

连东洋, 杨经绥, 熊发挥, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩及铬铁矿的铂族元素特征[J]. 中国地质, 2015, 42(2): 525–546.  
Lian Dongyang, Yang Jingsui, Xiong Fahui, et al. Platinum–group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Geology in China*, 2015, 42(2): 525–546(in Chinese with English abstract).

## 雅鲁藏布江缝合带西段达机翁地幔橄榄岩 及铬铁矿的铂族元素特征

连东洋<sup>1,2</sup> 杨经绥<sup>2</sup> 熊发挥<sup>2</sup> 刘 飞<sup>2</sup> 王云鹏<sup>2,3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 大陆构造与动力学国家重点实验室地幔研究中心, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:** 达机翁蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带的西段北亚带, 该蛇绿岩主要由地幔橄榄岩、玄武岩以及硅质岩组成, 其中地幔橄榄岩以方辉橄榄岩为主, 同时含有少量的纯橄榄岩, 纯橄榄岩主要呈不规则透镜状或团块状分布于方辉橄榄岩中。在达机翁地幔橄榄岩中产出有 3 种不同类型的铬铁矿, 分别为块状、豆状以及浸染状铬铁矿。文章主要对达机翁地幔橄榄岩的方辉橄榄岩及豆荚状铬铁矿进行了研究, 结合岩石的主量元素和铂族元素, 对地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿的成因以及雅鲁藏布江缝合带的找矿远景进行了探讨。达机翁地幔橄榄岩具有较高的 MgO 含量以及较低的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO 等含量, 这种亏损的全岩成分指示了达机翁地幔橄榄岩经历了较高的部分熔融作用, 同时方辉橄榄岩的 PGEs 的总量为 23.68×10<sup>-9</sup>~31.02×10<sup>-9</sup>, 高于原始地幔的值, Pd 和 Cu 2 个元素的含量较为分散明显偏离部分熔融曲线, 指示了达机翁方辉橄榄岩可能遭受了熔体的改造, 在熔体–岩石反应的过程中, 导致了富含 PPGE 的硫化物的加入。达机翁豆荚状铬铁矿为高 Cr 型铬铁矿, 具有 IPGE 和 Rh 明显富集以及 Pt, Pd 明显亏损的特征, 不同类型的铬铁矿之间具有一致的 PGEs 的分配模式。雅鲁藏布江缝合带内大量分布的超镁铁岩体在岩石组合、地球化学特征、成因以及形成时代等方面, 均具有相似性, 是中国铬铁矿找矿的有利远景区。

**关键词:** 雅鲁藏布江缝合带; 达机翁; 地幔橄榄岩; 豆荚状铬铁矿; 铂族元素

中图分类号: P595; P618.3 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)02-0525-22

## Platinum–group element characteristics of the peridotite and podiform chromitite from Dajiweng ophiolite of the western segment of Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet

LIAN Dong–yang<sup>1,2</sup>, YANG Jing–sui<sup>2</sup>, XIONG Fa–hui<sup>2</sup>, LIU Fei<sup>2</sup>, WANG Yun–peng<sup>2,3</sup>

(1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 2. CARMA, State Key Laboratory for

收稿日期: 2014–03–30; 改回日期: 2014–11–18

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(40930313)、国家自然科学基金创新群体项目(41221061)、国家自然科学基金项目(41202036、40921001)和中国地质调查局工作项目(1212011121263、12120114061801)联合资助。

作者简介: 连东洋, 男, 1990 年生, 硕士生, 矿物学岩石学矿床学专业; E-mail: ldy199008@163.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: yangjsui@163.com。

*Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;*

*3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)*

**Abstract:** Located in the northern subbelt of the western Yarlung Zangbo ophiolite zone, Dajiweng ophiolite is mainly composed of peridotite, basalt and silicious rocks. The peridotite is dominated by harzburgite with minor dunite. Dunite occurs as patches in the peridotites. Podiform chromitite can be found in the harzburgite with dunitic envelope. According to the texture and mineralogy of the chromitite, Dajiweng podiform chromitite can be divided into three types, namely massive chromitite, disseminated chromitite and nodular chromitite. This paper mainly reports the research on the harzburgite and podiform chromitite and makes a discussion on the petrogenesis of the peridotite, the origin of the chromitite and chromitite prospect in the Yarlung Zangbo suture zone combined with the major and platinum group elements. Dajiweng harzburgite has a depleted whole rock composition with higher MgO content and lower  $Al_2O_3$ , CaO content than the primitive mantle, indicating that Dajiweng peridotite has experienced a high degree of partial melting. Dajiweng harzburgite has higher PGEs content ( $23.68 \times 10^{-9} - 31.02 \times 10^{-9}$ ) than primitive mantle. The Cu and Pd content of Dajiweng harzburgite strongly deviates from the modeled partial melting curves, which is a symbol of melt-rock reaction. During the process of melt-rock reaction, sulfides were enriched with PPGEs and these materials were added to the Dajiweng harzburgite. In the primitive mantle-normalized PGE patterns of podiform chromitite, Dajiweng chromitite shows obvious enrichment of IPGE and Rh, and depletion of Pt and Pd. Podiform chromitites of different types have consistent primitive mantle-normalized PGE patterns. Ultramafic rock in the Yarlung Zangbo ophiolite belt shows remarkable similarities in such aspects as rock assemblage, rock geochemistry, formation age and petrogenesis, suggesting that the Yarlung-Zangbo ophiolite is a promising prospecting area for chromitite.

**Key words:** Yarlung-Zangbo suture zone; Dajiweng; peridotite; podiform chromitite; PGEs

**About the first author:** LIAN Dong-yang, male, born in 1990, master, majors in petrology and geochemistry of peridotite and related ore deposits; E-mail: ldy199008@163.com.

