

来盛民, 杨经绥, 熊发挥, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带泽当地幔橄榄岩的矿物化学和铂族元素特征[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1515–1534.
Lai Shengmin, Yang Jingsui, Xiong Fahui, et al. Mineralogy and PGE features of Zedang peridotites in eastern Yarlung Zangbo suture, Tibet[J].
Geology in China, 2015, 42(5): 1515–1534(in Chinese with English abstract).

西藏雅鲁藏布江缝合带泽当地幔橄榄岩的矿物化学 和铂族元素特征

来盛民^{1,2} 杨经绥^{1,2} 熊发挥² 刘 钊¹ 田亚洲²
徐向珍² 周文达² 张 岚¹ 陈艳虹² 高 健³

(1. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2. 大陆构造与动力学国家重点实验室,
中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 昆明理工大学, 云南昆明 650504)

摘要:泽当蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带东段,由地幔橄榄岩、辉长辉绿岩、火山岩等组成。地幔橄榄岩主要为方辉橄榄岩和二辉橄榄岩,有少量的铬铁矿化方辉橄榄岩和透镜状纯橄岩。地幔橄榄岩中橄榄石的Fo值为89.6–91.8,属镁橄榄石。斜方辉石为顽火辉石,En端员组分变化于87.8–90.3。单斜辉石En组分变化于44.1–50.0,主要为顽透辉石和透辉石。二辉橄榄岩与方辉橄榄岩铬尖晶石的Cr[#]为17.0–31.8,为富铝型尖晶石。泽当地幔橄榄岩PGE总量为 16.67×10^{-9} – 32.59×10^{-9} ,与原始地幔相似。矿物化学特征显示泽当二辉橄榄岩属于深海型地幔橄榄岩,方辉橄榄岩属于弧前地幔橄榄岩。尖晶石Cr[#]、橄榄石Mg[#]的变化以及高Os含量(3.50×10^{-9} – 7.75×10^{-9})表明泽当地幔橄榄岩经历了部分熔融过程;正斜率的PGE配分模式以及较高的Pd/Ir值(1.09–3.94)表明泽当地幔橄榄岩受到了俯冲带环境下地幔交代作用的改造。泽当地幔橄榄岩矿物学特征与铂族元素地球化学特征显示其形成于MOR环境,后受到SSZ环境的改造。

关键词:雅鲁藏布江缝合带;泽当蛇绿岩;地幔橄榄岩;部分熔融;交代作用

中图分类号:P588.12⁵ 文献标志码:A 文章编号:1000–3657(2015)05–1515–20

Mineralogy and PGE features of Zedang peridotites in eastern Yarlung Zangbo suture, Tibet

LAI Sheng-min^{1,2}, YANG Jing-sui^{1,2}, XIONG Fa-hui², LIU Zhao¹, TIAN Ya-zhou²,
XU Xiang-zhen², ZHOU Wen-da², ZHANG Lan¹, CHEN Yan-hong², GAO Jian³

(1. School of Earth Science and Mineral 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,

收稿日期:2015–06–16; 改回日期:2015–07–16

基金项目:国家行业专项(SinoProbe–05–02)、国家自然科学基金重点项目NSFC(40930313)、国家自然科学基金创新群体项目NSFC(40921001)、中国地质调查局工作项目(1212011121263)联合资助。

作者简介:来盛民,男,1991年生,硕士生,矿物学、岩石学、矿床学专业;E-mail: laishengmin_cc@126.com.

通讯作者:杨经绥,男,1950年生,研究员,青藏高原和造山带的岩石大地构造研究;E-mail: yangjingsui@163.com.

China; 3. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, Yunnan, China)

Abstract: The Zedang mafic-ultramafic body crops out in the eastern Yarlung Zangbo suture zone of Tibet. This massif consists of mantle peridotite, gabbro, diabase and volcanic rocks. The mantle peridotites are mostly harzburgite, lherzolite and minor harzburgite with chromite. A dike-like bodies of dunite are also present. The Fo values of olivine vary in the range of 89.62–91.84 and all olivines belong to forsterite. The orthopyroxenes are enstatite, and the En values vary from 87.82 to 90.32. Clinopyroxenes are mainly endiopside and diopside, and the En values of clinopyroxene vary in the range of 44.12–50.02. The spinels have Cr[#] values from 17.00 to 93.59. The aluminum-rich spinels are of harzburgite and lherzolite. The PGE content of Zedang peridotites (16.67×10^{-9} – 32.59×10^{-9}) is similar to that of primary mantle. The mineral-chemistry indicates that the lherzolite is abyssal peridotite and the harzburgite is fore-arc peridotite. The Cr[#] of spinel, Mg[#] of olivine and high Os (3.50×10^{-9} – 7.75×10^{-9}) imply that Zedang peridotites were formed by partial-melting. The positive slope of PGE patterns and high Pd/Ir are consistent with the opinion that the Zedang peridotites were influenced by melts/fluids which were enriched with PPGE. The mineralogy and PGE geochemistry of the Zedang peridotites suggest that they formed originally at a mid-ocean ridge (MOR) and were later modified by suprasubduction zone (SSZ) melts.

Key words: Yarlung Zangbo suture zone; Zedang ophiolite; peridotite; partial melting; metasomatism

About the first author: LAI Sheng-min, male, born in 1991, master candidate, majors in mineralogy, petrology and metallogeny; E-mail: laishengmin_cc@126.com.

About the corresponding author: YANG Jing-sui, male, born in 1950, senior researcher, majors in petrotectonics of Tibet and orogenic belt, E-mail: yangjsui@163.com.

蛇绿岩是在特定构造环境下,经过多次部分熔融、岩浆分异等作用形成的一套超镁铁-长英质的岩石组合,这套岩石组合在时间和空间上紧密相关。同时,蛇绿岩是板块汇聚作用拼接到大陆边缘,就位于大陆造山带内的产物,代表着大洋岩石圈的残余^[1-2]。蛇绿岩的成因及演化过程一直是地质学界研究的重点。青藏高原南部的雅鲁藏布江缝合带形成于晚侏罗—白垩纪,是印度板块向欧亚板块俯冲的产物,代表着新特提斯洋岩石圈的残片^[3-4]。前人对雅鲁藏布江蛇绿岩带的形成演化有以下几种观点:(1)该带蛇绿岩形成于洋中脊,属 MORB 蛇绿岩,之后部分经俯冲改造并构造就位到现在的位置^[5-7];(2)形成于俯冲环境下的岛弧或大陆边缘海环境^[8-9];(3)形成于俯冲带之上,属 SSZ 型蛇绿岩^[10-11]。雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的成因具有多样性^[3,12-18]。泽当地幔橄榄岩位于雅鲁藏布江缝合带东段,同罗布莎超基性岩体一起作为东段出露面积最大的超基性岩体之一。泽当蛇绿岩壳层火山熔岩属亚碱性玄武岩,其 Sm-Nd 等时线年龄为 (175 ± 20) Ma, 平均初始 $\epsilon_{\text{Nd}}(t) = +7.2$, 来自强烈亏损的地幔源区,未受到大陆地壳物质的混染,表明泽当蛇绿岩形成于边缘洋盆环境,之后构造就位到如今的位置^[19-20]。然而,近年来部分学者认为新特提斯洋在中侏罗世时发育一条幔内型推

覆韧性剪切带,印度板块与欧亚板块的相向移动引发了洋内的俯冲消减,从而形成了泽当蛇绿岩,并认为泽当蛇绿岩应属 SSZ 型^[4,21]。构造研究表明晚侏罗世—白垩纪期间,在新特提斯洋的洋内俯冲和岛弧形成过程中,已形成的蛇绿岩体部分破碎并进入到岛弧的火山建造序列中,最终形成野外见到的透视镜体或薄层等产状^[22]。

前人对泽当蛇绿岩的研究多集中在地球化学的层面,而忽略了不同岩相的划分以及矿物学的研究。笔者在泽当金鲁实测剖面中发现,该蛇绿岩内部岩相变化明显,包括纯橄岩、方辉橄岩、二辉橄岩、铬铁矿化方辉橄岩等超基性岩,辉石岩以及辉长岩、辉绿岩、玄武岩等基性岩。不同岩相之间,乃至同一岩相不同位置处的矿物性质都呈现出不同的特征。因此,有必要将不同岩相的地球化学与矿物学研究结合起来,确定不同岩相之间的联系与区别,得出不同岩相的形成及演化过程,从而为泽当蛇绿岩的形成环境及演化过程提供制约。通过与雅鲁藏布江缝合带内的其他蛇绿岩对比,进一步探讨新特提斯洋的形成、演化过程。

1 地质背景

青藏高原南部的雅鲁藏布江缝合带东西延伸大

约2000 km,形成于晚侏罗世—白垩纪,是印度板块与欧亚板块碰撞形成的最年轻的缝合带^[3-4,23]。雅鲁藏布江缝合带西起印度河蛇绿岩带,东部与印度—缅甸蛇绿岩带相接^[24],可分为西、中、东三段,出露的主要岩体有西部的东波、普兰与巴尔岩体,中部日喀则岩体,东部罗布莎岩体和泽当岩体。雅鲁藏布江缝合带内不同蛇绿岩体之间具有成因上的多样性,且同一个岩体往往具有多阶段的演化特征^[3-4,12,15-17]。

泽当蛇绿岩位于泽当县城以西20 km,主体呈西北—东南向产出,延伸约20余 km,最宽处可达4 km,总出露面积45 km²左右。泽当蛇绿岩南侧为晚三叠统姐德秀组复理石相粉砂质板岩夹细砂岩,北侧为岛弧火成岩组合,均呈断层接触。岩体变形明显,但蛇绿岩基本的岩相仍可以被识别出来,整个泽当蛇绿岩的风化程度为轻到中等,蚀变类型主要为蛇纹石化。方辉橄榄岩是泽当蛇绿岩的主体,占泽当蛇绿岩总出露面积的70%以上。

2 岩石学特征

野外调查及实测剖面资料显示,泽当蛇绿岩最南端出露一条宽5~10 m的方辉橄榄岩条带,其蚀变程度较高。方辉橄榄岩条带以北出露上白垩统黑色粉砂岩、炭质板岩夹薄层硅质岩,炭质板岩以北即为泽当蛇绿岩主体部分。方辉橄榄岩风化面呈土黄色,新鲜面呈黑绿色,岩石整体新鲜,占泽当蛇绿岩总出露面积的70%以上。二辉橄榄岩位于整个超基性岩体

的北部,几乎未发生蚀变作用,方辉橄榄岩与二辉橄榄岩之间界线截然。辉石岩岩脉、辉绿岩脉穿插于方辉橄榄岩之内。纯橄岩风化程度高,岩石破碎,呈透镜体分布于方辉橄榄岩内部。

2.1 方辉橄榄岩

泽当方辉橄榄岩主要矿物有斜方辉石与橄榄石,主要副矿物为单斜辉石与尖晶石。岩石具有中—细粒结构,块状构造。

橄榄石含量80%~75%,呈半自型—他形粒状,粒度0.5~3.5 mm。橄榄石呈中粒残斑晶状,肯克带以及波状消光十分明显,显示构造应力变形的特点。

斜方辉石含量20%~25%,多呈半自型—他形粒状结构,粒度变化范围较大,最大可达5 mm。斜方辉石中—粗粒粒状残斑晶结构,受应力作用的影响十分明显,表现出矿物颗粒的破碎、出溶叶片弯曲以及波状消光。单斜辉石含量较少,仅在薄片部分区域内出现,总体含量不超过1%。单斜辉石主要以单独细粒晶产出于其他矿物颗粒之间,常出现一组平直的解理。尖晶石含量为4%,深棕色或褐色,细粒状结构,常与斜方辉石形成共生组合。

在方辉橄榄岩与二辉橄榄岩的边界附近出现一处铬铁矿化方辉橄榄岩。野外观察可见铬铁矿化橄榄岩内部具有铬尖晶石的定向或团块状分布,含量约占整个岩石的10%左右。岩石表面呈黄色—棕黄色。铬铁矿化方辉橄榄岩主要矿物为橄榄石、斜方辉石、单斜辉石与尖晶石。

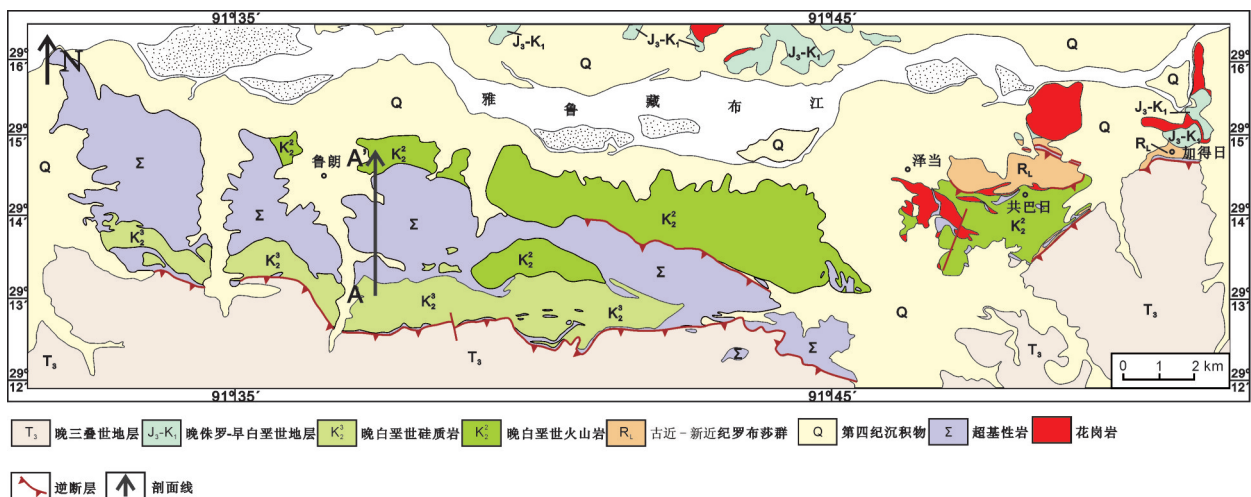


图1 泽当蛇绿岩地质简图,剖面线A-A'
Fig.1 Geological map of the Zedang ophiolite, profile A-A'

