

雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩起源及演化

李强¹⁾, 夏斌¹⁾, 黄强太³⁾, 夏连泽²⁾, 夏中宇¹⁾

1) 中山大学海洋学院, 广州, 510006; 2) 中山大学地球科学系, 广州, 510275;

3) 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640

内容提要: 本文通过对泽当蛇绿岩中地幔橄榄岩主要矿物的矿物化学, 以及蛇绿岩中地幔橄榄岩、玄武岩和辉长岩的岩石化学和地球化学的研究, 结合前人对泽当蛇绿岩年代学和构造背景的认识, 讨论泽当蛇绿岩的起源和演化。①通过对泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中橄榄石的 Fo 值, 斜方辉石和单斜辉石的 En 值、Mg# 值和 Al₂O₃ 含量, 尖晶石的 Mg# 和 Cr# 值的讨论, 发现泽当蛇绿岩地幔橄榄岩起源于洋中脊下亏损地幔域, 方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高, 后期都受到俯冲带的改造。②通过对地幔橄榄岩岩石化学和地球化学分析, 绝大多数的主量元素和微量元素的含量低于原始地幔, 微量元素的原始地幔标准化曲线与深海橄榄岩曲线重合, 说明它们是亏损的原始地幔熔融残留物, 起源于洋中脊环境。③通过对泽当蛇绿岩辉长岩的岩石化学和地球化学研究发现辉长岩起源于比 N-MORB 更亏损的源区, 具有 N-MORB 的性质, 后期可能因为受到俯冲带的改造又具有了岛弧拉斑玄武岩的性质。④泽当蛇绿岩玄武岩包含 N-MORB 型和 E-MORB 型两类, 说明泽当蛇绿岩起源于包含富集地幔的岩浆源区。N-MORB 型玄武岩还具有岛弧拉斑玄武岩的性质, 说明 N-MORB 型玄武岩后期受到俯冲带的改造, 而 E-MORB 型玄武岩没有受到俯冲带影响。⑤通过总结前人对泽当蛇绿岩年代学和构造背景的研究成果以及本文的发现, 作者认为泽当蛇绿岩是 170Ma 左右起源于混合不均一的洋中脊下亏损地幔域, 150Ma 左右在弧前环境受到俯冲带的改造。

关键词: 泽当蛇绿岩; 雅鲁藏布江缝合带; MOR; SSZ

有关雅鲁藏布江(以下简称“雅江”)蛇绿岩带产生的构造环境以及演化存在许多争论。张旗等(2001)提出雅江蛇绿岩产自复杂的构造背景。Batanova 等(2000)、Choi 等(2008)和 Xu Xiangzhen 等(2011)等认为, 同一雅江蛇绿岩具有洋中脊和俯冲带两种构造背景, 说明蛇绿岩经历过复杂的构造演化。徐向珍等(2011)、杨经绥等(2011)和李源等(2011)对雅江西段的普兰和东波以及巴尔等岩体的地幔橄榄岩研究后认为, 它们经历了 MOR 和 SSZ 两个阶段的演化。罗布莎蛇绿岩已经确认也具有两阶段演化的历史, 再次证明了雅江蛇绿岩带具有复杂的演化历史。

近年来对雅江东段的研究主要在以下几个方面: 罗布莎的特殊地幔矿物群(杨经绥等, 2004, 2008; 白文吉等, 2004, 2006, 2007; Xu Xiangzhen et

al., 2009; Yang Jingsui et al., 2007), 豆荚状铬铁矿(Zhou Meifu et al., 2005; 周二斌等, 2010), 蛇绿岩的构造侵位(梁凤华等, 2011), 泽当蛇绿岩及其北侧的泽当岛弧代表特提斯洋内俯冲系统(Aitchison et al., 2000), 埃达克岩证明泽当蛇绿岩形成于弧前环境(韦栋梁等, 2007), 泽当岛弧形成于 156Ma 左右(Aitchison et al., 2000; McDermid et al., 2002)。总之对泽当蛇绿岩研究的重点主要在俯冲形成之后, 对于俯冲之前的事件缺乏详细的研究, 而泽当蛇绿岩的研究又比罗布莎蛇绿岩更弱。

泽当蛇绿岩(图 1)位于雅江蛇绿岩带的东段, 沿雅江谷地展布, 南邻晚三叠统朗杰学群姐德秀组(T_{3j}), 北接冈底斯花岗岩基, 其间分布有第三系罗布莎群(Rlb)。地幔橄榄岩采自泽当镇西部(大致位置: N29°14'44", E91°37'2"), 包含方辉橄榄岩和二

注: 本文为国家“973”项目(编号: 2012420004108011)和广东省普通高校海洋石油勘探重点实验室(编号: 2010420004201001)共同资助成果。

收稿日期: 2012-09-13; 改回日期: 2012-11-05; 责任编辑: 黄敏

作者简介: 李强, 1983 年出生, 中山大学海洋学院构造地质学专业博士研究生, Email: doctorqiang@163.com。通讯作者: 夏斌, 研究员, 主要从事蛇绿岩相关方面的研究, Email: xb698xy@qq.com。

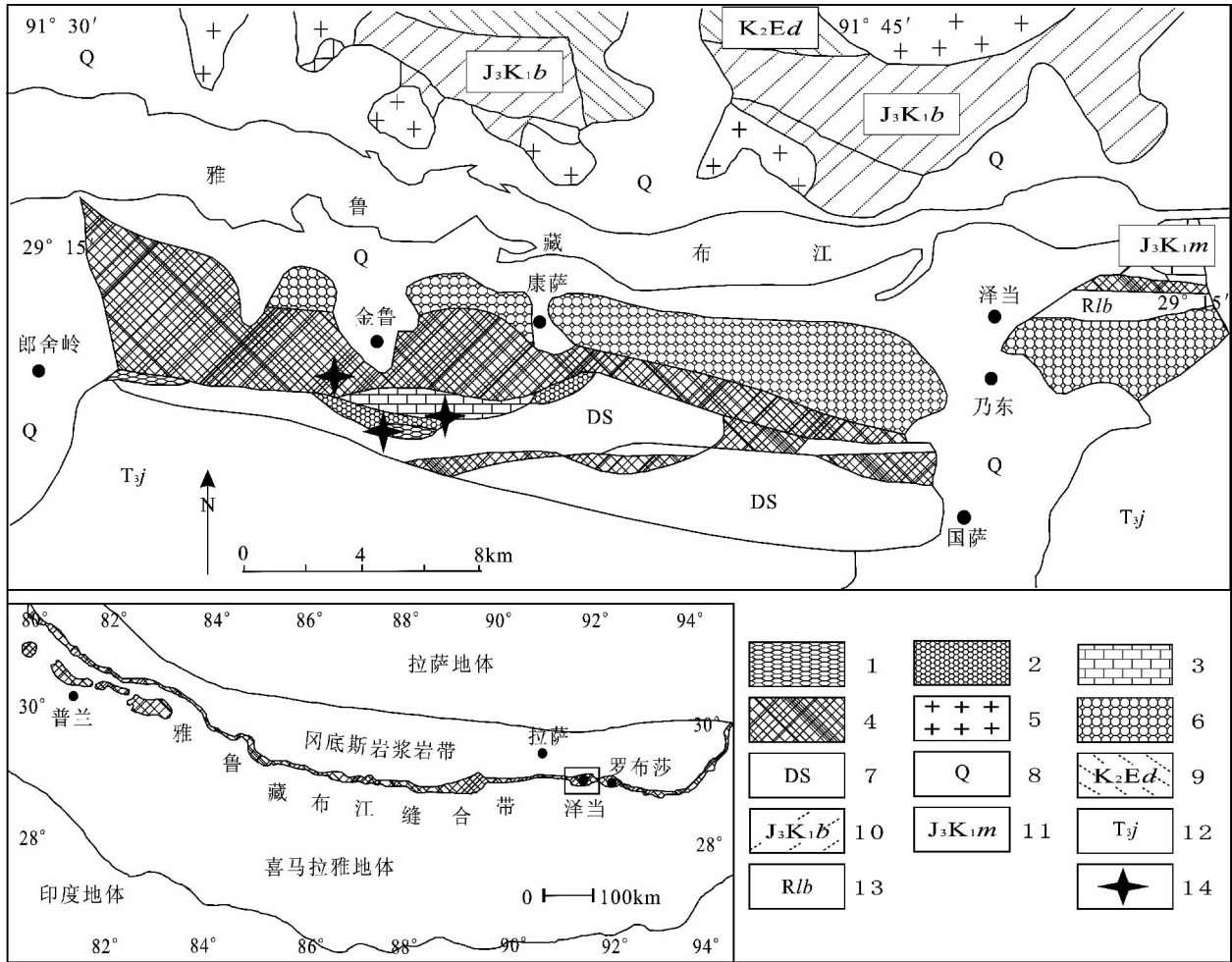


图 1 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当地质略图(据韦栋梁等,2007 修改)

Fig. 1 Geological sketch map of Zedang area in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (modified after Wei Dongliang et al., 2007)

- 1—枕状及块状熔岩;2—岩墙群(辉长岩和辉绿岩);3—堆积杂岩;4—地幔橄辉岩;5—花岗岩;6—岛弧火山岩组合;7—复理石类沉积岩;8—第四系;9—旦师组;10—比马组;11—麻木下组;12—姐德秀组;13—罗布莎群;14—采样位置
 1—pillowed and massive lavas; 2—dykes warms (gabbro and diabase); 3—cumulative complex rocks; 4—mantle peridotites; 5—granite; 6— island arc igneous rock assemblage; 7—flysch class sedimentary rocks; 8—quaternary; 9—Danshiting Group; 10—Bima Group; 11—Mamuxia Group; 12—Jedexiu Group; 13—Luobusha Group; 14—sampling site

辉橄岩;玄武岩类采自泽当镇西部(大致位置: N29°14'20", E91°37'46"),包含玄武玢岩、玻基玄武岩等;闪长岩化辉长岩样品采自泽当镇西部的金鲁村东南(大致位置: N29°14'30", E91°38'39")。

1 泽当蛇绿岩特征

1.1 泽当蛇绿岩地质背景

泽当蛇绿岩(图 1)位于西藏南部泽当镇西部,东西向延展约 20km,最宽处约 4km,出露面积约 45km²(西藏地质矿产局,1993;中国科学院青藏高原综合科学考察队,1981;韦栋梁等,2007)。泽当蛇绿岩南侧为一套晚三叠统姐德秀组(T_{3j})类复理石

沉积,主要组成为粉砂质板岩夹细砂岩、灰岩透镜体,代表印度板块北部的被动大陆边缘沉积;北侧为一套不同于蛇绿岩的岛弧火山岩组合;再往北隔着雅鲁藏布江断裂带有晚侏罗世至早白垩世及晚白垩世的火山沉积建造分布;东部与罗布莎群(R_{1b})相邻;西部则被第四纪沉积物覆盖。区内还分布有花岗岩、花岗闪长岩等燕山晚期的中酸性岩,表明该地区经历过复杂的构造运动。泽当蛇绿岩出露单元基本齐全,有地幔橄辉岩、辉长岩、块状和枕状玄武岩以及复理石类沉积岩、放射虫彩色隧石岩等。

1.2 泽当蛇绿岩地幔橄辉岩

泽当蛇绿岩以地幔橄辉岩为主体,而地幔橄辉

岩主要由方辉橄榄岩、二辉橄榄岩组成,夹少量纯橄榄岩,还见有透镜状的铬铁矿,部分橄榄岩遭受较强的蛇纹石化。

二辉橄榄岩具粒状结构,块状构造,主要由橄榄石和辉石组成,斜方辉石多于单斜辉石,含少量尖晶石,还可见到少量变质矿物蛇纹石、滑石、绢石等。橄榄石之间呈“三联点”式平衡变晶结构,受力碎裂成碎斑、碎基状,扭折带、扭折条、扭折纹和扭折块都可见到,但极不均匀,方向也很不一致,橄榄石还发育龟裂纹似的裂纹。斜方辉石和单斜辉石在橄榄石粒间和橄榄石碎粒交错镶嵌,接触界线呈圆滑的缝合线状,在斜方辉石中,常可见到被其包围的橄榄石碎屑,可以认为辉石是在橄榄石碎裂之后形成于橄榄石粒间的,后来又一齐遭受了更新的地幔塑性变形作用,切过解理和出溶条纹的裂隙则是更晚的、浅的地壳部位的作用产物。两种辉石都有出溶条纹,但斜方辉石更发育。两种辉石也都有扭折构造、解理和出溶条纹被弯曲的变形现象,但都不及橄榄石的复杂、多期。有的斜方辉石内有“碎屑状”单斜辉石,它们大致沿斜方辉石的解理也即是出溶条纹方向分布,其实它们成他形不规则外廓可以切过解理和出溶条纹,说明它们是后来的。尖晶石成他形碎屑状填在主要矿物粒间,和辉石橄榄石碎粒互嵌交生,说明它们是在橄榄石和斜方辉石之后,与单斜辉石大致同时形成的。

方辉橄榄岩具粒状结构,块状构造,主要由橄榄石和斜方辉石组成,含少量尖晶石和单斜辉石。橄榄石呈不规则他形粒状,碎裂结构,常见早世代的橄榄石以浑圆状被包含在斜方辉石和尖晶石内。斜方辉石多呈半自形至他形粒状,裂隙发育。斜方辉石具有扭折带、波状消光、解理和出溶条纹被弯曲的变形现象。斜方辉石内部可见到出溶的单斜辉石页片和交代的单斜辉石棒,斜方辉石内还偶见有浑圆的单斜辉石碎屑。深褐色尖晶石成他形粒状或熔融状大致定向地充填在主要矿物粒间,常见包含早世代的橄榄石,和斜方辉石、橄榄石碎粒呈蠕虫状交生。

1.3 泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩

泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩主要由斜长石和单斜辉石组成,含少量角闪石。大多数辉石已闪石化为粗粒闪石晶体,闪石化不均匀处仍有辉石残余。斜长石有葡萄石化,裂隙中仍有葡萄石和钠长石脉,这表明斜长石富钙,基性程度较高。角闪石结晶较好,具辉石假象,非一般纤维状或针状次生闪石。这种角闪石不是后来的蚀变作用产物,和一些辉绿岩

