988); Co 含量变化范围相对较小, 介于  $36.5 \times 10^{-6} \sim 56.0 \times 10^{-6}$  之间, 总体上与正常洋中脊玄武岩(N-MORB) 相当( $Co = 47.47 \times 10^{-6}$ ; Hofmann, 1988); 高场强元素(HFSE) 中  $Nb = 0.49 \times 10^{-6} \sim 1.01 \times 10^{-6}$ ,  $Zr = 35.3 \times 10^{-6} \sim 65.5 \times 10^{-6}$ ,  $Hf = 1.08 \times 10^{-6} \sim 1.63 \times 10^{-6}$ ,  $Y = 18.0 \times 10^{-6} \sim 31.6 \times 10^{-6}$ , 与亏损洋中脊玄武岩(N-MORB,  $Nb = 2.33 \times 10^{-6}$ ,  $Zr = 74 \times 10^{-6}$ ,  $Hf = 2.05 \times 10^{-6}$ ,  $Y = 28 \times 10^{-6}$ , 与 Hofmann (1988) 和 Sun and McDonough (1989) 相比较, 研究区样品的 Nb 明显负异常, 部分 Zr、Hf 元素表现出轻度负异常。

石榴角闪岩及其变质基性岩样品的原始地幔标准化微量元素蛛网的配分形式总体趋势与 N-MORB 近似(图 6b), 明显不同于富集地幔和洋岛玄武岩的成分。各组样品中大离子亲石元素(Rb、Ba、U) 明显富集, 高场强元素(Nb、Ta、Ti、Zr、Hf) 表现出明显到不明显的负异常, 基本呈相互平行且平缓的配分模式。本文研究的石榴角闪岩及伴生的变质基性岩的 REE 和微量元素蛛网的配分形式与该地区辉长岩/辉绿岩基本一致(图 6b)。

## 8 讨论

### 8.1 变质作用过程

本文所研究的白朗石榴角闪岩产于雅江带日喀则蛇绿岩增生杂岩体中, 岩石普遍发生片理化变形现象, 应该是作为变质底板侵位时受到构造应力作用的结果。包含在石榴石中的角闪石、斜长石、绿帘石和榍石构成了峰期变质前的早期阶段的矿物组合; 他形的石榴石、大颗粒的单斜辉石已经分解为 Pl + Prh 的大颗粒斜长石和金红石代表了峰期的变质作用; 退变质作用阶段石榴石边部的他形单斜辉石(图 2a) 和单斜辉石边部及基质中的角闪石代表了第三阶段的变质作用(图 2b); 最终, 以大颗粒角闪石边缘或基质中后期形成的细小颗粒角闪石(图 2b, e)、葡萄石、钠长石、绿泥石、斜

黝帘石和方解石共生矿物组合结束于前绿片岩相。根据石榴角闪岩不同变质阶段的矿物组合, 利用传统的温压计和内部一致热力学数据计算出的相关变质条件, 得出了一条逆时针的  $P-T$  轨迹, 因此得出白朗的石榴角闪岩代表了位于蛇绿岩底部, 支撑着蛇绿岩侵位的变质基底。这一结论与 Guilmette *et al.* (2008, 2012) 对桑桑、萨嘎等地石榴角闪岩研究的结论相一致, 也与西加利福尼亚、土耳其其 Kiziltepe 蛇绿岩片、Oman 和 Bay of Islands 的蛇绿岩动力学基底的形成原理一致, 代表了启动洋内俯冲的变质底板(Hall, 1991; Dilek and Whitney, 1997; Guilmette *et al.*, 2008, 2012)。日喀则地区白朗蛇绿岩作为雅江带蛇绿岩的一部分位于印度板块与欧亚板块之间, 代表了白垩纪新特提斯残留的洋壳。石榴角闪岩及其变质的辉石岩和角闪岩经历了角闪岩相到榴辉岩相的变质作用和片理化变形。大洋内部的快速俯冲折返, 尤其是变质底板, 记录了特殊的  $P-T$  轨迹。蛇绿岩在构造侵位过程中由于原岩自身和上覆火山岩的高温以及构造摩擦作用而产生的高温变质, 短时温度甚至可以达到很高  $\sim 1000^\circ\text{C}$  (Robertson, 2002; Guilmette *et al.*, 2008), 其后很快就开始抬升发生退变质作用(Dilek and Whitney, 1997; Robertson, 2002; Guilmette *et al.*, 2008; 吴福元等, 2014), 从而形成了一条变质底板特有的逆时针的  $P-T$  轨迹(El-Shazly and Coleman, 1990; Dilek and Whitney, 1997; Guilmette *et al.*, 2008; Lázaro *et al.*, 2009, 2013)。