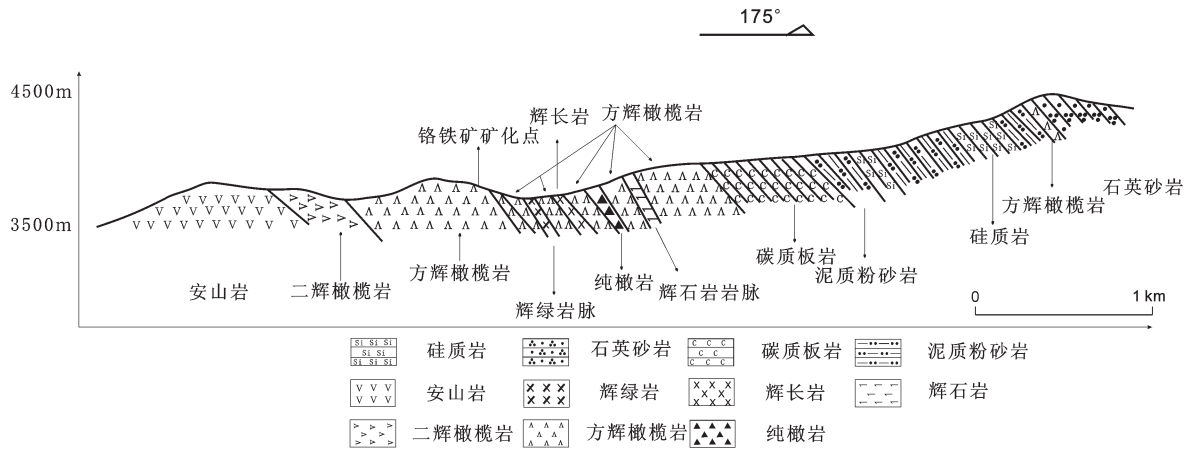


图2 泽当蛇绿岩实测剖面图
Fig. 2 Profile of the Zedang ophiolite

橄榄石含量45%~50%，整体为半自型—他形粒状，粒度0.5~2.5 mm。橄榄石为中粒结构、残斑晶结构。

斜方辉石含量40%左右，粒度变化范围0.5~2 mm，中—粗粒粒状残斑晶结构，整体粒度在3~4 mm，矿物颗粒破碎，变形明显，边部常被橄榄石交代，内部具有一定量的单斜辉石的出溶现象。

尖晶石10%左右，浅褐色—深褐色，粒状结构。粒度可达1~2 mm，存在一定的定向排列，常与斜方辉石、单斜辉石形成紧密接触，大颗粒尖晶石内常出现橄榄石或斜方辉石颗粒。

单斜辉石含量2%左右，仅在橄榄石、斜方辉石和尖晶石的边部出现，平均粒度0.05 mm，干涉色为II级蓝绿，主要通过电子探针对其进行观察和分析。

2.2 纯橄岩

方辉橄榄岩内部出现一处风化程度较高的纯橄岩透镜体。纯橄岩呈强—完全蛇纹石化，岩石破碎，呈土黄色，整个透镜体宽约10 m。纯橄岩中可见自形程度很高的铬尖晶石，黑色，粒度0.5~1 mm。橄榄石几乎全部蚀变为蛇纹石，内部裂隙十分发育，含量>92%，其余为副矿物，主要为蚀变的斜方辉石和抗风化能力较强的尖晶石。纯橄岩风化程度很高，后文只列出纯橄岩数据，不参与成因讨论。

2.3 二辉橄榄岩

方辉橄榄岩的北界与厚80~100 m的二辉橄榄岩相接触，是泽当蛇绿岩二辉橄榄岩部分的主体。二辉橄榄岩整体新鲜，蚀变作用只发生在岩石表面。

岩石风化面为褐黄色，新鲜面为深墨绿色，其表面常可见到辉石颗粒突出。二辉橄榄岩主要矿物为橄榄石、斜方辉石与单斜辉石，其中辉石颗粒粗大，粒径2~4 mm，呈定向排列。另外，少量二辉橄榄岩也以脉状或薄层状出露于剖面其他位置。

橄榄石含量45%~50%，整体为半自型—他形粒状，粒度0.5~3 mm，为中粒结构、残斑晶结构，部分位于斜方辉石颗粒内部，矿物颗粒光性不均一，受后期应力的改造。

斜方辉石含量40%~45%，粒度变化范围0.5~3 mm，为中—粗粒粒状残斑晶结构，整体粒度在3~4 mm，矿物颗粒破碎，变形明显，边部常被橄榄石交代。

单斜辉石含量3%~5%，中粒结构，干涉色II级蓝绿，部分颗粒解理缝十分平直，矿物颗粒边部为细粒橄榄石与斜方辉石。

尖晶石3%左右，浅褐色—褐色，粒状结构。常与斜方辉石、单斜辉石形成共生组合。

3 测试方法

在详细野外观测基础上，采集大量地幔橄榄岩样品，开展显微镜下详细岩相学和矿物学研究。矿物电子探针分析在中国地质科学院地质研究所进行，仪器为日本电子公司JXA-8100、能谱仪Inca Energy型电子探针，探针束流20 nA，加速电压15.0 kV，电子束斑2 μm。

铂族元素分析在国家地质实验测试中心进行。铂族元素的富集采用的是铈镍火试金2 碲共沉

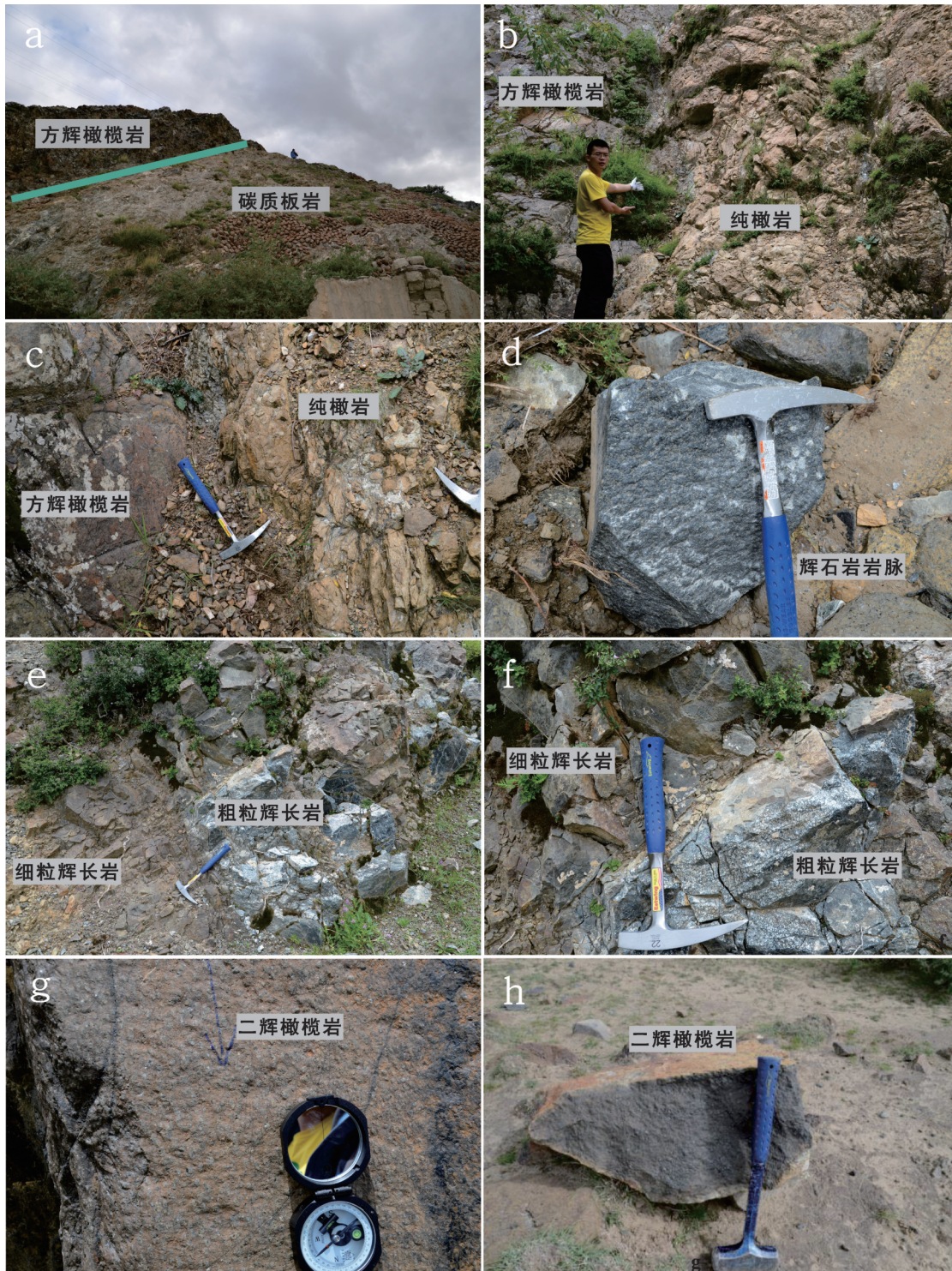


图3泽当蛇绿岩岩体野外照片

a—地幔橄岩岩界线; b—方辉橄岩中透镜状纯橄岩; c—纯橄岩与方辉橄岩接触界线; d—方辉橄岩中辉石岩岩脉;
e、f—两种类型辉长岩的接触界线; g—二辉橄岩岩表面突起的辉石; h—二辉橄岩

Fig. 3 Field occurrence of the Zedang ophiolite

a—Boundary of peridotite; b—Lenticular dunite in harzburgite; c—Boundary between dunite and harzburgite; d—Pyroxenite dike in harzburgite;
e, f—Boundary between two types of gabbro; g—Protuberant pyroxenes on the surface; h—Lherzolite

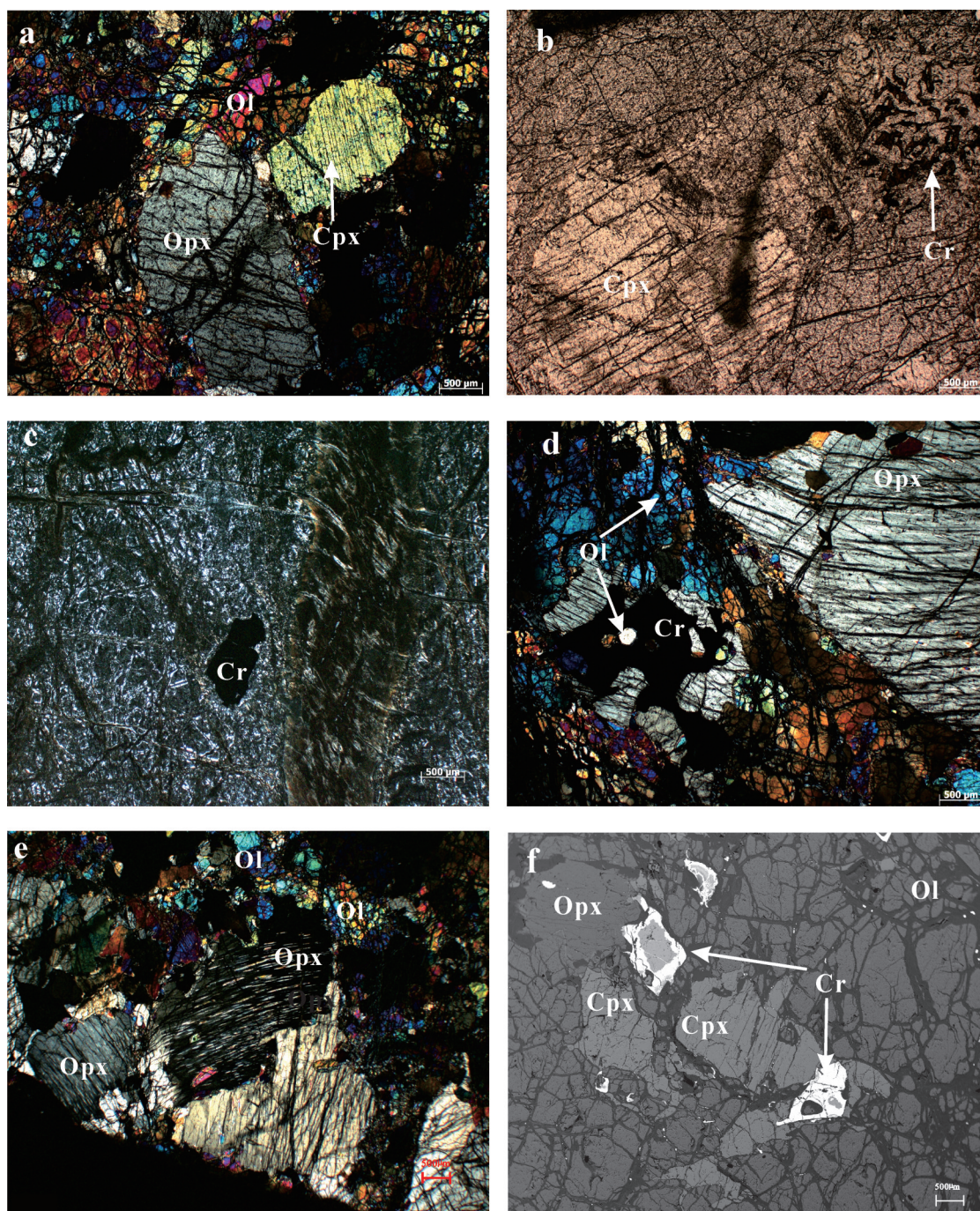


图4 泽当岩体地幔橄榄岩显微照片

Ol—橄榄石, Opx—斜方辉石, Cpx—单斜辉石, Cr—铬尖晶石

- a—二辉橄榄岩中粗粒他形粒状单斜辉石; b—二辉橄榄岩中铬尖晶石呈蠕虫状结构; c—纯橄岩中铬尖晶石; d—方辉橄榄岩中橄榄石部分熔融后呈弯曲边界, 细粒它形橄榄石分布于粗粒橄榄石颗粒之间; e—方辉橄榄岩中粗粒斜方辉石的塑性变形结构; f—方辉橄榄岩中铬尖晶石与单斜辉石联生