辉石角闪石化仍然保留部分辉石和辉石辉长结构一致说明是辉长岩岩浆上升冷却的后期有水加入的结果。

1.4 泽当蛇绿岩玄武岩

泽当蛇绿岩的北侧是一套与蛇绿岩呈断层接触的岛弧岩石组合,岩石组合较为复杂,包括喷出岩、侵入岩、火山碎屑岩、凝灰岩等,但以玄武安山岩和安山玄武岩中基性熔岩为主。蛇绿岩玄武岩以枕状玄武岩为主,还包含一些块状玄武岩。镜下鉴定泽当蛇绿岩玄武岩类岩石中包括多种类型,如流状玻璃基辉石斜长石玄武岩、辉石斜长石玄武岩、葡萄石化玄武岩和中粒辉石玄武岩等。枕状玄武岩主要由斜长石和单斜辉石组成,斜长石斑晶较多,还见少量粒状橄榄石斑晶和磁铁矿。镜下可观察到呈圆球状、肾状和囊状的绿泥石杏仁和钠长石杏仁等。枕状玄武岩内部发育较多韧性断裂,保留了玄武岩的填间结构、次辉绿结构和交织结构,边缘发育以隐晶质为主的冷凝边。块状玄武岩呈似层状产出,斑状结构,杏仁状构造,主要由斜长石、辉石和玻璃组成。斜长石斑晶表现为自形粒状。岩石裂缝局部充填绿泥石脉、碳酸盐脉、钠长石脉。

2 分析方法

在详细野外观察的基础上,采集泽当地区的地幔橄榄岩,玄武岩和辉长岩,尽量选取新鲜样品。矿物电子探针分析在中山大学测试中心完成,仪器为日本电子株式会社的 JXA-8800R,分析加速电压为 15kV,分析电流为 20nA。全岩主微量元素测试在中国科学院广州地球化学研究所同位素地球化学国家重点实验室测试分析中心完成。主量元素采用湿化学法测定;稀土元素和微量元素在 Finnigan MATELEMENT 型高分辨率等离子体质谱仪(ICP-MS)上测定,大致过程见 Qi Liang 等(2000):准确称取 50mg 样品粉末放于 PTFE 溶样器(bomb)中,每个样品中加入 1mL 的 HF(38%)和 0.5mL 的 HNO₃(68%),蒸干溶液以除掉大部分的硅。加入 1mL 的 HF 和 0.5mL 的 HNO₃,置于 190℃烘箱中加热 12h,冷却后加入 1mL 浓度为 0.5 μg/mL 的 Rh 内标溶液,加热至约 150℃蒸干溶液,加入 1mL 的 HNO₃蒸干,再加一次 HNO₃蒸干,用 8mL 40%的 HNO₃提取最终的残留物,重新密封溶样器,将其放入 110℃烘箱中加热 3h,冷却之后,加入去离子水将溶液稀释至 100mL。

3 泽当蛇绿岩地幔橄榄岩岩石化学和地球化学以及主要矿物的矿物化学特征

3.1 橄榄石矿物化学特征

橄榄石代表性电子探针分析数据见表1。泽当二辉橄榄岩橄榄石 Fo 值平均为 90.8(89.1~92之间),方辉橄榄岩橄榄石 Fo 值平均为 91.4(91~91.9之间)。由于橄榄石的 Fo 值与地幔橄榄岩的形成深度和熔融程度成正相关关系(Dick et al., 1995;徐向珍等,2011),如图2所示,方辉橄榄岩比二辉橄榄岩熔融程度高,与雅江西段的普兰岩体(徐

向珍等,2011)特征相同。橄榄石中 Cr₂O₃和 NiO 含量在两类岩石中差距较大(图2),有许多样品几乎不含 Cr₂O₃,方辉橄榄岩的含量明显比二辉橄榄岩大, NiO 和 Cr₂O₃含量的差异也说明方辉橄榄岩比二辉橄榄岩岩熔融程度高。图2中方辉橄榄岩 Fo 值比较恒定,变化不及二辉橄榄岩大,而 NiO 和 Cr₂O₃几乎是直线式的变化;二辉橄榄岩的 Fo 值有明显的变化, Cr₂O₃变化不大, NiO 有变化但不大,这可能暗示接近原始地幔的二辉橄榄岩本身或不均匀性,或经受了不均匀的熔融,从而导致泽当蛇绿岩熔岩的多样性和复杂性。

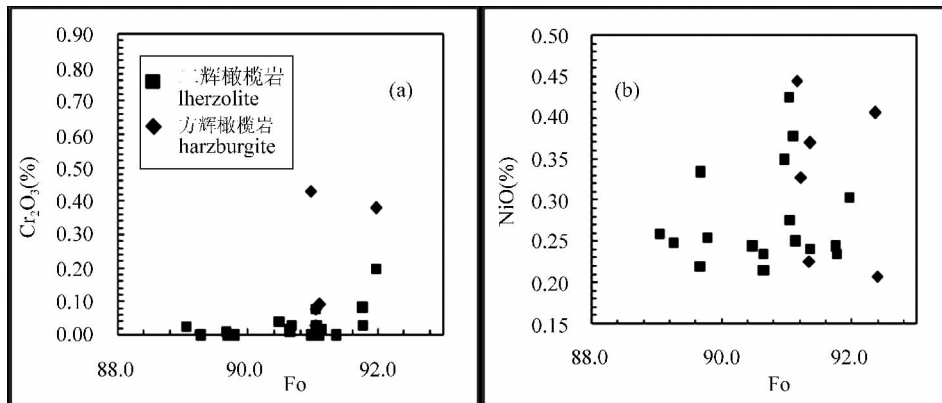


图2 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中橄榄石 Fo-Cr₂O₃ (a)和 Fo-NiO(b)成分图解

Fig.2 Olivine compositional diagrams in the mantle peridotites of the Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

(a)—Fo vs. Cr₂O₃ diagram; (b)—Fo vs. NiO diagram

表1 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中代表性样品的橄榄石电子探针分析结果(%)

Table 1 Representative microprobe analyses of olivine in mantle peridotites from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (%)

编号岩性	ZD096-13	ZD097-7	ZD106-8	ZD107-7	ZD107-16	ZD97-0L	ZD99-0L3	ZD029-4	ZD031-4
	二辉橄榄岩							方辉橄榄岩	
SiO ₂	43.17	40.01	40.02	40.17	40.57	40.10	39.62	38.60	39.85
TiO ₂	*	*	*	*	0.04	0.02	*	*	0.01
Al ₂ O ₃	0.01	0.01	0.08	*	0.02	0.04	*	0.07	0.06
FeO	9.65	10.37	9.09	9.21	8.44	8.99	9.00	8.23	8.62
NiO	0.26	0.34	0.22	0.25	0.24	0.35	0.28	0.24	0.33
MnO	0.19	0.21	0.18	0.11	0.27	0.20	0.17	0.15	0.30
MgO	47.12	50.08	48.82	48.59	49.57	50.32	50.82	51.85	50.53
CaO	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	*	0.17
Na ₂ O	0.10	0.09	0.06	0.06	0.00	0.01	0.11	0.03	0.01
K ₂ O	*	0.01	*	0.02	0.01	0.01	0.02	0.00	0.07
Cr ₂ O ₃	0.01	0.01	0.02	0.04	*	*	0.03	0.79	0.01
总量	100.52	101.13	98.49	98.45	99.18	100.05	100.05	99.95	100.30
Fo	89.78	89.68	90.63	90.48	91.36	90.97	91.05	91.90	91.34

注:“*”表示该项未测出或低于仪器检测限; Fo=100Mg/(Mg+Fe²⁺); 以下类同。

3.2 斜方辉石矿物化学特征

斜方辉石代表性电子探针分析结果见表 2。二辉橄榄岩斜方辉石的 En 值平均 87.52, 方辉橄榄岩平均 89.35。二辉橄榄岩 $Mg^{\#}$ 值平均为 90.06, 方辉橄榄岩平均 90.56, 如图 3b 所示, 两类橄榄岩的斜方辉石的 $Mg^{\#}$ 值大部分重叠, 方辉橄榄岩比多数二辉橄榄岩高, 说明地幔熔融时单斜辉石先于斜方辉石。

斜方辉石中另一个与岩相类型密切相关、变化明显的成分是 Al_2O_3 , 并且斜方辉石中 Al_2O_3 的含量和 $Mg^{\#}$ 值可以作为部分熔融程度的标志 (Dick, 1977; 徐向珍等, 2011), Al_2O_3 含量越低, $Mg^{\#}$ 越高, 说明地幔橄榄岩部分熔融程度越高 (Dick et al., 1984)。如图 3b 所示, Al_2O_3 和 $Mg^{\#}$ 呈现出负相关关系, 大体上表现出二辉橄榄岩的熔融程度比方辉橄榄岩低的特征。

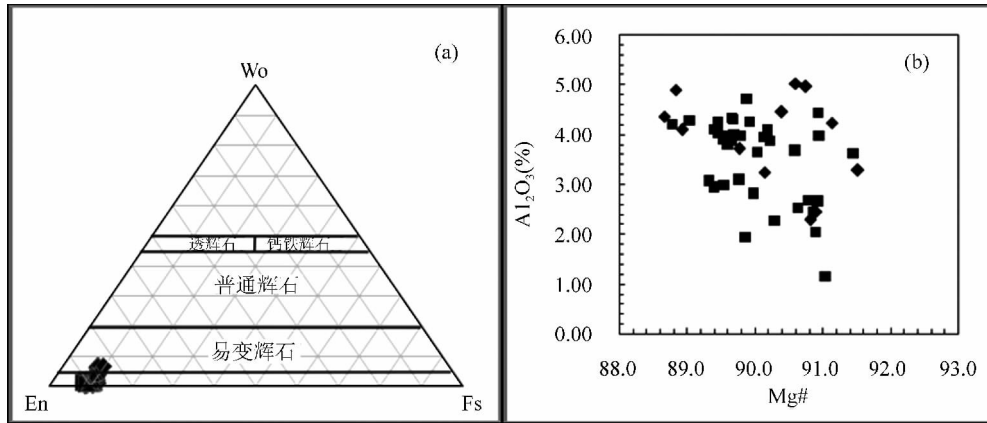


图 3 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中斜方辉石分类 Wo-En-Fs 图 (a) (据 Morimoto, 1988) 和 $Mg^{\#}$ - Al_2O_3 (%) 成分演化图 (b)

Fig. 3 Orthopyroxene compositional diagrams in the mantle peridotites from Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

(a)—Wo-En-Fs diagram (after Morimoto, 1988); (b)— $Mg^{\#}$ vs. Al_2O_3 (%) diagram

表 2 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中代表性样品的斜方辉石电子探针分析结果 (%)

Table 2 Representative microprobe analyses of orthopyroxene in mantle peridotites from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (%)

编号岩性	ZD088-12	ZD091-10	ZD093-10	ZD095-4	ZD097-8	ZD099-12	ZD108-7	ZD034-2	ZD028-4
	二辉橄榄岩							方辉橄榄岩	
SiO ₂	55.81	54.62	54.56	53.23	53.99	57.01	54.19	55.66	54.79
TiO ₂	0.02	0.06	0.07	0.03	0.03	0.04	0.10	0.04	0.06
Al ₂ O ₃	1.95	3.90	4.26	3.97	4.28	2.06	3.88	3.72	4.24
FeO	6.89	6.93	6.30	5.80	7.16	5.91	6.48	6.51	5.78
NiO	0.07	0.05	0.05	0.08	0.06	0.02	0.03	0.22	0.09
MnO	0.22	0.22	0.20	0.22	0.15	0.24	0.17	0.19	0.11
MgO	33.91	32.97	31.20	32.33	32.29	32.74	33.18	31.73	33.02
CaO	0.35	0.64	2.30	3.44	0.66	1.30	0.80	0.80	0.43
Na ₂ O	0.01	0.23	0.09	0.08	0.02	0.16	0.08	0.08	0.03
K ₂ O	0.01	0.13	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
Cr ₂ O ₃	0.38	0.67	0.86	0.95	0.77	0.65	0.75	0.67	0.66
总量	99.60	100.41	99.90	100.14	99.42	100.14	99.67	99.62	99.21
$Mg^{\#}$	89.86	89.54	89.92	90.94	89.04	90.89	90.22	89.77	91.13
Wo	0.65	1.22	4.52	6.47	1.29	2.51	1.53	2.7	2.1
En	89.27	88.45	85.86	85.06	87.89	88.61	88.84	87.8	86.9
Fs	10.08	10.33	9.63	8.48	10.82	8.88	9.63	8.9	9.2

注: $Mg^{\#} = 100Mg / (Mg + Fe^{2+})$; $Wo = 100Ca / (Ca + Mg + Fe)$; $En = 100Mg / (Ca + Mg + Fe)$; $Fs = 100Fe / (Ca + Mg + Fe)$; 以下类同。

3.3 单斜辉石矿物化学特征

单斜辉石代表性电子探针分析结果见表 3。二辉橄榄岩单斜辉石的 En 值平均为 45.1, Mg[#] 值平均为 92.14, Al₂O₃ 含量平均为 4.37%。方辉橄榄

岩 En 值平均 46.70, Mg[#] 值平均为 93.34, Al₂O₃ 含量平均为 5.10%。如图 4b 所示, Mg[#] 和 Al₂O₃ 也呈现出很好的负相关关系, 大体上表现出二辉橄榄岩的熔融程度比方辉橄榄岩低的特征。

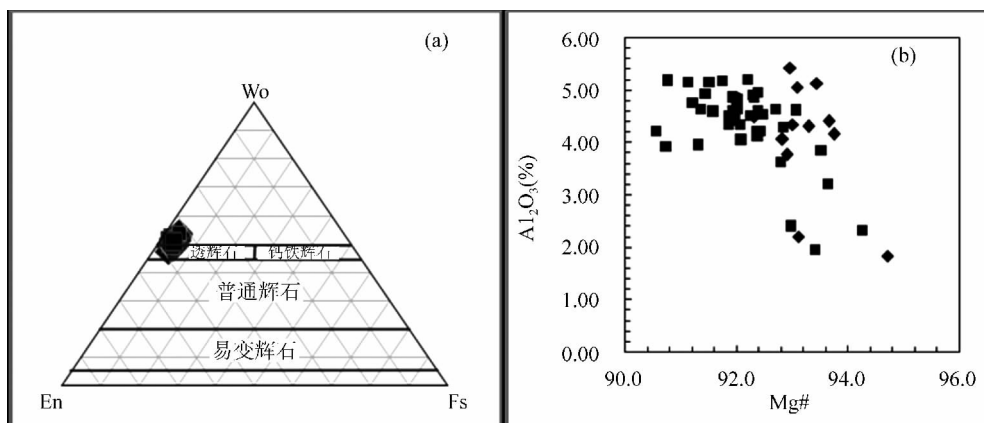


图 4 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中单斜辉石分类 Wo-En-Fs 图(a) (据 Morimoto,1988)和 Mg[#]-Al₂O₃(%)成分演化图(b)

Fig. 4 Clinopyroxene compositional diagrams in the mantle peridotites of Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

(a)—Wo-En-Fs diagram(after Morimoto,1988);(b)—Mg[#] vs. Al₂O₃(%) diagram

表 3 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中代表性样品的单斜辉石电子探针分析结果(%)

Table 3 Representative microprobe analyses of clinopyroxene in mantle peridotites from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt(%)