### 8.2 构造环境判别

研究区大多数石榴角闪岩样品具有 LREE/HREE 约为 0.73,  $(La/Yb)_N = 0.51 \sim 0.82$ , 显示较低程度的结晶分异作用, 因此用玄武岩类的构造环境判别图解来确定该石榴角闪岩的构造环境是可行的(和钟铨等, 2006)。微量元素蛛网图显示本次研究的石榴角闪岩 LILE 富集, 一些样品亏损高场强元素(HFSE), 并具有较高 LILE/HFSE 比值特征。这种微量元素配分形式特征与俯冲带上(SSZ) 的蛇绿岩相似, 如 Bay of Islands、Troodos、Semail、Vourinos、Papua-New 的蛇绿岩(Elthon, 1991) 等。较高的 LILE 可来自俯冲板块释放出来的流体或可由俯冲板块本身物质的加入引起源区及熔岩中 LILE 和 LREE 的增加而致。利用不活动性元素组合对原岩构造环境判别, 在 Ta/Yb-Th/Yb 判别图解中(图 7a), 三组样品全部落在了拉斑系列的区域内, 且大部分样品落在了 N-MORB 的附近区域, 说明原岩发育在正常亏损扩张洋脊环境; 在 Th-Hf/3-Ta 三角形判别图解中(图 7b), 绝大多数样品落在 N-MORB 的区域内, 仅个别样品落入了岛弧玄武岩和 E-MORB 或板内玄武岩区域; 然而在能有效区分板内玄武岩与其他类型玄武岩的 Zr-Ti-Y 判别图解(图 7c), 全部单辉石榴角闪岩落于洋中脊玄武岩 + 岛弧拉斑玄武岩的 B 区域, 两个角闪辉石岩和一个单辉角闪石岩样品均落在了岛弧玄武岩区域。

为进一步探讨发育于洋脊环境的该组石榴角闪岩与岛

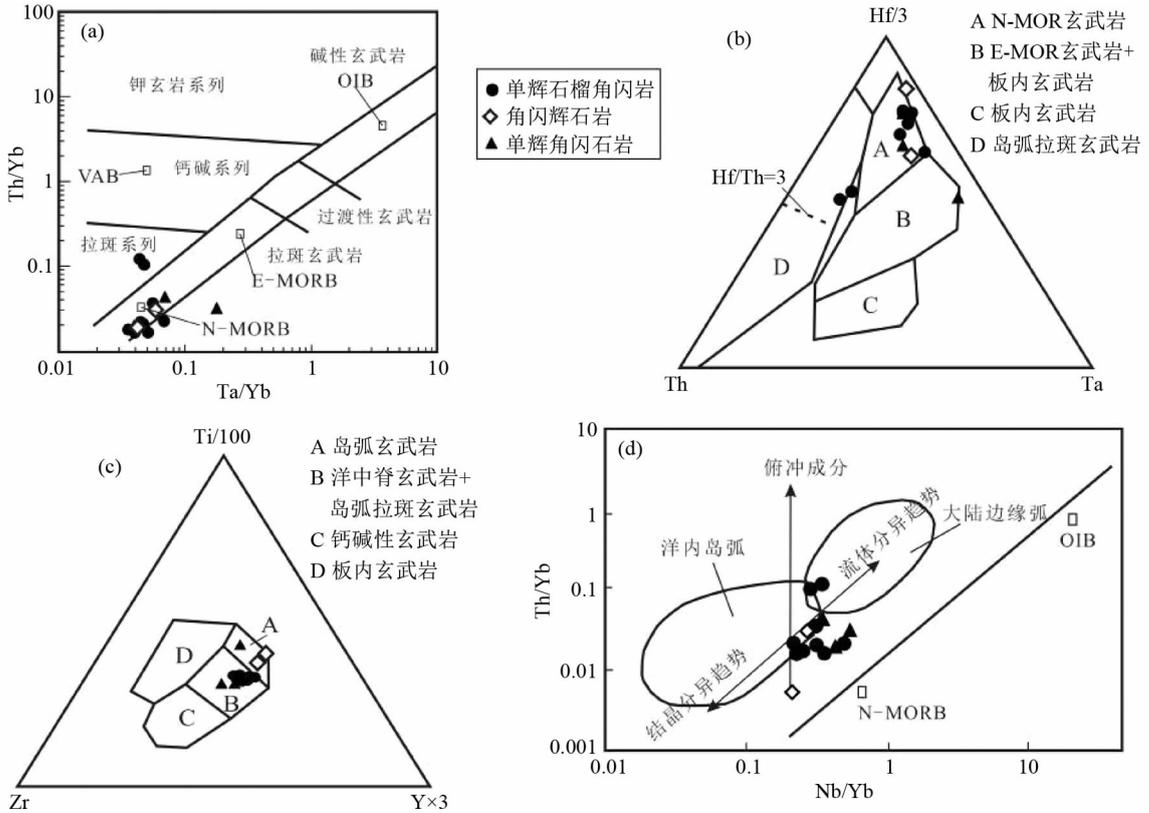


图7 日喀则石榴角闪岩的构造判别图

(a) Th/Yb-Ta/Yb 图解; (b) Th-Hf/3-Ta 图解和 (c) Zr-Ti-Y 图解 (Rollinson, 1993); (d) Th/Yb-Nb/Yb 图解 (Pearce and Peate, 1995)