Fig. 4 Microphotographs of different rock types of the Zedang mantle peridotite and chromitite

Ol—Olivine, Opx—Orthopyroxene, Cpx—Clinopyroxene, Cr—Chromite spinel

- a—Coarse anhedral grain in lherzolite; b—Chromite spinel exhibiting vermiform texture in lherzolite; c—Chromite spinel in dunite; d—Olivine melt as curved boundary in harzburgite, fine anhedral olivine distributed in coarse olivine; e—Coarse orthopyroxene plastic deformation in harzburgite; f—Chromite spinel and clinopyroxene associated crystal; Ol—Olivine; Opx—Orthopyroxene; Cpx—Clinopyroxene; Cr—Chromite spinel

淀的方法。分析过程简述如下:10 g (200目)样品与2 g Ni_2O_3 , 1.25 g 硫磺粉, 15 g Na_2CO_3 , 20g $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 1g SiO_2 以及1 g 面粉混匀后, 转入粘土坩埚中, 然后加入适量的Os190稀释剂(美国橡树岭国家实验室出品)。将坩埚置于1200°C的试金炉中加热熔融1.5 h。而后将熔融体转入特制铁模具中, 冷却后取出铈镍扣, 将其粉碎后溶解于浓HCl中。加入碲共沉淀剂, 加热使其凝聚后转入Teflon密闭溶解器中, 加入1 mL王水, 于100°C加热溶解1 h。用 H_2O 稀释至10 mL后, 然后用ICP-MS (TJAPQ-EXCELL)直接测量。本实验的全流程空白为:Ru、Ir、Pd、Os小于0.3 ng/g, Pt、Rh小于0.06 ng/g。实验所测定的标准参考物(GPT24和GPT27)的分析结果与推荐值吻合较好。

4 矿物化学特征

4.1 橄榄石

本文共分析了纯橄岩、铬铁矿化方辉橄岩、方辉橄岩和二辉橄岩中46个橄榄石的化学成分, 其中纯橄岩内未找到新鲜橄榄石进行分析。表1列出了代表性样品的橄榄石电子探针分析结果。所有橄榄石的Fo值变化于89.6~91.8, 属镁橄榄石, 其中二辉橄岩橄榄石Fo值为89.7~91.1, NiO为0.26%~0.43%, MnO为0.10%~0.14%; 方辉橄岩橄榄石Fo值变化于89.6~91.0, NiO含量为0.34%~0.48%, MnO为0.09%~0.17%; 铬铁矿化方辉橄岩橄榄石Fo值变化于89.8~91.8, NiO含量为0.32%~0.51%, MnO为0.09%~0.15%。

从表1及图5可以看出, 不同产出关系下的橄榄石Fo值呈连续变化的特征。泽当地幔橄岩中橄榄石MnO的含量变化范围比较大, Fo值与NiO呈负相关性。方辉橄岩、二辉橄岩和铬铁矿化橄岩中自形橄榄石NiO含量比较接近, 平均值为0.40%。

4.2 斜方辉石

斜方辉石的电子探针分析结果见表2, 斜方辉石的En端员组分变化于87.8~90.3, 主要为顽火辉石。二辉橄岩斜方辉石矿物化学组分差别不大, 其 $\text{Mg}^\#$ 值为89.5~90.8, Al_2O_3 含量为2.69%~3.55%, Cr_2O_3 为0.40%~0.70%, CaO为0.56%~1.25%; 方辉橄岩中斜方辉石的 $\text{Mg}^\#$ 为89.7~91.0, Al_2O_3 为2.04%~5.08%, Cr_2O_3 为0.35%~0.99%, NiO为0.05%~

0.13%, CaO为0.28%~1.70%; 铬铁矿化方辉橄岩中斜方辉石的 $\text{Mg}^\#$ 值为89.9~90.1, Al_2O_3 在3.64%~3.72%, Cr_2O_3 为0.74%~0.75%, NiO为0.09%~0.12%, CaO为0.63%~0.89%。

泽当地幔橄岩中斜方辉石 $\text{Mg}^\#$ 值变化不大在89~91之间(图6), 与 Al_2O_3 呈现不明显的负相关线性变化规律(图6-a)。从二辉橄岩→方辉橄岩→纯橄岩, Cr_2O_3 和 Al_2O_3 呈递减的趋势(图6-b)。

4.3 单斜辉石

单斜辉石在三种地幔橄岩岩相中含量较少, 但其变化规律比较明显, 分析数据见表3, En组分变化于44.1~50.0, 主要为顽透辉石和透辉石, 在不同岩相中具有不同特征: 单斜辉石含量最高的是二辉橄岩, 呈粗粒状(200~800 μm)产出, $\text{Mg}^\#$ 值为91.3~93.8, Al_2O_3 含量在2.90%~4.10%, Cr_2O_3 为0.05%~1.25%, NiO为0.01%~0.08%, CaO为23.11%~24.85%; 在方辉橄岩中单斜石的 $\text{Mg}^\#$ 为91.1~93.5, Al_2O_3 为1.85%~5.30%, Cr_2O_3 为0.25%~1.44%, NiO为0%~0.12%, CaO为22.82%~25.07%; 铬铁矿化方辉橄岩中存在一定数量的单斜辉石, 其 $\text{Mg}^\#$ 值为92.0~94.1, Al_2O_3 在1.67%~4.19%, Cr_2O_3 为0.36%~1.29%, NiO为0.01%~0.08%, CaO为23.05%~26.22%; 与斜方辉石不同, 单斜辉石在泽当三种地幔橄岩中 $\text{Mg}^\#$ 值变化较大, 在88.4~93.8(图7), 并且从二辉橄岩→方辉橄岩→铬铁矿化橄岩具有增加的趋势(图7-a,c)。随 $\text{Mg}^\#$ 的增加, Cr_2O_3 和 Al_2O_3 呈递减的趋势(图7-b), CaO含量呈递增的趋势(图7-d)。

4.4 铬尖晶石

泽当地幔橄岩中铬尖晶石多为棕色至棕黄色, 不均匀零星分布, 本文上述研究表明铬尖晶石的晶形和产出在不同的岩相中具有明显的变化规律。由于三种岩相中铬尖晶石的成分差别较大, 铬尖晶石探针数据见表4。

本文分析了泽当地幔橄岩的41个铬尖晶石数据。铬尖晶石的 Cr_2O_3 含量为15.55%~60.66%, 平均值为29.72%, Al_2O_3 含量为2.79%~50.91%, 平均值为36.30%。铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 为17.0~93.6, 其中二辉橄岩中 $\text{Cr}^\#$ 最低, 变化在18.8~34.1, 平均值为25.3, 为富铝型尖晶石, 其次为方辉橄岩中的铬尖晶石, $\text{Cr}^\#$ 变化在17.0~26.6, 平均值为22.2, 同样为富铝

表1 泽当地幔橄榄岩中橄榄石的电子探针分析结果(%)

Table 1 Representative microprobe analyses of olivine from the Zedang mantle peridotite (%)

岩性	样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]
方辉橄榄岩	7-3-1-7	40.73	0.01	0.00	0.06	8.89	0.12	48.78	0.02	0.01	0.00	99.08	90.73
	7-3-1-8	41.21	0.01	0.00	0.01	9.35	0.14	49.56	0.02	0.00	0.02	100.75	90.43
	7-3-2-7	40.62	0.00	0.00	0.01	9.43	0.14	49.48	0.01	0.00	0.00	100.12	90.34
	7-3-3-3	40.82	0.00	0.01	0.00	9.20	0.13	48.75	0.02	0.07	0.02	99.43	90.43
	7-3-4-6	40.59	0.00	0.01	0.13	8.72	0.16	49.59	0.02	0.00	0.01	99.65	91.02
	7-3-4-3	41.72	0.00	0.02	0.01	9.37	0.13	49.79	0.02	0.02	0.02	101.52	90.45
	7-3-5-3	40.70	0.00	0.00	0.00	9.92	0.17	48.92	0.02	0.00	0.01	100.07	89.78
	7-3-6-8	41.26	0.03	0.04	0.00	9.35	0.12	49.45	0.02	0.00	0.00	100.66	90.41
	8-1-1-9	40.84	0.00	0.00	0.00	9.88	0.15	48.33	0.03	0.00	0.00	99.62	89.71
	8-1-2-7	40.72	0.00	0.00	0.01	9.99	0.16	48.35	0.00	0.00	0.00	99.57	89.62
	8-1-2-9	40.61	0.00	0.00	0.03	9.39	0.15	48.75	0.03	0.01	0.01	99.32	90.25
	8-1-3-4	40.50	0.00	0.01	0.00	9.66	0.10	48.35	0.00	0.00	0.01	99.02	89.92
	8-1-3-5	41.07	0.00	0.05	0.00	9.67	0.13	48.66	0.03	0.00	0.00	99.96	89.97
	8-1-3-9	40.85	0.01	0.00	0.14	9.65	0.11	49.25	0.02	0.00	0.01	100.49	90.10
	8-1-3-11	40.02	0.00	0.00	0.00	9.79	0.15	48.58	0.00	0.00	0.00	98.88	89.84
8-1-3-12	40.37	0.00	0.00	0.05	10.02	0.11	48.47	0.00	0.00	0.01	99.37	89.61	
8-1-3-13	40.96	0.00	0.00	0.10	9.67	0.17	49.06	0.00	0.00	0.01	100.37	90.04	
铬铁矿化方辉 橄榄岩	11-2-1-4	40.99	0.00	0.00	0.02	9.75	0.13	48.89	0.00	0.01	0.00	100.19	89.94
	11-2-3-6	40.78	0.00	0.00	0.03	9.82	0.16	48.87	0.02	0.00	0.00	100.06	89.87
	11-2-3-7	40.65	0.00	0.00	0.01	9.46	0.09	49.14	0.01	0.02	0.00	99.73	90.25
	13-2-1-6	41.17	0.02	0.00	0.04	7.90	0.09	49.89	0.08	0.00	0.02	99.72	91.84
	13-2-1-9	40.82	0.01	0.00	0.00	9.17	0.09	49.39	0.05	0.00	0.01	99.88	90.57
	13-2-2-3	40.81	0.00	0.00	0.00	8.54	0.14	49.53	0.05	0.00	0.00	99.43	91.18
	13-2-2-6	41.22	0.01	0.03	0.09	8.49	0.10	49.71	0.05	0.00	0.00	100.05	91.26
	13-2-2-7	41.08	0.01	0.00	0.00	9.38	0.14	49.40	0.07	0.00	0.01	100.45	90.38
	13-2-2-8	40.91	0.00	0.01	0.02	9.66	0.15	49.20	0.06	0.00	0.01	100.40	90.08
	13-2-3-3	40.78	0.01	0.02	0.01	8.64	0.15	49.12	0.05	0.00	0.01	99.19	91.02
	13-2-3-4	41.06	0.00	0.01	0.10	9.66	0.15	48.53	0.08	0.00	0.02	99.99	89.95
	13-2-3-2	40.91	0.00	0.01	0.03	8.41	0.11	49.96	0.03	0.00	0.01	99.78	91.37
	13-2-3-3	41.02	0.03	0.00	0.02	9.86	0.13	48.88	0.05	0.00	0.01	100.37	89.83
	13-2-3-4	40.93	0.00	0.00	0.01	8.73	0.14	49.07	0.05	0.00	0.00	99.26	90.93
	13-2-3-5	40.84	0.00	0.00	0.01	9.50	0.12	49.49	0.06	0.00	0.00	100.39	90.28
13-1-2-7	40.73	0.00	0.00	0.02	9.58	0.14	48.68	0.08	0.00	0.00	99.57	90.06	
13-1-2-8	40.78	0.00	0.03	0.01	9.59	0.13	48.83	0.05	0.01	0.00	99.80	90.08	
13-1-2-9	41.11	0.02	0.00	0.02	9.90	0.13	48.94	0.06	0.00	0.01	100.59	89.81	
13-1-3-3	41.18	0.01	0.03	0.10	8.14	0.11	49.77	0.01	0.00	0.02	99.78	91.60	
13-1-3-4	40.99	0.02	0.00	0.37	8.61	0.14	49.28	0.04	0.00	0.00	99.82	91.07	
二辉橄榄岩	2-2-3	39.79	0.00	0.00	0.00	8.84	0.14	50.46	0.02	0.00	0.00	99.51	91.05
	2-2-7	40.46	0.00	0.01	0.00	8.69	0.12	49.31	0.01	0.04	0.04	99.03	91.00
	2-2-11	40.54	0.01	0.00	0.00	9.16	0.14	49.01	0.03	0.05	0.02	99.36	90.52
	2-2-16	40.90	0.00	0.01	0.00	9.95	0.12	48.58	0.01	0.02	0.00	99.90	89.70
	12-4-5	40.68	0.00	0.02	0.00	9.33	0.11	49.44	0.00	0.00	0.01	99.93	90.43
	12-4-6	40.63	0.00	0.01	0.00	9.04	0.12	49.23	0.00	0.00	0.00	99.45	90.66
	24-1-3	40.71	0.01	0.00	0.05	9.34	0.10	48.92	0.02	0.00	0.01	99.49	90.33

型尖晶石。与方辉橄榄岩相比,铬铁矿化方辉橄榄岩中尖晶石的Cr[#]稍高,变化在25.2~31.8,仍为富铝型尖晶石。而纯橄岩中的铬尖晶石,Cr[#]变化在73.2~93.6,平均值为81.7,属于富铬型尖晶石;铬尖晶石中Mg[#]值在不同岩相也呈明显不同的特征,其中二辉橄榄岩的Mg[#]为64.6~69.6,平均67.3。方辉橄榄岩Mg[#]为66.7~72.3,平均69.2。纯橄岩Mg[#]最低值为21.4~52.5,平均41.4。