**About the corresponding author:** YANG Jing-sui, male, born in 1950, senior researcher, engages in the tectonic study of the Tibetan Plateau and orogenic belts; E-mail: yangjsui@163.com.

## 1 引言

铂族元素(PGEs)主要由钌(Ru)、铑(Rh)、钯(Pd)、锇(Os)、铱(Ir)和铂(Pt)组成。PGE是高度亲铁元素,也是亲铜的元素。由于PGE在铁金属/硅酸盐熔体相的分配系数高达 $10^7$ (Pd)和 $10^{12}$ (Pt和Ir)数量级<sup>[1]</sup>,因此主要富集在地核中,而在由硅酸盐构成的地幔和地壳中的丰度是十分低的。根据元素的密度分为2组:Os、Ir、Pt密度约为 $22 \text{ g/cm}^3$ ,为重铂族组;Ru、Rh、Pd的密度约为 $12 \text{ g/cm}^3$ ,为轻铂族组。根据元素的共生特征,可将铂族元素分为Ir族(IPGEs: Os, Ir和Ru)和Pd族(PPGEs: Rh, Pt和Pd)<sup>[2]</sup>。其中IPGE为难熔的相容元素,而PPGE为弱相容元素。

由于铂族元素(PGEs)各元素之间性质的不同,导致在地质过程中,不同元素具有不同的化学行为,而发生分异,因此PGEs可以为地幔的部分熔融过程,岩浆中S的饱和度,地幔交代作用,核幔分异等作用提供重要的信息,尤其是地幔橄榄岩中的铂

族元素可以指示地幔橄榄岩的成因以及经历的地质作用<sup>[3-8]</sup>。

S不饱和的岩浆具有相对高的PGEs含量,尤其是PPGEs<sup>[9,10]</sup>。科马提岩,玻安岩以及高镁的拉斑玄武岩等均为S不饱和的岩浆岩,这类岩浆岩具有较高的PGE的含量<sup>[8,10,11]</sup>。大洋中脊玄武岩为S饱和的熔体,在熔体就位之前,不混熔的硫化物熔体残留在熔融残余中,而PGEs在硫化物/硅酸盐熔体具有较高的分配系数,因此大洋中脊玄武岩(MORB)极其亏损铂族元素<sup>[10]</sup>。

雅鲁藏布江缝合带是青藏高原最年轻的一条缝合带,位于青藏高原的最南端,代表着印度板块与欧亚板块的分界线<sup>[12-14]</sup>。雅鲁藏布江缝合带呈东西向分布,自东向西分布着数个蛇绿岩体,主要包括东段的罗布莎岩体<sup>[15,16]</sup>、中段的日喀则岩体<sup>[17,18]</sup>、西段南亚带的普兰岩体<sup>[19-21]</sup>、东波岩体<sup>[22-24]</sup>和西段北亚带达机翁岩体。前人对东段的罗布莎岩体、中段的日喀则岩体、以及西段南亚带的东波、普兰岩体

的地幔橄榄岩进行了研究,对铬铁矿的研究集中在东段的罗布莎岩体<sup>[6, 16, 25]</sup>以及西段南亚带的普兰岩体<sup>[26]</sup>,而对雅鲁藏布江西段北亚带的达机翁蛇绿岩中地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿的铂族元素研究则鲜有报道。

雅鲁藏布江蛇绿岩带西段北亚带达机翁岩体内部产出有典型的豆荚状铬铁矿,主要包含有块状铬铁矿、豆状铬铁矿以及浸染状铬铁矿。本文主要对达机翁地幔橄榄岩以及豆荚状铬铁矿的铂族元素的地球化学特征进行研究,希望对达机翁地幔橄榄岩和豆荚状铬铁矿的成因提供新的限制,对铬铁

矿找矿工作提供线索。

### 2 区域地质背景

雅鲁藏布江缝合带(YZSZ)北邻拉萨地体,南接喜马拉雅构造带,是青藏高原最南端,最新的一条缝合带(图1-a)。雅鲁藏布江缝合带是印度板块和欧亚板块的分界线,代表着新特提斯洋的残余,在中国境内保留有出露最大的蛇绿岩带和与俯冲碰撞有关的岩浆岩带等板块构造体系<sup>[12-14]</sup>。雅鲁藏布江缝合带主要呈东西向展布,向西经帕米尔高原绕喜马拉雅西构造结后转向南进入巴基斯坦,向东