Fig. 7 Diagrams for discriminating tectonic setting for the Xigaze garnet amphibolites

(a) Th/Yb-Ta/Yb; (b) Th-Hf/3-Ta and (c) Zr-Ti-Y (Rollinson, 1993); (d) Th/Yb-Nb/Yb (Pearce and Peate, 1995)

弧的成因联系, Th/Yb-Nb/Yb 判别图解可以较好地判断蛇绿岩与 SSZ 背景的关系 (Pearce and Peate, 1995), 三类样品大多数落在正常亏损大洋中脊玄武岩 (N-MORB) 区域 (图 7d), 早期地幔源区的部分熔融的结果是使 Th/Yb 比值减少, 使源区向俯冲物质成分加入的方向演化, 4 个石榴角闪岩样品和 1 个角闪辉石岩样品进入洋内岛弧区域内, 说明白朗蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩与正常亏损洋中脊玄武岩 N-MORB 具有亲缘性, 且有亲岛弧玄武岩 IAB 的特征。以上微量元素地区化学特征说明本研究的石榴角闪岩及其变质岩石符合前人对日喀则蛇绿岩形成环境的结论: 在俯冲带之上的岛弧和弧前环境形成的是岛弧拉斑玄武岩 (IAT) 和玻安岩, 如本文的情况, 形成于弧后盆地玄武岩并且兼有 IAT 和 MORB 的特征 (Weaver *et al.*, 1979; Hawkins, 2003)。

### 8.3 石榴角闪岩的成因及其构造意义

西藏日喀则地区白朗的石榴角闪岩与萨嘎、桑桑的石榴角闪岩都被认为是雅江带蛇绿岩构造侵位过程中由其原岩形成不久后自身的高温、上覆火山岩和构造摩擦作用而产生的高温变质岩 (Guilmette *et al.*, 2008, 2009, 2012; Bédard *et al.*, 2009; Bezard *et al.*, 2011; Hébert *et al.*, 2012; 吴福元等, 2014), 由此形成的变质岩都可以称之为变质底板。对

雅江带萨嘎、桑桑和白朗地区的石榴角闪岩的 Ar-Ar 定年表明, 其年龄为 123 ~ 132Ma (Guilmette *et al.*, 2009, 2012), 被认为代表蛇绿岩的就位时代; 而日喀则地区丰富的代表蛇绿岩形成年龄的辉长/辉绿岩定年介于 110 ~ 130Ma 之间 (Ziabrev *et al.*, 2003; Malpas *et al.*, 2003; 王冉等, 2006); 因此石榴角闪岩及其变质的辉石岩与蛇绿岩本身的年龄极为接近, 表明这些蛇绿岩在形成后不久就很快发生了构造就位, 变质底板的出现是蛇绿岩形成于初始俯冲阶段的重要标志 (Elitok and Drüppel, 2008; Wakabayashi and Dilek, 2003; Çelik *et al.*, 2006; Bortolotti *et al.*, 2013; 吴福元等, 2014)。

白朗蛇绿混杂岩中石榴角闪岩虽然来自于亏损地幔的 N-MORB 岩浆, 源于洋脊扩张中心, 但是在微量元素地球化学方面, 一些样品亏损高场强元素 Nb、Ta、Zr、Hf、Ti 等, 也说明与俯冲消减作用有关。综合本文的矿物岩石地球化学研究的特征, 在早白垩纪, 石榴角闪岩的原岩形成于 N-MORB 环境, 是在洋内弧间/弧后盆地的扩张中心形成 (图 8a)。根据前文计算出的该石榴角闪岩的 *P-T* 条件, 在之后的早白垩纪晚期发生洋内俯冲的过程中先后经历了绿帘角闪岩相 (M1 阶段)、榴辉岩-绿帘角闪岩相 (M2、M3 阶段) 的变质作用 (图 8b), 随着洋内俯冲的进行, 其温度和压力逐渐升高, 达到其峰值变质条件 830 ~ 870°C/18.0 ~ 22.0 kbar。晚白垩