从地幔橄榄岩尖晶石的成分图解可以看出(图8-a),与世界上大多数阿尔卑斯型超镁铁岩相似,

随着部分熔融程度的增加,尖晶石的Cr[#]值逐渐增加,而Mg[#]值逐渐减少,即Cr[#]值与Mg[#]值呈负相关关系^[30]。不同岩相间TiO₂含量基本一致,具相同的变化范围(图8-b)。NiO含量在二辉橄榄岩稍高于方辉橄榄与纯橄岩中的含量,呈不明显减少的趋势(图8-c)。尖晶石的Cr、Al呈明显的负相关线性关系(图8-d)。尖晶石的形成受地幔橄榄岩熔融程度、环境压力的控制^[25],因此尖晶石的化学组成可以指示其寄主岩石——地幔橄榄岩的成因特点,利用尖晶石的Cr[#]和橄榄石的Mg[#]的关系可以推测其寄

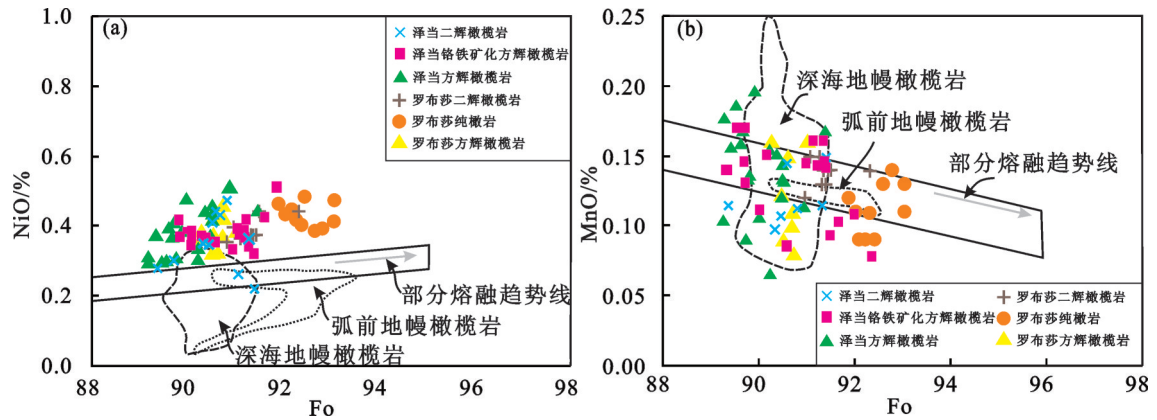


图5 泽当蛇绿岩不同岩相橄榄石的成分图解

深海地幔橄辉岩、弧前地幔橄辉岩数据来源于文献[25-26];罗布莎数据来源于文献[27-28]

Fig.5 Composition of olivine of different lithologies in the Zedang ophiolite

ABP—Abyssal peridotite and FAP—fore—arc peridotite from reference [25-26]; Luobusha peridotite data from references [27] and [28]

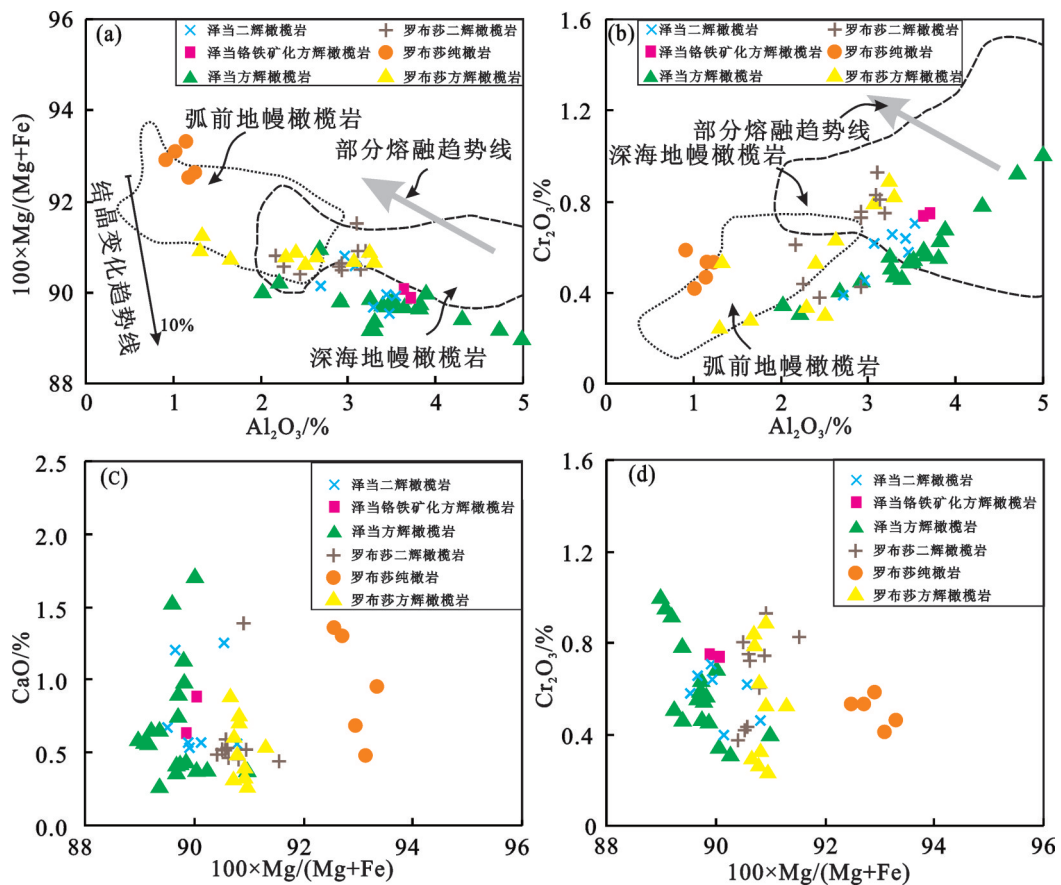


图6 泽当地幔橄辉岩中斜方辉石的成分图解

部分熔融趋势线来源于文献[25];深海地幔橄辉岩、弧前地幔橄辉岩数据来源于文献[26];罗布莎数据来源于文献[27-28];结晶变化趋势线来源于文献[29]

Fig. 6 Composition of orthopyroxene of different lithologies in the Zedang area

Partial melting trends from reference [25]; abyssal peridotite and fore—arc peridotite from reference [26]; Luobusha peridotite data from references [27] and [28]; fractionation trends from reference [29]

表2 泽当地幔橄辉岩中斜方辉石的电子探针分析结果(%)
Table 2 Representative microprobe analyses of orthopyroxene from the Zedang mantle peridotite (%)

岩性	样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	En	Fs	Wo	Mg#
方辉橄辉岩	7-3-1-6	55.86	2.04	0.01	0.35	6.52	0.17	33.12	0.39	0.01	0.00	98.53	89.38	9.88	0.75	90.05
	7-3-2-6	55.96	3.26	0.00	0.57	6.74	0.11	33.10	0.43	0.00	0.00	100.23	89.00	10.17	0.84	89.75
	7-3-3-2	55.55	3.68	0.01	0.57	6.55	0.11	32.38	1.14	0.01	0.00	100.10	87.82	9.96	2.23	89.82
	7-3-4-1	55.52	3.31	0.03	0.47	7.04	0.15	33.24	0.28	0.00	0.01	100.14	88.91	10.56	0.53	89.38
	7-3-4-2	57.84	2.68	0.02	0.41	6.19	0.17	35.00	0.39	0.02	0.00	102.82	90.32	8.95	0.72	90.98
	7-3-4-4	56.43	2.24	0.00	0.32	6.44	0.13	33.45	0.38	0.00	0.00	99.49	89.59	9.67	0.74	90.25
	7-3-5-8	55.49	3.84	0.05	0.64	6.71	0.11	32.82	0.76	0.00	0.00	100.50	88.40	10.13	1.47	89.72
	7-3-6-2	54.40	4.73	0.01	0.92	6.98	0.16	32.27	0.58	0.00	0.00	100.10	88.17	10.70	1.13	89.18
	7-3-6-4	54.31	5.08	0.00	0.95	7.02	0.16	32.08	0.58	0.01	0.01	100.32	88.05	10.81	1.14	89.07
	7-3-6-6	53.92	4.99	0.05	0.99	7.06	0.14	32.03	0.60	0.00	0.00	99.89	87.94	10.88	1.18	88.99
	8-1-1-1	55.53	3.49	0.07	0.54	6.68	0.13	32.72	0.91	0.00	0.00	100.17	88.14	10.10	1.76	89.72
	8-1-1-7	54.82	3.90	0.07	0.69	6.30	0.13	31.83	1.70	0.00	0.00	99.54	87.00	9.66	3.33	90.00
	8-1-1-11	55.65	3.40	0.06	0.47	6.72	0.15	32.93	0.43	0.00	0.02	99.91	88.99	10.18	0.83	89.74
	8-2-1-1	55.30	3.53	0.05	0.55	6.57	0.14	31.79	1.53	0.02	0.00	99.59	86.92	10.07	3.01	89.61
	8-1-3-1	54.79	4.32	0.02	0.79	6.78	0.16	32.01	0.66	0.01	0.00	99.67	88.20	10.48	1.31	89.38
	8-1-3-10	55.40	3.28	0.03	0.52	7.10	0.15	33.00	0.66	0.01	0.02	100.22	88.09	10.64	1.27	89.23
	11-2-1-6	54.90	3.52	0.01	0.54	6.56	0.14	32.48	0.99	0.01	0.02	99.23	88.10	9.98	1.93	89.83
	11-2-1-7	55.31	3.82	0.03	0.56	6.66	0.18	32.48	0.36	0.00	0.01	99.48	89.05	10.25	0.70	89.68
11-2-2-6	55.31	3.65	0.07	0.60	6.59	0.14	32.21	0.76	0.00	0.01	99.43	88.37	10.14	1.49	89.71	
11-2-3-3	55.62	2.94	0.05	0.46	6.74	0.14	33.53	0.45	0.01	0.00	100.06	89.09	10.05	0.86	89.86	
铬铁矿化方辉	13-1-1-1	55.34	3.72	0.08	0.75	6.63	0.09	33.02	0.64	0.02	0.01	100.39	88.77	10.00	1.23	89.87
橄辉岩	13-1-1-2	55.03	3.64	0.02	0.74	6.50	0.17	32.99	0.89	0.00	0.00	100.07	88.52	9.78	1.71	90.05
	2-2-2	55.90	3.29	0.04	0.66	6.60	0.09	32.11	1.20	0.03	0.01	100.00	87.55	10.10	2.35	89.66
	2-2-6	55.71	3.44	0.06	0.64	6.45	0.12	32.26	0.53	0.01	0.00	99.29	88.97	9.97	1.05	89.92
	2-2-10	55.49	3.55	0.02	0.70	6.46	0.10	32.27	0.57	0.01	0.01	99.28	88.89	9.98	1.13	89.90
	2-2-13	55.91	3.47	0.02	0.58	6.78	0.12	32.48	0.67	0.00	0.03	100.14	88.34	10.34	1.31	89.52
	12-4-7	55.46	2.96	0.00	0.46	6.03	0.17	33.37	0.56	0.02	0.00	99.13	89.81	9.10	1.09	90.80
	12-4-8	55.36	2.69	0.01	0.40	6.55	0.11	33.60	0.57	0.01	0.00	99.36	89.16	9.75	1.08	90.14
	24-1-2	54.90	3.08	0.06	0.62	6.15	0.16	33.06	1.25	0.04	0.00	99.43	88.38	9.22	2.40	90.56

表3 泽当地幔橄榄岩中单斜辉石的电子探针分析结果(%)

Table 3 Representative microprobe analyses of clinopyroxene from the Zedang mantle peridotite (%)