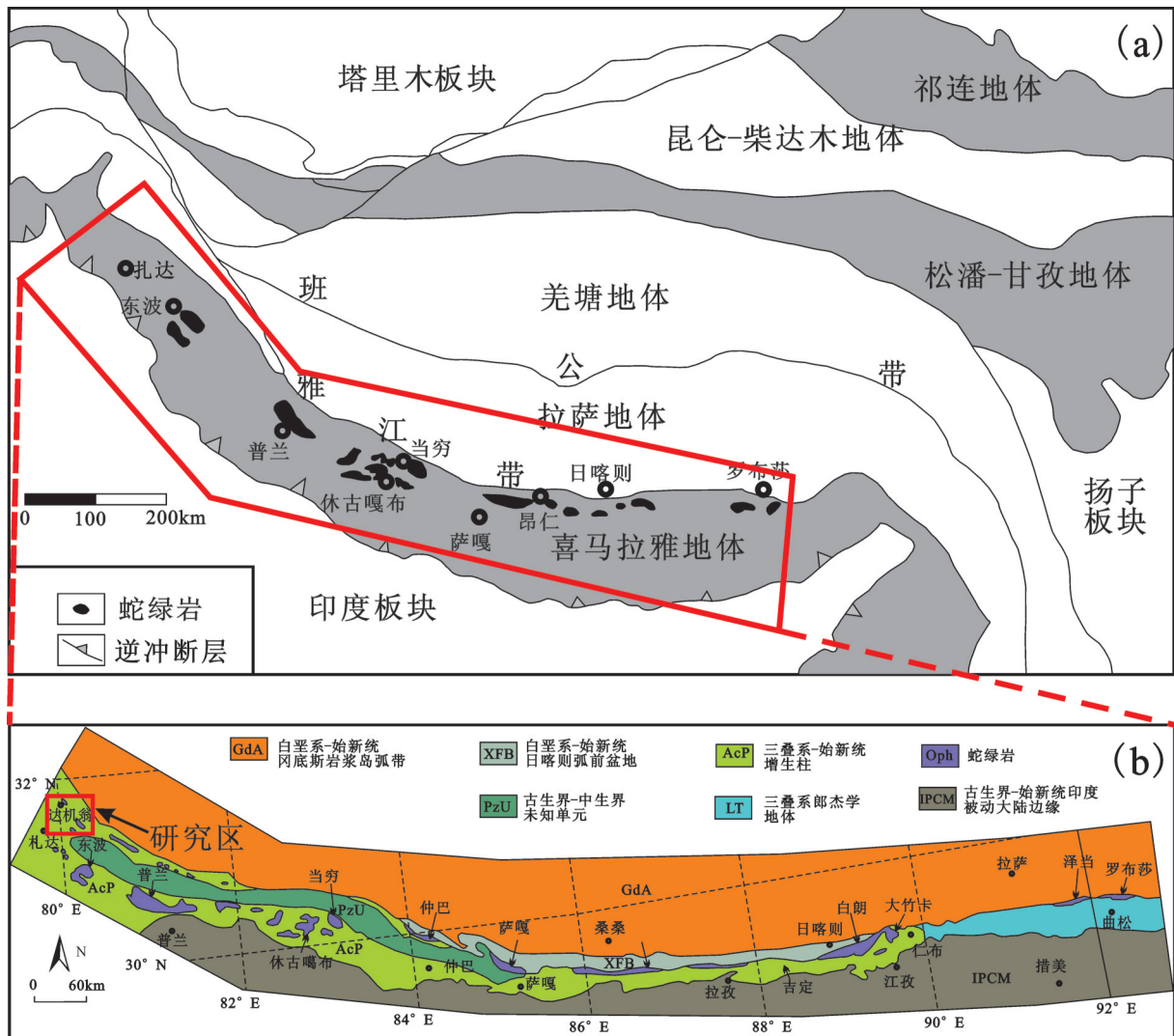


图1 青藏高原构造格架(a, 据文献[21])和雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的分布简图(b, 据文献[7])  
Fig.1 Geological sketch map of the Tibetan Plateau, showing major tectonic units (a, after reference [21]) and the location of the YZSZ ophiolite (b, after reference [7])



过南迦巴瓦东构造结后向南转入缅甸,在中国境内延展近2000 km<sup>[23]</sup>。雅鲁藏布江缝合带北部为日喀则弧前盆地和冈底斯岩浆岩弧,南部为特提斯喜马拉雅地层区<sup>[27]</sup>(图1-b)。日喀则弧前盆地主要由白垩系至古近系的复理石组成;特提斯喜马拉雅地层从北到南为大陆边缘沉积、碳酸盐复理石和台地地层<sup>[28]</sup>。

雅鲁藏布江蛇绿岩带由保存完好的和肢解的蛇绿岩体组成,大部分蛇绿岩代表着新特提斯洋岩石圈<sup>[7]</sup>。潘桂棠等(1997)根据蛇绿岩的空间展布特征,将雅鲁藏布江带自西向东分为3段:西段从萨嘎以西至中印边境,中段自昂仁至仁布,东段自曲水到墨脱。从东到西这些蛇绿岩体主要包括有罗布莎蛇绿岩、泽当蛇绿岩、大竹卡蛇绿岩、白朗蛇绿岩、吉定蛇绿岩、桑桑蛇绿岩、萨嘎蛇绿岩、仲巴蛇绿岩、东巧蛇绿岩、休古噶布蛇绿岩、普兰蛇绿岩以及东波蛇绿岩、达机翁蛇绿岩等<sup>[29]</sup>(图1-b)。

雅鲁藏布江蛇绿岩带的西段自萨嘎以西又分为2支,即达巴—休古噶布蛇绿岩带(南亚带)和达机翁—萨嘎蛇绿岩带(北亚带)<sup>[30,31]</sup>。南亚带发育早中三叠世穷果群和晚三叠世修康群,前者主要为滨浅海碳酸盐泥坪沉积和深海浊流沉积,后者为杂色板岩砂质板岩和变质砂岩为主的深海浊流沉积;其他的地层有侏罗纪达桑组、且嘎组,白垩纪折巴组、桑单林组等海相地层夹基性火山岩等。带内产有东波、普兰和休古噶布等规模较大的超镁铁岩体和有关的基性岩和火山岩类,以及不同规模的混杂岩。混杂岩基质的岩性以三叠纪到白垩纪的泥砂质为主,岩块的岩性为二叠纪、三叠纪、侏罗纪和白垩纪等不同时代的灰岩硅质岩玄武岩辉长岩等<sup>[33]</sup>。仲巴陆块为呈NWW向的楔形陆块,尖部在萨嘎处消失,在区内平均宽度为10~15 km,长约百余千米,向西延经普兰到印度陆块,由古生代和中生代地层组成,以二叠纪曲嘎组砂岩和三叠纪穷果群的砂板岩和碳酸岩为主体,均已遭受变形变质作用。北亚带由三叠纪修康群构造混杂岩和晚侏罗世至早白垩世蛇绿混杂岩组成,其中蛇绿岩体总体比较零星,多呈透镜状产于断裂带南侧,岩体出露规模大小不等,一般长10 km左右,宽1~2 km,多数地点蛇绿岩体层序发育不全。蛇绿岩剖面常有1~3个单元组成,各单元之间多为断层接触,多数岩体蛇纹石化强烈,主要岩石类型为方辉橄榄岩、纯橄岩、(层状)