编号岩性	ZD088-10	ZD090-10	ZD091-1	ZD093-2	ZD095-3	ZD096-7	ZD097-2	ZD031-2	ZD029-2	ZD034-6
	二辉橄榄岩							方辉橄榄岩		
SiO ₂	50.23	48.19	49.11	51.32	49.50	52.15	46.85	50.69	51.39	51.03
TiO ₂	0.16	0.13	0.11	0.12	0.20	0.10	0.22	0.20	0.08	0.11
Al ₂ O ₃	4.55	4.62	4.91	4.36	4.63	4.52	4.65	5.07	5.14	5.43
FeO	2.36	2.38	2.44	2.50	2.21	2.45	2.25	2.15	2.01	2.17
NiO	0.03	0.03	0.04	0.01	0.07	0.02	0.08	0.09	0.06	0.14
MnO	0.10	0.11	0.06	0.12	0.10	0.12	0.08	0.16	0.01	0.07
MgO	16.09	16.03	16.24	15.66	16.49	15.36	15.86	16.09	15.94	15.90
CaO	24.34	26.87	24.77	24.23	24.29	23.57	27.51	24.17	23.79	23.75
Na ₂ O	0.38	0.37	0.34	0.31	0.39	0.41	0.31	0.18	0.24	0.30
K ₂ O	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	*	0.02	*
Cr ₂ O ₃	1.07	1.05	1.16	1.11	1.34	1.20	1.21	1.20	1.25	1.24
总量	99.31	99.77	99.19	99.75	99.22	99.91	99.02	99.98	99.93	100.14
Mg [#]	92.46	92.38	92.29	91.86	93.07	91.85	92.70	93.10	93.44	92.96
Wo	49.98	52.52	50.13	50.38	49.47	50.17	53.46	49.96	49.91	49.79
En	46.25	43.86	46.02	45.58	47.02	45.77	43.14	46.58	46.81	46.67
Fs	3.77	3.62	3.84	4.04	3.50	4.06	3.40	3.45	3.29	3.53

3.4 尖晶石矿物化学特征

尖晶石代表性电子探针分析结果见表 4。地幔橄榄岩的熔融程度以及形成深度影响尖晶石的形成(Dick et al., 1984; 李源等, 2011; 徐向珍等, 2011), 尖晶石的 Cr[#] 值能够反映地幔橄榄岩的部分熔融程度和亏损水平(Dick et al., 1984; Xu Xiangzhen et

al., 2011), 利用尖晶石的 Cr[#] 和 Mg[#] 的关系可以推测地幔橄榄岩的形成环境(Arai, 1994; Sobolev et al., 1995; Pearce et al., 2000)。泽当蛇绿岩二辉橄榄岩的 Cr[#] 平均值为 31.4, Mg[#] 平均值为 66.15; 方辉橄榄岩的 Cr[#] 平均值为 39.2, Mg[#] 平均值为 61.1。如图 5 所示, 泽当地幔橄榄岩尖晶石样品在

表 4 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中代表性样品的尖晶石电子探针分析结果(%)

Table 4 Representative microprobe analyses of spinel in mantle peridotites from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt(%)

编号岩性	ZD093-7	ZD095-10	ZD095-12	ZD097-13	ZD099-1	ZD099-3	ZD106-7	ZD028-1	ZD029-3	ZD032-4
	二辉橄榄岩							方辉橄榄岩		
SiO ₂	0.05	0.04	0.02	0.03	0.06	0.04	0.06	0.02	*	0.02
TiO ₂	0.02	0.01	0.03	0.02	0.04	0.06	0.08	0.02	0.04	0.02
Al ₂ O ₃	50.23	45.45	46.56	43.86	29.66	30.38	43.01	50.76	50.91	50.06
FeO	12.44	14.60	13.11	15.45	17.04	16.67	14.14	11.50	13.50	12.59
NiO	0.18	0.18	0.15	0.16	0.06	0.05	0.15	0.13	0.28	0.18
MnO	0.20	0.24	0.24	0.21	0.30	0.33	0.18	0.15	0.14	0.20
MgO	18.35	18.50	18.76	17.89	13.85	14.00	17.69	17.06	17.38	16.49
CaO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	*	*	*
Na ₂ O	0.09	0.07	0.06	0.08	0.05	0.07	0.10	0.01	*	0.02
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	*	*	*
Cr ₂ O ₃	18.87	21.04	20.81	22.46	38.06	37.60	24.09	19.86	17.40	20.12
总量	100.43	100.14	99.78	100.18	99.13	99.20	99.50	99.51	99.64	99.70
Mg [#]	72.64	69.51	72.04	67.58	59.39	60.19	69.24	72.75	69.87	70.21
Cr [#]	20.14	23.70	23.07	25.58	46.27	45.37	27.32	20.79	18.66	21.25

注:Cr[#] = 100Cr/(Cr+Al),以下类同。

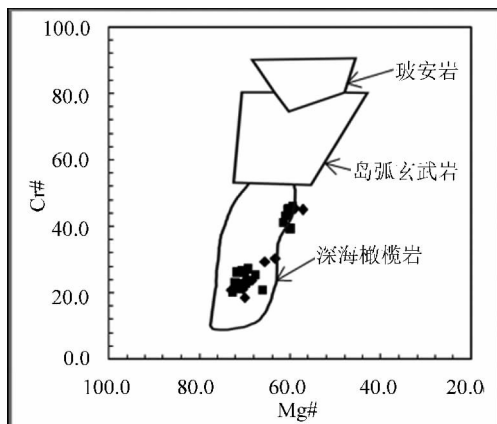


图 5 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中尖晶石的 Mg[#]-Cr[#] 图解(据 Irvine,1967;Cameron et al.,1980;Xu Xiangzhen et al.,2011)

Fig.5 Mg[#] vs. Cr[#] diagram of spinel in the mantle peridotites of the Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (after Irvine, 1967; Cameron et al.,1980;Xu Xiangzhen et al.,2011)

图上分成了两个区域,尖晶石样品 Cr[#] 值较低的都落在深海橄榄岩范围内,这说明泽当蛇绿岩起源于洋中脊下亏损地幔域,Cr[#] 值较高的趋向岛弧方向,说明泽当蛇绿岩地幔橄榄岩后期受到过俯冲带的改造,而泽当蛇绿岩北面存在泽当岛弧早已被证实(Aitchison et al.,2000;韦栋梁等,2007)。

3.5 地幔橄榄岩岩石化学特征

泽当地幔橄榄岩样品扣除烧失量后重新归一化计算后的代表性数据见表 5。方辉橄榄岩由于蛇纹

石化的原因,烧失量较高,影响了部分元素的含量,归一化计算后的 SiO₂ (38.50%~39.87%), Al₂O₃ (0.18%~0.24%), CaO(0.89%~0.94%), TiO₂ (0.01%~0.06%)和 MgO(33.68%~34.98%)的含量较低,但是 Mg[#] 值较高,平均 94.45(93.03~96.73 之间)。二辉橄榄岩烧失量也较大(最小 5.4%,最大 11.1%),归一化计算后的 MgO (36.71%~39.69%),SiO₂ (41.93%~44.27%),相对较高,但是 Al₂O₃ (0.18%~0.24%)和 TiO₂ (0.01%~0.02%)的含量较低,远低于原始地幔的含量(McDonough et al.,1995),Mg[#] 值平均为 92.96(92.09~93.45 之间)。方辉橄榄岩 Mg[#] 值明显地高于二辉橄榄岩,这与地幔橄榄岩的矿物化学性质一样,再次证明了方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高。

在 MgO 对 SiO₂、Al₂O₃、CaO、MnO、TiO₂ 和 FeO* (全铁)的哈克图(图 6)上,将泽当蛇绿岩地幔橄榄岩与 McDonough 等(1995)给出的原始地幔值相比。如图 6 所示:①泽当地幔橄榄岩的 Al₂O₃、SiO₂、CaO、MgO、TiO₂ 和 FeO* (全铁)含量都比原始地幔亏损,说明泽当地幔橄榄岩是亏损的原始地幔熔融残留物(Parkinson et al.,1998;史仁灯等,2005;徐向珍等,2011;杨经绥等,2011)。②地幔橄榄岩两亚类岩石分成了两个区域,证明地幔橄榄岩的各亚类岩石之间熔融程度不同。③方辉橄榄岩和二辉橄榄岩之间,Al₂O₃ 和 FeO* 的含量相似,与 MgO 的线性关系相似,而且方辉橄榄岩和二辉橄榄

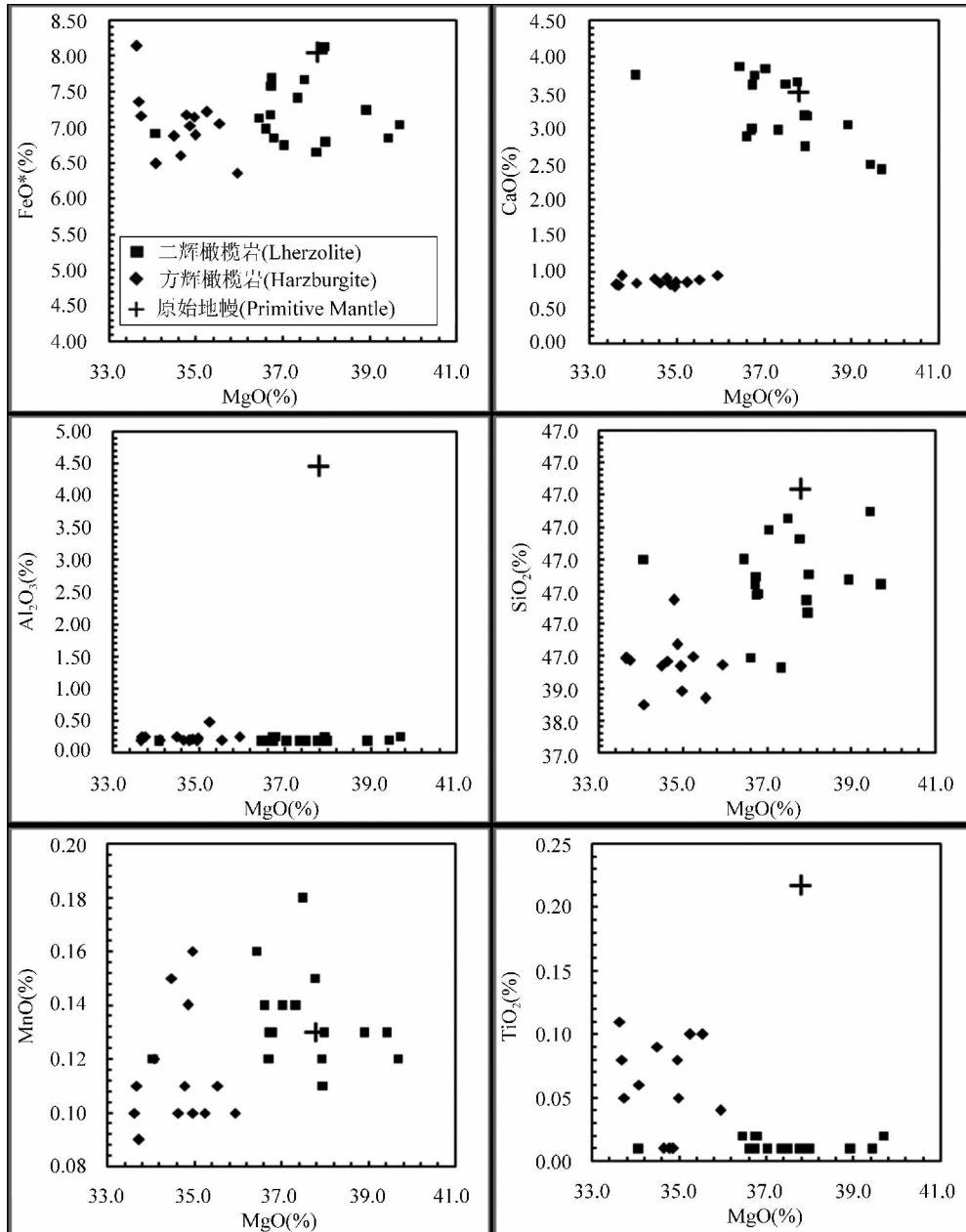


图 6 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩主要元素对 MgO 图解
(原始地幔值据 McDonough et al., 1995)

Fig. 6 Variation diagrams of oxide plotted against MgO of the mantle peridotites in the Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (Primitive mantle values after McDonough et al., 1995)

岩的 Al₂O₃ 结合在一条近水平直线的两段上, 指示它们的血缘演化关系。④方辉橄榄岩的 TiO₂ 高于二辉橄榄岩, 但方辉橄榄岩的 TiO₂ 变化大, 二辉橄榄岩的 TiO₂ 变化不大, 说明 Ti 是相对不相容程度高的元素, 容易从二辉橄榄岩经熔融而转入方辉橄榄岩中。⑤方辉橄榄岩的 MgO、SiO₂、MnO 和 CaO 低于二辉橄榄岩。⑥泽当地幔橄榄岩的 SiO₂ 都随着 MgO 变化而近同步地变化, 但二辉橄榄岩的 SiO₂ 一般明显地高于方辉橄榄岩, 且更接近原始地

幔。⑦泽当地幔橄榄岩的 CaO 与 MgO 均具线性关系, 但方辉橄榄岩中 CaO 几乎恒定不变, 而二辉橄榄岩中 CaO 与 MgO 呈负相关的线性关系, 这反应了透辉石质单斜辉石在两种地幔岩中的作用和地位的不同, 及地幔熔融过程中, 透辉石质单斜辉石的熔点相对地低于斜方辉石和橄榄石而先一步熔融。总结上述, 两类泽当地幔橄榄岩的岩石化学特征指示了岩石熔融程度的不同和地幔源区的不均匀性以及可能的俯冲作用的一定的影响。

表 5 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩主量元素分析结果 (%)

Table 5 The abundances of the Major elements in mantle peridotites from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (%)

编号岩性	ZD090	ZD093	ZD094	ZD106	ZD107	ZD108	ZD031	ZD035	ZD036	ZD037	ZD038
	二辉橄榄岩						方辉橄榄岩(蛇纹石化)				
SiO ₂	41.93	41.89	42.22	44.27	42.23	42.37	38.91	39.87	38.50	39.83	39.93
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.05	0.05	0.06	0.01	0.08
Al ₂ O ₃	0.24	0.18	0.24	0.18	0.24	0.18	0.23	0.24	0.18	0.19	0.24
Fe ₂ O ₃	1.95	2.9	2.6	2.08	2.2	2.6	3.55	2.91	2.66	5.00	4.13
FeO	5.1	5.1	4.84	5.8	5.06	4.91	3.70	4.55	4.10	2.11	3.65
MnO	0.13	0.13	0.12	0.18	0.12	0.13	0.10	0.09	0.12	0.10	0.11
MgO	36.78	36.73	36.71	37.49	39.69	38.92	34.98	33.74	34.08	34.64	33.68
CaO	3.74	3.61	2.98	3.62	2.43	3.05	0.85	0.94	0.84	0.84	0.81
Na ₂ O	0.18	0.31	0.4	0.42	0.4	0.49	0.01	0.02	0.01	0.11	0.01
K ₂ O	0.16	0.17	1.47	0.11	0.13	0.25	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01
P ₂ O ₅	0.2	0.17	0.07	0.01	0.07	0.07	0.05	0.05	0.05	0.13	0.01
LOI	9.07	8.3	7.95	5.35	6.8	6.55	16.84	16.96	18.82	16.40	16.81
总量	99.5	99.51	99.61	99.52	99.39	99.53	99.28	99.43	99.44	99.38	99.47
FeO*	6.86	7.71	7.18	7.67	7.04	7.25	6.90	7.17	6.49	6.61	7.37
Mg [#]	92.85	92.84	93.18	92.09	93.39	93.45	94.45	93.03	93.74	96.73	94.32