岩性	样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	En	Fs	Wo	Mg [#]
方辉橄榄岩	7-3-1-1	51.35	3.87	0.10	0.82	2.42	0.10	16.13	24.59	0.17	0.01	99.59	45.87	3.86	50.27	92.24
	7-3-1-2	52.78	2.46	0.10	0.82	2.69	0.06	16.61	25.07	0.12	0.00	100.78	45.95	4.18	49.86	91.66
	7-3-2-1	51.95	3.69	0.09	0.82	2.44	0.04	16.25	24.78	0.14	0.00	100.29	45.87	3.86	50.27	92.23
	7-3-3-1	51.93	3.45	0.08	1.03	2.08	0.08	16.37	24.69	0.19	0.00	99.91	46.40	3.31	50.29	93.34
	7-3-3-4	51.20	4.44	0.16	1.21	2.38	0.09	15.75	24.72	0.17	0.00	100.16	45.19	3.82	50.98	92.20
	7-3-3-5	53.30	2.32	0.08	0.36	2.34	0.09	16.91	24.76	0.09	0.01	100.29	46.95	3.64	49.41	92.80
	7-3-4-2	52.55	3.58	0.12	0.76	2.29	0.08	16.94	22.82	0.19	0.00	99.39	48.92	3.71	47.36	92.94
	7-3-5-1	51.75	3.89	0.10	0.92	2.31	0.08	16.12	25.06	0.15	0.01	100.41	45.50	3.66	50.84	92.55
	7-3-5-2	52.10	2.88	0.14	0.53	2.40	0.08	16.72	24.86	0.14	0.00	99.85	46.52	3.74	49.73	92.55
	7-3-5-6	53.41	1.85	0.06	0.25	2.58	0.06	17.16	24.89	0.10	0.00	100.35	47.02	3.97	49.01	92.21
	7-3-5-7	50.75	5.04	0.13	1.23	2.69	0.08	16.26	23.74	0.30	0.01	100.28	46.69	4.33	48.98	91.52
	7-3-6-1	50.13	5.30	0.16	1.40	2.68	0.11	15.55	24.89	0.18	0.00	100.41	44.49	4.30	51.20	91.18
	7-3-6-3	50.53	5.01	0.10	1.44	2.50	0.06	15.58	24.42	0.18	0.01	99.94	45.11	4.07	50.83	91.73
	7-3-6-5	50.68	5.23	0.17	1.24	2.61	0.07	15.57	24.55	0.20	0.00	100.36	44.90	4.23	50.87	91.39
	7-3-6-7	51.72	3.76	0.07	0.96	2.50	0.09	16.01	24.92	0.16	0.00	100.21	45.32	3.97	50.70	91.94
	8-1-1-3	52.38	3.20	0.12	0.60	2.37	0.05	16.53	24.11	0.12	0.00	99.58	46.97	3.78	49.25	92.56
	8-1-1-6	51.59	3.95	0.14	0.96	2.54	0.08	15.98	24.68	0.16	0.00	100.10	45.47	4.05	50.48	91.83
	8-1-1-8	51.24	4.54	0.18	1.03	2.43	0.09	15.72	25.00	0.12	0.01	100.44	44.86	3.89	51.26	92.03
	8-1-1-10	52.09	3.58	0.13	0.59	2.67	0.09	16.78	23.91	0.12	0.00	100.06	47.32	4.22	48.46	91.82
	8-1-2-2	51.54	3.93	0.13	0.77	2.44	0.06	16.03	24.79	0.17	0.01	99.92	45.52	3.89	50.59	92.13
	8-1-2-3	52.72	2.79	0.10	0.52	2.37	0.06	17.13	24.21	0.14	0.03	100.14	47.76	3.71	48.53	92.79
	8-1-2-8	51.72	4.01	0.14	0.84	2.45	0.06	16.18	24.33	0.17	0.00	99.94	46.17	3.92	49.91	92.18
	8-1-3-2	52.01	4.60	0.17	1.12	2.05	0.07	16.11	23.24	0.17	0.02	99.58	47.43	3.39	49.18	93.33
	8-1-3-3	51.45	3.91	0.08	0.79	2.55	0.08	16.41	24.62	0.17	0.00	100.05	46.18	4.02	49.80	91.98
8-1-3-6	51.22	4.63	0.15	1.12	2.49	0.04	15.44	25.07	0.17	0.00	100.42	44.29	4.01	51.70	91.69	
8-1-3-14	51.45	3.98	0.12	0.86	2.73	0.08	16.57	24.27	0.13	0.01	100.22	46.62	4.31	49.07	91.55	
11-2-1-1	51.24	4.06	0.09	1.02	2.33	0.09	16.01	24.93	0.14	0.00	99.92	45.43	3.72	50.86	92.44	
11-2-1-5	51.64	3.90	0.18	0.85	2.01	0.08	16.17	25.05	0.13	0.00	100.04	45.81	3.20	50.99	93.47	
11-2-2-4	52.80	2.23	0.02	0.40	2.33	0.09	17.12	24.56	0.08	0.00	99.68	47.45	3.63	48.92	92.90	
11-2-2-5	53.23	2.02	0.10	0.37	2.27	0.10	17.25	24.83	0.07	0.00	100.32	47.42	3.50	49.08	93.13	
11-2-3-4	51.83	3.29	0.07	0.61	2.75	0.13	17.29	23.31	0.13	0.00	99.49	48.59	4.34	47.07	91.81	
11-2-3-5	52.40	2.74	0.10	0.50	2.67	0.06	16.86	24.54	0.14	0.00	100.13	46.84	4.16	49.00	91.84	
铬铁矿化方辉橄榄岩	13-2-1-3	52.74	2.92	0.15	0.83	2.04	0.05	16.39	25.36	0.27	0.00	100.78	45.84	3.20	50.96	93.47
	13-2-1-4	52.84	2.55	0.13	0.71	1.85	0.07	16.61	25.64	0.26	0.00	100.66	46.04	2.88	51.08	94.12
	13-2-1-5	52.44	2.93	0.14	0.70	2.16	0.10	16.40	25.26	0.29	0.00	100.46	45.86	3.39	50.75	93.12
	13-2-1-1	53.42	1.67	0.08	0.56	1.88	0.05	16.59	25.37	0.33	0.00	99.98	46.24	2.94	50.82	94.02
	13-2-2-2	50.97	4.11	0.13	1.09	2.41	0.04	15.73	25.56	0.31	0.02	100.41	44.37	3.81	51.82	92.09
	13-2-2-5	51.90	3.41	0.16	0.93	2.38	0.04	15.94	25.48	0.26	0.00	100.57	44.80	3.75	51.45	92.27
	13-2-3-2	51.93	3.19	0.11	0.99	2.28	0.05	15.91	25.34	0.30	0.02	100.18	44.94	3.62	51.44	92.55
	13-2-4-1	51.89	2.98	0.20	0.94	2.20	0.05	15.85	26.22	0.14	0.00	100.53	44.12	3.43	52.45	92.78
	13-2-4-2	53.17	2.18	0.11	0.36	2.12	0.08	16.64	25.68	0.23	0.00	100.64	45.85	3.28	50.87	93.32
	13-1-1-3	51.54	3.87	0.16	1.29	2.40	0.05	15.79	24.64	0.30	0.00	100.10	45.31	3.87	50.82	92.13
	13-1-1-4	52.55	3.57	0.17	0.94	2.33	0.08	16.10	24.67	0.29	0.01	100.78	45.82	3.72	50.46	92.49
	13-1-1-6	52.71	3.32	0.12	1.15	2.19	0.09	16.38	23.75	0.33	0.00	100.09	47.23	3.55	49.23	93.02
	13-1-1-7	52.40	3.60	0.12	1.07	2.50	0.08	16.12	24.41	0.36	0.00	100.72	45.96	3.99	50.04	92.01
	13-1-1-8	52.78	4.19	0.08	1.23	2.11	0.08	16.34	23.13	0.35	0.00	100.31	47.85	3.47	48.69	93.25
	13-1-1-9	52.09	3.95	0.10	1.13	2.09	0.08	16.50	23.05	0.44	0.01	99.46	48.19	3.42	48.38	93.37
	13-1-1-1	51.93	3.89	0.12	1.16	2.38	0.10	15.89	24.36	0.35	0.01	100.26	45.75	3.85	50.40	92.24
	13-1-1-1	53.24	2.17	0.09	0.57	2.42	0.06	16.89	24.15	0.23	0.00	99.85	47.43	3.81	48.76	92.57
	13-1-4-3	53.05	2.58	0.14	0.55	2.18	0.03	16.16	25.21	0.20	0.00	100.16	45.52	3.45	51.03	92.96
	13-1-4-4	51.48	3.84	0.12	1.06	2.36	0.07	15.47	24.68	0.36	0.01	99.52	44.79	3.83	51.38	92.12
	二辉橄榄岩	2-2-1	51.68	4.10	0.09	0.99	2.91	0.09	17.13	23.11	0.12	0.01	100.23	48.42	4.61	46.97
2-2-5		52.40	4.20	0.09	1.04	2.53	0.08	15.67	24.24	0.14	0.01	100.40	45.41	4.11	50.49	91.70
2-2-9		51.80	2.90	0.11	0.70	2.27	0.09	17.00	24.22	0.09	0.00	99.25	47.66	3.56	48.78	93.05
2-2-15		52.46	4.01	0.05	1.15	2.30	0.07	15.88	23.30	0.11	0.00	99.31	46.83	3.80	49.37	92.50
12-4-3		51.16	3.92	0.15	0.92	2.25	0.07	16.26	24.27	0.13	0.00	99.11	46.51	3.61	49.88	92.80
12-4-4		51.53	3.87	0.06	0.97	2.49	0.08	16.41	24.12	0.15	0.00	99.74	46.70	3.97	49.33	92.16
24-1-1	50.29	3.66	0.18	1.25	1.99	0.05	17.04	24.85	0.24	0.00	99.56	47.31	3.10	49.58	93.84	

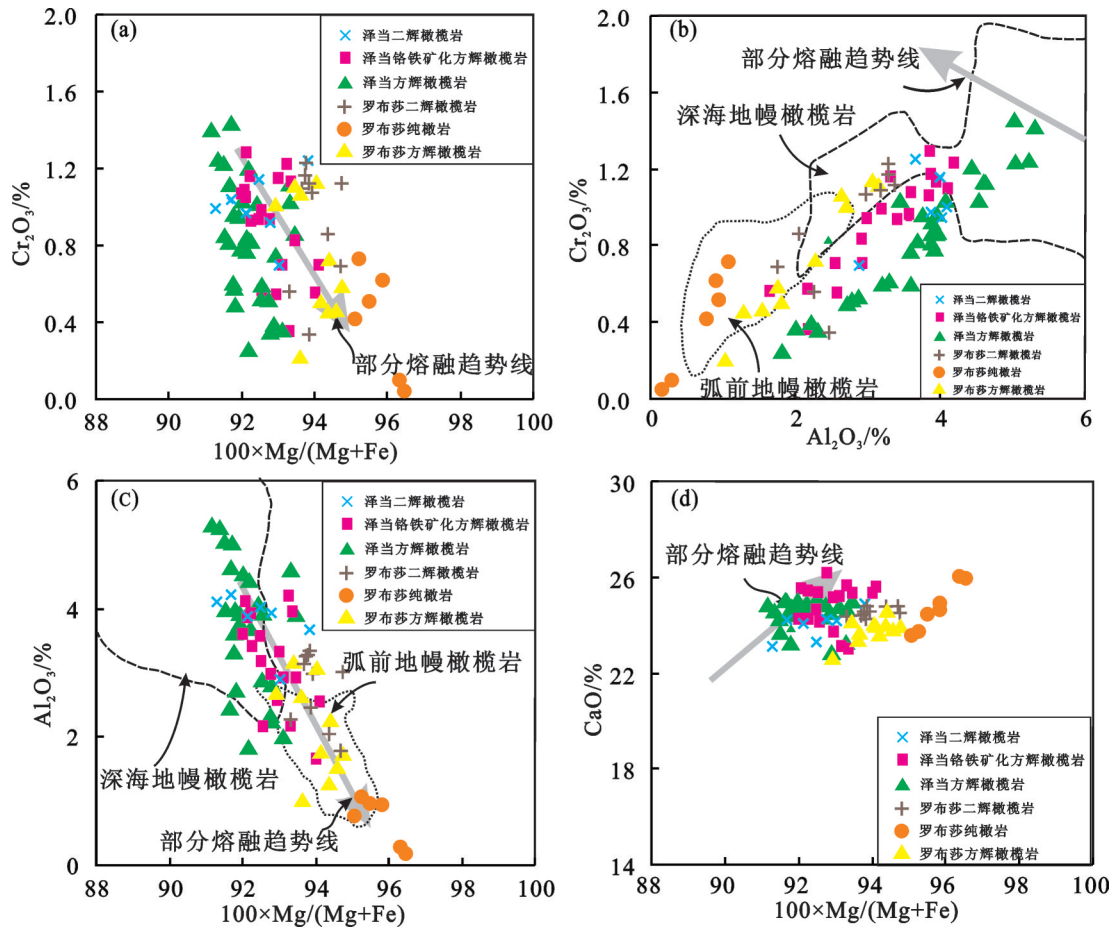


图7 西藏泽当地幔橄辉岩单斜辉石的成分图解

部分熔融趋势线来源于文献[25];深海地幔橄辉岩、弧前地幔橄辉岩数据来源于文献[26];罗布莎数据来源于文献[27-28]

Fig.7 Composition of clinopyroxene of different lithologies in the Zedang area

Partial melting trends from reference [25]; abyssal peridotite and fore-arc peridotite data from reference [26]; Luobusha peridotite data from references [27] and [28]

主岩石的部分熔融程度、形成压力及构造环境^[31]。

5 铂族元素特征

泽当地幔橄辉岩四种岩相的PGE总量基本一致为 $16.67 \times 10^{-9} \sim 32.59 \times 10^{-9}$ 。图9结果表明泽当地幔橄辉岩中纯橄岩、铬铁矿化方辉橄辉岩、方辉橄辉岩以及二辉橄辉岩铂族元素特征均与原始地幔相似。由于Ir熔点高,在部分熔融过程中表现为相容元素的特点,Pd表现为不相容元素特点,Pd/Ir可以反映部分熔融程度,纯橄岩Pd/Ir为0.33~0.60,铬铁矿化方辉橄辉岩为1.29~1.97,方辉橄辉岩为0.52~4.90,其中大部分数据落在1.09~2.78,二辉橄辉岩Pd/Ir=2.11~3.94,这表明纯橄岩-铬铁矿化方辉橄辉岩-方辉橄辉岩-二辉橄辉岩的部分熔融程度逐渐降低,这与矿物化学反应的部分熔融特点相一

致。泽当纯橄岩Pt/Pd为1.09~2.10,铬铁矿化方辉橄辉岩为1.74~2.22,方辉橄辉岩为1.24~2.72,二辉橄辉岩Pt/Pd=1.09~1.54,总体保持一致,并且Pd/Ir与Pt/Pd呈负相关关系(图9),这可能是由于地幔橄辉岩中Pt分配系数要低于Ir、Pd的原因^[32]。

泽当地幔橄辉岩四种岩相原始地幔标准化显示^[35],泽当地幔橄辉岩铬铁矿化方辉橄辉岩、方辉橄辉岩与二辉橄辉岩铂族元素特征与原始地幔类似,纯橄岩的IPGE与原始地幔相同,PPGE要低于原始地幔,呈现右倾的特征。

6 讨论

6.1 部分熔融

铂族元素为强烈亲铁元素,它们在熔融残留和岩浆结晶作用过程中表现出不同的地球化学特

表4 泽当地幔橄榄岩中铬尖晶石的电子探针分析结果(%)

Table 4 Representative microprobe analyses of spinel from the Zedang mantle peridotite (%)