辉长岩、枕状熔岩和硅质岩<sup>[32-34]</sup>。

### 3 达机翁蛇绿岩地质特征

达机翁蛇绿岩位于雅鲁藏布江蛇绿岩带的西段北亚带,地理坐标:北纬31°48'50"、东经80°03'59"、海拔5051 m。达机翁蛇绿岩主要由方辉橄榄岩、透镜状纯橄岩,以及豆荚状铬铁矿、玄武岩、硅质岩组成(图2)。

#### 3.1 岩石学特征

方辉橄榄岩是达机翁地幔橄榄岩的主体,纯橄岩和铬铁矿在其中呈不规则透镜状或团块状、带状分布。方辉橄榄岩地表风化后呈土黄色,风化面上常可见到斜方辉石颗粒突出(图2-b)。岩石普遍蛇纹石化,主要沿岩石的裂隙分布。方辉橄榄岩新鲜面呈绿色,暗绿色,具粒状结构,块状构造,可见到较明显的斜方辉石颗粒。方辉橄榄岩主要由橄榄石、斜方辉石组成,此外还含有少量的单斜辉石和铬尖晶石(图3-a)。

纯橄岩主要呈不规则透镜状或团块状分布于方辉橄榄岩中,岩石蛇纹石化强烈,呈暗绿色,表面因为没有辉石的差异风化而显得十分平滑,易于与方辉橄榄岩相区别(图2-a、c、d)。岩石蛇纹石化强烈,橄榄石被蛇纹石呈网格状穿插交代(图3-b)。

根据矿石的结构特征,可以将豆荚状铬铁矿划分为块状铬铁矿、浸染状铬铁矿、豆状铬铁矿、反豆状铬铁矿以及条带状铬铁矿<sup>[35]</sup>。达机翁蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿主要包括豆状、浸染状和致密块状3种类型。豆状铬铁矿由铬尖晶石聚晶体或单晶体组成的豆体组成,豆体之间具有较强或完全蛇纹石化的橄榄石,鲜有新鲜的硅酸盐矿物(橄榄石、斜方辉石等)(图2-f、3-e);浸染状铬铁矿主要由铬尖晶石和橄榄石(蛇纹石)组成(图2-d、3-d);块状铬铁矿主要由粗粒铬尖晶石单晶体或聚晶体组成,呈紧密镶嵌结构,块状构造,块状铬铁矿内部裂隙普遍具有比较强烈的蛇纹石化、磁铁矿化和碳酸盐化等现象,内部未见到有新鲜的硅酸盐脉石矿物产出(图2-c、e、3-c、f)。