注:FeO*(全铁)=FeO+0.9×Fe₂O₃,以下类同。

3.6 地幔橄榄岩地球化学特征

泽当地幔橄榄岩部分样品的 La、Ce、Pr、Nd 和 Pb 由于含量太低,低于仪器检测限,本次测试没有获得数值。获得的泽当地幔橄榄岩代表性微量元素数据见表 6。

Zr、Y、Sc、Cr、Ni 和 V 等元素在交代过程中具有相对不活动的特性,因此被认为能代表原始的、交代前的岩石元素丰度(史仁灯等,2005)。将泽当地幔橄榄岩的 Ni、Cr、V 和 Y 对 MgO 投图(图 7),与 McDonough 等(1995)给出的原始地幔含量比较。

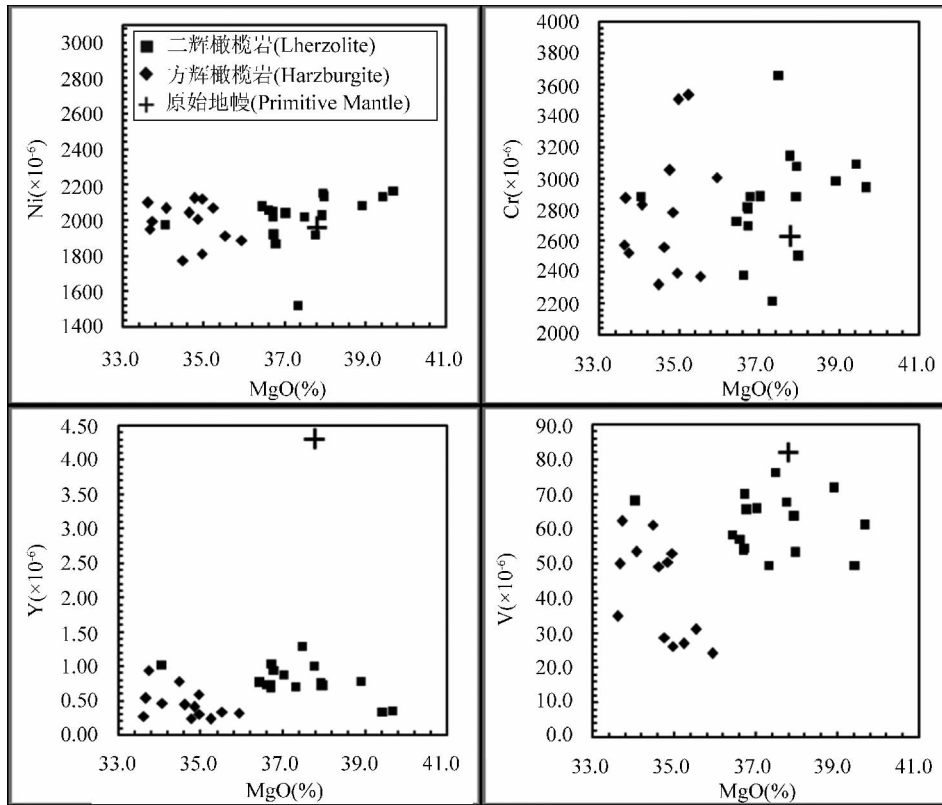


图 7 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩微量元素对 MgO 图解(原始地幔值据 McDonough et al., 1995)
Fig. 7 Ni, Cr, V, Y plotted against MgO of the mantle peridotites in the Zedang district in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt(Primitive mantle values after McDonough et al., 1995)

表6 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩地幔橄榄岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)Table 6 The abundances of the trace elements in mantle peridotites from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt($\times 10^{-6}$)

编号岩性	ZD090	ZD093	ZD094	ZD106	ZD107	ZD108	ZD031	ZD035	ZD036	ZD037	ZD038
	二辉橄榄岩						方辉橄榄岩(蛇纹石化)				
Sc	14.216	14.86	13.062	16.581	14.403	16.365	6.125	19.06	15.988	14.116	14.067
V	65.624	69.957	53.917	76.146	61.22	71.836	26.265	62.203	53.329	49.112	49.875
Cr	2883.657	2806.085	2819.725	3655.566	2944.708	2984.889	3503.576	2525.743	2827.776	2559.930	2873.210
Co	94.274	104.518	109.787	112.664	116.665	116.973	98.437	96.483	100.813	101.501	98.279
Ni	1870.484	1923.524	2052.51	2021.213	2168.041	2083.763	2122.575	1996.243	2070.595	2044.994	1951.003
Cu	14.875	29.424	16.61	24.667	29.97	34.371	6.517	22.594	25.298	22.182	38.535
Rb	0.132	0.498	0.465	0.433	0.069	0.08	0.478	0.24	0.27	0.193	0.218
Sr	0.926	1.612	1.347	0.969	0.607	0.786	1.471	2.262	2.043	1.844	1.824
Y	0.944	1.042	0.734	1.297	0.355	0.786	0.308	0.947	0.468	0.444	0.54
Zr	0.137	0.211	0.475	0.764	0.152	0.203	1.044	0.334	0.186	0.212	0.152
Nb	0.082	0.087	0.389	0.099	0.058	0.049	0.11	0.088	0.087	0.092	0.066
Ba	1.445	2.569	2.74	3.87	0.471	1.421	0.25	0.087	0.176	0.029	0.024
Hf	*	0.087	0.119	0.026	0.005	0.007	0.765	0.632	0.888	0.312	0.571
Ta	0.043	0.008	0.052	0.006	0.004	0.004	0.152	0.23	0.002	0.155	0.097
Pb	1.52	*	*	*	*	*	*	*	0.003	0.003	*
Th	0.007	0.046	0.089	0.101	0.02	0.009	0.068	0.02	0.023	0.032	0.008
U	0.008	0.004	0.067	0.113	0.06	0.028	0.064	0.349	0.34	0.599	0.473
La	*	*	*	0.152	*	*	0.05	0.022	0.023	0.015	0.024
Ce	*	*	0.014	0.365	*	*	0.138	0.033	0.019	0.024	0.035
Pr	*	*	0.081	0.045	*	*	0.049	0.068	*	*	0.007
Nd	0.018	*	0.024	0.209	*	*	0.019	0.018	0.011	0.024	0.010
Sm	0.071	0.069	0.457	0.078	0.009	0.008	0.062	0.103	0.037	0.036	0.045
Eu	0.015	0.06	0.274	0.025	0.003	0.007	0.009	0.021	0.011	0.015	0.009
Gd	0.074	0.302	0.342	0.136	0.017	0.052	0.054	0.213	0.07	0.056	0.075
Tb	0.043	0.064	0.055	0.026	0.018	0.013	0.017	0.049	0.021	0.018	0.024
Dy	0.235	0.264	0.073	0.227	0.099	0.099	0.043	0.155	0.074	0.063	0.068
Ho	0.027	0.032	0.029	0.038	0.012	0.024	0.006	0.021	0.011	0.022	0.014
Er	0.191	0.114	0.068	0.155	0.051	0.118	0.054	0.175	0.106	0.121	0.098
Tm	0.021	0.021	0.01	0.039	0.01	0.016	0.005	0.019	0.009	0.012	0.01
Yb	0.18	0.113	0.191	0.168	0.072	0.158	0.033	0.023	0.007	0.055	0.017
Lu	0.027	0.021	0.065	0.034	0.013	0.024	0.008	0.002	0.014	0.044	0.004
ΣREE	0.902	1.06	1.683	1.696	0.304	0.519	0.546	0.922	0.413	0.505	0.440

如图7所示:①与图6一样,在图7中也分成了两个区域,同样指示了两者的熔融程度的不同。②两类岩石的Y、Cr、Ni和V的元素含量基本相同,泽当地幔橄榄岩比原始地幔亏损不相容元素V和Y,但两种地幔岩的V均更接近原始地幔值,说明相对于Y来,V相容性程度更高。③Cr和Ni与原始地幔含量类似,但两种地幔岩的Ni几乎恒定不变,这是因为 Ni^{2+} 与地幔岩中 Mg^{2+} 地球化学行为关系更密切,说明 Ni^{2+} 相容性程度更高, Cr^{3+} 比 Ni^{2+} 不相容程度更高。④Ni、Cr、V、Y对MgO的关系与图6中 SiO_2 、 Al_2O_3 、CaO、MnO、 TiO_2 和 FeO^* 对MgO的相关关系分别有类似之处,Y-MgO和Ni-MgO类似 Al_2O_3 -MgO和 TiO_2 -MgO,V-MgO类似 SiO_2 -MgO

和 FeO^* -MgO,Cr-MgO类似MnO-MgO。某种程度上来说,Y-MgO、 Al_2O_3 -MgO和 FeO^* -MgO、V-MgO也有类似之处,这些关系说明,在地幔熔融过程中,Fe族元素的地球化学行为是相关的。总体上,图7说明,泽当地幔橄榄岩是亏损的原始地幔熔融残留物,熔融程度较低,方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高,再次证明两种地幔岩成因演化上的血缘关系。

在排除部分轻稀土元素后的微量元素原始地幔标准化蛛网图(图8)中,将泽当地幔橄榄岩与罗布莎康金拉地幔橄榄岩(Xu Xiangzhen et al., 2011)以及深海橄榄岩进行比较。由于泽当的方辉橄榄岩蛇纹石化较为严重,所以将泽当的二辉橄榄岩和方

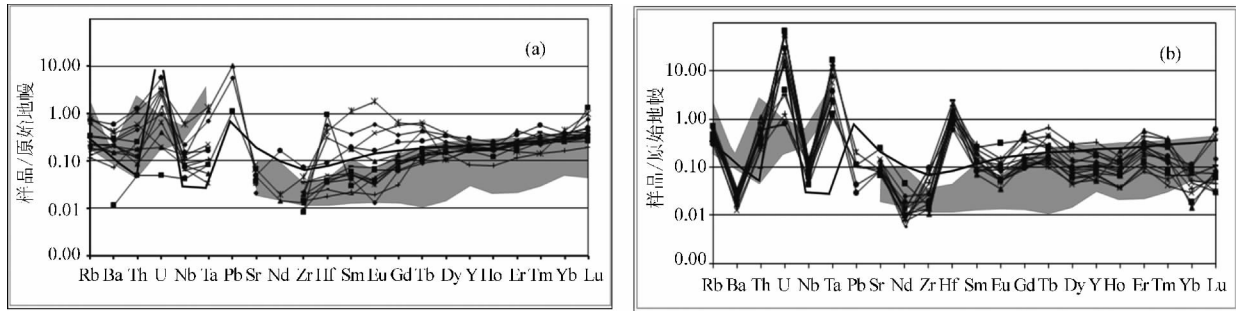


图 8 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩中二辉橄榄岩 (a) 和方辉橄榄岩 (b) 微量元素蛛网图 [原始地幔值据 McDonough et al., 1995; 深海橄榄岩平均值 (图中黑色粗线) 据 Ibrahim et al., 2012; 图中阴影区为罗布莎康金拉地幔橄榄岩微量元素曲线, 据 Xu Xiangzhen et al., 2011]

Fig. 8 Primitive mantle-normalized trace element patterns of the Zedang lherzolites (a) and harzburgites (b) in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt [Normalizing values after McDonough et al., 1995; The average composition of abyssal peridotites (black line) is from Ibrahim et al., 2012; The compositions of Luobusha Kangjinla mantle peridotite are from Xu Xiangzhen et al., 2011]

辉橄榄岩分别做微量元素图进行比较, 如图 8a 和 8b, 方辉橄榄岩比二辉橄榄岩更亏损 Ba、Nd、Pb 和 Yb, 更富集 Sr、U、Ta 和 Hf, 可能是由于早期的熔融程度不同, 后期受到俯冲带的改造, 造成两类岩石个别元素在含量上的不同。

将泽当新鲜的更能代表原始地幔性质的二辉橄榄岩与罗布莎康金拉的地幔橄榄岩进行比较, 如图 8a 所示, ①两个地方的 Zr、Sr 和 Ba 都是负异常, Zr 和 Sr 含量基本相同而 Ba 含量变化较大; ②两个地方的 Rb 都是正异常, 含量大致相同; ③泽当的 Nb 和 Ta 是负异常, 康金拉的 Ta 是正异常, 且康金拉的 Nb 和 Ta 含量更高; ④泽当的 U 和 Pb 是正异常, 康金拉的 U 变化混乱, Pb 没有数据; ⑤两个地方的 Th、Sm、Eu 和 Hf 变化混乱, 正负异常都有, 康

金拉相对更集中; ⑥两个地方的重稀土元素含量基本相同, 曲线平行且重合; ⑦两个地方的元素含量, 除个别样品的 U 和 Pb 等元素外, 其余元素的含量都低于原始地幔。总体上两个地方的地幔橄榄岩微量元素曲线基本平行, 并且与深海橄榄岩曲线重合。通过以上比较, 可以认为泽当地幔橄榄岩起源于洋中脊下的亏损地幔域, 而且泽当和罗布莎地幔橄榄岩具有密切的联系。

泽当地幔橄榄岩部分 LREE 的含量太低, 无法准确检测。由于重稀土在俯冲过程中不受影响, 能更好的代表源区性质, 在稀土元素原始地幔标准化蛛网图上 (图 9), 重稀土含量均低于原始地幔, 方辉橄榄岩由于蛇纹石化的原因曲线变化较大 (图 9b), 但总体上低于原始地幔, 再次说明泽当地幔橄榄岩