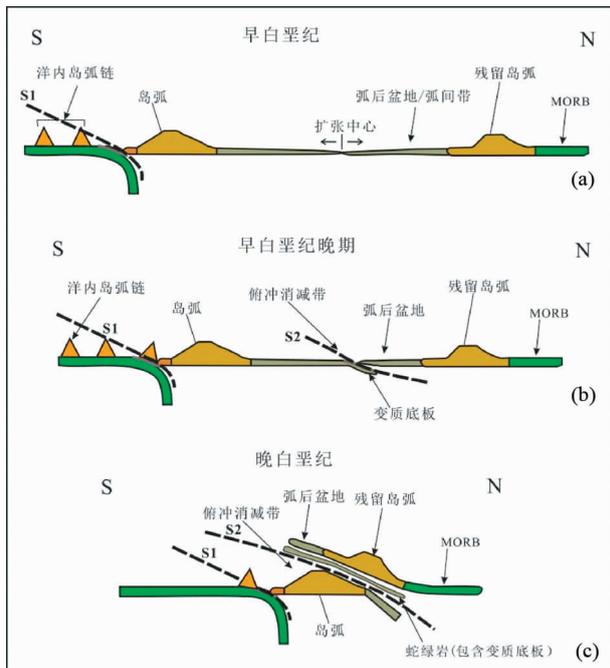


图8 日喀则石榴角闪岩洋内俯冲形成动力学模式(据 Hébert *et al.*, 2012 修改)

Fig. 8 Geodynamic model of intra-oceanic subduction for the Xigaze garnet amphibolites (modified after Hébert *et al.*, 2012)

纪时,作为变质底板的石榴角闪岩承载着上覆蛇绿岩发生侵位,对向的弧后盆地向其仰冲,将石榴角闪岩及其上面承载的蛇绿岩块夹持于洋内岛弧之间(图8c),当蛇绿岩构造就位后,温度降低,退变质阶段保留了 $640 \sim 680^{\circ}\text{C}/10.7 \sim 14.9\text{kbar}$ 的温压条件(图5);最终新特提斯大洋在印度板块和欧亚板块的碰撞中闭合,抬升后形成目前的增生杂岩带,其后石榴角闪岩又经历了葡萄石-绿纤石相的退变质作用。与前人的研究的结果一致,白朗地区的石榴角闪岩与雅江带桑桑、萨嘎等地的变质底板一起形成于大洋内部俯冲/侵位环境(Bézar *et al.*, 2009; Bezar *et al.*, 2011; Hébert *et al.*, 2003, 2012; Guilmette *et al.*, 2009, 2012)。

西藏日喀则地区白朗石榴角闪岩位于雅鲁藏布江缝合带白朗蛇绿混杂岩中,地处欧亚板块和印度板块碰撞缝合带上。前人研究表明,在雅鲁藏布江中段蛇绿岩至少包含三种组分的熔岩,其代表性剖面分别是吉定、得村和大竹卡,分别形成于近俯冲带的弧后盆地、弧前盆地和弧后盆地(Huot *et al.*, 2002; Xia *et al.*, 2003; Dupuis-Côté *et al.*, 2005; Dupuis *et al.*, 2005, 2006; 牛晓露等, 2006; 陈根文等, 2015)。此次研究的白朗蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩位于得村与大竹卡之间,其地球化学分析表明可能源于大洋中脊玄武岩,至少能确定其源于靠近消减带的扩张中心,而又是与SSZ有关的一类岩石,由此可以总结出在日喀则地区从东到西,从大竹卡、白朗到吉定发育一条早白垩世时期洋间岛弧及其弧

后扩张脊(Hébert *et al.*, 2001, 2003, 2012; Aitchison *et al.*, 2000; Dubois-Côté *et al.*, 2005; Dupuis *et al.*, 2005, 2006; Bédard *et al.*, 2009; Bezar *et al.*, 2011; 陈根文等, 2015)。

## 9 结论

本文通过详细的矿物学、岩石学,及其系统的地球化学研究,得到如下主要结论:

(1)根据岩相学和矿物化学分析,日喀则石榴角闪岩经历了四个变质阶段,各阶段的温压条件分别为:M1为 $560 \sim 620^{\circ}\text{C}/9.1 \sim 9.8\text{kbar}$ ;M2为 $830 \sim 870^{\circ}\text{C}/18.0 \sim 22.0\text{kbar}$ ;M3为 $640 \sim 680^{\circ}\text{C}/10.7 \sim 14.9\text{kbar}$ ;M4为 $< 205^{\circ}\text{C}/6\text{kbar}$ ;得出一条逆时针的 $P-T$ 轨迹。

(2)岩相学研究表明,日喀则地区的变质基性岩主要为石榴角闪岩,其次还有角闪辉石岩和单辉角闪石岩。三类岩石具有大致相似的地球化学性质:主量元素具有低钛(0.92% ~ 1.29%)、低钾( $< 0.26\%$ )、低钠(0.24% ~ 2.46%)的特征,为低钾亚碱性拉斑玄武质岩石。