#### 3.2 采样位置及样品特征

在详细野外观测基础上,采集大量地幔橄榄岩和铬铁矿矿石样品。地幔橄榄岩样品主要包含有方辉橄榄岩和纯橄岩,铬铁矿矿石主要包含有豆状



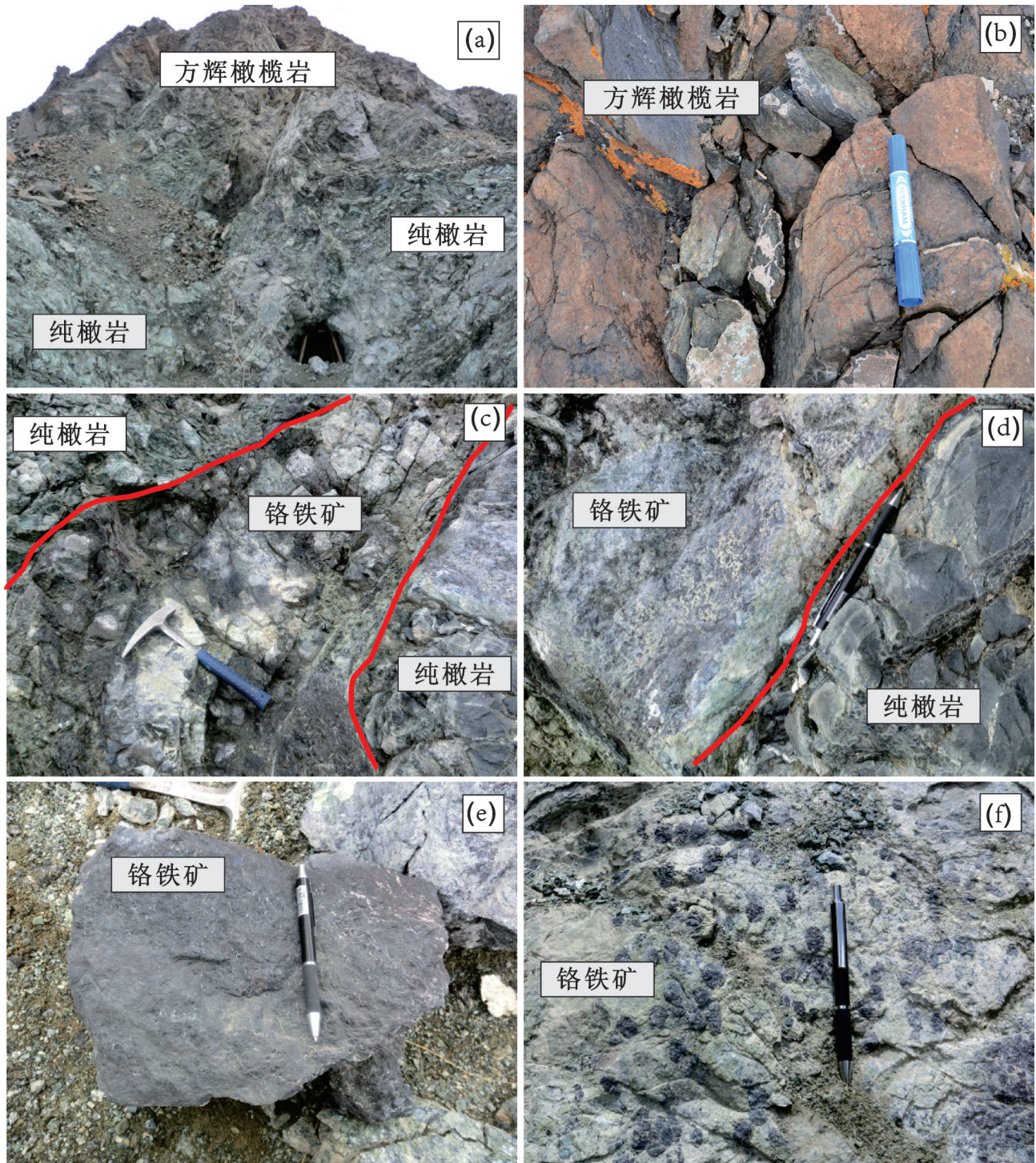


图2 达机翁地幔橄榄岩岩体及铬铁矿化野外照片

a—蛇纹石化的纯橄岩及方辉橄榄岩; b—方辉橄榄岩风化表面呈突起; c—块状铬铁矿及蛇纹石化的纯橄岩外壳;  
d—稠密浸染状铬铁矿及蛇纹石化纯橄岩外壳; e—块状铬铁矿; f—豆状铬铁矿

Fig. 1 Field photographs of the peridotite and chromitite from Dajiweng ophiolite

a—Serpentinized dunite and harzburgite; b—Weathering prominent of harzburgite; c—Massive chromitite with serpentized dunite shell; d—Densely disseminated chromitite with serpentized shell; e—Massive chromitite; f—Nodular chromitite



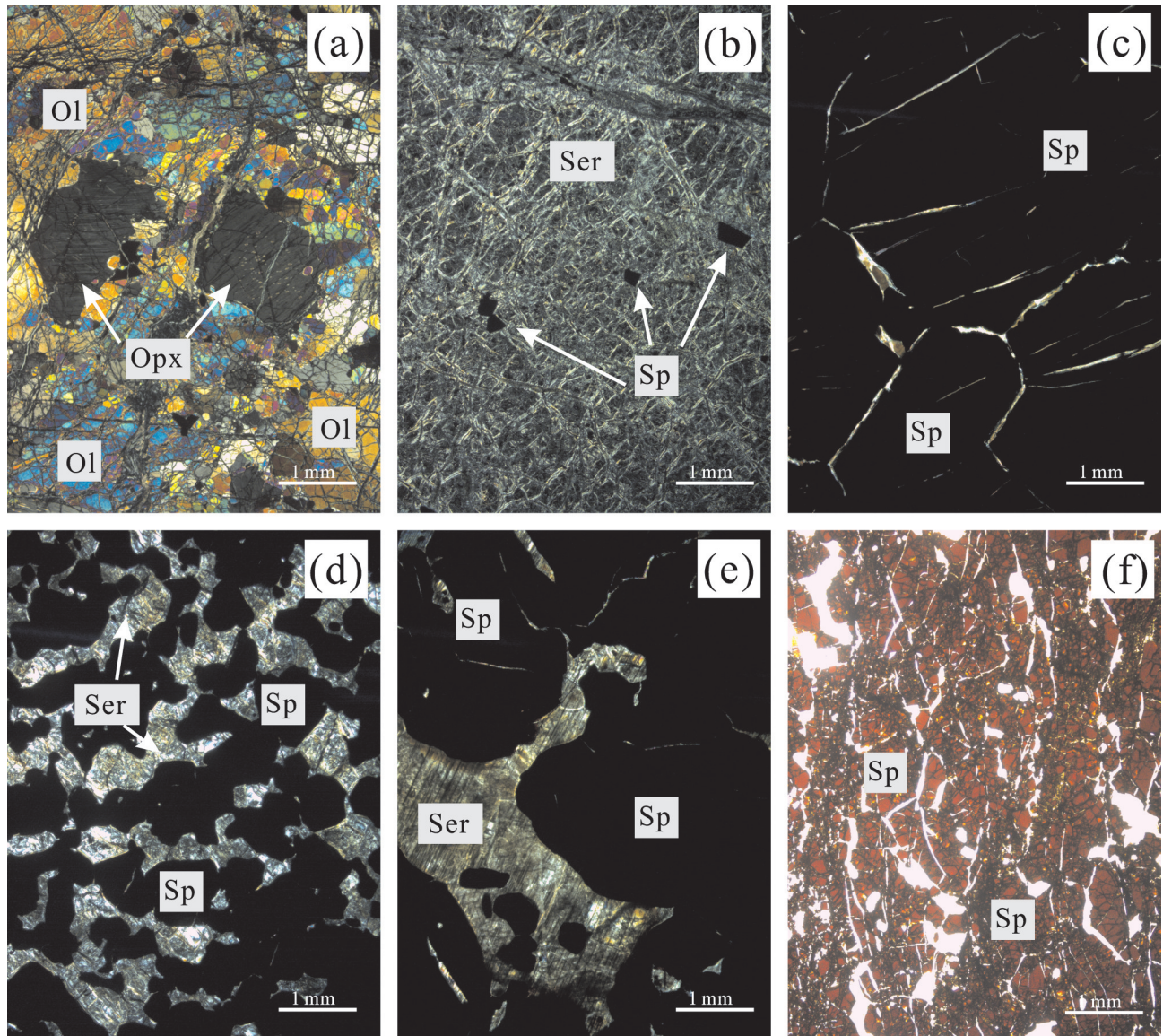


图3 达机翁地幔橄榄岩和铬铁矿显微照片

a—方辉橄榄岩; b—纯橄岩; c—块状铬铁矿; d—浸染状铬铁矿; e—豆状铬铁矿; f—块状铬铁矿; Ol—橄榄石; Opx—斜方辉石; Ser—蛇纹石; Sp—尖晶石

Fig.3 Microphotographs of different rock types of Dajiweng mantle peridotite and chromitite

a—Harzburgite; b—Dunite; c—Massive chromitite; d—Disseminated chromitite; e—Nodular chromitite; f—Massive chromitite.