岩性	样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	Mg [#]	Cr [#]
方辉橄榄岩	7-3-1-4	0.03	46.94	0.02	20.23	15.00	0.16	17.65	0.00	0.00	0.03	100.36	68.03	22.43
	7-3-1-9	0.01	46.21	0.05	20.72	14.77	0.20	17.43	0.00	0.00	0.01	99.65	67.97	23.13
	7-3-2-2	0.99	39.75	0.02	21.44	14.91	0.18	14.88	0.06	0.00	0.01	92.40	72.34	26.57
	7-3-2-5	0.03	46.24	0.02	20.69	15.53	0.17	17.25	0.00	0.00	0.00	100.16	66.70	23.09
	7-3-4-3	0.05	47.04	0.02	20.66	14.37	0.20	17.82	0.01	0.01	0.00	100.41	69.29	22.76
	7-3-4-5	0.01	46.38	0.03	20.64	14.84	0.13	17.61	0.00	0.00	0.00	99.89	68.00	22.99
	7-3-5-4	0.01	46.83	0.02	20.02	15.13	0.14	17.87	0.00	0.00	0.00	100.26	67.90	22.29
	8-1-1-5	0.13	50.91	0.01	15.55	13.20	0.11	18.11	0.03	0.00	0.00	98.25	72.00	17.00
	8-1-2-5	0.06	47.29	0.05	20.27	14.02	0.15	17.97	0.00	0.01	0.00	100.04	70.05	22.33
	8-1-3-7	0.00	46.52	0.05	19.77	14.71	0.17	17.67	0.00	0.00	0.00	99.15	68.23	22.19
	11-2-1-2	0.00	47.97	0.03	18.62	14.69	0.14	17.82	0.02	0.00	0.00	99.53	68.42	20.66
	11-2-2-2	0.00	48.84	0.03	18.79	14.04	0.21	18.25	0.01	0.00	0.00	100.41	69.88	20.51
	11-2-2-7	0.02	46.68	0.03	20.40	14.11	0.15	17.62	0.00	0.00	0.00	99.25	69.18	22.67
11-2-3-2	0.00	47.45	0.02	20.11	13.55	0.16	18.27	0.00	0.00	0.00	99.83	70.67	22.14	
纯橄岩	6-8-1-1	0.73	10.66	0.10	56.45	19.89	0.38	9.87	0.06	0.00	0.02	98.18	51.92	78.03
	6-8-2-1	1.13	3.40	0.16	59.38	29.87	0.69	6.36	0.01	0.02	0.00	101.02	31.80	92.14
	6-8-3-1	0.17	13.60	0.11	55.31	20.00	0.40	11.85	0.00	0.00	0.00	101.46	52.53	73.18
	6-8-4-1	0.09	12.75	0.14	55.44	19.97	0.35	11.58	0.00	0.00	0.00	100.35	51.51	74.47
	6-8-6-1	0.21	3.00	0.11	60.53	31.36	0.64	4.89	0.00	0.04	0.01	100.86	22.41	93.11
	6-8-7-1	0.05	11.56	0.14	55.92	20.43	0.40	10.84	0.00	0.00	0.01	99.35	49.10	76.45
	6-10-1-1	0.15	2.79	0.09	60.66	31.51	0.62	4.70	0.02	0.01	0.00	100.58	21.44	93.59
	6-10-2-1	0.06	13.31	0.09	55.29	20.12	0.36	11.45	0.00	0.00	0.00	100.72	50.81	73.60
	6-10-3-1	0.04	11.07	0.10	56.84	23.02	0.42	9.03	0.00	0.02	0.00	100.60	41.48	77.50
	方辉橄榄岩 铬铁矿化	13-2-1-1	0.04	39.41	0.08	26.99	15.82	0.21	16.92	0.00	0.01	0.00	99.68	66.02
13-2-1-2		0.02	39.62	0.07	26.90	15.15	0.17	17.28	0.00	0.01	0.00	99.46	67.29	31.29
13-2-2-1		0.01	39.61	0.09	23.89	19.18	0.21	16.74	0.00	0.02	0.00	100.01	61.09	28.80
13-2-2-4		0.00	39.96	0.13	23.69	19.17	0.21	16.65	0.00	0.00	0.00	100.07	60.92	28.45
13-2-3-1		0.03	38.82	0.08	26.95	16.88	0.23	16.88	0.02	0.00	0.00	100.12	64.36	31.77
13-1-1-5		0.02	44.78	0.05	23.97	13.87	0.20	16.79	0.03	0.04	0.01	99.95	68.76	26.42
13-1-2-1		0.04	40.72	0.09	21.98	19.88	0.22	16.26	0.00	0.03	0.01	99.51	59.75	26.59
13-1-2-3		0.03	41.77	0.07	21.02	19.96	0.24	16.20	0.00	0.04	0.01	99.63	59.53	25.23
13-1-2-5		0.03	38.69	0.11	24.07	20.18	0.23	15.49	0.00	0.03	0.02	99.07	58.18	29.45
13-1-3-1		0.01	38.47	0.08	26.66	17.04	0.21	16.53	0.00	0.01	0.03	99.24	63.61	31.74
二辉橄榄岩	2-2-4	0.00	43.28	-	21.96	16.83	0.18	17.03	0.01	0.07	0.00	99.51	64.58	25.40
	2-2-8	0.03	43.42	0.00	22.38	15.72	0.21	17.39	0.02	0.05	0.00	99.36	66.69	25.69
	2-2-12	0.03	44.11	0.03	22.78	14.44	0.17	17.60	0.00	0.04	0.00	99.40	68.90	25.72
	2-2-14	0.00	43.26	0.02	22.87	15.36	0.14	17.19	0.01	0.07	0.02	99.08	66.95	26.18
	12-4-1	0.03	47.86	0.09	19.24	14.34	0.15	18.06	0.00	0.02	0.00	100.04	69.61	21.24
	12-4-2	0.02	49.10	0.02	16.97	14.52	0.18	18.37	0.00	0.02	0.00	99.49	69.49	18.82
	24-1-4	0.06	37.12	0.12	28.56	16.43	0.23	16.57	0.00	0.00	0.01	99.21	64.80	34.05

征。以元素 Os 为例,在地幔熔融过程中 Os 是强相容元素,因此熔融过程残余的地幔岩石具有较高的 Os 含量,通过熔体结晶作用形成的岩石的 Os 含量较低^[35-36]。泽当地幔橄榄岩 Os 含量为 $3.50 \times 10^{-9} \sim 7.75 \times 10^{-9}$,高于原始地幔,指示泽当地幔橄榄岩为地幔岩石,属于熔融过程残余的地幔橄榄岩(表5)。

部分熔融是地幔橄榄岩亏损的原因之一。实验数据表明,当部分熔融程度达到20%,二辉橄榄岩会转变成方辉橄榄岩,当部分熔融程度达到50%~60%,二辉橄榄岩将形成纯橄岩^[39-41]。

泽当地幔橄榄岩的岩相学研究表示,不规则状、未发生变形的橄榄石出现在泽当地幔橄榄岩的

斜方辉石斑晶内,这可能是原位的斜方辉石在洋中脊之下发生减压熔融导致的。橄榄石具有光滑、弯曲的边界以及“三联点”结构,同时方辉橄榄岩中存在少量的辉石的变形(图4-e, f),可能是在软流圈下的早期部分熔融阶段,塑性流动和韧性变形作用产生了这种结构的橄榄岩^[37-38]。

由于尖晶石存在着 Cr 和 Al 的广泛互相替换^[31],蛇绿岩中地幔橄榄岩(或阿尔卑斯型橄榄岩)的铬尖晶石可分为富铬型尖晶石和富铝型尖晶石两类。随着地幔岩部分熔融程度的增高,尖晶石的 Cr[#]增大,地幔橄榄岩中尖晶石的 Cr[#]大小可作为推测地幔岩熔融程度、源区亏损程度和结晶压力的指

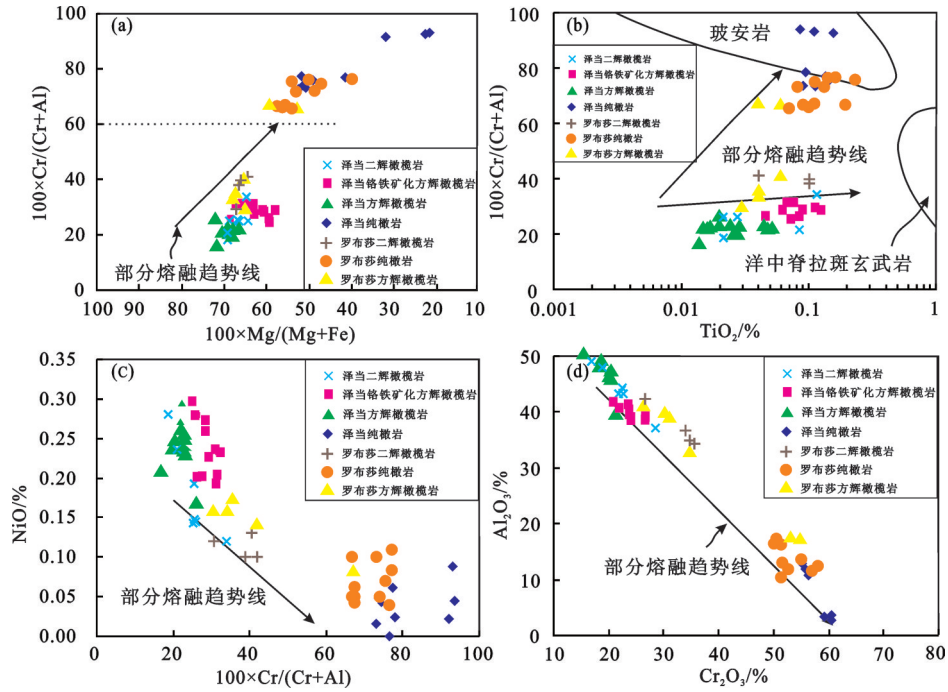


图8 西藏泽当地幔橄榄岩中铬尖晶石的成分图解

部分熔融趋势线来源于文献[25]; 玻安岩、洋中脊拉斑玄武岩数据、罗布莎数据来源于文献[27-28]

Fig. 8 Composition of clinopyroxene spinel of different lithologies in the Zedang area

Partial melting trends from reference [25]; Boninite, MORB and Luobusha peridotite data from references [27]and [28]

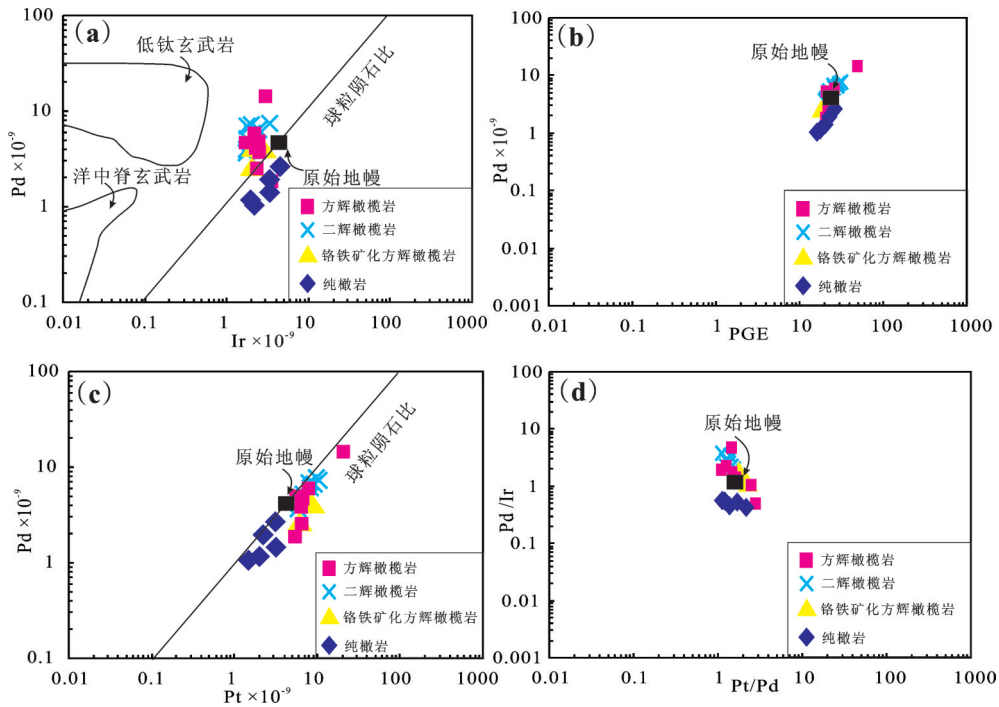


图9 泽当地幔橄榄岩的铂族元素图

球粒陨石和地幔值引自文献 [33], MORB 和 Low-Ti lavas 数据引自文献[34]

Fig. 9 PGE diagram of the Zedang ophiolite

Chondritic ratio and mantle value from reference [33], MORB and low-Ti lavas field from reference [34]

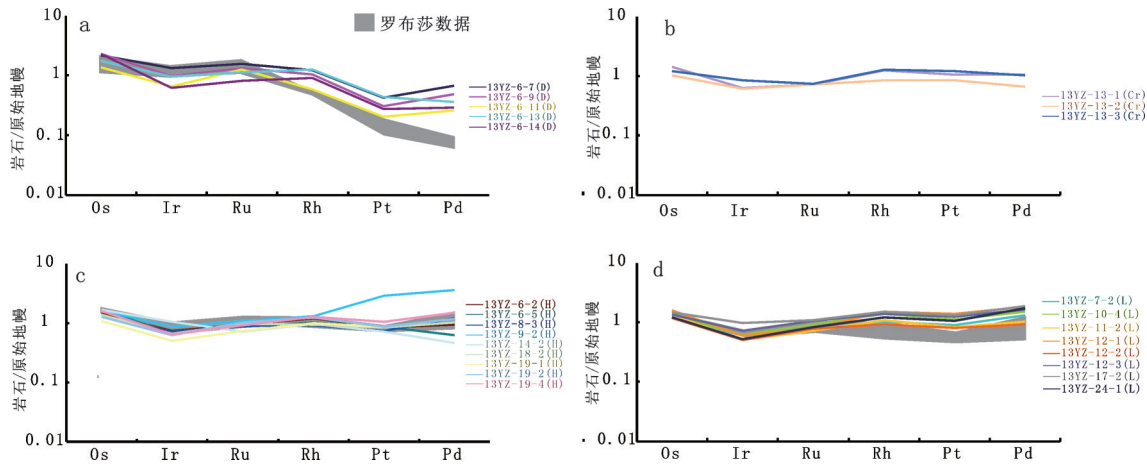


图10原始地幔标准化泽当地幔橄橄榄岩和铬铁矿的铂族元素图[35]

a—纯橄岩; b—铬铁矿化方辉橄橄榄岩; c—方辉橄橄榄岩; d—二辉橄橄榄岩; 罗布莎数据来源于文献[36]