(3)日喀则石榴角闪岩具有与N-MORB相似的稀土元素特征,微量元素总体与N-MORB一致。岩石富集大离子亲石元素(Rb、Ba、U),一些样品亏损高场强元素(Nb、Ti、Zr、Hf),显示白朗蛇绿混杂岩中的石榴角闪岩与正常亏损洋中脊玄武岩N-MORB具有亲缘性,且具有俯冲带成分加入的岛弧玄武岩IAB的特征。

(4)作为变质底板的日喀则白朗地区石榴角闪岩及其伴生变质基性岩在成因上与MORB和SSZ环境都有亲缘关系,是形成于与俯冲带相关的地质背景,代表了弧后盆地的扩张环境,并形成于洋内俯冲/侵位过程。

**致谢** 衷心感谢审稿专家陈丹玲教授和吴春明教授提出的建设性宝贵意见。矿物化学成份测试得到德国Ruhr大学Niels Jöns老师的帮助,岩石地球化学元素分析得到漆亮研究员的帮助,在此一并表示感谢。

## References

- Aitchison JC, Zhu BD, Davis AM, Liu JB, Luo H, Malpas JG, McDermid IRC, Wu HY, Ziabrev SV 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(1-2): 231-244
- Allégre CJ, Courtillot V, Tapponnier P *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307(5946): 17-22
- Agrinier P, Javoy M and Girardeau J. 1988. Hydrothermal activity in a peculiar ocean ridge-oxygen and hydrogen isotope evidence in the Xigaze ophiolite (Tibet, China). *Chemical Geology*, 71(1-3): 313-335
- Bédard é, Hébert R, Guilmette C, Lesage G, Wang CS and Dostal J. 2009. Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolitic massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: Evidence for

