

# 西藏日喀则地区白朗蛇绿岩中石榴辉石岩的岩石地球化学、年代学及其构造意义\*

赵佳楠<sup>1,2</sup> 许志琴<sup>2\*\*</sup> 梁凤华<sup>2</sup>

ZHAO JiaNan<sup>1,2</sup>, XU ZhiQin<sup>2\*\*</sup> and LIANG FengHua<sup>2</sup>

1. 中国地质大学地球科学与资源学院,北京 100083

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

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

2. State Key Laboratory for Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2015-06-10 收稿, 2015-09-09 改回.

**Zhao JN, Xu ZQ and Liang FH. 2015. Geochemistry and geochronology of Bailang garnet pyroxenite within Xigaze area in Tibet, and its tectonic significance. *Acta Petrologica Sinica*, 31(12):3687–3700**

**Abstract** Bailang garnet pyroxenite is located in Yarlung-Zangbo ophiolite belt of southern Tibet within the Xigaze region. Many scholars are interested in it as a result of its important tectonic location and significance. Studying it is helpful to research emplacement mechanism of the whole ophiolite belt. Field occurrence of Bailang garnet pyroxenite is a tectonic block, surrounded by serpentinized mantle peridotite. The Early Cretaceous Angren Formation and purple red silicolites get no deformation and strong tectonic foliation without undergoing metamorphism. In the field, there is a clear boundary between serpentinized mantle peridotite and garnet pyroxenite. Furthermore, Bailang garnet pyroxenite is studied in the laboratory with the approaches to petro-geochemistry, geochronology and tectonic geodynamics. Based on petro-geochemical analysis, Bailang garnet pyroxenite is formed in the stable physical and chemical environment without fluid, and it is depleted in high-field strength elements such as Th, Ta and Nb. Tested by LA-ICP-MS, its magmatic zircon U-Pb age is at least  $149.0 \pm 3.1$  Ma. Moreover the average value of zircon  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  is +17.7, indicating that its primitive magma is mainly derived from depleted mantle without magma mixing. According to trace elements studying, a conclusion is made that its primary magma originated from upper mantle. In addition, the forming of this rock is related to subduction between Indian plate and Eurasian plate. It's confirmed that forming position is located in upper mantle and primitive magma originates from N-MORB. It suggests that Neo-Tethys Ocean had been closed and continental collision did not substantially occur. The same to say, since 149Ma, Indian plate and Eurasian plate are still moving with opposite direction. In terms of geochronological and tectonic geodynamical analysis, the above explanation is quite reasonable.

**Key words** Bailang garnet pyroxenite; Lithology; Geochemistry; Geochronology; Tectonic geodynamics

**摘要** 白朗石榴辉石岩位于西藏南部雅鲁藏布江蛇绿岩带上,地处于日喀则地区白朗县境内,因其具有重要的大地构造位置和意义,得到了国内外诸多学者关注。国内外学者对该岩体的研究有助于深入剖析雅鲁藏布江蛇绿岩带的就位机制。本文以白朗石榴辉石岩为研究对象,其野外产出为构造岩块,围岩为没有变形特征的蛇纹石化地幔橄辉岩,早白垩世昂仁组紫红色硅质岩也没有构造变质现象,且石榴辉石岩与蛇纹石化地幔橄辉岩间界限截然。通过对其进行岩石地球化学和年代学的研究,并结合大地构造动力学观点,认为西藏日喀则地区石榴辉石岩属钙碱性超基性岩,形成于无流体无水的稳定物理化学环境中,略亏损高场强元素 Th、Ta、Nb 等,锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $149.0 \pm 3.1$  Ma,且锆石  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +17.7,说明原始岩浆主要源于亏损地幔,且没有发生岩浆混染。总结:本文确定白朗石榴辉石岩原始岩浆来源于上地幔,并且该岩石的形成与印度板块和欧亚板块俯冲有关,但在该岩石形成过程中印度板块和欧亚板块没有发生陆陆碰撞。

\* 本文受中国地质调查局地质调查项目(1212010818035、12120114022601、12120115026801)和国家自然科学基金创新研究群体项目(41221061)联合资助。

第一作者简介:赵佳楠,男,1989年生,博士生,构造地质学专业,E-mail: zhaojianan1989@163.com

\*\* 通讯作者:许志琴,女,1941年生,研究员,中国科学院院士,构造地质学,长期从事大陆动力学研究工作,E-mail: xuzhiqin2015@126.com

关键词 白朗石榴辉石岩; 岩石学; 地球化学; 年代学; 大地构造动力学

中图法分类号 P588.125; P597.3

位于西藏南部的雅鲁藏布江缝合带(简称“雅江缝合带”,英文简写“YZSZ”)近东西向展布,延伸2000多千米,该缝合带是印度板块和欧亚板块的碰撞边界(Aitchison and Davis, 2004)。从构造上看,雅鲁藏布江混杂岩带向南以雅鲁藏布江缝合带为界,向北以南倾大型反向逆冲断层为界(Yin *et al.*, 2006),该大型反向逆冲断层局部与雅鲁藏布江缝合带一致(Yin *et al.*, 1999)(图1)。在雅江缝合带上蛇绿岩分布不连续(Masle, 1985; Reuber, 1986a, b),西部为东波-普兰-当雄蛇绿岩,中部为萨嘎-桑桑-吉定-日喀则蛇绿岩,东部为泽当-罗布莎蛇绿岩。白朗蛇绿岩位于雅江缝合带的中部,且出露较好。自潘裕生发现白朗蛇绿混杂岩以来,激起了诸多学者对此处蛇绿岩的研究兴趣,并提出对该处蛇绿岩的研究有助于确定雅江蛇绿岩的侵位机制(潘裕生, 1980)。杨经绥等在西藏罗布莎铬铁矿和地幔橄榄岩中发现超高压矿物金刚石,并以此为依据提出早 MOR(洋中脊)晚 SSZ(洋内超俯冲)的雅鲁藏布江蛇绿岩带成因模式(Allégre *et al.*, 1984; Dilek and Furnes, 2001; Dilek and Thy, 2009; Dubois-Côté *et al.*, 2005; 杨经绥等, 2008; Xu *et al.*, 2012, 2013; 许志琴等, 2011)。夏斌等(2012)在日喀则地区白朗县白岗村发现尖晶石石榴石二辉橄榄岩,并通过岩石中橄榄石、辉石、尖晶石和石榴子石的研究,提出存在温度大于800°C、压力大于1.8GPa的地幔石榴子石域超高压环境。Xu *et al.* (2015)对雅鲁藏布江缝合带上典型蛇绿岩露头进行了

详细岩石学、构造地质学及其侵位机制的剖析,认为沿缝合带出露的蛇绿岩体形成于130~120Ma 弧后盆地环境(图1),是新特提斯洋岩石圈残片,并提出雅鲁藏布江缝合带具有明显的构造分异特征,既具有向南和向北的逆冲作用,又具有与韧性变形相关的组构特征。

张泽明等(2007)研究东喜马拉雅构造结南迦巴瓦群岩中的石榴辉石岩是产于麻粒岩相变质岩中的超高压变质岩,是榴辉岩相高压变质作用的产物,而门清波等(2013)研究的河北汉诺坝石榴辉石岩则为岩浆底侵于上地幔顶部形成的堆晶岩,是壳幔过渡带的典型超基性岩,前人对石榴辉石岩的研究因产出不同研究的结果也有差别。岩石命名中辉石岩和榴辉岩是不同的,辉石岩属火成岩中超基性岩类,可含石榴子石;而榴辉岩类通常是已到达麻粒岩相或榴辉岩相的变质岩(常丽华等, 2009; 陈曼云等, 2009)。本文选取白朗蛇绿岩中的石榴辉石岩为研究对象,通过对该岩石的岩石学、地球化学和年代学研究,剖析岩石形成的物理化学环境,并对该岩石的地球动力学成因进行讨论。

## 1 地质背景

新特提斯蛇绿岩体沿着雅鲁藏布江缝合带出露不连续,这些分散且以断层为界的蛇绿岩体通常被含有蛇绿岩、深海沉积岩和变质岩块体的混杂岩覆盖。雅鲁藏布江蛇绿

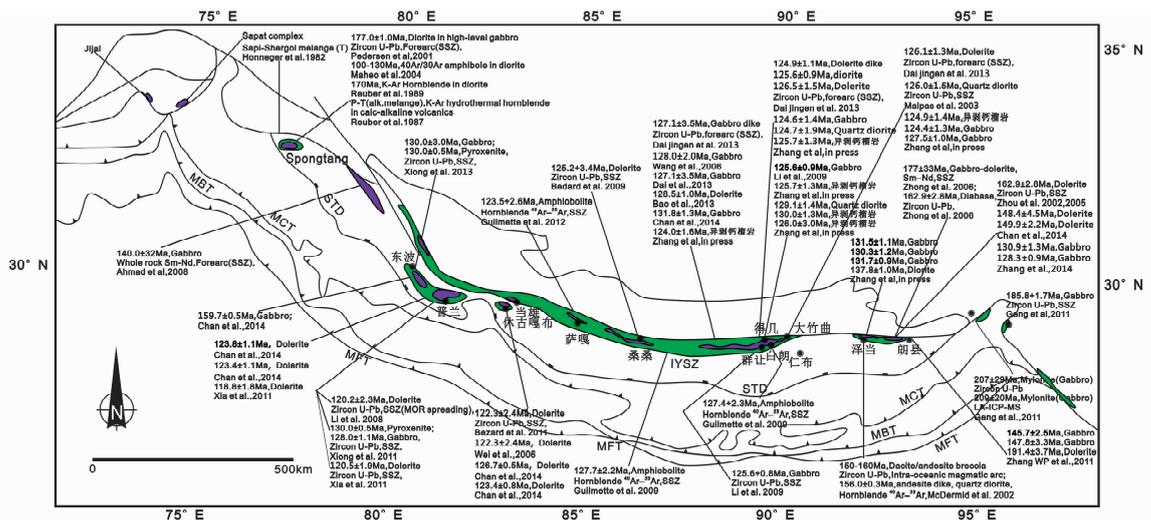


图1 雅鲁藏布江缝合带构造格架与年龄图

STD-藏南拆离系; MCT-主中央逆冲断层; MBT-主边界逆冲断层; MFT-主前缘逆冲断层; IYSZ-印度雅鲁藏布江缝合带. 图中文献来源: Bédardé *et al.*, 2009; Dai *et al.*, 2012; Guilmette *et al.*, 2009, 2012; Hébert *et al.*, 2003, 2012; Liu *et al.*, 2010; Malpas *et al.*, 2003; McDermid *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; 李建峰等, 2008, 2009; 刘钊等, 2011; 夏斌等, 2008; 熊发挥等, 2011