Ol—Olivine; Opx—Orthopyroxene; Ser—Serpentine; Sp—Spinel

铬铁矿, 块状铬铁矿以及浸染状铬铁矿。针对这些样品, 作者开展了显微镜下详细岩相学和矿物学研究。其中方辉橄榄岩整体较为新鲜, 然而纯橄岩蚀变强烈, 岩石几乎被完全蛇纹石化。因此, 选取了7件方辉橄榄岩样品和9件矿石样品进行了地球化学分析, 其中铬铁矿矿石样品包含有4件块状铬铁矿, 3件豆状铬铁矿以及2件浸染状铬铁矿。

#### 4 分析方法

本研究共完成了7件岩石样品和9件矿石样品的全岩分析, 包括主量元素、Cu元素和铂族元素的测试, 均在国家地质实验测试中心完成。由于纯橄岩岩石蚀变强烈, 因此未对纯橄岩进行相关的分析测试。进行分析测试的铬铁矿包含有块状铬铁矿,

豆状铬铁矿以及浸染状铬铁矿,涵盖了3种类型的矿石。主量元素采用熔片X-射线荧光光谱法(XRF)测定,并采用等离子光谱和化学法测定进行互相检测。Cu元素用熔片XRF和酸溶等离子质谱(ICP-MS)法测定。铂族元素的富集采用的是铈镍火试金-碲共沉淀的方法,分析过程简述如下:10 g (200目)样品与2 g  $\text{Ni}_2\text{O}_3$ , 1.25 g 硫磺粉, 15 g  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 20 g  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 1 g  $\text{SiO}_2$ 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℃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密闭溶样器中,加入1 mL王水,于100℃加热溶解1 h用 $\text{H}_2\text{O}$ 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 $0.3 \times 10^{-9}$ , Pt、Rh小于 $0.06 \times 10^{-9}$ 。本文所列的结果是测定值扣除全流程空白后的结果。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。

## 5 地球化学特征

达机翁地幔橄榄岩的MgO含量介于42.00%~46.09%,平均值为44.85%,明显高于原始地幔的

MgO的含量<sup>[40]</sup>(图4-a,b)。CaO的含量变化于0.61%~1.52%, $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量介于0.46%~0.65%,均低于原始地幔的CaO和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的含量(图4-a,b)。达机翁豆荚状铬铁矿的蚀变程度较低,烧失量介于1.04%~4.25%,平均值为3.12%。达机翁豆荚状铬铁矿的 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 的含量42.49%~54.12%,平均值为47.16%; $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量为6.62%~8.98%,平均值为7.57%,属于高Cr型铬铁矿。豆荚状铬铁矿的 $\text{TiO}_2$ 含量为0.08%~0.10%,平均值为0.09%,与罗布莎、东巧、大道吉尔等地区的高Cr铬铁矿的 $\text{TiO}_2$ 含量相近<sup>[41]</sup>。

达机翁地幔橄榄岩的PGEs分析结果列于表1,其原始地幔标准化图解如图5-a显示。不同的方辉橄榄岩样品的PGEs的含量具有一定的差异,但是均具有较为一致的原始地幔标准化的PGEs分配模式。方辉橄榄岩的PGEs的总量为 $23.68 \times 10^{-9}$ ~ $31.02 \times 10^{-9}$ ,平均含量为 $26.65 \times 10^{-9}$ 。方辉橄榄岩的Ir含量为 $2.45 \times 10^{-9}$ ~ $3.34 \times 10^{-9}$ ,平均值为 $3.02 \times 10^{-9}$ ;Ru的含量为 $4.59 \times 10^{-9}$ ~ $6.49 \times 10^{-9}$ ,平均值为 $5.79 \times 10^{-9}$ ;Pd的含量为 $4.24 \times 10^{-9}$ ~ $9.09 \times 10^{-9}$ ,平均值为 $5.86 \times 10^{-9}$ ;Pt的含量为 $4.98 \times 10^{-9}$ ~ $7.19 \times 10^{-9}$ ,平均值为 $5.88 \times 10^{-9}$ 。