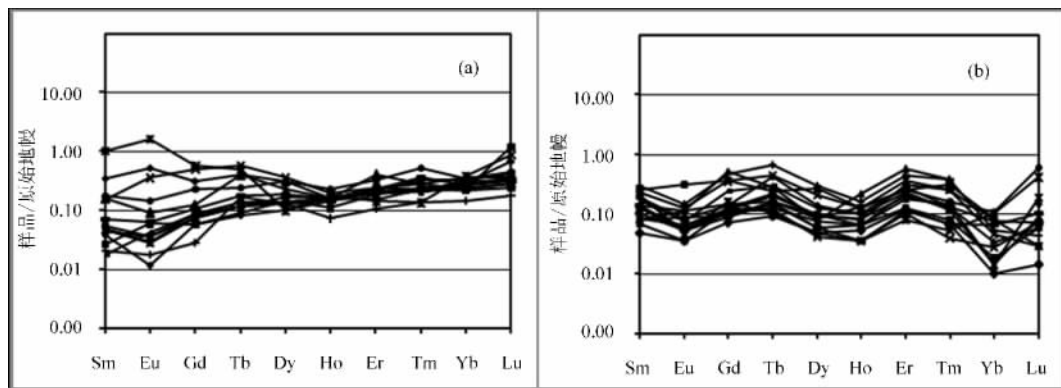


图 9 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩二辉橄榄岩 (a) 和方辉橄榄岩 (b) 稀土元素配分图 (原始地幔值据 McDonough et al., 1995)

Fig. 9 Primitive mantle-normalized REE element patterns of the Zedang lherzolites (a) and harzburgites (b) in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (Normalizing values after McDonough et al., 1995)

起源于亏损的原始地幔源区。

4 泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩岩石化学和地球化学特征

本文选择的泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ 图上(图 10a), 闪长岩化辉长岩落在闪长岩和辉长岩区域, 落入闪长岩区的岩石是辉长质岩石角闪石化的结果。在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 (\times 10^{-4}) - \text{Nb}/\text{Y}$ 图上(图 10b), 所有岩石都落入亚碱性玄武岩区域, 并且分布集中, 说明它们是同源岩浆在不同阶段的产物。

4.1 闪长岩化辉长岩岩石化学特征

闪长岩化辉长岩的代表性主量元素数据见表 7, 烧失量(2%~5.99%)变化较大。闪长岩化辉长岩的 SiO_2 含量在 48.51%~57.51% 之间, 平均为 55.86%; Al_2O_3 含量为 13.27%~16.87%, 平均为 15.17%; MgO 含量为 5.85%~6.79%, 平均为 6.38%; $\text{Mg}^\#$ 值变化范围较大在 67.37~80.47 之间, 平均为 75.01; TiO_2 含量为 0.03%~0.12%, 平均为 0.066%; Na_2O 含量 0.01%~0.11% 之间, 平均为 0.1%; K_2O 含量 0.01%~0.02% 之间, 平均 0.015%。闪长岩化辉长岩 SiO_2 含量高于印度洋的

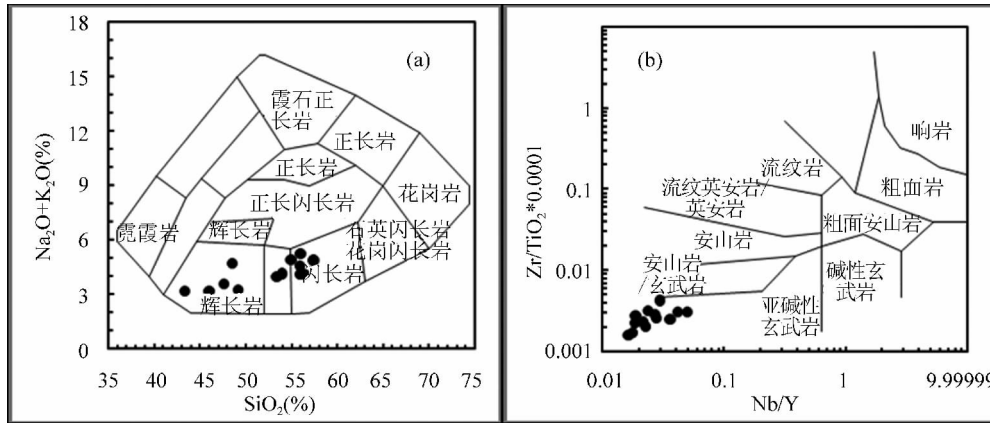


图 10 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩中闪长岩化辉长岩的 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (a) 和 $\text{Zr}/\text{TiO}_2 (\times 10^{-4}) - \text{Nb}/\text{Y}$ (b) 图(据 Winchester et al., 1977)

Fig. 10 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} - \text{SiO}_2$ (a) and $\text{Zr}/\text{TiO}_2 (\times 10^{-4}) - \text{Nb}/\text{Y}$ (b) diagram(after Winchester et al., 1977) for the diorite-gabbros from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

表 7 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩中闪长岩化辉长岩主量元素分析结果(%)

Table 7 The abundances of the Major elements in diorite-gabbros from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (%)

编号岩性	ZD005	ZD048	ZD062 ^①	ZD063 ^①	ZD064 ^①	ZD065 ^①	ZD066 ^①	ZD071	ZD072
	闪长岩化辉长岩								
SiO_2	53.07	50.75	55.92	55.99	55.93	57.51	53.96	48.51	49.14
TiO_2	0.06	0.06	0.17	0.01	0.03	0.08	0.01	0.12	0.03
Al_2O_3	16.59	17.99	14.73	14.72	14.11	14.80	16.26	21.16	19.04
Fe_2O_3	1.85	1.81	2.50	2.06	2.60	1.40	1.00	1.50	2.72
FeO	3.72	4.08	3.21	3.60	3.21	3.60	2.81	4.06	5.10
MnO	0.10	0.10	0.14	0.08	0.12	0.11	0.08	0.09	0.09
MgO	6.49	6.79	5.84	5.98	7.35	5.86	5.61	6.48	5.85
CaO	9.06	8.98	8.88	9.32	7.92	7.93	11.74	8.49	10.73
Na_2O	3.49	2.91	4.02	3.95	4.26	4.71	3.99	2.73	2.30
K_2O	0.68	1.11	0.09	0.14	0.31	0.11	0.09	1.99	0.94
P_2O_5	0.16	0.17	0.27	0.12	0.20	0.14	0.08	0.17	0.20
CO_2	0.65	0.67	0.55	0.60	0.30	0.55	1.10	0.35	1.35
LOI	3.71	4.28	3.50	2.80	3.18	2.95	2.75	4.18	2.00
总量	99.64	99.70	99.82	99.37	99.52	99.75	99.48	99.83	99.49
$\text{Mg}^\#$	75.84	74.97	76.61	74.94	80.47	74.55	78.23	74.18	67.37

注: ①表示数据引自韦栋梁, 2007, 以下类同。

玄武岩的含量(49.68%)(Sun S S et al., 1979)。MgO 含量远低于大西洋中脊玄武岩平均成分的相应含量(9.04%)(韦栋梁等, 2004), 与洋脊玄武岩(6.56%)(Sun S S et al., 1979)含量相当。Mg[#] 值介于印度洋辉长岩的 Mg[#] 值范围(32~88), 属于蛇绿岩中的镁铁质堆晶岩(Coleman, 1977)。TiO₂ 含量远低于洋脊玄武岩(1%~1.5%)(赖绍聪等, 1996; 姚玉鹏等, 1997)。闪长岩化辉长岩 K₂O 含量高于洋脊玄武岩 K₂O 含量(Sun S S et al., 1979)。总体上表现出高 Si、K, 低 Ti 和 Na 的特点。

4.2 闪长岩化辉长岩地球化学特征

闪长岩化辉长岩的代表性微量元素和稀土元素数据见表 8。微量元素原始地幔标准化蛛网图(图 11a)和稀土元素分布曲线图(图 11b)所示, 曲线大体与 N-MORB 曲线平行, 说明闪长岩化辉长岩具

有 N-MORB 的性质。除去 Rb、Sr 和 Pb 的个别样品的含量高于 N-MORB 外(图 11a), 其余的元素含量明显低于 N-MORB, 说明闪长岩化辉长岩来自比 N-MORB 更亏损的源区。大离子亲石元素中 Rb、Sr、Ba、U 和 Pb 是正异常, Th 负异常, Eu 正负异常都有; 高场强元素中 Nb、Ta、Zr 和 Hf 都是负异常, 微量元素明显受到俯冲带的影响, 具有岛弧拉斑玄武岩的性质。闪长岩化辉长岩的 2Nb-Zr/4-Y 和 Th-Hf/3-Nb/16 环境判别图(图 12)中, 样品明显具有 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重特征。闪长岩化辉长岩具有的 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重性质可能是洋中脊环境下产生, 后期受到俯冲带的改造造成的。在图 12a 中, 闪长岩化辉长岩高 Y 值超出 D(正常型洋脊玄武岩和岛弧玄武岩)区, 更可能是受到俯冲带的改造的结果。

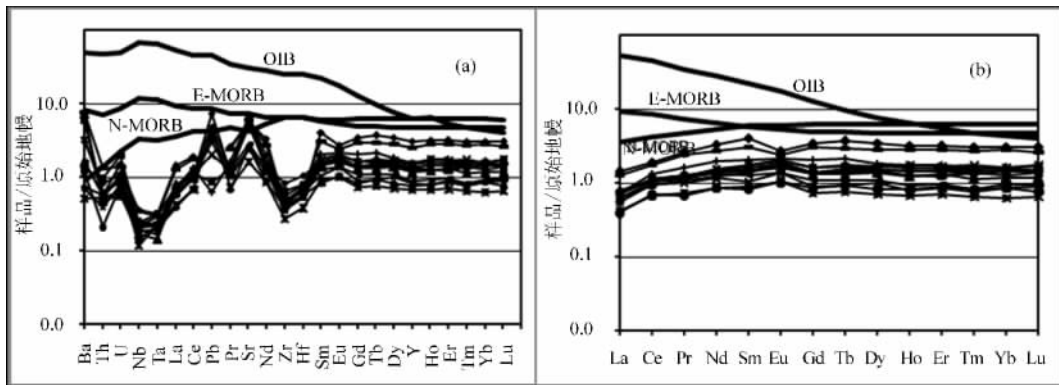


图 11 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩微量元素蛛网图(a)和稀土元素原始地幔曲线图(b) (原始地幔值, OIB, E-MORB 和 N-MORB 都引自 Sun S S et al., 1989)

Fig. 11 Primitive mantle-normalized trace element(a) and REE element(b) patterns for the diorite-gabbros from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (Normalizing values and OIB, N-MORB as well as E-MORB all after Sun S S et al., 1989)

表 8 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩微量元素分析结果(×10⁻⁶)

Table 8 The abundances of the trace elements in diorite-gabbros from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt(×10⁻⁶)

编号岩性	ZD005	ZD048	ZD062#	ZD063#	ZD064#	ZD065#	ZD066#	ZD071	ZD072
	闪长岩化辉长岩								
Sc	33.288	33.238	33.536	31.462	37.441	30.714	29.172	35.112	32.719
V	151.612	146.226	173.582	149.536	162.561	120.769	112.926	182.547	188.807
Cr	129.050	154.786	96.155	130.044	89.700	200.299	103.873	91.513	94.830
Co	25.658	26.570	24.343	25.479	28.613	24.196	20.601	28.870	25.392
Ni	68.069	72.395	52.901	65.699	55.834	97.840	48.396	55.492	55.905
Cu	10.697	14.472	16.927	5.687	13.541	6.631	9.100	3.200	10.409
Rb	1.524	5.202	0.713	1.567	2.787	1.027	0.668	17.069	7.406
Sr	81.928	91.357	50.449	102.905	123.588	50.768	34.348	125.335	115.267
Y	5.341	5.363	6.379	5.772	5.448	3.763	3.089	11.571	13.978
Zr	6.808	5.569	9.263	7.203	5.540	5.224	3.068	4.883	4.697
Nb	0.164	0.143	0.151	0.172	0.148	0.186	0.085	0.248	0.259

续表 8

Ba	7.604	18.372	5.190	9.130	11.215	4.882	3.618	52.858	21.244
Hf	0.245	0.216	0.324	0.250	0.201	0.204	0.118	0.209	0.173
Ta	0.011	0.009	0.012	0.013	0.009	0.009	0.009	0.012	0.013
Pb	1.866	1.132	6.916	0.062	0.265	0.220	0.319	*	*
Th	0.054	0.047	0.050	0.084	0.050	0.033	0.046	0.114	0.071
U	0.028	0.021	0.032	0.042	0.022	0.017	0.021	0.029	0.023
La	0.483	0.447	0.524	0.486	0.540	0.383	0.294	0.883	0.976
Ce	1.876	1.808	1.885	1.995	1.916	1.708	1.205	3.155	3.392
Pr	0.319	0.314	0.313	0.353	0.331	0.280	0.202	0.678	0.714
Nd	1.826	1.800	1.929	1.933	1.864	1.578	1.169	3.666	4.464
Sm	0.621	0.628	0.709	0.675	0.640	0.458	0.391	1.376	1.804
Eu	0.274	0.276	0.306	0.284	0.275	0.229	0.173	0.409	0.466
Gd	0.752	0.778	0.841	0.833	0.798	0.534	0.436	1.793	2.047
Tb	0.144	0.148	0.171	0.162	0.143	0.099	0.083	0.322	0.399
Dy	0.995	0.983	1.140	1.061	1.036	0.743	0.528	2.126	2.575
Ho	0.195	0.205	0.236	0.213	0.201	0.128	0.111	0.456	0.519
Er	0.585	0.605	0.695	0.594	0.632	0.417	0.335	1.348	1.509
Tm	0.085	0.089	0.099	0.101	0.084	0.056	0.048	0.199	0.226
Yb	0.586	0.604	0.700	0.630	0.584	0.429	0.308	1.403	1.506
Lu	0.090	0.093	0.107	0.101	0.087	0.066	0.048	0.195	0.224
ΣREE	8.829	8.776	9.655	9.421	9.131	7.108	5.331	18.009	20.821

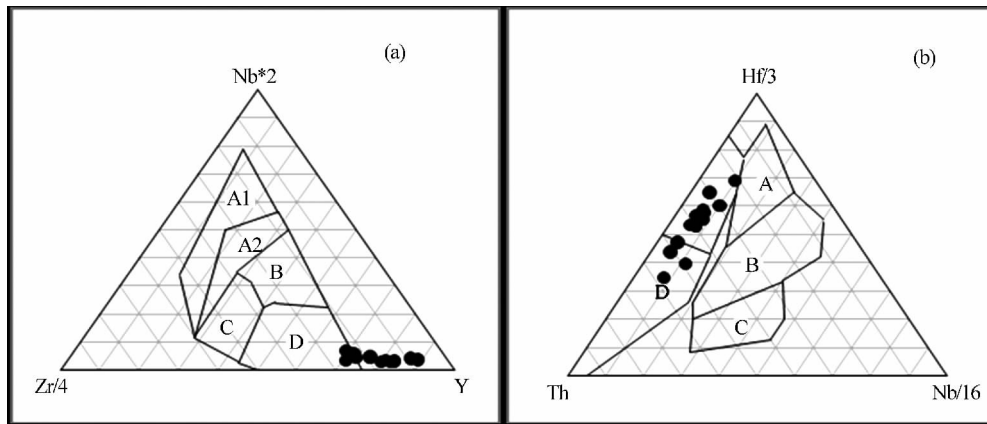


图 12 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩 2Nb-Zr/4-Y(a)(据 Meschede,1986)和 Th-Hf/3-Nb/16(b)(据 Wood,1980)构造环境判别图解