Fig. 1 Tectonic map of Yarlung Zangbo ophiolite belt with dating data

STD-South Tibet detachment; MCT-Main central thrust; MBT-Main Boundary thrust; MFT-Main Front thrust; IYSZ-India-Yarlung Zangbo suture zone

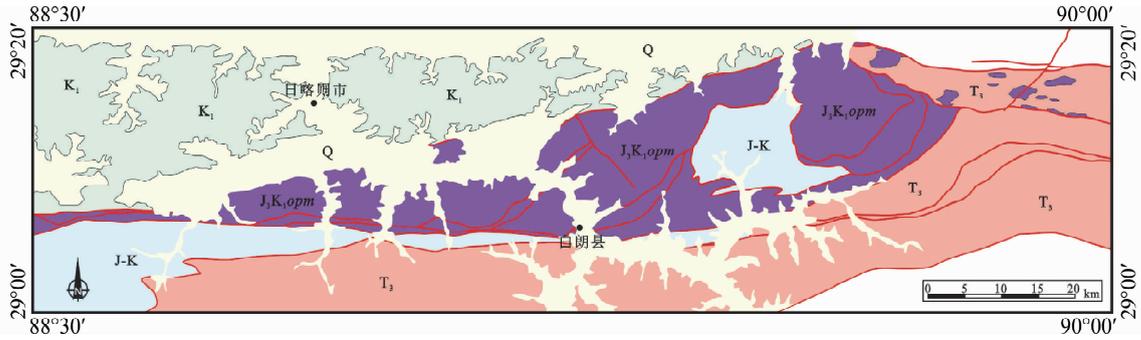


图2 日喀则地区白朗蛇绿岩地质简图

T<sub>3</sub>-晚三叠世地层; J-K-侏罗纪-白垩纪地层; K<sub>1</sub>-早白垩世地层; J<sub>3</sub>K<sub>1</sub>opm-晚侏罗世至早白垩世蛇绿混杂岩; Q-第四季沉积物

Fig.2 Geological map of Bailang ophiolite belt within the Xigaze region

T<sub>3</sub>-Late Triassic stratum; J-K-Jurassic-Cretaceous stratum; K<sub>1</sub>-Early Cretaceous stratum; J<sub>3</sub>K<sub>1</sub>opm-Late Jurassic-Early Cretaceous ophiolite mélange; Q-Quaternary sediments

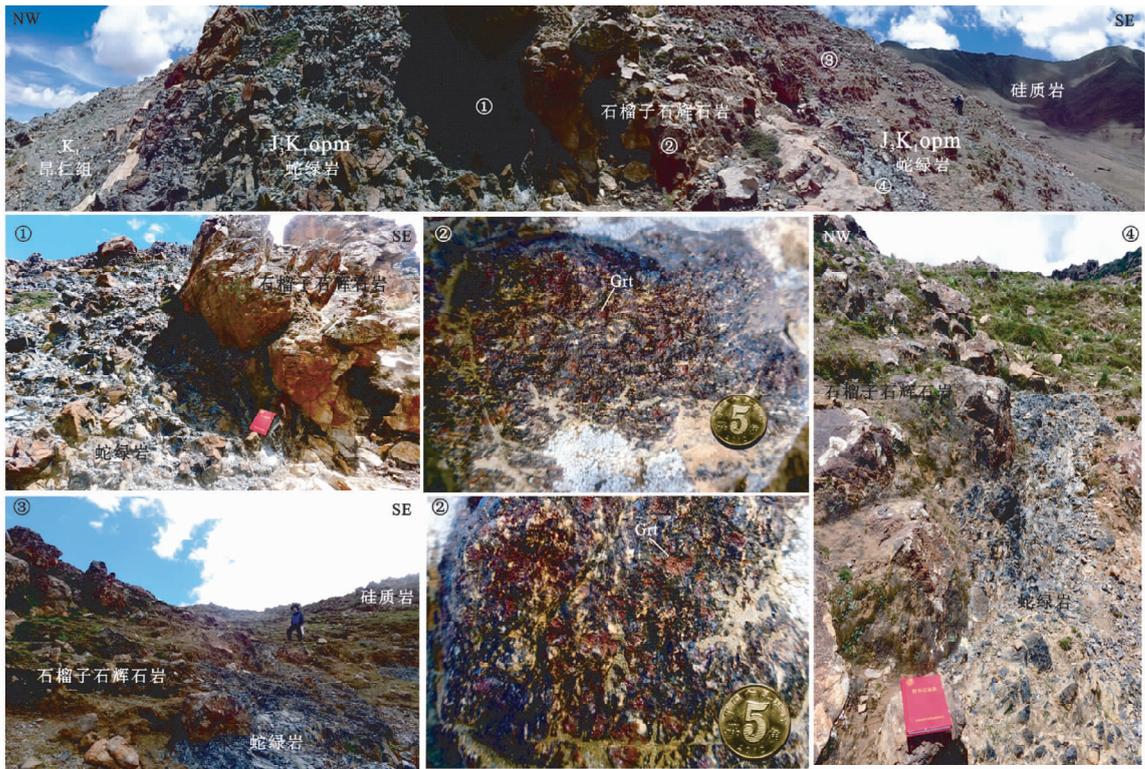


图3 白朗石榴辉石岩野外照片

①、③、④为蛇绿岩与石榴子石辉石岩界限; ②石榴子石辉石岩

Fig.3 Field occurrence of the Bailang garnet pyroxenite

Photograph ①, ③ and ④ are the boundary between ophiolite and garnet pyroxenite. Photograph ② is the details of garnet pyroxenite

岩带下伏为复理石单元,该复理石单元包括晚二叠世灰岩、早三叠世远洋灰岩和晚白垩世钙质片岩和枕状玄武岩 (Diener, 1898; Von Kraft, 1902)。蛇绿岩带北部为日喀则前陆盆地和冈底斯岩浆岛弧带,日喀则前陆盆地位于拉萨地体的南缘,由碎屑复理石夹少量泥灰岩组成,冈底斯岩基由晚侏罗世至古近纪的钙碱性花岗岩类组成,该花岗岩类的形成与碰撞前亚洲南部活动大陆边缘有关 (Chu *et al.*, 2006)。

蛇绿岩带南部为喜马拉雅造山带,由特提斯喜马拉雅地层序列、高喜马拉雅地层序列和低喜马拉雅地层序列组成,且均属于印度板块被动大陆边缘 (图 1)。特提斯喜马拉雅地层序列由元古代至始新世的硅质碎屑岩、碳酸盐岩组成,夹古生代、中生代火山岩。白朗蛇绿岩位于雅鲁藏布江蛇绿岩带的中段,是日喀则蛇绿岩的一部分。白朗蛇绿岩总体呈近东西向展布,在白朗县附近的蛇绿岩局部呈北东-南西向展布,