达机翁豆荚状铬铁矿的PGEs的分析结果列于表2,原始地幔标准化图解如图5-c。铬铁矿的PGEs的总量有一定的变化,但是不同类型的铬铁矿

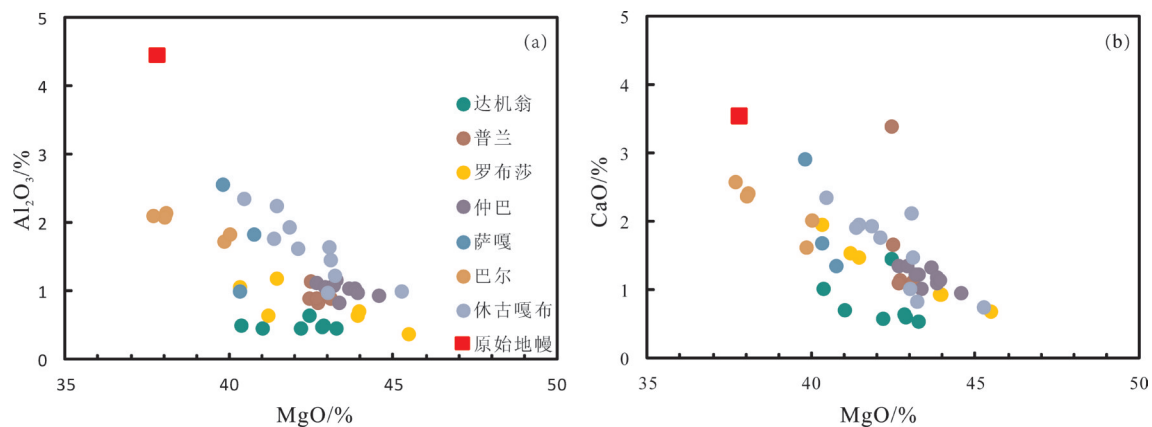


图4 雅鲁藏布江缝合带不同岩体的方辉橄榄岩的主量元素对MgO图解

a—方辉橄榄岩的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO图解; b—方辉橄榄岩的CaO-MgO图解; 普兰数据来自文献[36]; 罗布莎数据来自文献[15]; 仲巴数据来自文献[7]; 萨嘎数据来自文献[37]; 巴尔数据来自文献[38]; 休古嘎布数据来自文献[39]; 原始地幔值来自文献[40]

Fig. 4 Composition of harzburgite of different ophiolitic massifs from the Yarlung-Zangbo suture zone  
a -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -MgO diagram for harzburgite; b - CaO-MgO diagram for harzburgite; Purang data after reference [36]; Luobusa data after reference [15]; Zhongba data after reference [7]; Saga data after reference [37]; Baer data after reference [38]; Xiugugabu data after reference [39]; primitive data after reference [40]



表1 西藏达机翁地幔橄榄岩中方辉橄榄岩常量元素(%)和铂族元素( $10^{-9}$ )含量  
Table 1 Major elements and platinum-group elements compositions of harzburgite from Dajiweng ophiolite

分析项目	12Y-DJ-48	12Y-DJ-15	12Y-DJ-16	12Y-DJ-17	12Y-DJ-18	12Y-DJ-19	12Y-DJ-20
SiO <sub>2</sub>	41.74	40.96	41.10	41.30	40.58	42.10	41.51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.62	0.49	0.43	0.44	0.47	0.49	0.43
CaO	1.44	0.58	0.52	0.70	0.63	1.01	0.57
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.13	3.50	3.55	4.03	3.85	3.88	3.54
FeO	5.05	4.69	4.65	4.11	4.29	4.29	4.67
K <sub>2</sub> O	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01
MgO	42.49	42.90	43.29	41.03	42.84	40.38	42.22
MnO	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.11	0.12
Na <sub>2</sub> O	0.07	0.07	0.07	0.06	0.12	0.09	0.08
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
TiO <sub>2</sub>	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
LOI	5.32	6.46	5.81	6.98	7.19	6.99	6.94
Cu	27.04	6.00	13.62	12.45	25.00	17.44	12.67
Pt	5.86	4.99	5.89	5.91	7.19	6.74	5.50
Pd	4.37	4.24	6.42	6.72	9.09	6.26	5.14
Rh	1.26	1.01	1.21	1.14	1.29	1.27	1.12
Ru	5.82	6.27	6.49	5.13	5.86	6.45	5.73
Ir	3.28	3.04	3.14	2.76	3.13	3.34	3.04
Os	3.09	4.70	4.77	3.96	4.46	4.29	5.17

均具有相似的原始地幔标准化的PGEs图解(图5-c),均为右倾斜的分布模式,与罗布莎以及普兰的高Cr型铬铁矿具有一致的分布模式<sup>[6,26]</sup>。豆荚状铬铁矿的PGEs含量如下: Os= $24.30 \times 10^{-9} \sim 88.70 \times 10^{-9}$ , Ir= $20.70 \times 10^{-9} \sim 70.80 \times 10^{-9}$ , Ru= $56.60 \times 10^{-9} \sim 134 \times 10^{-9}$ , Rh= $6.71 \times 10^{-9} \sim 11.70 \times 10^{-9}$ , Pd= $1.30 \times 10^{-9} \sim 2.81 \times 10^{-9}$ 以及Pt= $1.30 \times 10^{-9} \sim 3.67 \times 10^{-9}$ 。

## 6 讨论

### 6.1 地幔橄榄岩中的PGEs的分馏

达机翁方辉橄榄岩的烧失量介于5.32~7.19,平均烧失量为6.53。含水流体中的PGEs的活动性主要受温度、pH、氧逸度和硫逸度以及氯的浓度控制<sup>[43,44]</sup>。Marchesi et al.<sup>[45]</sup>对大洋钻探项目的1274A孔的地幔橄榄岩的研究认为尽管不能排除Pt和Pd在低温的条件下发生了活化的作用,但是,蛇纹石化和海底热液改造对岩浆成因的PGE含量的影响是很低的。达机翁方辉橄榄岩的烧失量水平较低,

因此可以忽略蛇纹石化和低温海底改造的影响。

达机翁方辉橄榄岩的PGEs的含量高于原始地幔的PGEs含量( $\Sigma \text{PGE} = 23.5 \times 10^{-9}$ ),与雅鲁藏布江西段的普兰地幔橄榄岩的含PGEs量( $14.9 \times 10^{-9} \sim 30.3 \times 10^{-9}$ )相近<sup>[26]</sup>。达机翁方辉橄榄岩的Pd<sub>n</sub>/Ir<sub>n</sub>(1.09~2.38),IPGE的含量变化相对集中(如Ir= $2.45 \times 10^{-9} \sim 3.34 \times 10^{-9}$ ),而PPGE的含量变化范围则相对较大(如Pd= $4.24 \times 10^{-9} \sim 9.09 \times 10^{-9}$ )。ΣIPGE/ΣPPGE的比值介于0.77~1.37,其中有4个样品的IPGE(Os、Ir和Ru)的含量相对于PPGE(Rh、Pt和Pd)亏损,3个样品的IPGE含量相对于PPGE富集。地幔橄榄岩的Os、Ru、Rh以及Pd的含量均高于原始地幔的值,Ir的含量与原始地幔的Ir含量较为接近,Pt的含量低于原始地幔值<sup>[40]</sup>。Ir相对于相邻的Os和Ru,Pt相对于相邻的Rh和Pd具有负异常。