Fig. 12 Tectonic setting discrimination diagram of 2Nb-Zr/4-Y(a)(after Meschede,1986) and Th-Hf/3-Nb/16(b)

(after Wood,1980) for the diorite-gabbros from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

(a); A1—板内碱性玄武岩; A2—板内碱性玄武岩和板内拉斑玄武岩; B—富集型洋脊玄武岩(E-MORB); C—板内拉斑玄武岩和岛弧玄武岩; D—正常型洋脊玄武岩(N-MORB)和岛弧玄武岩(图例以下类同); (b); A—正常型洋脊玄武岩(N-MORB); B—富集型洋脊玄武岩(E-MORB); C—板内碱性玄武岩; D—岛弧拉斑玄武岩(图例以下类同)

(a); A1—within plate Alkaline Basalts; A2—within plate Alkaline Basalts and within plate Tholeiites; B—Enriched type Mid-Ocean Ridge Basalts; C—within plate Tholeiites and Island Arc Basalts; D—Normal type Mid-Ocean Ridge Basalts and Island Arc Basalts; (b); A—Normal type Mid-Ocean Ridge Basalts; B—Enriched type Mid-Ocean Ridge Basalts; C—within plate Alkaline Basalts; D—Island Arc Tholeiites

5 泽当蛇绿岩玄武岩岩石化学和地球化学特征

本文选择的泽当蛇绿岩样品为玄武玢岩和雏晶球颗玄武岩(韦栋梁等,2004)。在 Zr/TiO₂(×10⁻⁴)-Nb/Y 图(图 13a)上,雏晶球颗玄武岩落入亚碱性玄武岩区域,并且分布集中。玄武玢岩(图

13b)也落在亚碱性玄武岩区域,但靠近安山岩/玄武岩区域。

5.1 蛇绿岩玄武岩岩石化学特征

泽当蛇绿岩玄武岩的代表性主量元素数据见表 9。雏晶球颗玄武岩的 SiO₂ 含量平均为 47.59%,低于印度洋的玄武岩的含量(49.68%)(Sun S S et al.,1979)而 MgO 的平均值为 5.11%,低于洋脊玄

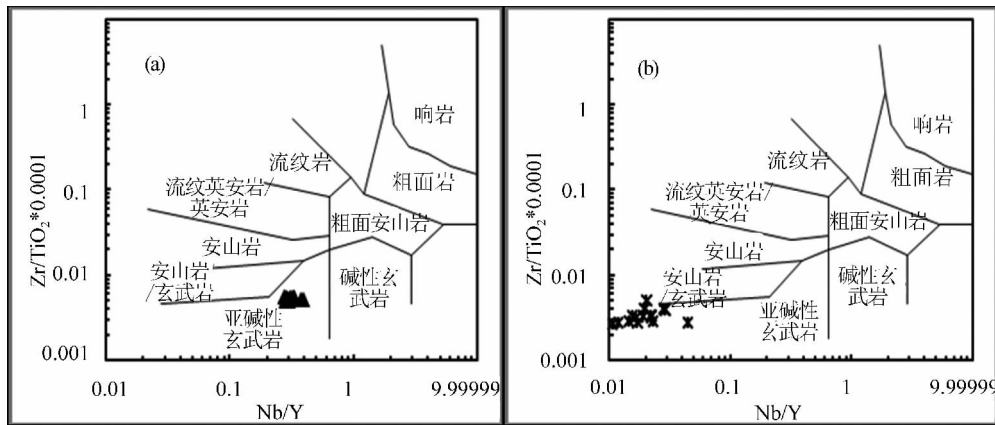


图 13 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩的 $Zr/TiO_2(\times 10^{-4})-Nb/Y$ 图(据 Winchester et al., 1977)
 Fig. 13 $Zr/TiO_2(\times 10^{-4})-Nb/Y$ diagram(after Winchester et al., 1977) for the basalts from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt

a—隼晶球颗玄武岩; b—玄武玢岩
 a—crystallite variolite; b—basaltic porphyrite

表 9 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩主量元素分析结果(%)
 Table 9 The abundances of the major elements in basalts from Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (%)

编号岩性	ZD058	ZD060	ZD079	ZD084	ZD085	ZD150	ZD151	ZD152	ZD153	ZD154	ZD155
	玄武玢岩(N-MORB)					隼晶球颗玄武岩(E-MORB)					
SiO ₂	53.75	57.20	42.13	49.15	53.90	48.38	48.65	49.74	42.89	45.35	53.00
TiO ₂	0.45	0.52	0.55	0.30	0.27	1.25	1.12	1.15	1.20	1.22	1.42
Al ₂ O ₃	18.10	15.34	19.64	19.63	15.64	18.71	20.16	17.79	18.40	19.32	16.87
Fe ₂ O ₃	4.05	2.70	3.00	2.03	2.54	3.00	3.18	2.68	2.90	2.02	2.71
FeO	3.20	6.07	5.85	5.36	3.70	4.15	4.50	4.42	4.04	4.30	4.50
MnO	0.14	0.16	0.13	0.17	0.20	0.16	0.14	0.13	0.13	0.15	0.16
MgO	5.04	4.60	4.55	5.30	5.41	5.26	5.09	4.55	4.31	4.18	5.14
CaO	7.53	3.27	19.82	10.07	7.29	10.22	8.70	10.08	12.53	13.04	8.59
Na ₂ O	4.28	5.50	0.56	3.47	4.21	3.75	3.51	3.31	2.58	3.14	3.89
K ₂ O	0.07	0.01	0.20	0.01	0.21	0.16	0.14	0.07	0.12	0.11	0.17
P ₂ O ₅	0.27	0.37	0.17	0.12	0.15	0.30	0.31	0.25	0.18	0.15	0.22
CO ₂	0.55	*	1.10	1.05	0.90	0.90	*	1.50	4.55	4.70	1.00
LOI	2.41	3.75	2.15	2.85	4.95	3.40	4.10	4.09	5.59	2.10	2.10
总量	99.84	99.49	99.85	99.51	99.37	99.64	99.60	99.76	99.42	99.78	99.77

注:隼晶球颗玄武岩数据引自韦栋梁等(2004),以下类同。

玄武岩(6.56%) (Sun S S et al., 1979), 显示出贫 MgO 的特点(夏斌等, 1998)。TiO₂ 平均含量为 1.32%, 与洋脊玄武岩(1%~1.5%) 的含量接近(Sun S S et al., 1979; 赖绍聪等, 1996; 姚玉鹏等, 1997)。Al₂O₃ 平均含量为 18.26%, P₂O₅ 的含量平均为 0.2%, 比洋中脊玄武岩(0.14%) 稍高(Sun S S et al., 1979; 郭通珍等, 1999)。Na₂O 平均含量为 3.43%, K₂O 含量平均为 0.13%。总体上看, 隼晶球颗玄武岩具有低 Si、Mg, 高 Al、Na 和 P 的特征。玄武玢岩 SiO₂ 含量在 42.13%~57.20% 之间, 变化范围较大, 高于印度洋的玄武岩的含量(49.68%) (Sun S S et al., 1979)。MgO 含量的平均值 5.79%,

低于洋脊玄武岩(6.56%) (Sun S S et al., 1979), 明显高于隼晶球颗玄武岩。TiO₂ 的含量在 0.27%~0.55% 之间, 明显比隼晶球颗玄武岩低, 低于岛弧玄武岩的含量(平均为 0.8%) (张旗等, 1999)。Al₂O₃ 变化范围在 15.34%~19.64% 之间, 与隼晶球颗玄武岩含量相当。P₂O₅ 的平均含量为 0.13%, 稍低于隼晶球颗玄武岩, 与洋中脊玄武岩相当(0.14%) (Sun S S et al., 1979; 郭通珍等, 1999)。Na₂O 平均含量为 4.7%, 高于隼晶球颗玄武岩。总的来说, 玄武玢岩具有高 Si 和 Na, 低 Mg 和 Ti 的特征。

5.2 蛇绿岩玄武岩地球化学特征

泽当蛇绿岩玄武岩的微量元素数据见表 10。

如(图 14)微量元素和稀土元素原始地幔标准化曲线图中,两类玄武岩表现出明显不同的性质。玄武玢岩(图 14c 和 14d)的原始地幔标准化曲线与 N-MORB 曲线平行,相对亏损大离子亲石元素 Rb、Ba、Th、Sr 和轻稀土,证明它具有 N-MORB 的性质。微量元素含量仅个别样品的含量高于 N-

MORB,说明它们来源于比 N-MORB 更亏损的源区。Pb 和 U 等大离子亲石元素具有明显的正异常,Nb、Ta 和 Zr 等高场强元素有明显的负异常,说明这类玄武岩受到俯冲带的影响,具有岛弧拉斑玄武岩的特征。在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ (图 15b)和 $\text{Th-Hf}/3\text{-Nb}/16$ (图 16b)构造环境判别图中,这类玄武岩都

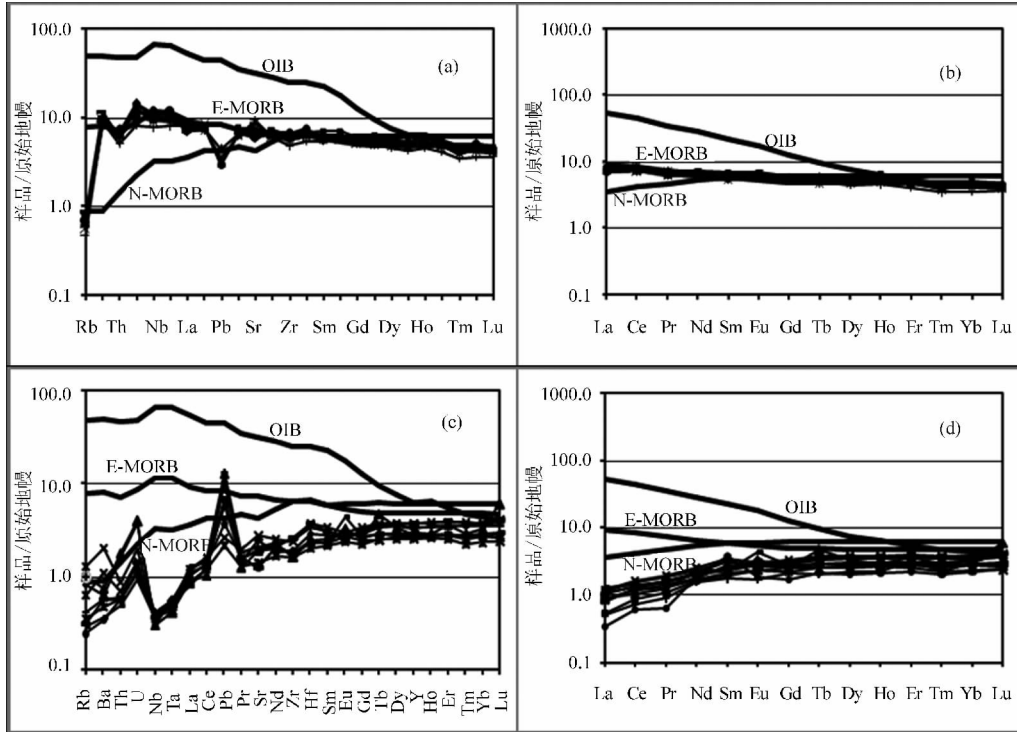


图 14 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩微量元素蛛网图(a,c)和稀土元素原始地幔曲线图(b,d)
(原始地幔值,OIB,E-MORB 和 N-MORB 都引自 Sun et al.,1989; a,b—雏晶球状玄武岩; c,d—玄武玢岩)

Fig. 14 Primitive mantle-normalized trace element (a, c) and REE element (b, d) patterns for the basalts from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt (Normalizing values and OIB, N-MORB as well as E-MORB after Sun et al., 1989; a, b—crystallite variolite; c, d—basaltic porphyrite)

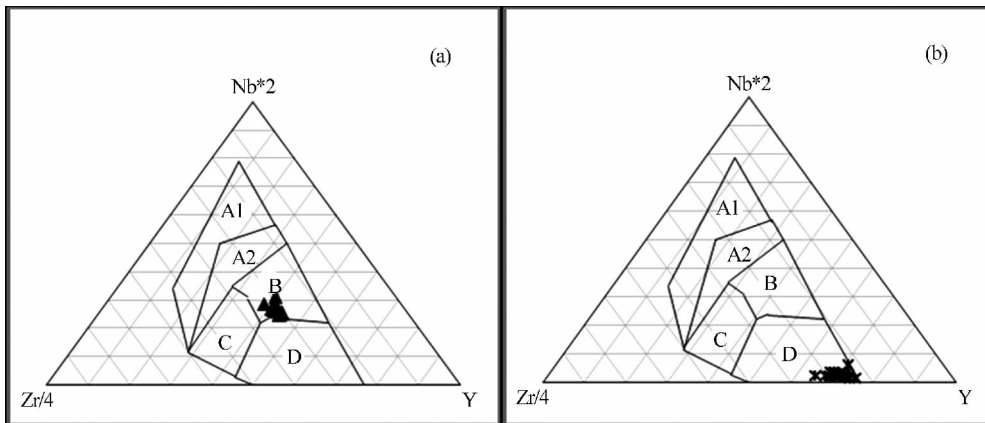


图 15 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ 构造环境判别图解(据 Meschede,1986)

Fig. 15 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ tectonic setting discrimination diagram (after Meschede, 1986) for the basalts from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt
(a—雏晶球状玄武岩; b—玄武玢岩)(a—crystallite variolite; b—basaltic porphyrite)

表 10 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩微量元素分析结果($\times 10^{-6}$)

Table 10 The abundances of the trace elements in basalts from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt($\times 10^{-6}$)