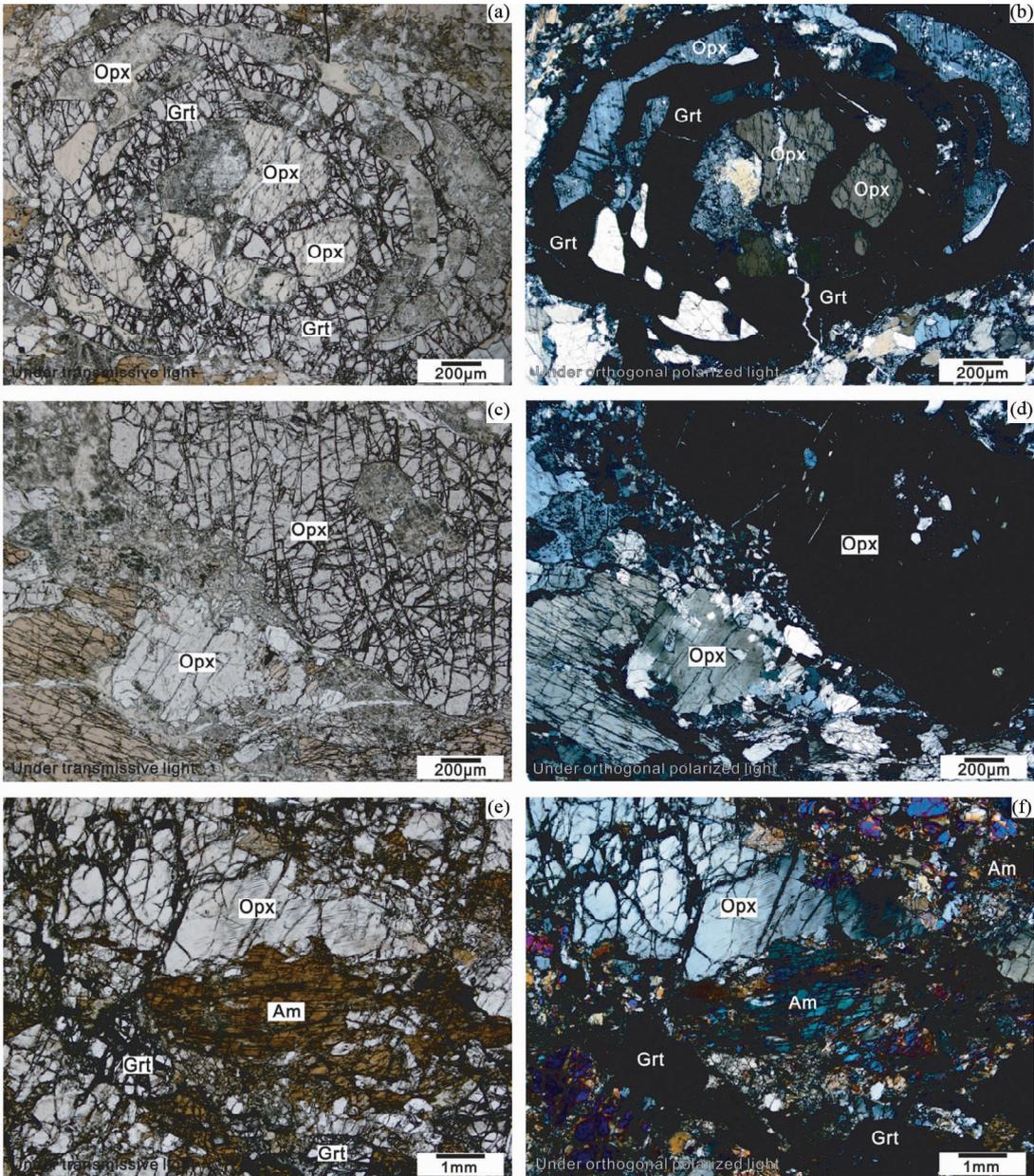


图4 白朗石榴辉石岩显微照片

(a, c, e)为透射光下观察; (b, d, f)为正交偏光下观察. Grt-石榴子石; Opx-斜方辉石; Am-角闪石

Fig. 4 Micrographs of the Bailang garnet pyroxenite

Fig. 4a, c, e are observed under transmissive light. Fig. 4b, d, f are observed under orthogonal polarized light. Grt-garnet; Opx-orthopyroxene; Am-amphibole

宽约16km,主要由地幔橄榄岩、辉绿岩墙群和玄武岩组成,其西北侧与早白垩世复理石沉积地层断层接触,且蛇绿岩向北逆冲于早白垩世复理石沉积地层之上;其东南侧与放射虫硅质岩和晚三叠世沉积岩断层接触,且蛇绿岩向南逆冲于放射虫硅质岩之上(Xu *et al.*, 2015)(图2)。

白朗石榴辉石岩地处西藏日喀则地区白朗县东北方雪布村东侧,地理坐标为29°08'03"N, 89°19'34"E, 4539m,位于白朗蛇绿岩中,野外出露宽度约5m,垂直于白朗蛇绿岩走向且从NW至SE地层依次为早白垩世昂仁组、蛇纹石化地幔

橄榄岩、石榴子辉石岩、蛇纹石化地幔橄榄岩、紫红色硅质岩(图3)。通过野外实地考察,白朗石榴辉石岩野外产出为构造岩块,周围被蛇纹石化地幔橄榄岩包裹,地幔橄榄岩除蛇纹石化强烈外没有显著变质现象,早白垩世昂仁组和紫红色硅质岩也没有强烈面理化等构造变质现象,且石榴辉石岩与蛇纹石化地幔橄榄岩间界限截然。经前人研究表明没有在白朗蛇绿岩中发现金刚石等高压矿物(杨经绥等, 2008, 2011; Yang *et al.*, 2014)。

## 2 岩石学特征

西藏日喀则地区白朗石榴子石辉石岩位于地幔橄榄岩旁,与地幔橄榄岩呈断层接触,除橄榄岩外,围岩还有含磁铁矿斜方辉石岩、蛇纹石化斜方角闪岩(原岩为斜方辉石岩),上述岩石中辉石普遍发生蚀变,岩石中的辉石蚀变成为角闪石(图4)。石榴辉石岩也普遍发生蚀变,其中辉石普遍蚀变为角闪石,但仍有辉石假象残留。在野外可见蚀变后的石榴斜方角闪岩、石榴二辉角闪岩,其中石榴子石在透射光下呈正高至极高正突起,裂纹多,粒度为0.2~0.6mm,含量约占15%,正交偏光下呈全消光,他形粒状,矿物的中部和边部都存在不同程度的溶蚀现象,矿物边缘具不规则溶蚀边(图4)。该岩石中辉石(Py)约占40%,其中斜方辉石(Opx)约占25%,单斜辉石(Cpx)约占15%,辉石的晶型呈半自形短柱状,正交偏光下斜方辉石干涉色为一级黄或黄灰,单斜辉石干涉色在一级紫至二级蓝之间,单偏光下解理仍可见两组完全解理,两组解理夹角近垂直。角闪石(Am)在岩石中居多,少数仍旧保留辉石晶型,大多数角闪石呈他形-半自形长柱状,边部存在角闪石的反应边和溶蚀边,说明折返出露地表时石榴辉石岩所处的物理化学环境发生改变,并伴有含水流体加入。在岩石中少见橄榄石,约占1%或不见。

## 3 分析方法

全岩样品分析由中国地质科学院国家地质实验测试中心完成,其中氧化物含量采用X荧光光谱仪3080E测试,执行GB/T 14506.28—1993标准; $H_2O^+$ 标准执行GB/T 14506.2—1993, $CO_2$ 标准执行GB 9835—1988;稀土元素(La、Ce、Pr、Nd、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu)和部

分微量元素(Y、Cu、Pb、Th、U、Hf、Ta、Sc、Cs、V、Co、Ni)采用等离子质谱Excell测试,执行标准为T 0223—2001;少数微量元素(Sr、Ba、Zn、Nb、Zr、Ga)用X荧光光谱仪2100测试,并执行JY/T 016—1996标准。

锆石分选采用重砂方法完成。CL图像分析由中国地质科学院地质研究所大陆构造与动力学国家重点实验室高分辨热场发射能谱阴极发光室(SEM-EDS-CL)完成,仪器由热场发射扫描电镜(Nano SEM450)、阴极荧光谱仪(Gatan Mono CL4)和牛津电制冷能谱仪(INCA XMax50 EDS)组成,可提取高精度全光、单光阴极发光图像。锆石LA-ICP-MS U-Pb测年和Lu-Hf同位素测试在天津地质矿产研究所完成,所用仪器为Neptune多接收等离子质谱和Newwave UP193紫外激光剥蚀系统(LA-MC-ICP-MS),U-Pb同位素测试方法及流程见李怀坤等(2010),Lu-Hf同位素测试方法及流程见耿建珍等(2011)。

## 4 分析结果

### 4.1 全岩地球化学

选取西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩7个地球化学样品进行全岩分析,该岩中 $SiO_2$ 含量为39.16%~45.10%,平均含量为43.21%(<45%),属超基性岩范畴; $Al_2O_3$ 平均含量为14.96%, $Na_2O$ 平均含量为1.35%, $K_2O$ 平均含量为0.15%, $MgO$ 平均含量为9.59%, $FeO^T$ 平均含量为9.63%,该岩石总体呈现高Al贫Na、K的特征(表1)。在火成岩TAS图解中,落入橄榄辉长岩的范围内,并属于亚碱性系列(图5a)。在 $SiO_2$ -AR判别岩石碱性图解中,该岩石为钙碱性,与 $K_2O$ - $SiO_2$ 图解所表明的结果一致(图5b)。对该岩石地球化学数据进行CIPW标准矿物计算,其中该岩石固结指数(SI)平均为45.96,分异指数(DI)平均为11.13,表明该岩

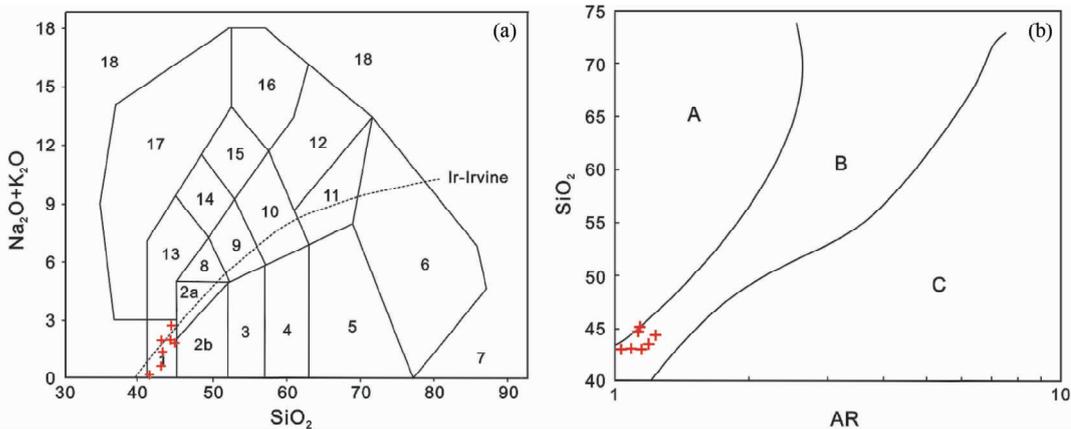


图5 白朗石榴辉石岩岩石判别图解

(a)  $Na_2O + K_2O$ - $SiO_2$ 图; (b) AR- $SiO_2$ 图. A-钙碱性; B-碱性; C-过碱性

Fig. 5 Classification diagrams of Bailang garnet pyroxenite

(a)  $Na_2O + K_2O$ - $SiO_2$  diagram; (b) AR- $SiO_2$  diagram. A-calc-alkaline; B-alkaline; C-paralkaline

表1 白朗石榴辉石岩主量元素 (wt%) 及稀土元素 ( $\times 10^{-6}$ ) 含量Table 1 Chemical compositions of major oxides (wt%) and trace elements ( $\times 10^{-6}$ ) of the Bailang garnet pyroxenite