Fig.10 Primitive mantle-normalized PGE patterns of the Zedang peridotite (after reference [35])

a—Dunite; b—Harzburgite with chromite; c—Lherzolite; d—Lherzolite; data of Luobusha from reference [36]

表5 泽当蛇绿岩地幔橄橄榄岩铂族元素分析数据

Table 5 PGE composition of the mantle peridotite from the Zedang ophiolite

	样品号	Os/(ng/g)	Ir/(ng/g)	Ru/(ng/g)	Rh/(ng/g)	Pt/(ng/g)	Pd/(ng/g)	总量	Pd/Tr	Pt/Pd
纯橄岩	13YZ-6-7	7.31	4.47	8.57	1.17	2.95	2.66	27.13	0.60	1.11
	13YZ-6-9	7.71	3.36	7.31	0.98	2.13	1.95	23.44	0.58	1.09
	13YZ-6-11	4.68	2.21	6.77	0.56	1.40	1.05	16.67	0.48	1.33
	13YZ-6-13	5.85	3.27	6.16	1.19	3.03	1.44	20.94	0.44	2.10
	13YZ-6-14	7.75	2.13	4.37	0.86	1.92	1.16	18.19	0.54	1.66
方辉橄橄榄岩	13YZ-6-2	4.97	2.53	5.18	1.17	6.02	3.78	23.65	1.49	1.59
	13YZ-8-3	4.35	2.47	4.95	0.87	5.26	4.93	22.83	2.00	1.07
	13YZ-9-2	5.65	2.96	5.88	1.25	20.50	14.50	50.74	4.90	1.41
	13YZ-14-2	5.70	3.60	3.89	0.94	5.08	1.87	21.08	0.52	2.72
	13YZ-18-2	4.76	2.27	5.34	0.90	5.97	4.12	23.36	1.81	1.45
	13YZ-19-1	3.75	1.71	4.09	0.95	6.18	4.75	21.43	2.78	1.30
铬铁矿化方辉橄橄榄岩	13YZ-19-4	5.42	2.20	5.05	1.21	7.41	5.98	27.27	2.72	1.24
	13YZ-13-1	4.82	2.16	3.98	1.20	7.43	4.26	23.85	1.97	1.74
	13YZ-13-2	3.50	2.07	3.92	0.80	5.92	2.67	18.88	1.29	2.22
二辉橄橄榄岩	13YZ-13-3	4.10	2.90	4.00	1.22	8.41	4.11	24.74	1.42	2.05
	13YZ-7-2 (L)	4.51	1.78	4.27	0.99	6.38	5.28	23.21	2.97	1.21
	13YZ-10-4 (L)	4.54	2.07	5.03	1.31	7.77	5.98	26.70	2.89	1.30
	13YZ-11-2 (L)	4.48	1.74	3.95	1.03	5.86	4.09	21.15	2.35	1.43
	13YZ-12-1 (L)	5.46	2.03	4.28	1.45	9.82	7.32	30.36	3.61	1.34
13YZ-17-2 (L)	5.02	3.32	5.95	1.45	9.22	7.63	32.59	2.30	1.21	

示标志^[39]。泽当岩体二辉橄橄榄岩铬尖晶石的Cr[#]变化在18.82~34.05,其部分熔融程度为5%~10%。方辉橄橄榄岩铬尖晶石的Cr[#]变化在17.00~26.57,部分熔融程度为10%~15%。与方辉橄橄榄岩相比,铬铁矿化方辉橄橄榄岩中尖晶石的Cr[#]稍高,变化在25.23~31.77,部分熔融程度为15%~20%(图11-b)。

铂族元素特征表明,泽当二辉橄橄榄岩-方辉橄橄榄岩-铬铁矿化方辉橄橄榄岩-纯橄岩Os含量逐渐增高,表明部分熔融程度逐渐增大,这与矿物化学特

征相一致。泽当地幔橄橄榄岩野外、岩相学观察以及矿物化学、铂族元素特征说明泽当岩体经历了一定程度的部分熔融作用,属于熔体抽离之后的地幔岩石的残余。

6.2 俯冲带环境下的地幔交代作用

矿物化学研究表明,泽当二辉橄橄榄岩属于深海地幔橄橄榄岩,方辉橄橄榄岩及纯橄岩具有岛弧橄橄榄岩的特征(图11-a,b)。方辉橄橄榄岩和二辉橄橄榄岩部分橄橄榄石的Fo值为89.5~92.3,这与残余地幔橄橄

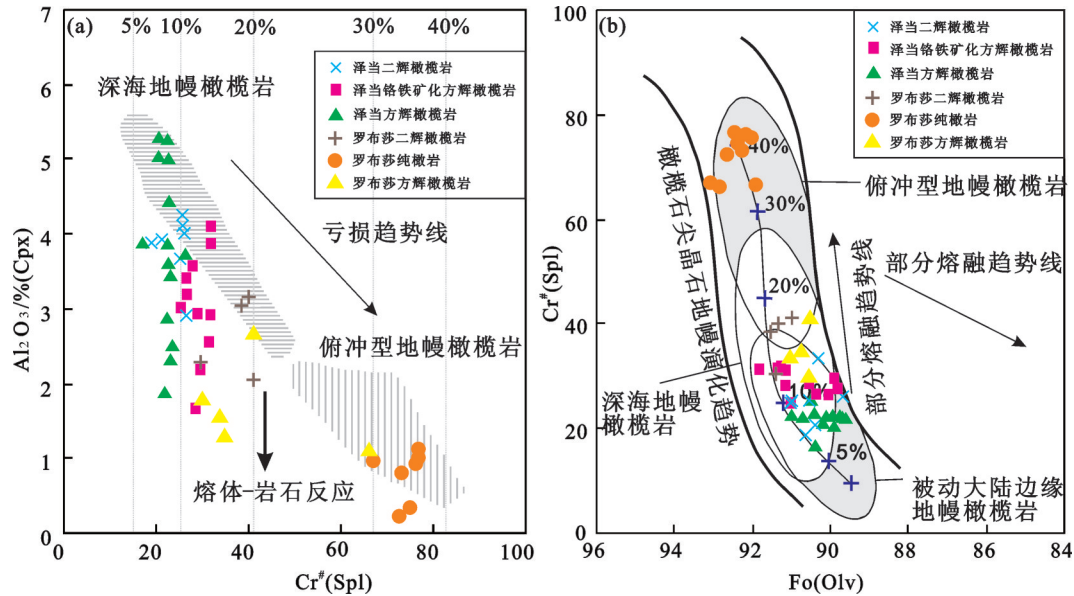


图 11(a) 泽当地幔橄榄岩中 $\text{Cr}^\#(\text{Spl}) - \text{Al}_2\text{O}_3/\%(\text{Cpx})$ 图; (b) 泽当地幔橄榄岩及铬铁矿中 $\text{Fo}(\text{Olv}) - \text{Cr}^\#(\text{Spl})$ 的成分图^[31]
罗布莎数据来源于文献[27-28]

Fig. 11 (a) Variation diagram of $\text{Al}_2\text{O}_3/\%$ of clinopyroxene versus $\text{Cr}^\#$ of coexisting spinel for Zedang peridotites and (b) compositional relationship between $\text{Cr}^\#$ of spinel and Fo content of coexisting olivine from Zedang peridotites and chromitites (after reference [31]); Luobusha peridotite data from references [27] and [28].

岩中橄榄石相似^[40],但是相比于正常的地幔橄榄岩中的橄榄石有更高的NiO含量(图5),Ishimaru and Arai (2008)^[41]认为富NiO的橄榄石可能是在SSZ环境中熔体或者富 $\text{H}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ 的流体渗透作用^[42]导致的。熔体-岩石相互作用以及在渗透作用的后期阶段斜方辉石中饱和熔体的迁移可能形成了泽当地幔橄榄岩颗粒间未变形的辉石,这是由于高温上升的熔体中斜方辉石为欠饱和,而单斜辉石为饱和,当熔体上升至浅部位置时从围岩方辉橄榄岩中易熔解斜方辉石^[37,43-47]。铬尖晶石矿物化学成分表明,铬尖晶石 TiO_2 含量随着 $\text{Cr}^\#$ 的增加而增加,一种解释为地幔交代成因^[48],另一种为玻安质熔体与方辉橄榄岩反应的结果^[49]。

泽当地幔橄榄岩具有与原始地幔相似的PGE含量(原始地幔平均为 24.20×10^{-9} ,泽当地幔橄榄岩绝大部分数据位于 $22.44 \times 10^{-9} \sim 27.27 \times 10^{-9}$),并且高于一些典型地幔橄榄岩(塞浦路斯Troodos方辉橄榄岩PGE平均含量为 $15 \times 10^{-9} \sim 20 \times 10^{-9}$)。Pd/Ir可以反映IPGE和PPGE的分异程度,除纯橄岩外,泽当地幔橄榄岩其他岩相Pd/Ir为1.09~3.94,均大于1,具有轻微正斜率型配分模式的特点,并且高于原始

地幔的Pd/Ir(Pd/Ir=1.18)。大量研究表明PGE配分模式主要受部分熔融作用以及地幔交代作用的影响。部分熔融过程中,IPGE表现出相容元素的特征,PPGE则进入熔体,但交代作用可以使残余的地幔橄榄岩富集PPGE。因此,泽当地幔橄榄岩正斜率型的PGE配分模式以及较高的Pd/Ir值表明泽当地幔橄榄岩经历了俯冲环境下的地幔交代作用。

另外,俯冲环境下俯冲板片中的 H_2O 可能是导致减压熔融的原因^[50-54]。原因如下:(1) H_2O 降低了橄榄岩的固相线或在恒定的温度下增加了地幔橄榄岩的部分熔融程度^[55-61];(2)增加了斜方辉石熔融的比例,降低了橄榄石和单斜辉石进入熔体的比例,使单斜辉石能够残留在高度部分熔融的熔体中^[62];(3) H_2O 可以导致斜方辉石的不一致熔融,从而形成了铬铁矿和橄榄石^[55,63]。熔体中斜方辉石占的比例增加致使岩浆中更富硅,类似于板块边界的特征^[64-66]。

6.3 泽当地幔橄榄岩与罗布莎地幔橄榄岩的对比

罗布莎地幔橄榄岩位于泽当岩体东部约120 km处,是雅鲁藏布江缝合带东段另一重要的超基性岩体。前人研究表明,罗布莎岩体同样经历了MOR至SSZ环境的改造过程,说明泽当岩体与罗布莎岩

体具有一定成因上的联系与可对比性^[23,27]。岩石学特征表明,罗布莎二辉橄榄岩与方辉橄榄岩单斜辉石的含量明显降低。矿物化学数据表明,罗布莎地幔橄榄岩橄榄石、单斜辉石、斜方辉石与尖晶石普遍具有更高的 $Mg^{\#}$ (图5~图8),罗布莎二辉橄榄岩部分熔融程度为15%,方辉橄榄岩部分熔融程度为17%~22%,纯橄岩部分熔融程度达到40%(图11)。上述结果表明,相同岩性下,罗布莎地幔橄榄岩部分熔融程度整体高于泽当地幔橄榄岩,这与野外罗布莎地区二辉橄榄岩出露较少的情况相符。铂族元素地球化学表明,泽当二辉橄榄岩、方辉橄榄岩与罗布莎二辉橄榄岩、方辉橄榄岩具有相似的铂族元素特征(图10)。部分熔融程度不同的情况下,相似的铂族元素配分模式表明泽当地幔橄榄岩源区与罗布莎地幔橄榄岩源区相比可能存在不同,罗布莎超基性岩的源区可能更加富集,另外两个岩体形成过程中交代作用的不同也可能造成两者岩石学、矿物化学和地球化学上的差异。

7 结 论

(1)泽当岩体中二辉橄榄岩铬尖晶石的 $Mg^{\#}$ 变化在89.7~91.1, $Cr^{\#}$ 变化在18.82~34.05,其部分熔融程度为5%~10%。方辉橄榄岩的 $Mg^{\#}$ 变化在89.6~91.0,铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 变化在17.00~26.57,部分熔融程度为10%~15%。铬铁矿化方辉橄榄岩 $Mg^{\#}$ 变化在89.8~91.8,尖晶石的 $Cr^{\#}$ 变化在25.23~31.77,部分熔融程度为15%~20%。 $Mg^{\#}$ 与 $Cr^{\#}$ 的不同表明泽当地幔橄榄岩经历了部分熔融过程。

(2)泽当地幔橄榄岩矿物化学成分及地幔橄榄岩的铂族元素地球化学结果表明,泽当地幔橄榄岩岩体经历了俯冲环境下交代作用的改造。泽当地幔橄榄岩的形成过程经历了两个阶段,即早期的MOR构造背景,以及后期就位过程中SSZ环境的改造。

(3)泽当地幔橄榄岩与罗布莎地幔橄榄岩相比具有相似的形成过程,但岩相学以及铂族地球化学特征存在差异,分析结果表明源区特点、部分熔融程度、俯冲环境下交代作用的改造以及构造就位过程的差异可能是产生上述差别的原因。

致谢:感谢西藏矿业公司教授级高工巴登珠等的大力帮助,论文撰写过程中与实验室其他师兄进行了有益的讨论,电子探针测试在大陆构造与动力

学国家重点实验室或合研究员的帮助下完成,在此,一并致以诚挚的谢意!