- an arc-back-arc origin. *Lithos*, 113(1–2): 48–67
- Bezard R, Hébert R, Wang CS, Dostal J, Dai JG and Zhong HT. 2011. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet. *Lithos*, 125(1–2): 347–367
- Bortolotti V, Chiari M, Marroni M, Pandolfi L, Principi G and Saccani E. 2013. Geodynamic evolution of ophiolites from Albania and Greece (Dinaric-Hellenic belt): One, two, or more oceanic basins? *International Journal of Earth Sciences*, 102(3): 783–811
- Çelik ÖF, Delaloye M and Feraud G. 2006. Precise <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar ages from the metamorphic sole rocks of the Tauride belt ophiolites, southern Turkey: Implications for the rapid cooling history. *Geological Magazine*, 143(2): 213–227
- Chen GW, Liu R, Xia B and Deng T. 2015. Geochemistry of the Jiding ophiolite in SW Tibet and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 31(9): 2495–2507 (in Chinese with English abstract)
- Coulon C, Maluski H, Bollinger C and Wang S. 1986. Mesozoic and cenozoic volcanic rocks from central and southern Tibet: <sup>39</sup>Ar–<sup>40</sup>Ar dating, petrological characteristics and geodynamical significance. *Earth and Planetary Science Letters*, 79(3–4): 281–302
- Dilek Y and Whitney DL. 1997. Counterclockwise *P-T-t* trajectory from the metamorphic sole of a Neo-Tethyan ophiolite (Turkey). *Tectonophysics*, 280(3–4): 295–310
- 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
- Dupuis C, 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 ultramafic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 25(6): 937–960
- Dupuis C, Hébert R, Dubois-Côté V, Guilmette C, Wang CS and Li ZJ. 2006. Geochemistry of sedimentary rocks from mélange and flysch units south of the Yarlung Zangbo Suture Zone, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(5): 489–508
- Elitok Ö and Drüppel K. 2008. Geochemistry and tectonic significance of metamorphic sole rocks beneath the Beyşehir-Hoyran ophiolite (SW-Turkey). *Lithos*, 100(1–4): 322–353
- El-Shazly AK and Coleman RG. 1990. Metamorphism in the Oman Mountains in relation to the Semail ophiolite emplacement. In: Robertson AHF, Searle MP and Ries AC (eds.). *The Geology and Tectonics of the Oman Region*. Geological Society, London, Special Publications, 49(1): 473–493
- Elthon D. 1991. Geochemical evidence for formation of the Bay of Islands ophiolite above a subduction zone. *Nature*, 354(6349): 140–143
- Gaetani M and Garzanti E. 1991. Multicyclic history of the northern India continental margin (northwestern Himalaya). *AAPG Bulletin*, 75(9): 1427–1446
- Girardeau J, Mercier JCC and Wang XB. 1985a. Petrology of the mafic rocks of the Xigaze ophiolite, Tibet: Implications for the genesis of the oceanic lithosphere. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 90(4): 309–321
- Girardeau J, Mercier JCC and Zao YG. 1985b. 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
- 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(2): 301–310
- Guilmette C, Hébert R, Dupuis C, Wang CS and Li ZJ. 2008. Metamorphic history and geodynamic significance of high-grade metabasites from the ophiolitic mélange beneath the Yarlung Zangbo ophiolites, Xigaze area, Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5–6): 423–437
- Guilmette C, Hébert R, Wang CS and Villeneuve M. 2009. Geochemistry and geochronology of the metamorphic sole underlying the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone, South Tibet. *Lithos*, 112(1–2): 149–162
- Guilmette C, Hébert R, Dostal J, Indares A, Ullrich T, Bédard é and Wang CS. 2012. Discovery of a dismembered metamorphic sole in the Saga ophiolitic mélange, South Tibet: Assessing an Early Cretaceous disruption of the Neo-Tethyan supra-subduction zone and consequences on basin closing. *Gondwana Research*, 22(2): 398–414
- Hall Jr CA. 1991. Geology of the Point Sur-Lopez Point region, Coast Ranges, California: A part of the Southern California allochthon. *Geological Society of America Special Papers*, 266: 1–41
- Hawkins JW. 2003. Geology of supra-subduction zones: Implications for the origin of ophiolites. *Geological Society of America Special Papers*, 373: 227–268
- Hébert R, Wang CS, Varfalvy V, Huot F, Beaudoin G and Dostal J. 2001. Yarlung Zangbo Suture Zone Ophiolites and their suprasubduction zone setting. *Journal of Asian Earth Sciences*, 19(3): 27–28
- Hébert R, Huot F, Wang CS and Liu ZF. 2003. Yarlung Zangbo ophiolites (Southern Tibet) revisited: Geodynamic implications from the mineral record. In: Dilek Y and Robinson PT (eds.). *Ophiolites in Earth History*. Geological Society, London, Special Publications, 218(1): 165–190
- Hébert R, Bezard 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(2): 377–397
- He ZH, Yang DM and Wang TW. 2006. Age, geochemistry and its tectonic significance of Kaimeng ophiolites in Jiali fault belt, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2): 653–660 (in Chinese with English abstract)
- Hofmann AW. 1988. Chemical differentiation of the Earth: The relationship between mantle, continental crust, and oceanic crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 90(3): 297–314
- Holland TJB and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309–343
- Hollister LS, Grissom GC, Peters EK, Stowell HH and Sisson VB. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*, 72(3–4): 231–239
- Huot F, Hébert R, Varfalvy V, Beaudoin G, Wang CS, Liu ZF, Cotten J and Dostal J. 2002. The Beimarang Mélange (southern Tibet) brings additional constraints in assessing the origin, metamorphic evolution and obduction processes of the Yarlung Zangbo ophiolite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(3): 307–322
- Kretz R. 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 68(1–2): 277–279
- Lúzaró C, García-Casco A, Rojas-Agramonte Y, Kröner A, Neubauer F and Iturralde-Vinent M. 2009. Fifty-five-million-year history of oceanic subduction and exhumation at the northern edge of the Caribbean plate (Sierra del Convento mélange, Cuba). *Journal of Metamorphic Geology*, 27(1): 19–40
- Lúzaró C, Blanco-Quintero IF, Rojas-Agramonte Y, Proenza JA, Núñez-Cambra K and García-Casco A. 2013. First description of a metamorphic sole related to ophiolite obduction in the northern Caribbean: Geochemistry and petrology of the Güira de Jaico Amphibolite complex (eastern Cuba) and tectonic implications. *Lithos*, 179(10): 193–210
- Leake BE, Woolley AR, Arps CES, Birch WD, Gilbert MC, Grice JD, Hawthorne FC, Kato A, Kisch HJ, Krivovichev VG, Linthout K, Laird J, Mandarino JA, 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. *European Journal Mineralogy*, 9(3): 623–651
- 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 WX, Zhao ZD, Zhu DC, Dong GC, Zhou S, Mo XX, DePaolo D and Dilek Y. 2012. Geochemical discrimination of tectonic environments of the Yalung Zangpo ophiolite in southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1663–1673 (in Chinese with English abstract)
- Li XP, Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B and Li YL. 2004. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: Petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148(4): 443–470
- Li XP, Zhang L, Wei C, Ai Y and Chen J. 2007. Petrology of rodingite derived from eclogite in western Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3): 363–382
- Li XP, Zhang LF, Wilde SA, Song B and Liu XM. 2010. Zircons from rodingite in the Western Tianshan serpentinite complex: Mineral chemistry and U-Pb ages define nature and timing of rodingitization. *Lithos*, 118(1–2): 17–34
- Li XP, Yang JS, Robinson P, Xu ZQ and Li TF. 2011. Petrology and geochemistry of UHP-metamorphosed ultramafic-mafic rocks from the main hole of the Chinese Continental Scientific Drilling Project (CCSD-MH), China: Fluid/melt-rock interaction mafic-ultramafic complex from CCSD-MH. *Journal of Asian Earth Sciences*. 42(4): 661–683
- Li XP, Yan JY, Schertl HP, Kong FM and Xu H. 2014. Eclogite from the Qianliyan Island in the Yellow Sea: A missing link between the mainland of China and the Korean Peninsula. *European Journal of Mineralogy*, 26(6): 727–741
- Liang Q and Grégoire DC. 2000. Determination of trace elements in twenty six Chinese geochemistry reference materials by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 24(1): 51–63
- Liu FL, Gerdes A and Xue HM. 2009. Differential subduction and exhumation of crustal slices in the Sulu HP-UHP metamorphic terrane: Insights from mineral inclusions, trace elements, U-Pb and Lu-Hf isotope analyses of zircon in orthogneiss. *Journal of Metamorphic Geology*, 27(9): 805–825
- Liu FL and Liou JG. 2011. Zircon as the best mineral for *P-T*-time history of UHP metamorphism: A review on mineral inclusions and U-Pb SHRIMP ages of zircons from the Dabie-Sulu UHP rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40(1): 1–39
- 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)
- Malpas J, Zhou MF, Robinson PT and Reynolds PH. 2003. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites, Southern Tibet. In: Dilek Y and Robinson PT (eds.). *Ophiolites in Earth History*. Geological Society, London, Special Publications, 218(1): 191–206
- McDermid IRC, Aitchison JC, Davis AM, Harrison TM and Grove M. 2002. The Zedong terrane: A Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Tsangpo Suture Zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187(3–4): 267–277
- 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. 1975. Classification, characteristics, and origin of ophiolites. *The Journal of Geology*, 83(2): 249–281
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia: Effects of a continental collision. *Science*, 189(4201): 419–426
- Murphy MA, Yin A, Harrison TM, Dürr SB, Chen Z, Ryerson FJ, Kidd WSF, Wang X and Zhou X. 1997. Did the Indo-Asian collision alone create the Tibetan Plateau? *Geology*, 25(8): 719–722
- Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, Dupré 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)
- Pan GT and Ding J. 2004. *Geological Map of the Qinghai-Tibet Plateau and Adjacent Areas (1:1500000)*. Chengdu: Chengdu Cartographic Publishing House (in Chinese)
- Pearce JA and Peate DW. 1995. Tectonic implications of the composition of volcanic arc magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251–285
- Ravna K. 2000. The garnet-clinopyroxene  $Fe^{2+}$ -Mg geothermometer: An updated calibration. *Journal of Metamorphic Geology*, 18(2): 211–219
- Robertson AHF. 2002. Overview of the genesis and emplacement of Mesozoic ophiolites in the Eastern Mediterranean Tethyan region. *Lithos*, 65(1–2): 1–67
- Rollinson HR. 1993. *Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation*. New York: Longman Scientific & Technical, 1–352
- Schertl HP and Sobolev NV. 2013. The Kokchetav Massif, Kazakhstan: “Type locality” of diamond-bearing UHP metamorphic rocks. *Journal of Asian Earth Sciences*, 63: 5–38
- Schertl HP, Neuser RD, Logvinova AM, Wirth R and Sobolev NV. 2015. Cathodoluminescence microscopy of the Kokchetav ultrahigh-pressure calcisilicate rocks: What can we learn from silicates, carbon-hosting minerals, and diamond? *Russian Geology and Geophysics*, 56(1–2): 100–112
- Schmidt MW. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: An experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110(2–3): 304–310
- 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
- Tapponnier 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. 1981a. The Tibetan side of the India-Eurasia collision. *Nature*, 294(5840): 405–410
- Tapponnier P, Mercier JL, Armijo R, Han TL and Zhou J. 1981b. Field evidence for an active normal faulting in Tibet. *Nature*, 294(5840): 410–414
- Wakabayashi J and Dilek Y. 2003. What constitutes ‘emplacement’ of an ophiolite? Mechanisms and relationship to subduction initiation and formation of metamorphic soles. In: Dilek Y and Robinson PT (eds.). *Ophiolites in Earth History*. Geological Society, London, Special Publications, 218(1): 427–447
- Wang R, Xia B, Zhou GQ, Zhang YQ, Yang ZQ, Li WQ, Wei DL, Zhong LF and Xu LF. 2006. SHRIMP zircon U-Pb dating for gabbro from the Tiding ophiolite in Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 51(1): 114–117 (in Chinese)
- Weaver SD, Saunder AD, Pankhurst RJ and Tarney J. 1979. A geochemical study of magmatism associated with the initial stages of back-arc spreading: The quaternary volcanics of Bransfield Strait, from South Shetland Islands. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 68(2): 151–169
- Wu FY, Ji WQ, Liu CZ and Chung SL. 2010. Detrital zircon U-Pb and