Sample No.	XY7B-3-1	XY7B-6-2	XY7B-4-2	XY7B-6-1	XY7B-7-1	Z-14-1-1	Z-21-1-1
SiO <sub>2</sub>	42.98	39.16	44.39	43.03	43.01	45.10	44.80
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.83	13.48	15.31	17.40	14.62	14.60	14.50
CaO	17.21	26.38	10.65	15.33	13.24	14.35	14.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.83	2.26	3.00	1.95	1.98	4.80	4.71
FeO	8.18	5.03	8.01	6.15	8.55	6.08	6.07
K <sub>2</sub> O	0.27	0.01	0.30	0.22	0.18	0.04	0.04
MgO	6.83	8.19	11.12	10.08	12.01	9.48	9.45
MnO	0.20	0.13	0.19	0.19	0.16	0.19	0.20
Na <sub>2</sub> O	0.38	0.03	2.50	1.21	1.77	1.76	1.78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.13	0.06	0.11	0.04	0.08	0.09	0.10
TiO <sub>2</sub>	1.34	0.73	1.49	0.48	1.24	0.42	0.40
CO <sub>2</sub>	0.23	0.44	0.09	0.34	0.25	0.31	0.32
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	3.90	3.24	2.32	2.70	2.00	2.60	2.70
LOI	3.67	3.39	2.14	2.70	1.69	2.10	2.06
Total	102.98	102.53	101.62	101.82	100.78	101.92	101.48
ALK	0.65	0.04	2.80	1.43	1.95	1.80	1.82
FeO <sup>T</sup>	10.73	7.06	10.71	7.90	10.33	10.40	10.31
m/f	1.31	2.46	2.15	2.59	2.29	2.11	2.11
MgO/FeO <sup>T</sup>	0.64	1.16	1.04	1.28	1.16	0.91	0.92
FeO <sup>T</sup> /MgO	1.57	0.86	0.96	0.78	0.86	1.10	1.09
Mg <sup>#</sup>	56.63	71.06	68.24	72.14	69.60	67.81	67.86
Fe <sup>#</sup>	43.37	28.94	31.76	27.86	30.40	32.19	32.14
Li	10.10	8.39	11.80	9.14	17.60	9.11	9.22
Be	0.32	0.12	0.28	0.09	0.30	0.10	0.13
Cr	246	219	381	361	437	350	360
Mn	1540	1066	1510	1547	1224	1545	1541
Co	49.9	38.3	52.0	42.5	52.5	43.4	41.3
Ni	84.1	94.3	168.0	113.0	137.0	110.0	114.0
Cu	27.5	67.8	95.2	47.7	35.5	47.1	48.2
Zn	99.8	57.3	90.9	45.6	82.5	46.2	47.6
Ga	16.3	6.9	15.9	11.6	15.5	14.9	14.8
Rb	3.29	0.15	2.52	1.82	1.05	0.20	0.20
Sr	32.4	9.3	91.9	27.6	46.0	36.3	35.8
Mo	0.11	0.07	0.28	0.58	0.14	0.41	0.53
Cd	0.10	0.11	0.11	0.07	0.12	0.08	0.07
In	0.07	0.05	0.08	0.05	0.07	0.05	0.05
Cs	0.15	0.05	0.16	0.17	0.19	0.01	0.01
Ba	9.99	3.45	12.70	12.00	9.47	8.20	8.50
Pb	0.51	2.37	1.85	2.96	0.87	2.91	2.85
Th	0.14	0.06	0.06	0.15	0.10	0.05	0.05
U	0.17	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	0.08
Nb	1.01	0.34	0.85	0.73	0.70	0.70	0.60
Ta	0.11	0.05	0.08	0.07	0.06	0.40	0.40
Zr	72.3	38.4	54.5	23.5	55.1	66.0	66.0
Hf	2.14	1.25	1.81	0.65	1.78	1.70	1.90
Sn	0.76	0.36	0.90	0.44	0.82	2.00	1.00
Sb	0.05	0.05	0.05	0.05	0.08	0.06	0.05
Ti	8068	4361	8364	3067	6771	3147	3225
W	0.14	0.05	0.17	0.18	0.06	0.16	0.13
As	0.53	0.34	0.63	0.42	0.17	0.41	0.37
V	263	214	321	177	282	332	341
Sc	47.4	35.1	48.0	59.6	44.9	56.6	49.2

续表 1

Continued Table 1

Sample No.	XY7B-3-1	XY7B-6-2	XY7B-4-2	XY7B-6-1	XY7B-7-1	Z-14-1-1	Z-21-1-1
La	2.93	1.22	1.78	1.43	1.90	1.70	1.80
Ce	7.48	3.98	6.58	4.08	7.18	6.30	6.50
Pr	1.64	0.73	1.41	0.72	1.40	1.34	1.30
Nd	9.12	4.22	8.41	3.54	7.92	7.30	7.40
Sm	3.54	1.56	3.34	1.33	3.03	3.03	3.07
Eu	1.34	0.79	1.24	0.57	1.18	1.11	1.24
Gd	5.18	2.43	4.71	2.43	4.04	4.37	4.68
Tb	0.90	0.42	0.86	0.49	0.71	0.77	0.78
Dy	6.35	2.90	5.79	4.29	4.41	5.52	5.34
Ho	1.32	0.62	1.22	1.04	0.91	1.16	1.10
Er	3.78	1.74	3.52	3.49	2.56	3.58	3.59
Tm	0.54	0.27	0.52	0.57	0.37	0.57	0.57
Yb	3.50	1.61	3.37	3.95	2.27	3.48	3.41
Lu	0.53	0.27	0.49	0.69	0.35	0.53	0.51
Y	34.9	16.5	32.6	29.9	23.1	33.1	33.5
ΣREE	48.15	22.76	43.24	28.62	38.23	40.76	41.29
LREE	26.05	12.50	22.76	11.67	22.61	20.78	21.31
HREE	22.10	10.26	20.48	16.95	15.62	19.98	19.98
LREE/HREE	1.18	1.22	1.11	0.69	1.45	1.04	1.07
(La/Yb) <sub>N</sub>	0.60	0.54	0.38	0.26	0.60	0.35	0.38
(La/Sm) <sub>N</sub>	0.53	0.50	0.34	0.69	0.40	0.36	0.38
(Gd/Lu) <sub>N</sub>	1.21	1.11	1.19	0.44	1.43	1.02	1.13
δEu	0.96	1.24	0.96	0.96	1.03	0.93	1.00
δCe	0.83	1.01	0.96	0.98	1.03	0.97	1.00

注:  $ALK = Na_2O + K_2O$ ;  $FeO^T = FeO + 0.8998Fe_2O_3$ ;  $MgO/FeO^T = MgO/(FeO + 0.8998Fe_2O_3)$ ;  $FeO^T/MgO = (FeO + 0.8998Fe_2O_3)/MgO$ ;  $Mg^{\#} = MgO/(MgO + FeO^T)$ ;  $Fe^{\#} = (MgO + FeO^T)/MgO$

石的岩浆分异度低,与大多数原生玄武岩浆的固结指数相近,间接说明形成该岩石的岩浆单一;该岩石的理论干粘度平均为 1.31,理论湿粘度平均为 1.28(路远发, 2004),与岩石圈与地幔的粘度相比,岩石圈的粘度在 7.0 左右,而地幔的粘度为 0.7 ~ 2.0(路风香, 1989),说明原岩岩浆源于地幔,因下地幔的粘度大于上地幔,且接近 2.0,可推断原岩岩浆源于上地幔;该岩石的理论液相线平均温度为 1309.5°C(路远发, 2004),且上地幔岩浆温度在 1300 ~ 3000°C 之间(路远发, 2004),与上地幔岩浆温度范围吻合。通过对西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩的主量元素分析,表明该岩石属钙碱性超基性岩,并源于上地幔岩浆。

西藏日喀则白朗石榴辉石岩总体亏损大离子亲石元素 Sr, 高场强元素含量变化较为稳定(表 1),与正常大洋中脊玄武岩(N-MORB)微量元素相比,亏损 Sr, 相对富集 Rb、Ba, 且 Sr 在大洋中较为富集, Rb 在大陆中较为富集,说明此时该岩石的形成已经脱离大洋环境,由于其位于雅江蛇绿岩带上,可推测该岩石的成岩过程发生在俯冲过程中的无水环境;高场强元素(HFSE)与 N-MORB 大体近似,其中 Th、Ta、Nb 略微亏损,表示该岩石在形成过程中原始岩浆没有侵入陆壳发生岩浆混染。与原始地幔微量元素相比, HFSE 略微富集且稳定, 亏损 Rb、Sr, 稍富集 U、Pb, 但含量不高(图 6)。综合

所述,该岩石的形成过程中已经脱离大洋,且形成在高温无水环境的俯冲环境中。

西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩的总稀土元素平均含量为  $37.58 \times 10^{-6}$ , 其中轻稀土元素(LREE)总平均含量为  $19.67 \times 10^{-6}$ , 重稀土元素(HREE)总平均含量为  $17.91 \times 10^{-6}$ , LREE/HREE 平均值为 1.09(表 1), 表示轻稀土元素和重稀土元素没有分馏现象,说明形成该岩石的原始岩浆地球化学系统稳定,没有发生岩浆混染作用。根据稀土元素标准化配分曲线(图 7), 稀土元素配分曲线总体呈左微倾右平直的平滑曲线,  $(La/Sm)_N$  平均值为 0.46,  $(Gd/Lu)_N$  平均值为 1.07, 说明重稀土元素比较稳定,没有发生内部分馏,而轻稀土元素内部发生分馏,且  $\delta Eu$  平均值为 1.01,  $\delta Ce$  平均值为 0.97, 可以视为没有 Eu 异常和 Ce 异常,说明该岩石在形成过程中地球化学系统和物理化学条件相对稳定。该岩石与大洋中脊玄武岩(MORB)稀土元素含量相似,其 MORB 标准化配分曲线呈近水平的平滑曲线,且与纵坐标  $y=1$  的直线近平行。与原始地幔稀土元素相比,该岩石稀土元素含量总体比原始地幔略微富集,且原始地幔标准化配分曲线呈左陡峭近水平的平滑曲线。综上所述,形成该岩石的原始岩浆来源于 MORB,且形成过程中地球化学系统相对稳定(图 7)。