编号岩性	ZD058	ZD060	ZD079	ZD084	ZD085	ZD150	ZD151	ZD152	ZD153	ZD154	ZD155
	玄武玢岩(N-MORB)					雏晶球状玄武岩(E-MORB)					
Sc	38.094	35.485	41.682	41.252	41.192	42.217	43.603	41.033	38.644	39.449	46.339
V	336.922	270.315	316.632	260.404	256.614	218.128	249.79	241.517	245.23	240.578	217.179
Cr	32.838	48.937	40.251	57.500	50.479	314.99	344.056	292.457	289.501	272.909	388.226
Co	29.194	30.247	32.156	32.535	31.934	38.504	43.535	38.479	35.033	33.09	40.634
Ni	28.135	29.157	26.830	48.003	42.528	88.741	91.863	74.613	77.211	68.406	108.727
Cu	93.590	101.169	25.105	66.051	64.203	90.935	88.276	79.56	66.328	71.561	81.254
Rb	0.188	0.197	0.143	0.276	0.903	0.421	0.467	0.416	0.359	0.408	0.432
Sr	39.978	26.658	39.054	77.514	213.605	130.516	131.955	138.464	158.246	152.409	127.251
Y	13.551	17.077	13.089	9.454	10.008	22.943	24.176	21.865	21.362	20.752	21.773
Zr	20.378	29.440	17.839	11.988	13.061	69.737	71.994	67.403	62.13	62.584	75.083
Nb	0.258	0.265	0.156	0.100	0.446	7.483	7.983	7.11	6.624	6.632	8.16
Ba	2.575	4.014	1.725	5.624	12.012	56.183	69.41	63.958	69.604	61.478	63.635
Hf	0.722	1.174	0.754	0.493	0.759	2.176	2.153	2.036	1.923	1.885	2.314
Ta	0.020	0.022	0.093	0.013	0.192	0.461	0.473	0.416	0.408	0.365	0.501
Pb	0.420	0.490	0.588	0.740	0.272	*	*	0.313	0.074	*	0.211
Th	0.042	0.050	0.048	0.036	0.219	0.563	0.568	0.545	0.539	0.486	0.607
U	0.020	0.030	0.027	0.019	0.096	0.297	0.244	0.248	0.265	0.262	0.247
La	0.885	0.546	0.373	0.236	0.359	4.824	5.744	5.155	5.769	5.156	4.876
Ce	2.575	2.258	1.583	1.072	1.322	13.23	14.577	13.617	14.441	12.949	13.835
Pr	0.434	0.447	0.307	0.176	0.249	1.859	2.037	1.813	1.88	1.726	1.837
Nd	2.765	2.829	2.198	2.550	2.129	8.747	9.869	8.725	8.757	8.177	9.03
Sm	1.045	1.385	0.871	1.728	0.778	2.761	3.097	2.725	2.78	2.496	2.55
Eu	0.736	0.431	0.396	0.311	0.292	1.049	1.175	1.068	1.042	0.966	1.033
Gd	1.640	1.920	1.499	1.025	1.244	3.357	3.602	3.199	3.311	3.107	3.236
Tb	0.314	0.397	0.313	0.233	0.224	0.625	0.647	0.576	0.583	0.528	0.6
Dy	2.138	2.763	2.236	1.527	1.610	4.11	4.299	3.975	3.819	3.589	3.956
Ho	0.482	0.615	0.507	0.355	0.366	0.896	1.014	0.865	0.865	0.816	0.895
Er	1.355	1.895	1.470	1.089	1.573	2.512	2.676	2.42	2.375	2.25	2.368
Tm	0.209	0.278	0.228	0.152	0.166	0.342	0.354	0.321	0.285	0.303	0.312
Yb	1.429	1.867	1.632	1.121	1.477	2.37	2.546	2.25	2.261	2.042	2.253
Lu	0.221	0.307	0.287	0.183	0.319	0.33	0.341	0.33	0.307	0.299	0.323
Σ REE	16.228	17.938	13.900	11.758	12.108	47.012	51.978	47.039	48.475	44.404	47.104

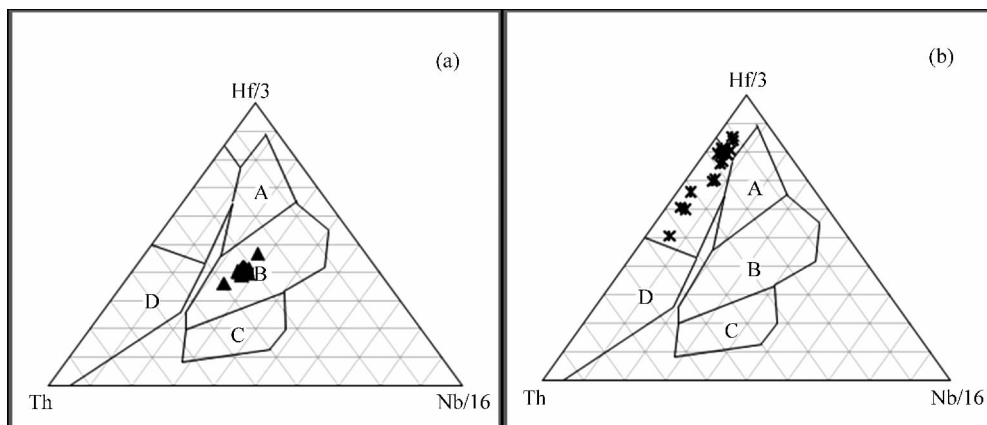


图 16 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩玄武岩的 Th-Hf/3-Nb/16 判别图(据 Wood,1980)
 Fig. 16 Th-Hf/3-Nb/16 tectonic setting discrimination diagram (after Wood, 1980) for the basalts from the Zedang ophiolite in the east section of the Yarlung-Zangbo ophiolite belt
 (a—雏晶球状玄武岩;b—玄武玢岩)(a—crystallite variolite;b—basaltic porphyrite)

落在了洋中脊(N-MORB)和岛弧玄武岩的范围内。总的来说玄武岩具有 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重特征。

雏晶球状玄武岩(图 14a 和 14b)的微量元素和稀土元素的原始地幔标准化曲线除了 Rb 和 Pb 外,其余与 E-MORB 曲线重合。高场强元素没有出现亏损现象,说明这类玄武岩没有受到俯冲带的影响。在 $2\text{Nb}-\text{Zr}/4-\text{Y}$ (图 15a)和 $\text{Th}-\text{Hf}/3-\text{Nb}/16$ (图 16a)构造环境判别图中,这类玄武岩都落在了富集型洋中脊玄武岩(E-MORB)的范围内。以上说明雏晶球状玄武岩具有 E-MORB 型玄武岩的性质,并且没有受到俯冲带的影响,这与韦栋梁等(2004)得出的结论相同。有学者认为 E-MORB 是 N-MORB 地幔端元与 OIB 地幔端元不同程度的叠加改造产生的(张旗等,1999),也可能是地幔本身具有的不均一的性质(张旗等,2003),蛇绿岩的岩浆源区本身就具有多样性的特点(张旗等,1999)。韦栋梁等(2004)认为泽当蛇绿岩中 E-MORB 玄武岩不具有 N-MORB 地幔端元与 OIB 地幔端元混合产生的特征,通过前面的描述作者认为用岩浆地幔源区具有不均一的性质解释更合适,也就是说 E-MORB 玄武岩是在包含有富集岩浆的不均匀的洋中脊环境中产生而不可能是俯冲带环境,因为它不具有岛弧拉斑玄武岩的性质。蛇绿岩中 E-MORB 型玄武岩的存在可能说明在俯冲开始之前在泽当就有蛇绿岩的存在。

6 讨论

6.1 泽当蛇绿岩的起源

为了探讨泽当蛇绿岩的起源,作者从四个方面入手:①泽当蛇绿岩地幔橄榄岩主要矿物的矿物化学特征;②泽当蛇绿岩地幔橄榄岩岩石化学和地球化学特征;③泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩岩石化学和地球化学特征;④泽当蛇绿岩玄武岩岩石化学和地球化学特征。下面分别讨论:

(1)通过对泽当蛇绿岩地幔橄榄岩主要矿物的矿物化学分析,发现如下规律:①如图 2 所示,方辉橄榄岩的橄榄石 Fo 值高于二辉橄榄岩;②如图 3 和 4 所示,方辉橄榄岩比二辉橄榄岩的斜方辉石和单斜辉石的 En 值和 $\text{Mg}^\#$ 值高, Al_2O_3 含量稍低, $\text{Mg}^\#$ 和 Al_2O_3 表现出很好的负相关关系;③如图 5 所示,在尖晶石的 $\text{Mg}^\#-\text{Cr}^\#$ 图中,两类橄榄岩样品聚集在深海橄榄岩的范围内,因受俯冲带的影响分成两个区;④两类岩石的各类数值都有重叠(如图 2、3、4 和 5 所示),呈渐变过渡关系。以上规律说明

泽当地幔橄榄岩起源于洋中脊下亏损地幔域,方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高,后期受到俯冲带的改造。

(2)通过对地幔橄榄岩岩石化学和地球化学分析,作者发现:①方辉橄榄岩虽然由于蛇纹石化烧失量大的原因造成一些元素的含量较低,但是归一化计算后 $\text{Mg}^\#$ 值明显的高于二辉橄榄岩,与地幔橄榄岩的矿物化学性质一样;②如图 6 所示,两类岩石的 Al_2O_3 、 SiO_2 、 MgO 、 CaO 、 MnO 、 TiO_2 和全铁含量都比原始地幔含量低;③方辉橄榄岩和二辉橄榄岩在图 6 中分成两个区域, Al_2O_3 和全铁的含量相似,线性关系相似; TiO_2 是方辉橄榄岩高于二辉橄榄岩; MgO 、 SiO_2 、 MnO 和 CaO 方辉橄榄岩低于二辉橄榄岩;④如图 7 所示,两类岩石的 Y、Cr、Ni 和 V 的元素含量基本相同,与 MgO 的线性关系大体上相似,比原始地幔亏损不相容元素 V 和 Y, Cr 和 Ni 与原始地幔含量类似;⑤图 7 中 Ni、Cr、V、Y 对 MgO 的线性关系与图 6 中的 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MnO 、 TiO_2 和 FeO^* 对 MgO 的线性关系有一定的相似性;⑥如图 8a 所示,二辉橄榄岩的微量元素原始地幔标准化曲线与罗布莎康金拉地幔橄榄岩曲线以及深海橄榄岩曲线平行,并且含量低于原始地幔;⑦如图 8 和图 9 所示,方辉橄榄岩和二辉橄榄岩在一些微量元素的含量上不同。以上说明泽当地幔橄榄岩是亏损的原始地幔熔融残留物,起源于洋中脊下亏损地幔域,与罗布莎地幔橄榄岩有密切的联系。地幔橄榄岩中两个亚类熔融程度不同,方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高,一些元素含量上的不同既是由于早期的熔融程度不同也是由于后期受到俯冲带的影响的原因。

(3)再讨论泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩。①闪长岩化辉长岩在 $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 图和 Zr/TiO_2 ($\times 10^{-4}$)- Nb/Y 图(图 10)分别落在闪长岩化辉长岩和亚碱性玄武岩区域;② MgO 含量与洋脊玄武岩(6.56%)含量相当, $\text{Mg}^\#$ 值介于印度洋辉长岩的 $\text{Mg}^\#$ 值范围, TiO_2 含量远低于洋脊玄武岩, Na_2O 的含量远低于洋脊玄武岩及碱性玄武岩,总体上表现出高 Si 和 K,低 Ti 和 Na 的特点,具有洋中脊玄武岩的性质;③微量元素和稀土元素原始地幔标准化曲线(图 11)与 N-MORB 曲线平行,说明闪长岩化辉长岩具有 N-MORB 的性质,元素含量又明显低于 N-MORB,说明来自比 N-MORB 更亏损的源区;④大离子亲石元素以正异常为主,高场强元素都是负异常,明显受到俯冲带的影响,具有岛弧拉斑玄武

岩的性质;⑤在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ 和 $\text{Th-Hf}/3\text{-Nb}/16$ 环境判别图(图 12)中,明显具有 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重特征。以上说明闪长岩化辉长岩起源于比 N-MORB 更亏损的源区,具有 N-MORB 的性质,可能后期受到俯冲带的改造又具有了岛弧拉斑玄武岩的性质。

(4)本次讨论的蛇绿岩玄武岩样品明显的分成了两组,分别是玄武玢岩(N-MORB)和雏晶球状玄武岩(E-MORB)。①在 $\text{Zr}/\text{TiO}_2(\times 10^{-4})\text{-Nb}/\text{Y}$ 图上,雏晶球状玄武岩(图 13a)落入亚碱性玄武岩区域,玄武玢岩(图 13b)也落在亚碱性玄武岩区域但靠近安山岩/玄武岩区域;②雏晶球状玄武岩具有低 Si、Mg,高 Al、Na 和 P 的特征,玄武玢岩具有高 Si 和 Na,低 Mg 和 Ti 的特征,两类玄武岩在主量元素的含量上有差距;③玄武玢岩(图 14c 和 14d)的微量元素和稀土元素的原始地幔标准化曲线与 N-MORB 曲线平行,并且元素含量都低于 N-MORB,说明具有 N-MORB 的性质,且更亏损,富集大离子亲石元素亏损高场强元素,说明也具有岛弧拉斑玄武岩的性质,在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ (图 15b)和 $\text{Th-Hf}/3\text{-Nb}/16$ (图 16b)构造环境判别图中,这类玄武岩都落在了洋中脊和岛弧玄武岩的范围内;④雏晶球状玄武岩(图 14a 和 14b)的微量元素和稀土元素的原始地幔标准化曲线除了 Rb 和 Pb 外,其余与 E-MORB 曲线重合,说明是 E-MORB 型玄武岩,高场强元素没有出现亏损现象,说明这类玄武岩没有受到俯冲带的影响,在 $2\text{Nb-Zr}/4\text{-Y}$ (图 15a)和 $\text{Th-Hf}/3\text{-Nb}/16$ (图 16a)构造环境判别图中,这类玄武岩都落在了富集型洋中脊玄武岩的范围内。以上说明泽当蛇绿岩中包含两个类型的玄武岩,分别是 E-MORB 型和具有岛弧拉斑玄武岩性质的 N-MORB 型,可能说明泽当蛇绿岩起源于不均匀的洋中脊下亏损地幔域,产生了 N-MORB 型和 E-MORB 型玄武岩,后期又经历了俯冲带的改造。

泽当地幔橄榄岩的矿物化学和岩石化学、地球化学表明其起源于洋中脊下亏损地幔域,后期受到俯冲带的改造。蛇绿岩中具有 E-MORB 型玄武岩说明泽当蛇绿岩起源的环境具有富集地幔,说明了蛇绿岩起源于不均匀的洋中脊下亏损地幔域。蛇绿岩闪长岩化辉长岩和玄武玢岩都具有 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重特征,可能是由于在洋中脊起源后又受到俯冲带改造的原因。

综合以上对泽当蛇绿岩中地幔橄榄岩、闪长岩化辉长岩和玄武岩的研究,作者认为泽当蛇绿岩是

在洋中脊环境下产生的,结合玄武玢岩和辉长岩都具有的岛弧拉斑玄武岩的性质和研究区北面存在的泽当岛弧,泽当蛇绿岩后期又受到俯冲带的改造,构造演化过程类似于研究区东边相邻的罗布莎蛇绿岩。