- Hf isotopic data from the Xigaze fore-arc basin: Constraints on Transhimalayan magmatic evolution in southern Tibet. *Chemical Geology*, 271(1-2): 13-25
- 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
- Xia B, Zhou GQ, Li JF, Chen GW, Liu WL, Wang R and Dong BH. 2012. A study on mineralogical phase confining reaction from spinel to garnet in Baigang lherzolite of the Yarlung Zangbo Suture Zone, and its geological implication. *Geological Review*, 58(3): 453-470 (in Chinese with English abstract)
- Xiao XC and Gao YL. 1981. The ophiolite in the Xigaze and its related tectonic problems of the southern Tibet, China. Beijing: Geological Publishing House, 143-163 (in Chinese)
- Yang JJ. 2003. Titanian clinohumite-garnet-pyroxene rock from the Su-Lu UHP metamorphic terrane, China: Chemical evolution and tectonic implications. *Lithos*, 70(3-4): 359-379
- Yang JJ. 2006. Ca-rich garnet-clinopyroxene rocks at Hujialin in the Su-Lu Terrane (eastern China): Deeply subducted arc cumulates? *Journal of Petrology*, 47(5): 965-990
- Zhang L, Ellis DJ, Arculus RJ, Jiang W and Wei C. 2003. "Forbidden zone" subduction of sediments to 150km depth: The reaction of dolomite to magnesite + aragonite in the UHPM metapelites from western Tianshan, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 21(6): 523-529
- Zhang LF, Ellis DJ and Jiang WB. 2002. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China, part I. Evidence from the inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 87(7): 853-860
- 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)
- Zhong LF, Xia B, Zhou GQ, Zhang YQ, Wang R, Wei DL and Yang ZQ. 2006. SHRIMP age determination of the diabase in Luobusa ophiolite, Southern Xizang (Tibet). *Geological Review*, 52(2): 224-229 (in Chinese with English abstract)
- Zhou MF, Robinson PT, Malpas J and Li ZJ. 1996. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37(1): 3-21
- Zhou S, Mo XX, Mahoney JJ, Zhang SQ, Guo TJ and Zhao ZD. 2002. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusa ophiolite, Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 47(2): 144-147
- Ziabrev SV, Aitchison JC, Abrajevitch AV, Badenzhu, Davis AM and Luo H. 2003. Precise radiolarian age constraints on the timing of ophiolite generation and sedimentation in the Dazhuqu terrane, Yarlung-Tsangpo suture zone, Tibet. *Journal of the Geological Society*, 160(4): 591-599