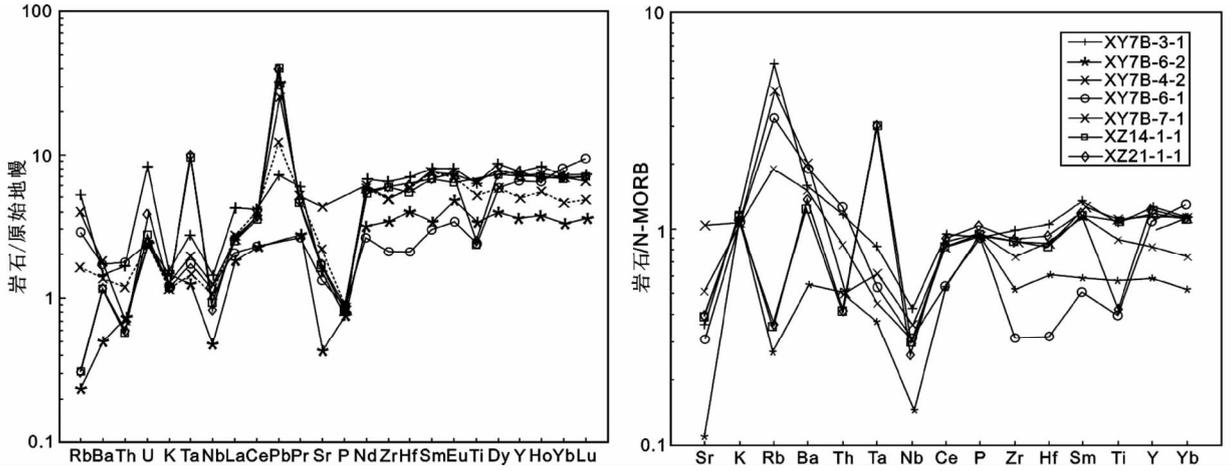


图6 白朗石榴辉石岩微量元素标准化配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 6 Normalized patterns of trace elements for Bailang garnet pyroxenite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

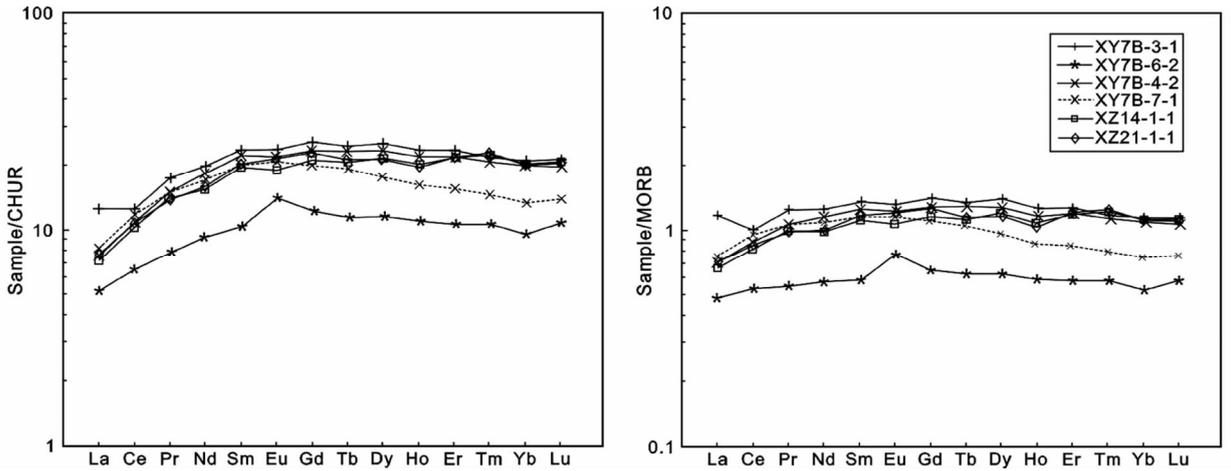


图7 白朗石榴辉石岩稀土元素球粒陨石标准化配分曲线与 MORB 标准化配分曲线(标准化值据 Sun and McDonough, 1989)

Fig. 7 Chondrite-normalized pattern and MORB-pattern of trace elements for Bailang garnet pyroxenite (normalization values after Sun and McDonough, 1989)

#### 4.2 岩石年代学

西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩锆石形态特征根据锆石颗粒大小不同呈现出不同的形态, 锆石边缘多呈光滑浑圆状, 粒度不均, 较大的锆石颗粒粒度在  $120 \times 90 \mu\text{m}$  至  $220 \times 120 \mu\text{m}$ , 长宽比平均 1.5 : 1, 较大的可达 2.2 : 1, 较小的锆石颗粒粒度在  $70 \times 65 \mu\text{m}$  至  $90 \times 80 \mu\text{m}$ , 长宽比平均接近 1, 锆石呈浑圆状(图 8)。阴极发光图像显示锆石亮度较亮, 表示 U、REE、Th 等元素含量较低; 锆石阴极发光 (CL) 图像存在具有宽环带锆石。Th/U 比值在 0.24 至 0.38 之间, 平均 Th/U 比值为 0.30, 锆石具有岩浆锆石向变质锆石转变 Th/U 比值, 存在残余岩浆锆石 Th/U 比值特征, 综上所述, 该岩石锆石大致可归属为岩浆锆石。

优先选择具有宽环带的锆石进行测试, 锆石 LA-ICP-MS

U-Pb 测试结果(表 2)表明, 数据的谐和性较好, 样品石榴辉石岩锆石 U-Pb 年龄为  $149.0 \pm 3.1 \text{Ma}$  (MSWD = 0.093, 95% 置信度), 概率拟合系数为 1.000。通过加权年龄分布图可得, 该样品的加权平均年龄为  $146.7 \pm 1.4 \text{Ma}$  (0.93%) (MSWD = 1.8, 95% 置信度), 在锆石 U-Pb 年龄误差范围内(图 9)。

#### 4.3 锆石 Hf 同位素

对石榴子石辉石岩锆石进行 Hf 同位素分析, 并对数据进行校正, 所测试的锆石均具有较好的 Hf 同位素数据,  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  的误差值 ( $2\sigma$ ) 均小于 0.0003, 所有锆石的  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  值均小于 0.002, 表明锆石形成后放射性成因 Hf 累积少, 能够很好的反映锆石形成时岩浆 Hf 同位素组成特征(吴福元等, 2007), 该岩石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值在 0.283049