参考文献(References):

- [1] Dewey J F, Bird J. Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, 76: 3179-3206.
- [2] Coleman R G. Ophiolites: ancient oceanic lithosphere?[C]// *Ophiolites: ancient oceanic lithosphere?*. Springer-Verlag, 1977.
- [3] Miller C, Thfni M, Frank W, Schuster R, et al. Geochemistry and tectonomagmatic affinity of the Yungbwa ophiolite, SW Tibet[J]. *Lithos*, 2003, 66: 155-172.
- [4] Dubois-Coté V, Hébert R, Dupuis C, et al. Petrological and geochemical evidence for the origin of the Yarlung Zangbo ophiolites, southern Tibet[J]. *Chemical Geology*, 2005, 214: 265-286.
- [5] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): A peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1981, 294: 414-417.
- [6] Girardeau J, Mercier J C C, Wang X. Petrology of the mafic rocks of the Xigaze ophiolites, Tibet: Implications for the genesis of the oceanic lithosphere[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1985, 90: 309-321.
- [7] Girardeau J, Mercier J C C, Zao Y. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suturezone, southern Tibet, China: Genetic implications[J]. *Tectonics*, 1985b, 4: 267-288.
- [8] 王希斌, 鲍佩声. 豆荚状铬铁矿床的成因——以西藏自治区罗布莎铬铁矿床为例[J]. *地质学报*, 1987, 2: 167-181.
Wang Xibin, Bao Peisheng. The genesis of podiform chromite deposits——A case study of the Luobusa chromite deposit, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1987, 2: 167-181(in Chinese with English abstract).
- [9] 潘桂棠, 陈智梁, 李兴振. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-100.
Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. *Tectonic Evolution of Eastern Tethys*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1-100(in Chinese).
- [10] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. *Geological Society London Special Publications*, 1984, 16(1): 77-94.
- [11] Wang CS, Liu Z, Hébert R. The Yarlung Zangbo paleophiolite, southern Tibet: Implications for the dynamic evolution of the

- Yarlung Zangbo suture zone[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 651–661.
- [12] Zhou S, Mo X X, Mahony J J, et al. Geochronology and Nd and Pb isotope characteristics of gabbro dikes in the Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47: 143–146.
- [13] Dupuis C V, Hébert R, Dubois–Coté V, et al. The Yarlung Zangbo suture zone ophiolitic melange(southern Tibet): New insights from geochemistry of ultra– mafic rocks[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 937–960.
- [14] Guilmette C, Hébert R, Dupuis C, et al. Metamorphic history and geodynamic significance of high– grade metabasites from the ophiolitic mélange beneath the Yarlung metabasites from the ophiolitic mélange beneath the Yarlung[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 423–437.
- [15] Yamamoto S, Komiya T, Hirose K, et al. Coesite and clinopyroxene exsolution lamellae in chromites: In–situ ultrahigh pressure evidence from podiform chromitites in the Luobusha ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 109: 314–322.
- [16] Bédard, Hébert R, Guilmette C, et al. Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolitic massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: Evidence for an arc– back– arc origin[J]. *Lithos*, 2009, 113: 48–67.
- [17] Liu C Z, Wu F Y, Wide S A, et al. Anorthitic plagioclase and pargasitic amphibole in mantle peridotites from the Yungbwa ophiolite (southwestern Tibetan Plateau) formed by hydrous melt metasomatism[J]. *Lithos*, 2010, 114(3–4): 413–422
- [18] 李源, 杨经绥, 刘钊, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段巴尔地幔橄辉岩成因及构造意义[J]. *岩石学报*, 2012, 27(11): 3239–3254.
Li Yuan, Yang Jingsui, Liu Zhao, et al. The origins of Baer ophiolitic peridotite and its implication in the Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 27(11): 3239–3254(in Chinese with English abstract).
- [19] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当蛇绿岩壳层火山熔岩的岩石地球化学及成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2004, 28(3): 270–278.
Wei Dongliang, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. Lithochemical characteristics and origin of the Zedang ophiolite lava in Xizang (Tibet), China[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2004, 28(3): 270–278(in Chinese with English abstract).
- [20] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 西藏泽当蛇绿岩的Sm–Nd等时线年龄及其意义[J]. *地球学报*, 2006, 27(1): 31–34.
Wei Dongliang, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. Sm–Nd isochron age of Zedang ophiolite in Tibet and its significance[J]. *Journal of Earth Science*, 2006, 27(1): 31–34(in Chinese with English abstract).
- [21] 韦栋梁, 夏斌, 周国庆, 等. 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[J]. *中国科学*, 2007, 37(4): 442–450.
Wei Dongliang, Xia Bin, Zhou Guoqing, et al. 2007. Geochemistry and Sr–Nd of Zedang tonalite: New evidence of intra– subduction[J]. *Science China*, 2007, 37(4): 442–450(in Chinese).
- [22] 梁凤华, 许志琴, 巴登珠, 等. 西藏罗布莎—泽当蛇绿岩体的构造产出与侵位机制探讨[J]. *岩石学报*, 2011, 27(11): 3255–3268.
Liang Fenghua, Xu Zhiqing, Ba Dengzhu, et al. Tectonic occurrence and emplacement mechanism of ophiolites from Luobusha– Zedang, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3255–3268(in Chinese with English abstract).
- [23] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中发现超高压矿物柯石英[J]. *地球科学*, 2004, 29(6): 651–660.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Coesite discovered from the podiform chromitite in the Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Earth Science*, 2004, 29(6): 651–660(in Chinese with English abstract).
- [24] 叶培盛, 江万, 吴珍汉, 等. 西藏泽当—罗布莎蛇绿岩的地球化学特征及其构造意义[J]. *现代地质*, 2006, 20(3): 370–377.
Ye Peisheng, Jiang Wan, Wu Zhenhan, et al. Geochemical characteristics of ophiolites in Zedang–Luobusha, Tibet and their tectonic significance [J]. *Geoscience*, 2006, 20(3): 370–377(in Chinese with English abstract).
- [25] Ozawa K. Melting and melt segregation in the mantle wedge above a subduction zone: evidence from the chromite– bearing peridotites of the Miyamori ophiolite complex, northeastern Japan[J]. *Journal of Petrology*, 1994, 35(3): 647–678.
- [26] Pagé P, Bédard J H, Schroetter J M, et al. Mantle petrology and mineralogy of the Thetford mines ophiolite complex[J]. *Lithos*, 2008, 100(1): 255–292
- [27] 熊发挥, 杨经绥, 巴登珠, 等. 西藏罗布莎不同类型铬铁矿的特征及成因模式讨论[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2137–2163.
Xiong Fahui, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, et al. Different type of chromitite and genetic model from Luobusha ophiolite, Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2137–2163(in Chinese with English abstract).
- [28] 徐向珍. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄辉岩成因研究[D]. 中国地质科学院, 2009.

- Xu Xiangzhen. The Origin of Podiform Chromite and Peridotite in Kangjinla, southern Tibet[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2009(in Chinese with English abstract).
- [29] Nakamura M. Residence time and crystallization history of nickeliferous olivine phenocrysts from the northern Yatsugatake volcanoes, Central Japan: Application of a growth and diffusion model in the system Mg-Fe-Ni[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 1995, 66(1):81-100.
- [30] Leblanc M. Chromite growth, dissolution and deformation from a morphological view point: SEM investigations[J]. *Mineralium Deposita*, 1980, 15(2):201-210.
- [31] Pearce J A, Barker P F, Edwards S J, et al. Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2000, 139(1):36-53.
- [32] Borisov A, Palme H, Spettel B. Solubility of palladium in silicate melts: Implications for core formation in the Earth[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(2):705-716.
- [33] Chou C, Shaw D M, Crockett J H. Siderophile trace elements in the Earth's oceanic crust and upper mantle[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 1983, 88(S02):A507-A518.
- [34] Hamlyn P R, Keays R R, Cameron W E, et al. Precious metals in magnesian low-Ti lavas: Implications for metallogenesis and sulfur saturation in primary magmas[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1985, 49(8):1797-1811.
- [35] Barnes S J, Boyd R, Korneliussen A, et al. The use of mantle normalization and metal ratios in discriminating between the effects of partial melting, crystal fractionation and sulphide segregation on platinum-group elements, gold, nickel and copper: Examples from Norway[C]// *Geo-Platinum 87*. Springer Netherlands, 1988:113-143.
- [36] Jaques A L, Green D H. Anhydrous melting of peridotite at 0-15 kb pressure and the genesis of tholeiitic basalts[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, 73(3): 287-310.
- [37] Dijkstra A H, Barth M G, Drury M R, et al. Diffuse porous melt flow and melt-rock reaction in the mantle lithosphere at a slow-spreading ridge: A structural petrology and LA-ICP-MS study of the othris peridotite massif (Greece) [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2003, 4(8).
- [38] 李继亮, 陶克捷, 俞良军, 等. 西藏拉昂错剪切橄榄岩中橄榄石初步研究[J]. *岩石学报*, 2007, 23(5): 977-985.
- Li Jiliang, Tao Kejie, Yu Liangjun, Xiao Wenjiao. Preliminary study on the olivine in the Laangcuo sheared peridotite, western Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(5):977-985(in Chinese with English abstract).
- [39] Dick H J B, Bullen T. Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86(1): 54-76.
- [40] Takahashi E. Origin of basaltic magmas: Implications from peridotite melting experiments and an olivine fractionation Model[J]. *Bulletin of the Volcanological Society of Japan Second*, 1986, 30.
- [41] Ishimaru S, Arai S. Nickel enrichment in mantle olivine beneath a volcanic front[J]. *Contributions to Mineralogy & Petrology*, 2008, 156(1):119-131.
- [42] Nakamura Y, Kushiro I. Composition of the gas phase in Mg₂SiO₄-SiO₂-H₂O at 15 kbar[J]. *Year Book Carnegie Inst. Washington*, 1974, 73: 255-258.
- [43] Kelemen P B. Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle[J]. *Nature*, 1992, 358(6388):635-641.
- [44] Kelemen P B. Reaction between ultramafic rock and fractionating basaltic magma I. Phase relations, the origin of calc-alkaline magma series, and the formation of discordant dunite[J]. *Jour. Petrol.*, 1990, 31(1):51-98.
- [45] Barth M G, Mason P R, Davies G R, et al. Geochemistry of the othris ophiolite, Greece: Evidence for refertilization?[C]// *AGU Fall Meeting Abstracts*. AGU Fall Meeting Abstracts, 2001, (27): 1759-1785.
- [46] Piccardo G B, Zanetti A, Müntener O. Melt/peridotite interaction in the Southern Lanzo peridotite: Field, textural and geochemical evidence[J]. *Lithos*, 2007, 94(1/4):181-209.
- [47] Piccardo G B, Vissers R L M. The pre-oceanic evolution of the Erro-Tobbio peridotite (Voltri Massif, Ligurian Alps, Italy) [J]. *Journal of Geodynamics*, 2007, 43:417-449.
- [48] Batanova V G, Suhr G, Sobolev A V. Origin of Geochemical heterogeneity in the mantle peridotites from the bay of islands ophiolite, Newfoundland, Canada: Ion probe study of clinopyroxenes[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(97):853-866.
- [49] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle[J]. *Journal of Petrology*, 1996, 37(1):3-21.

- [50] Gill J B. Orogenic andesites and plate tectonics[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1981: 390.
- [51] Pawley A R, Jr H. Water sources for subduction zone volcanism: new experimental constraints.[J]. Science, 1993, 260(5108):664 – 667.
- [52] Ulmer P, Trommsdorff V. Serpentine stability to mantle depths and subduction-related magmatism[J]. Science, 1995, 268(5212): 858–861.
- [53] Tatsumi Y, Eggins S. Subduction Zone Magmatism[M]. Oxford: Blackwell Science, 1995: 1–95.
- [54] Sisson T W, Bronto S. Evidence for pressure-release melting beneath magmatic arcs from basalt at Galunggung, Indonesia[J]. Nature, 1998, 391(6670): 883–886.
- [55] Syono Y, Akimoto S I. Melting of a Peridotite nodule at high pressures and high water pressures[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1968, 73(18):6023–6029.
- [56] Green D H. Experimental melting studies on a model upper mantle composition at high pressure under water-saturated and water-undersaturated conditions[J]. Earth & Planetary Science Letters, 1973, 19(1):37–53.
- [57] Mysen B O, Boettcher A L. Melting of a hydrous mantle: I. Phase relations of natural peridotite at high pressures and temperatures with controlled activities of water, carbon dioxide and hydrogen[J]. Journal of Petrology, 1975, 16(1): 520–548.
- [58] Green TH. Experimental testing of “equilibrium” partial melting of peridotite under water-saturated, high-pressure conditions[J]. The Canadian Mineralogist, 1976, 14(3): 255–268.
- [59] Mysen B O, Kushiro I. Compositional variations of coexisting phases with degrees of melting of peridotite in the upper mantle[J]. American Mineralogist, 1977, 62(9/10): 843–865.
- [60] Hirose K and Kawamoto T. Hydrous partial melting of lherzolite at 1 GPa: the effect of H₂O on the genesis of basaltic magmas[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1995, 133(3/4): 463–473.
- [61] Green T H, Falloon T J. Pyrolite: A Ringwood concept and its current expression. The Earth’s Mantle: Composition, Structure, and Evolution[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1998: 311–378
- [62] Kushiro I. The system forsterite–diopside–silica with and without water at high pressures[J]. American Journal of Science, 1969: 267: 269–294.
- [63] Bowen N L, Anderson O. The binary system MgO– SiO₂[J]. American Journal of Science, 1914, 37: 487–500.
- [64] Green T H, Ringwood A E. Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1968, 18 (2): 105–162.
- [65] Nicholls I A, Rigwood A E. Effect of water on olivine stability in tholeiites and production of silica-saturated magmas in the island arc environment[J]. The Journal of Geology, 1973a, 285–306.
- [66] Nicholls I A, Rigwood A E. Production of silica-saturated tholeiitic magmas in island arcs[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1973, 17(1): 243–246.