6.2 泽当蛇绿岩的演化

韦栋梁等(2006a)对泽当蛇绿岩玄武岩进行的 Sm-Nd 同位素分析,得到等时线年龄为 $175 \pm 20\text{Ma}$,同时发现玄武岩样品具有 MORB 和 IAT 双重特征,可能是早期形成的玄武岩后来受到俯冲带上流体的改造。Aitchison 等(2000)和 McDermid 等(2002)对泽当蛇绿岩北侧的泽当岛弧中安山岩的角闪石和英安角砾岩中的锆石进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 和 U-Pb 年代学分析,得出的年龄分别为 $152.2 \pm 3.3\text{Ma}$ 和 $161 \pm 2.3\text{Ma}$,两者平均 $156 \pm 0.3\text{Ma}$,另外他们还对石英闪长岩中的角闪石和锆石进行了相同的年代学分析得到一个 $156.8 \pm 0.38\text{Ma}$ 的平均年龄。夏斌(未刊数据)对泽当蛇绿岩玻基熔岩进行的锆石 SHRIMP U-Pb 定年获得了 $154.0 \pm 2.1\text{Ma}$ 的数据,与泽当岛弧的年代相似。

泽当蛇绿岩获取的最早年代是 $175 \pm 20\text{Ma}$,最新的年代是 $154.0 \pm 2.1\text{Ma}$,前人普遍接受泽当岛弧的形成时间是在 150Ma 左右,韦栋梁(2007)结合在泽当发现的埃达克质英云闪长岩,认为泽当岛弧是在弧前环境形成的。综上所述作者认为泽当蛇绿岩是 170Ma 左右形成于不均匀的洋中脊(MOR)下亏损地幔域, 150Ma 左右在弧前环境受到俯冲带的改造。

7 结论

(1)泽当蛇绿岩地幔橄榄岩中方辉橄榄岩和二辉橄榄岩相比,方辉橄榄岩橄榄石的 F_o 值,斜方辉石和单斜辉石的 En 值和 $Mg^\#$ 值比二辉橄榄岩高, Al_2O_3 含量比二辉橄榄岩低,并且数值重叠,呈渐变过渡关系。在尖晶石的 $Mg^\#-\text{Cr}^\#$ 图中,两类岩石都聚集在深海橄榄岩的范围内。以上说明泽当蛇绿岩地幔橄榄岩起源于洋中脊下亏损地幔域,方辉橄榄岩的熔融程度比二辉橄榄岩高,结合存在的泽当岛弧说明后期受到俯冲带的改造。

(2)地幔橄榄岩岩石化学和地球化学分析表明,方辉橄榄岩和二辉橄榄岩绝大多数的主量元素和微量元素的含量都低于原始地幔,微量元素的原始地幔标准化曲线与深海橄榄岩曲线和罗布莎康金拉地幔橄榄岩曲线重合,说明它们是亏损的原始地幔熔

融残留物,起源于洋中脊下亏损地幔域。主微量元素的含量以及与 MgO 的线性关系表明方辉橄岩比二辉橄岩熔融程度高,两类岩石之间的差异是由于早期的熔融程度不同,后期又受到俯冲带的影响。

(3) 泽当蛇绿岩闪长岩化辉长岩具有 N-MORB 和岛弧拉斑玄武岩的双重特征,并且微量元素含量低于 N-MORB,说明闪长岩化辉长岩起源于比 N-MORB 更亏损的源区,具有 N-MORB 的性质,后期受到俯冲带的改造又具有了岛弧拉斑玄武岩的性质。

(4) 泽当蛇绿岩玄武岩包含 N-MORB 型和 E-MORB 型两类, N-MORB 型玄武岩还具有岛弧拉斑玄武岩的性质。这说明泽当蛇绿岩起源于混合不均一的洋中脊下亏损地幔域,产生了 N-MORB 型和 E-MORB 型玄武岩, N-MORB 型玄武岩后期受到俯冲带的改造具有了岛弧拉斑玄武岩的性质, E-MORB 型玄武岩没有受到俯冲带的影响。

(5) 通过总结前人对泽当蛇绿岩年代学和构造背景的研究成果以及本文的研究,作者认为泽当蛇绿岩是 170Ma 左右形成于洋中脊(MOR)环境, 150Ma 左右在弧前环境受到俯冲带的改造。

参 考 文 献

白文吉,杨经绥,施倪承,方青松,代明泉,熊明,颜秉刚. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩地幔岩中首次发现超高压矿物方铁矿和自然铁. 地质论评, 50(2):184~187.

白文吉,施倪承,方青松,李国武,杨经绥,熊明,戎合. 2006. 新矿物: 罗布莎矿. 地质学报, 80(10):1487~1490.

白文吉,施倪承,杨经绥,方青松,任玉峰,戎合,李国武,马喆生. 2007. 西藏蛇绿岩豆荚状铬铁矿中简单氧化物矿物组合及其超高压成因. 地质学报, 81(11):1538~1549.

郭通珍,赵凤清. 1999. 大坂山蛇绿岩特征及其形成环境. 青海地质, 8(2):14~24.

赖绍聪,邓晋福. 1996. 柴达木北缘古生代蛇绿岩及其构造意义. 现代地质, 10(1):18~28.

李源,杨经绥,刘钊,贾毅,徐向珍. 2011. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄岩成因及构造意义. 岩石学报, 027(11):3239~3254.

梁风华,许志琴,巴登珠,徐向珍,刘飞,熊发挥,贾毅. 2011. 西藏罗布莎-泽当蛇绿岩体的构造产出与侵位机制探讨. 岩石学报, 27(11):3255~3268.

史仁灯,杨经绥,许志琴,戚学祥. 2005. 西藏班公湖存在 MOR 型和 SSZ 型蛇绿岩:来自两种不同地幔橄岩的证据. 岩石矿物学杂志, 24(5):397~408.

韦栋梁,夏斌,周国庆,王冉. 2004. 西藏泽当蛇绿岩壳层火山熔岩的岩石地球化学及成因. 大地构造与成矿, 28(3):270~278.

韦栋梁,夏斌,周国庆,闫俊,王冉,钟立峰. 2007. 西藏泽当英云闪长

岩的地球化学和 Sr-Nd 同位素特征:特提斯洋内俯冲的新证据. 中国科学 D 辑:地球科学, 37(4):442~450.

韦栋梁. 2007. 雅鲁藏布缝合带泽当段蛇绿岩的地球化学特征及构造意义. 北京:中国科学院研究生院,博士学位论文.

西藏地质矿产局. 1993. 西藏自治区区域地质志. 北京:地质出版社. 1~318.

夏斌,郭令智,施央申. 1998. 西藏西南部蛇绿岩及其地体构造. 广州:中山大学出版社, 11~26.

徐向珍,杨经绥,郭国林,李金阳. 2011. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄岩的岩石学研究. 岩石学报, 27(11):3179~3196.

杨经绥,白文吉,方青松,颜秉刚,戎合,陈松永. 2004. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现超高压矿物柯石英. 地球科学, 29(6):651~660.

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岩中的异常矿物. 岩石学报, 24(7):1445~1452.

杨经绥,熊发挥,郭国林,刘飞,梁风华,陈松永,李兆丽,张隶文. 2011. 东波超镁铁岩体:西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄岩体. 岩石学报, 027(11):3207~3222.

姚玉鹏,田兴有. 1997. 中国蛇绿岩研究的现状及今后的研究方向. 地球科学进展, 2(2):34~137.

张旗,钱青,王焰,贾秀琴,韩松. 1999. 蛇绿岩的地球化学研究. 地质论评, 45(增刊):101~107.

张旗,周国庆. 2001. 中国蛇绿岩. 北京:科学出版社, 85~89.

张旗,周国庆,王焰. 2003. 中国蛇绿岩的分布、时代及其形成环境. 岩石学报, 019(01):1~8.

中国科学院青藏高原综合科学考察队. 1981. 西藏岩浆活动和变质作用. 北京:科学出版社.

周二斌,杨竹森,江万,侯增谦,郭福生,洪俊. 2011. 藏南罗布莎铬铁矿床铬尖晶石矿物学与矿床成因研究. 岩石学报, 27(7):2060~2072.

Aitchison J C, Ba D Z, Davis A M, Liu J, Luo H, Malpas J, McDermid p, Wu H, Ziabrev S, Zhou M F. 2000. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung-Zangbo suture (southern Tibet). Earth and Planetary Science Letters, 183: 231~244.

Arai S. 1994. Characterization of spinel peridotites by olivine spinel compositional relationships: Review and interpretation. Chemical Geology, 113: 191~204

Batanova V G, Sobolev A V. 2000. Compositional heterogeneity in subduction-related mantle peridotites, Troodos massif, Cyprus. Geology, 28:55~58.

Cameron W E, Nisbet E G, Dietrich V J. 1980. Petrographic dissimilarities between ophiolitic and ocean floor basalts; In: Panayiotou A (ed.). Ophiolites, Proceedings International Ophiolite Symposium, Cyprus, 1979. The Geological Survey of Cyprus, Nicosia, 182~193.

Choi S H, Shervais J W, Mukasa S B. 2008. Supra-subduction and abyssal mantle peridotites of the coast range ophiolite, California. Contributions to Mineralogy and Petrology, 156:551~576.

- Coleman R G. 1977. Ophiolite-ancient oceanic lithosphere. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Dick H J B. 1977. Partial melting in the Josephine peridotite-1, the effect of mineral composition and its consequence from geobarometry and geothermometry. *American Journal of Science*, 227: 801~832.
- Dick H J B, Bullen T. 1984. Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 54~76.
- Dick H J B, Natland J H. 1995. Late stage melt evolution and transport in the shallow mantle beneath the East Pacific Rise. In: Mevel C, Gillis K M, Allan J F and Meyer P S (eds). *Proceedings of the Ocean Drilling Program. Scientific Results*, 147: 103~134.
- İbrahim Uysal E, Yalçın Ersoy, Orhan Karsli, Yildirim Dilek, M Burhan Sadiklar, Chris J Ottley, Massimo Tiepolo, Thomas Meisel. 2012. Coexistence of abyssal and ultra-depleted SSZ type mantle peridotites in a Neo-Tethyan ophiolite in SW Turkey; Constraints from mineral composition, whole-rock geochemistry (major-trace-REE-PGE), and Re-Os isotope systematic. *Lithos*, 132~133, 50~69.
- Irvine T N. 1967. Chromian spinel as a petrogenetic indicator. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 4: 71~97.
- McDermid I, Aitchison J C, Davis A M, Harrison T M, Grove M. 2002. The Zedong terrane: A Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung-Zangbo suture zone, southeastern Tibet. *Chemical Geology*, 187: 267~277.
- McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth. *Chemical Geology*, 120: 223~254.
- Meschede M. 1986. A method of discriminating between different types of mid-ocean ridge basalts and continental tholeiites with the Nb-Zr-Y diagram. *Chemical Geology*, 56: 207~218.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxene. *Acta Mineralogica* 8 (4), 289~305.
- Parkinson I. J and Pearce J A. 1998. Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana forearc (ODP Leg 125): Evidence for mantle melting and melt-mantle interaction in a supra-subduction zone setting. *Journal of Petrology*, 39: 1577~1618.
- Pearce J A, Barker P F, Edwards S J, Parkinson I J, Leat P T. 2000. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139: 36~53.
- Qi Liang, Hu J, Gregoire D C. 2000. Determination of trace elements in granites by inductively coupled plasma mass spectrometry. *Talanta*, 51: 507~513.
- Sobolev A V, Batanova V G. 1995. Mantle lherzolites of the Troodos ophiolite complex, Cyprus: clinopyroxene geochemistry. *Petrology*, 3: 440~448.
- Sun S S, Nesbitt R W and Sharaskin A Y. 1979. Geochemical characteristics of mid-ocean ridge basalts. *Earth and Planetary Science Letters*, v. 44:119~138.
- Sun S S and McDonough W F. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. *Magmatism in the Ocean Basins*. In: Saunders A D and Norry M J (eds.). *Geological Society of London Special Publication*, 42: 313~435.
- Winchester J A and Floyd P A. 1977. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology*, 20(4): 325~343.
- Wood D A. 1980. The application of a Th-Hf-Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province. *Earth and Planetary Science Letters*, 50: 11~30.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Chen Songyong. 2009. Unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr-11 in Luobusa ophiolite of Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet. *Journal of Earth Science*, 20(2):284~302.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Guo Guolin, Robinson P T, Li Jinyang. 2011. Petrogenesis of the Kangjinla peridotite in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 42(4): 553~568.
- Yang Jingsui, Dobrzhinetskaya Larissa, Bai Wenji. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa Ophiolite, Tibet. *Geology*, 35(10):875~878.
- Zhou Meifu, Robinson P T, Malpas J. 2005. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet. *Journal of Petrology*, 46 (3):615~639.

The Origin and Evolution of Zedang Ophiolite in the Eastern Yarlung-Zangbo Suture Zone, Southern Tibet

LI Qiang¹⁾, XIA Bin¹⁾, HUANG Qiangtai³⁾, XIA Lianze²⁾, XIA Zhongyu¹⁾

1) School of Marine Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510006;

2) Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou, 510275;

3) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640

Abstract

In this paper, based on a study of mineral chemistry of mantle peridotites as well as petrochemistry and geochemistry of mantle peridotites, basalts, gabbros from Zedang ophiolite, combined with previous research of chronology and tectonic setting in study area, we discuss the origin and evolution of Zedang ophiolite. ① Based on a research of Fo values of olivine, En and Mg[#] values of clinopyroxene and orthopyroxene, contents of Al₂O₃ of clinopyroxene and orthopyroxene, Mg[#] and Cr[#] values of spinel, we found that Zedang mantle peridotites originated from depleted mantle source in a MOR (mid-ocean ridge) environment, then was modified by later-stage melts and fluids in a SSZ (Suprasubduction Zone) setting, and that the molten degree of harzburgites is higher than lherzolites. ② Based on a research of petrochemistry and geochemistry of mantle peridotites, we found the contents of most major elements and trace elements in mantle peridotites are lower than that in primitive mantle, the distribution patterns of trace-elements well coincide with abyssal peridotites, which proved again mantle peridotites originated from depleted mantle source in a MOR environment. ③ We found that gabbros from Zedang ophiolite had the feature of N-MORB (Normal type Mid-Ocean Ridge Basalts) and originated from a source region which was much more depleted than N-MORB, the gabbros also had the feature of IAT (Island Arc Tholeiites) and probably ascribe it modified in a SSZ setting. ④ There are two types basalts in Zedang ophiolite, N-MORB and E-MORB (Enriched type Mid-Ocean Ridge Basalts), because the source region might have the feature of inhomogeneity, which include enriched magma. N-MORB type basalts also have the feature of IAT, indicating them modified in a SSZ setting later, whereas E-MORB type basalts not have the feature of IAT. ⑤ Combined with previous research of chronology and tectonic setting in study area, Zedang ophiolite originated from depleted and inhomogeneous mantle source in a MOR environment in c. 170Ma, then was modified in a fore-arc setting in c. 150 Ma.

Key words: Zedang ophiolite; Yarlung Zangbo Suture Zone; MOR; SSZ