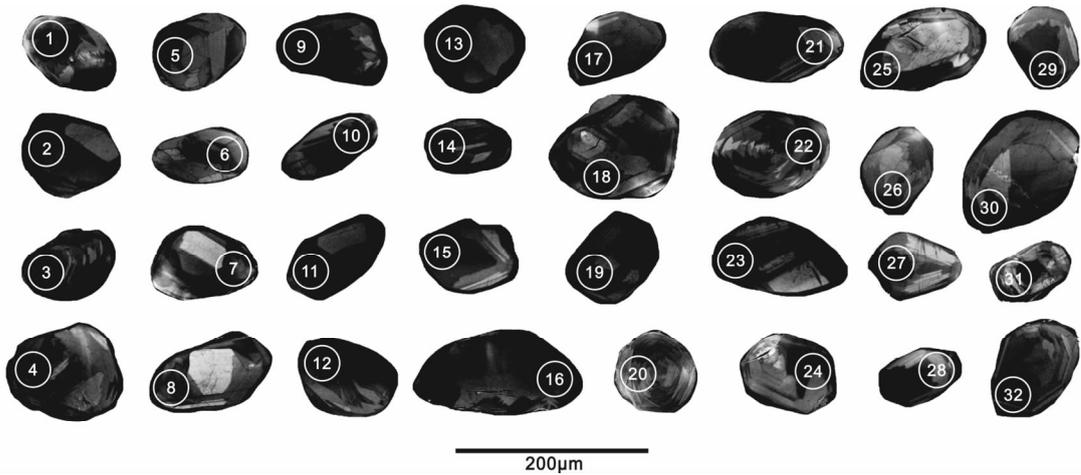


图8 锆石阴极发光图像

Fig. 8 Cathodoluminescence image of zircons

表2 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年数据

Table 2 LA-ICP-MS U-Pb data for zircons

Spot No.	Th/U	Corrected Ratios										Age(Ma)	
		$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{208}\text{Pb}}{^{232}\text{Th}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{238}\text{U}}{^{232}\text{Th}}$	1 $\sigma$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	1 $\sigma$
XZ14-BL-01	0.28	0.41513	0.04006	0.15917	0.00326	0.02630	0.00474	0.15876	0.12793	4.60	0.05	150	2.4
XZ14-BL-02	0.27	0.40938	0.04016	0.15344	0.00319	0.02564	0.00473	0.15069	0.12885	4.61	0.05	144	4.5
XZ14-BL-03	0.28	0.41415	0.04074	0.15126	0.00316	0.02496	0.00467	0.14758	0.12656	4.62	0.05	143	5.1
XZ14-BL-04	0.28	0.41647	0.04095	0.15050	0.00314	0.02469	0.00463	0.14552	0.12540	4.62	0.05	142	1.7
XZ14-BL-05	0.28	0.41875	0.04117	0.15972	0.00312	0.02442	0.00460	0.14334	0.12427	4.61	0.05	151	1.2
XZ14-BL-06	0.28	0.42098	0.04141	0.15887	0.00311	0.02414	0.00456	0.14119	0.12315	4.60	0.05	149	3.6
XZ14-BL-07	0.28	0.41649	0.04071	0.15795	0.00307	0.02424	0.00453	0.25481	0.16775	4.60	0.05	148	2.4
XZ14-BL-08	0.28	0.41870	0.04094	0.15713	0.00305	0.02397	0.00449	0.25142	0.16628	4.61	0.05	148	3.2
XZ14-BL-09	0.27	0.42087	0.04117	0.15634	0.00304	0.02371	0.00446	0.24866	0.16483	4.59	0.05	147	4.7
XZ14-BL-10	0.27	0.42300	0.04143	0.15543	0.00302	0.02343	0.00443	0.24595	0.16340	4.56	0.05	146	2.6
XZ14-BL-11	0.27	1.01942	0.15939	0.15372	0.01105	0.02667	0.00480	0.04717	0.02299	4.55	0.05	144	4.5
XZ14-BL-12	0.28	1.06201	0.15924	0.15376	0.01097	0.02592	0.00473	0.04589	0.02239	4.26	0.04	144	4.8
XZ14-BL-13	0.27	1.10236	0.15930	0.15380	0.01088	0.02520	0.00466	0.05170	0.02262	4.24	0.04	144	3.7
XZ14-BL-14	0.28	1.07208	0.15614	0.15373	0.01060	0.02545	0.00455	0.05037	0.02207	4.19	0.04	144	5.3
XZ14-BL-15	0.28	1.13313	0.15298	0.15377	0.01019	0.02431	0.00432	0.05947	0.02376	4.34	0.04	144	4.8
XZ14-BL-16	0.28	1.10495	0.15012	0.15370	0.00993	0.02446	0.00423	0.05808	0.02324	4.39	0.04	143	4.3
XZ14-BL-17	0.27	1.12298	0.14468	0.15377	0.00963	0.02452	0.00406	0.06846	0.02430	4.38	0.04	143	5.4
XZ14-BL-18	0.37	1.09026	0.14440	0.15374	0.00969	0.02509	0.00411	0.05813	0.02229	4.33	0.04	143	5.2
XZ14-BL-19	0.37	1.05606	0.14423	0.15371	0.00974	0.02567	0.00416	0.04734	0.01973	4.29	0.04	143	2.9
XZ14-BL-20	0.37	1.89965	0.16245	0.15269	0.00524	0.02865	0.00478	0.00541	0.00626	2.68	0.03	143	2.3
XZ14-BL-21	0.37	2.05508	0.16165	0.15267	0.00483	0.02637	0.00424	0.00147	0.00401	2.71	0.03	144	1.4
XZ14-BL-22	0.38	2.13462	0.16026	0.15269	0.00462	0.02549	0.00400	0.00408	0.00478	2.79	0.03	143	1.6
XZ14-BL-23	0.38	2.17528	0.16257	0.15269	0.00461	0.02509	0.00396	0.00398	0.00471	2.73	0.03	143	3.2
XZ14-BL-24	0.36	2.16273	0.15140	0.15283	0.00455	0.02652	0.00382	0.00851	0.00692	2.68	0.03	143	2.6
XZ14-BL-25	0.37	2.10049	0.14631	0.15277	0.00443	0.02676	0.00376	0.00823	0.00676	2.66	0.03	143	5.3
XZ14-BL-26	0.25	0.53784	0.05331	0.16062	0.00142	0.01969	0.00392	0.06543	0.03497	6.33	0.06	150	3.1
XZ14-BL-27	0.24	0.55499	0.05511	0.16065	0.00147	0.01977	0.00402	0.06743	0.03589	6.34	0.06	151	4.1
XZ14-BL-28	0.26	0.53068	0.05661	0.16066	0.00160	0.02110	0.00430	0.06780	0.03905	6.27	0.06	151	2.4
XZ14-BL-29	0.26	0.41653	0.03848	0.16055	0.00113	0.02249	0.00367	0.01881	0.01615	6.53	0.07	152	2.5
XZ14-BL-30	0.37	0.36627	0.04349	0.16057	0.00145	0.02664	0.00489	0.00628	0.01369	6.53	0.07	152	3.0
XZ14-BL-31	0.35	0.32619	0.04082	0.16050	0.00136	0.02611	0.00529	0.00899	0.01619	6.31	0.06	152	2.6
XZ14-BL-32	0.25	0.11366	0.04312	0.16015	0.00081	0.02078	0.00438	0.00244	0.00738	4.61	0.05	150	2.9

表3 白朗石榴辉石岩锆石 Hf 同位素组成

Table 3 Zircon Hf isotopic compositions of Bailang garnet pyroxenite

Spot No.	Age (Ma)	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	$2\sigma$	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	$^{176}\text{Yb}/^{177}\text{Hf}$	$(^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf})_i$	$\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$	$2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ga})$	$t_{\text{DM2}}(\text{Ga})$
XZ14-BLHf-01	150	0.283119	0.000024	0.000022	0.000880	0.283119	15.1	0.8	0.18	0.20
XZ14-BLHf-02	144	0.283200	0.000026	0.000036	0.001428	0.283200	17.9	0.9	0.15	0.17
XZ14-BLHf-03	143	0.283239	0.000028	0.000112	0.004267	0.283239	19.2	0.9	0.16	0.07
XZ14-BLHf-04	142	0.283049	0.000028	0.000038	0.001641	0.283049	12.5	0.9	0.28	0.36
XZ14-BLHf-05	151	0.283167	0.000025	0.000014	0.000501	0.283167	16.9	0.9	0.12	0.09
XZ14-BLHf-06	149	0.283200	0.000027	0.000108	0.003751	0.283200	18.0	0.9	0.18	0.18
XZ14-BLHf-07	148	0.283158	0.000027	0.000013	0.000519	0.283158	16.5	0.9	0.13	0.11
XZ14-BLHf-08	148	0.283154	0.000024	0.000078	0.002673	0.283154	16.3	0.8	0.13	0.12
XZ14-BLHf-09	147	0.283193	0.000020	0.000041	0.001054	0.283193	17.7	0.7	0.08	0.08
XZ14-BLHf-10	146	0.283205	0.000025	0.000134	0.004268	0.283205	18.1	0.9	0.06	0.07
XZ14-BLHf-11	144	0.283199	0.000032	0.000062	0.001754	0.283199	17.8	0.8	0.07	0.07
XZ14-BLHf-12	144	0.283193	0.000025	0.000011	0.000373	0.283193	17.6	0.9	0.08	0.09
XZ14-BLHf-13	144	0.283269	0.000055	0.000024	0.000893	0.283269	20.3	0.9	0.13	0.14
XZ14-BLHf-14	144	0.283216	0.000041	0.000029	0.001217	0.283216	18.4	0.8	0.24	0.20
XZ14-BLHf-15	144	0.283112	0.000047	0.000126	0.004447	0.283112	14.8	0.8	0.19	0.22
XZ14-BLHf-16	143	0.283162	0.000038	0.000055	0.001952	0.283162	16.5	0.7	0.12	0.10
XZ14-BLHf-17	143	0.283396	0.000059	0.000082	0.002738	0.283396	24.8	0.9	0.20	0.22
XZ14-BLHf-18	143	0.283268	0.000043	0.000122	0.004011	0.283268	20.2	0.8	0.25	0.15

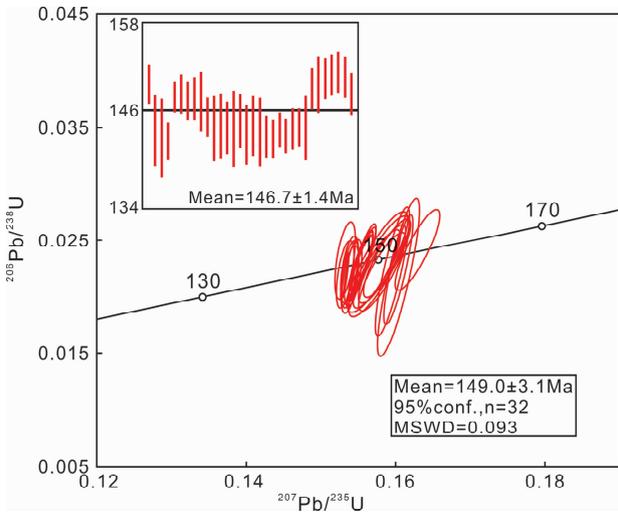
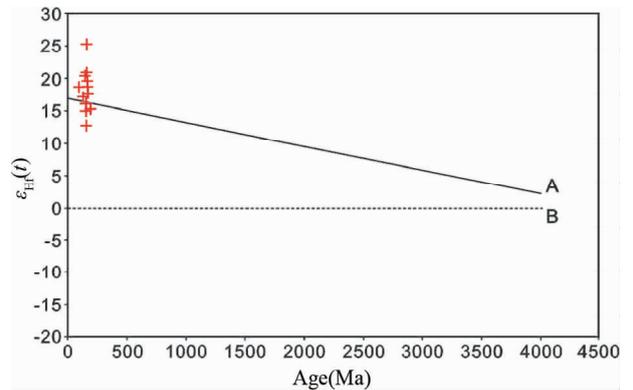


图9 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年谱和图与加权平均锆石年龄计算

Fig. 9 Zircon LA-ICP-MS U-Pb Concordia diagram and averaged age of the garnet pyroxenite