### 附中文参考文献

- 陈根文, 刘睿, 夏斌, 邓腾. 2015. 西藏吉定蛇绿岩地球化学特征及其构造指示意义. *岩石学报*, 31(9): 2495-2507
- 和钟铎, 杨德明, 王天武. 2006. 西藏嘉黎断裂带凯蒙蛇绿岩的年代学、地球化学特征及大地构造意义. *岩石学报*, 22(2): 653-660
- 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
- 李文霞, 赵志丹, 朱弟成, 董国臣, 周肃, 莫宣学, DePaolo D, Dilek Y. 2012. 西藏雅鲁藏布蛇绿岩形成构造环境的地球化学鉴别. *岩石学报*, 28(5): 1663-1673
- 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
- 潘桂棠, 丁俊. 2004. 青藏高原及邻区地质图(1:1500000). 成都: 成都地图出版社
- 王冉, 夏斌, 周国庆, 张玉泉, 杨之青, 李文霞, 韦栋梁, 钟立峰, 徐力峰. 2006. 西藏吉定蛇绿岩中辉长岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄. *科学通报*, 51(1): 114-117
- 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
- 夏斌, 周国庆, 李建峰, 陈根文, 刘维亮, 王冉, 董冰华. 2012. 雅鲁藏布江缝合带白朗县白岗尖晶石-石榴子石相二辉橄榄岩的相界反应及其意义. *地质论评*, 58(3): 453-470
- 肖序常, 高延林. 1981. 西藏雅鲁藏布江缝合带中段高压低温变质带的新认识. 见: 喜马拉雅地质(II). 北京: 地质出版社, 143-163
- 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
- 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 张玉泉, 王冉, 韦栋梁, 杨之青. 2006. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年. *地质论评*, 52(2): 224-229