至 0.283396 之间, 平均值为 0.283194, 表明所测锆石中 Hf 同位素分布均一, 指示岩浆来源单一(表 3)。 $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值在 +12.5 至 +24.8 之间, 平均值为 +17.7, 其  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  值绝大多数落入亏损地幔线以上, 极少数落入亏损地幔线以下, 且均为正值, 说明该岩浆主要源于亏损地幔, 没有发生岩浆混染(图 10)。计算得出单阶段模式年龄  $t_{\text{DM}}$  平均值为 0.15Ga, 二阶段模式年龄  $t_{\text{DM2}}$  平均值为 0.17Ga, 该计算结果与该岩石的锆石 U-Pb 年龄  $149.0 \pm 3.1\text{Ma}$  相近, 说明锆石直接源于幔源岩石中, 该岩石岩浆来源于地幔。

图 10 Age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  图解

A-亏损地幔; B-球粒陨石

Fig. 10 Age- $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  diagram

A-depleted mantle; B-chondrite

## 5 讨论

### 5.1 岩石成因

通过全岩地球化学分析, 白朗石榴子石辉石岩的平均  $\text{SiO}_2$  含量为 43.21%, 具高 Al 贫 K、Na 特征, 岩石固结指数 (SI) 平均值为 45.96, 分异指数 (DI) 平均值为 11.13, 说明岩浆分异度低, 与原生玄武岩浆固结指数一致。该岩石的理论湿粘度为 1.28, 理论液相线平均温度为 1309.5°C, 与上地幔岩浆物理条件一致。该岩石亏损 Sr 富集 Rb 且高场强元素和稀土元素含量变化稳定, 说明岩石形成过程中已脱离大洋环境, 且此时物理化学环境为高温无流体无水的稳定地球化学系统。通过 Hf 同位素分析, 该岩石初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值范

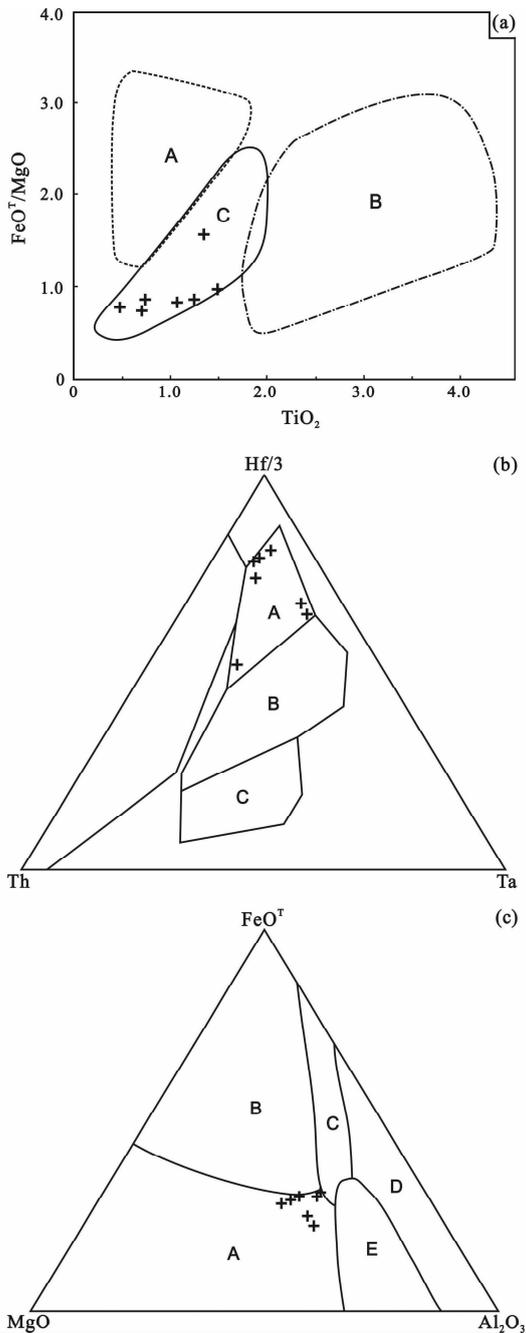


图 11 白朗石榴辉石岩构造环境判别图解

(a)  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{TiO}_2$  图, A-岛弧拉斑玄武岩环境, B-大洋岛弧玄武岩环境, C-大洋中脊玄武岩环境; (b)  $\text{Hf}/3-\text{Th}-\text{Ta}$  图, A-正常大洋中脊玄武岩环境, B-亏损大洋中脊玄武岩与板内拉斑玄武岩环境, C-板内玄武岩环境; (c)  $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  图, A-大洋中脊或洋底环境, B-洋岛环境, C-大陆环境, D-扩张性中央岛弧环境, E-造山带环境

Fig. 11 Tectonic discrimination diagrams of Bailang garnet pyroxenite

(a)  $\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}-\text{TiO}_2$  diagram, A-island arc tholeiitic setting, B-oceanic island basaltic setting, C-mid-oceanic ridge basalt; (b)  $\text{Hf}/3-\text{Th}-\text{Ta}$  diagram, A-normal mid-oceanic ridge basalt, B-depleted mid-oceanic ridge basalt and within-plate tholeiitic setting, C-within-plate basaltic setting; (c)  $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  diagram, A-mid-oceanic ridge or oceanic floor setting, B-oceanic island setting, C-continental setting, D-divergent central island arc environment, E-orogenic belt setting

围为 0.283049 至 0.283396, 平均值为 0.283194, 比值变化范围较小, 说明 Hf 同位素分布均匀, 表明岩浆来源单一;  $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +17.7, 且 Hf 同位素模式年龄与锆石年龄相近, 说明该岩石岩浆来源于地幔。综上所述, 白朗石榴子石辉石岩是钙碱性超基性岩, 且成岩环境为高温无洋水的稳定地球化学系统, 处在脱离大洋的俯冲环境, 位于上地幔附近。

## 5.2 构造意义

西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩位于雅江缝合带白朗蛇绿岩中, 地处印度板块和欧亚板块碰撞缝合带上, 所以该岩石构造意义不言而喻。  $\text{TiO}_2-\text{FeO}^{\text{T}}/\text{MgO}$  构造环境判别图 (图 11a) 显示该岩石形成于大洋中脊玄武岩 (MORB) 构造环境;  $\text{Hf}/3-\text{Th}-\text{Ta}$  构造判别三角图解 (图 11b) 指示该岩石形成于正常大洋中脊玄武岩 (N-MORB) 构造环境;  $\text{FeO}^{\text{T}}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3$  构造环境三角图解 (图 11c) 也指示该岩石形成于大洋中脊环境。结合前文所述, 该岩石形成的物理化学环境为高温无水环境, 且位于上地幔, 无水无流体加入, 没有发生岩浆混染, 成岩物理化学条件稳定; 说明此时新特提斯洋中脊已经俯冲至上地幔附近, 且上伏洋壳已经在俯冲过程中剥去, 洋中脊岩浆在上升侵位过程中受到俯冲作用影响。

西藏日喀则地区白朗蛇绿岩中石榴辉石岩来自于亏损地幔的 N-MORB 岩浆, 虽源于洋脊, 但其大地构造位置决定了该岩石的形成与俯冲蛇绿岩有关, 在微量元素地球化学方面, 亏损高场强元素 Nb、Ta、Th 等, 是与俯冲消减作用有关的火成岩共同特点, 所以若要提供相对封闭的系统, 且该系统应具有高温无水无流体的物理化学环境, 则将该岩石形成的位置限定在上地幔是合理的, 且该岩石又间接标志着洋脊, 根据前人研究资料, 虽然此时洋脊已经俯冲消亡, 但此时印度板块和欧亚板块并未发生陆陆碰撞。在显微镜下观察, 发现部分辉石已蚀变成为角闪石, 并伴随有石榴子石、辉石溶蚀现象, 表示由于后期该岩石折返, 使得相对稳定的物理化学系统打破, 并伴随流体和水的加入, 导致该岩石中辉石发生蚀变和溶蚀现象, 但仍可从角闪石的矿物特征中发现辉石假象。综上所述, 该岩石的形成位置确定于上地幔, 早期成岩过程中物理化学条件稳定, 无流体无水, 无岩浆混染, 且具高温高压; 晚期折返过程中, 由于流体和水的加入, 使得辉石退变质成角闪石, 伴随流体挥发分混入, 致使矿物发生溶蚀。从大地构造与动力学角度分析, 至少在 149Ma 洋脊已俯冲消减, 但印度板块和欧亚板块此时并未发生陆陆碰撞; 结合前人研究, 雅鲁藏布江蛇绿岩年龄约为 130 ~ 120Ma (Xu *et al.*, 2015), 按照年代学和构造动力学的角度分析, 白朗石榴辉石岩形成后随蛇绿岩折返出露地表是完全合理的。

## 6 结论

(1) 西藏日喀则地区白朗石榴辉石岩属钙碱性超基性岩, 因后期折返出露地表, 并伴随含水流体的加入, 致使部分辉石蚀变成角闪石; 该岩石形成于高温无流体无水的稳定物理化学环境中, 略亏损高场强元素 Th、Ta、Nb 等, 稀土元素配分曲线与 MORB 稀土元素配分曲线相似, 指示该岩石源于上地幔, 岩浆来源于 MORB。

(2) 该岩石的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄为  $149.0 \pm 3.1 \text{ Ma}$  (MSWD = 0.093, 95% 置信度), 且锆石 Hf 同位素的初始初始  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  比值分布均一,  $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$  平均值为 +17.7, 且所有数据均为正值, 说明该岩石的原始岩浆来源于地幔, 与地球化学分析结果一致。

(3) 该岩石的成岩过程与印度板块和欧亚板块俯冲过程相关, 其原始岩浆源于 N-MORB 岩浆, 且成岩位置确定在上地幔附近, 标志着新特提斯洋脊已俯冲消亡, 但印度板块和欧亚板块此时并没有发生陆陆碰撞, 该岩石后期随蛇绿岩一同折返出露地表说明了在 149Ma 后印度板块和欧亚板块仍在相向运动。

**致谢** 李化启博士、刘飞博士在本文编写过程中提供了帮助; 曹汇研究员对本文进行了耐心的审阅和改批; 审稿专家对本文提出了宝贵的意见与建议; 在此一并表示感谢。

## References

Aitchison JC and Davis AM. 2004. Evidence for the multiphase nature of the India-Asia collision from the Yarlung Tsangpo suture zone, Tibet. In: Malpas J, Fletcher CJN, Ali JR and Aitchison JC (eds.). *Aspects of the Tectonic Evolution of China*. London, United Kingdom: Geological Society, 226: 217–233

Allégre CJ, Courtillot V, Tapponnier P *et al.* 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307(5946): 17–22

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

Chang LH, Cao L and Gao FH. 2009. *Identification Manual of Igneous rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 28–32 (in Chinese)

Chen MY, Jin W and Zheng CQ. 2009. *Identification Manual of Metamorphic Rocks*. Beijing: Geological Publishing House, 83–84 (in Chinese)

Chu MF, Chung SL, Song B, Liu DY, O'Reilly SY, Pearson NJ, Ji JQ and Wen DJ. 2006. Zircon U-Pb and Hf isotope constraints on the Mesozoic tectonics and crustal evolution of southern Tibet. *Geology*, 34(9): 745–748

Dai JG, Wang CS and Li YL. 2012. Relicts of the Early Cretaceous seamounds in the central-western Yarlung Zangbo Suture Zone, southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 53: 25–37

Dilek Y and Furnes H. 2001. Ophiolite genesis and global tectonics: Geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic

lithosphere. *GSA Bulletin*, 123(3–4): 387–411

Dilek Y and Thy P. 2009. Island arc tholeiite to boninitic melt evolution of the Cretaceous Kizildag (Turkey) ophiolite: Model for multi-stage early arc-forearc magmatism in Tethyan subduction factories. *Lithos*, 113(1–2): 68–87

Diener C. 1898. Notes on the geological structure of the Chitichun region. *Memoirs of the Geological Survey of India*, 28: 1–27

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

Geng JZ, Li HK, Zhang J, Zhou HY and Li HM. 2011. Zircon Hf isotope analysis by means of LA-MC-ICP-MS. *Geological Bulletin of China*, 30(10): 1508–1513 (in Chinese with English abstract)

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

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, Bezaud 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

Li HK, Zhu SX, Xiang ZQ, Su WB, Lu SN, Zhou HY, Geng JZ, Li S and Yang FJ. 2010. Zircon U-Pb dating on tuff bed from Gaoyuzhuang Formation in Yanqing, Beijing: Further constraints on the new subdivision of the Mesoproterozoic stratigraphy in the northern North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2131–2140 (in Chinese with English abstract)

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 JF, Xia B, Liu LW, Xu LF, He GS, Wang H, Zhang YQ and Yang ZQ. 2009. SHRIMP U-Pb zircon dating for the gabbro in Qunrang ophiolite, Tibet: The geochronology constraint for the development of eastern Tethys basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 33: 294–298 (in Chinese with English abstract)

Liu CZ, Wu FY, Wilde SA and Yu LJ. 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 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)

Lu FX. 1989. *Mantle Petrology*. Wuhan: China University of Geosciences press (in Chinese)

Lu YF. 2004. Geokit: Geochemical software package built by VBA. *Geochemistry*, 33(5): 459–464

Malpas J, Zhou MF, Robinson PT, 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
- Mascle H. 1985. L'Himalaya résulte-t-il du telescopage de trois chaînes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1(3): 289–304
- 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
- Men QB, Wang Q, Nikolai B, Xia QK and Fan QC. 2013. The electrical conductivity of garnet pyroxenite: Implications for magmatic underplating. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(5): 652–662 (in Chinese with English abstract)
- Pan YS. 1980. About the discovery of ophiolite-migmatite in the Bainang County, Xizang. *Seismology and Geology*, 2(1): 48 (in Chinese)
- Reuber I. 1986a. Geometry of accretion and oceanic thrusting of the Spongtag ophiolite, Ladakh-Himalaya. *Nature*, 321(6070): 592–596
- Reuber I. 1986b. Two peridotite units superposed by intra-oceanic thrusting in the Spongtag Klippe (Ladakh-Himalaya). *Science Geologiques (Bulletin)*, 39(4): 391–402
- 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
- Von Kraft A. 1902. Notes on the 'exotic blocks' of Malla johar in the Bhot Mahals of Kumaon. *Memoirs of the Geological Survey of India*, 32(Part 3): 127–183
- 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(14): 1776–1779
- Wu FY, Li XH, Zheng YF and Gao S. 2007. Lu-Hf isotopic systematics and their applications in petrology. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2): 185–220 (in Chinese with English abstract)
- Xia B, Li JF, Liu LW, Xu LF, He GS, Wang H, Zhang YQ and Yang ZQ. 2008. SHRIMP U-Pb dating for diabase in Sangsang ophiolite, Xizang, China: Geochronological, constraint for development of eastern Tethys basin. *Geochimica*, 37(4): 399–403 (in Chinese with English abstract)
- Xia B, Zhou GQ, Li JF, Chen GW, Liu WL, Wang R and Dong BH. 2012. A study on mineralogical phase 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)
- 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)
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Ji SC, Zhang ZM and Liu Y. 2011. On the tectonics of India-Asia collision. *Acta Geologica Sinica*, 85(1): 1–33 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Ji SC, Cai ZH, Zeng LS, Geng QR and Cao H. 2012. Kinematics and dynamics of the Namche Barwa Syntaxis, eastern Himalaya: Constraints from deformation, fabrics and geochronology. *Gondwana Research*, 21(1): 19–36
- Xu ZQ, Wang Q, Pêcher A, Liang FH, Qi XX, Cai ZH, Li HQ, Zeng LS and Cao H. 2013. Orogen-parallel ductile extension and extrusion of the Greater Himalaya in the Late Oligocene and Miocene. *Tectonics*, 32(2): 191–215
- 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
- Yang JS, Zhang ZM, Li TF, Li ZL, Ren YF, Xu XZ, Ba DZ, Bai WJ, Fang QS, Chen SY and Rong H. 2008. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1445–1452 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Xu XZ, Li Y, Li JY, Rong H, Ba DZ and Zhang ZM. 2011. Diamonds recovered from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung-Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence. *Acta Petrologica Sinica*, 27(11): 3171–3178 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Robinson PT and Dilek Y. 2014. Diamonds in ophiolites. *Elements*, 10(2): 127–130
- Yin A, Harrison TM, Murphy MA, Grove M, Nie S, Ryerson FJ, Wang XF and Chen ZL. 1999. Tertiary deformation history in southeastern and southwestern Tibet during the Indo-Asian collision. *Geological Society of America Bulletin*, 111(11): 1644–1664
- 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): 1–131
- Zhang ZM, Zheng LL, Wang JL, Zhao XD and Shi C. 2007. Garnet pyroxenite in the Namjagbarwa Group-complex in the eastern Himalayan tectonic syntaxis. Tibet, China: Evidence for subduction of the Indian continent beneath the Eurasian plate at 80–100km depth. *Geological Bulletin of China*, 26(1): 1–12 (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

- 常丽华, 曹林, 高福红. 2009. 火成岩鉴定手册. 北京: 地质出版社, 28–32
- 陈曼云, 金巍, 郑常青. 2009. 变质岩鉴定手册. 北京: 地质出版社, 83–84
- 耿建珍, 李怀坤, 张健, 周红英, 李惠民. 2011. 锆石 Hf 同位素组成的 LA-MC-ICP-MS 测定. *地质通报*, 30(10): 1508–1513
- 李怀坤, 朱士兴, 相振群, 苏文博, 陆松年, 周红英, 耿建珍, 李生, 杨峰杰. 2010. 北京延庆高于庄组凝灰岩的锆石 U-Pb 定年研究及其对华北北部中元古界划分新方案的进一步约束. *岩石学报*, 26(7): 2131–2140
- 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
- 李建峰, 夏斌, 刘立文, 徐力峰, 何观生, 王洪, 张玉泉, 杨之青. 2009. 西藏群让蛇绿岩辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. *大地构造与成矿学*, 33(2): 294–298
- 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
- 路凤香. 1989. 地幔岩石学. 武汉: 中国地质大学出版社
- 路远发. 2004. GeoKit: 一个用 VBA 构建的地球化学工具软件包. *地球化学*, 33(5): 459–464
- 门清波, 王勤, 夏群科, 樊祺诚. 2013. 石榴辉石岩的电导率及对岩浆底侵的约束. *岩石矿物学杂志*, 32(5): 652–662
- 潘裕生. 1980. 在西藏白朗发现蛇绿混杂岩. *地震地质*, 2(1): 48

- 吴福元, 李献华, 郑永飞, 高山. 2007. Lu-Hf 同位素体系及其岩石学应用. 岩石学报, 23(2): 185-220
- 夏斌, 李建峰, 刘立文, 徐力峰, 何观生, 王洪, 张玉泉, 杨之青. 2008. 西藏桑桑蛇绿岩辉绿岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄: 对特提斯洋盆发育的年代学制约. 地球化学, 37(4): 399-403
- 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
- 熊发挥, 杨经绥, 梁风华, 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
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 嵇少丞, 张泽明, 刘焰. 2011. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 85(1): 1-33
- 杨经绥, 张仲明, 李天福, 李兆丽, 任玉峰, 徐向珍, 巴登珠, 白文吉, 方青松, 陈松永, 戎合. 2008. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物. 岩石学报, 24(7): 1445-1452
- 杨经绥, 徐向珍, 李源, 李金阳, 戎合, 巴登珠, 张仲明. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出. 岩石学报, 27(11): 3171-3178
- 张泽明, 郑来林, 王金丽, 赵旭东, 石超. 2007. 东喜马拉雅构造结南迦巴瓦岩群中的石榴辉石岩——印度大陆向欧亚板块之下俯冲至 80~100km 深度的证据. 地质通报, 26(1): 1-12