达机翁方辉橄榄岩的原始地幔标准化的PGEs分配模式以Os、Ru和Rh,Pd分别相对于Ir和Pt的富集为特征,与雅鲁藏布江缝合带内的罗布莎岩

表2 西藏达机翁豆荚状铬铁矿常量元素(%)和铂族元素( $10^{-9}$ )含量

Table 2 Major elements and platinum-group elements compositions of podiform chromitite from Dajiweng ophiolite

分析项目	块状铬铁矿				豆状铬铁矿			浸染状铬铁矿	
	12Y-DJ-8-3	12Y-DJ-22	12Y-DJ-24	12Y-DJ-42	12Y-DJ-8-7	12Y-DJ-25	12Y-DJ-31	12Y-DJ-41B	12Y-DJ-47B
SiO <sub>2</sub>	11.75	7.15	5.62	3.73	11.51	8.46	11.59	8.6	3.48
TiO <sub>2</sub>	0.08	0.1	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.81	7.76	7.97	8.98	7.08	7.15	6.62	7.13	8.65
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	43.68	48.43	48.33	53.09	43.55	45.23	42.49	45.52	54.12
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.89	5.76	4.14	4.11	3.3	3.2	3.07	3.52	3.67
FeO	7.98	7.41	9.78	10.17	8.63	8.3	8.09	8.2	11.25
MgO	20.97	19.5	18.09	16.75	20.44	22.36	22.53	22.1	15.32
MnO	0.19	0.15	0.17	0.17	0.13	0.12	0.12	0.12	0.17
CaO	0.25	<0.05	0.96	0.24	0.3	0.11	<0.05	<0.05	0.66
NiO	0.15	0.17	0.12	0.14	0.18	0.2	0.23	0.2	0.13
K <sub>2</sub> O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Na <sub>2</sub> O	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02	<0.01	<0.01	0.02	0.02	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
LOI	3.53	3.27	3.08	1.41	3.62	4	4.25	3.91	1.04
Pt	1.43	2.48	2.44	3.67	2.21	1.62	1.3	1.38	3.64
Pd	1.59	1.5	1.3	1.86	2.29	1.45	2.81	1.68	1.59
Rh	6.71	10	8.7	11.7	7.27	7.25	6.9	7.83	9.19
Ru	58.4	94.2	111	134	67.9	64	56.6	77.5	88.5
Ir	24.3	49.4	51.1	70.8	29	31.9	20.7	24.8	47.8
Os	51.2	38.1	53.8	49.6	27.8	58.7	77.1	24.3	88.7

体、仲巴岩体、日喀则地区的鹿曲岩体和东波岩体具有相似的特征,不同的是鹿曲的方辉橄榄岩具有相对高的PGEs含量,同时罗布莎方辉橄榄岩的Os相对Ir呈现亏损的特征<sup>[7, 8, 16, 26]</sup>。

## 6.2 豆荚状铬铁矿中PGEs的分馏

豆荚状铬铁矿的 $\Sigma$ PGE= $136.47 \times 10^{-9} \sim 271.63 \times 10^{-9}$ ,平均含量为 $187.00 \times 10^{-9}$ ,远高于原始地幔和豆荚状铬铁矿围岩方辉橄榄岩的PGEs的含量,与普兰岩体的高Cr型铬铁矿的铂族元素具有相似的特征,同时高于贺根山,萨尔托海的高Al型豆荚状铬铁矿<sup>[6, 26, 40]</sup>。达机翁豆荚状铬铁矿的IPGE与PPGE之间具有较强的分馏作用,IPGEs含量远高于PPGEs的含量, $\Sigma$ IPGE/ $\Sigma$ PPGE=10.91~16.14,平均值为14.05。尽管达机翁豆荚状铬铁矿的Os, Ir, Ru和Rh的含量显著高于原始地幔的含量,但是豆荚状铬铁矿的Pt和Pd的含量则低于原始地幔以及豆荚状铬铁矿的围岩方辉橄榄岩,同时Pt具有较明显的负异常( $Pt_n/Pd_n < 1$ )(图6),与伊朗的Neyriz蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿具有相似的特征<sup>[46]</sup>。

达机翁豆荚状铬铁矿具有Os、Ir、Ru和Rh相对于原始地幔明显富集, Pt和Pd明显亏损的右倾(图5)模式,与雅鲁藏布江缝合带的东段罗布莎岩体、西段普兰岩体的高Cr型铬铁矿以及内蒙贺根山和新疆萨尔托海高Al型铬铁矿具有相似的原始地幔标准化PGEs分配模式,IPGE与PPGE均具有明显的分馏,但是达机翁豆荚状铬铁矿的PGEs的含量高于内蒙古贺根山、新疆萨尔托海高Al型铬铁矿。尽管高Cr型的铬铁矿和高Al型的铬铁矿来源于不同的岩浆,但是两者的原始地幔标准化的PGEs具有相似的模式<sup>[6, 26]</sup>。

Burgath et al.<sup>[47]</sup>根据Pt/Ir和Pd/Ir的比值对蛇绿岩中的铬铁矿进行了分类: I型铬铁矿为“正常蛇绿岩型铬铁矿”,这种类型的铬铁矿的原始地幔标准化的PGEs图解以从Os到Pt的负斜率为特征,同时 $Pt_n/Ir_n$ 的比值小于0.9,铬铁矿的总PGEs的含量小于 $200 \times 10^{-9}$ ,个别样品可能具有异常高的PGE含量; II型铬铁矿称为“分散蛇绿岩型铬铁矿”,这种类型个铬铁矿含有较高的贱金属硫化物,PGEs的含量最

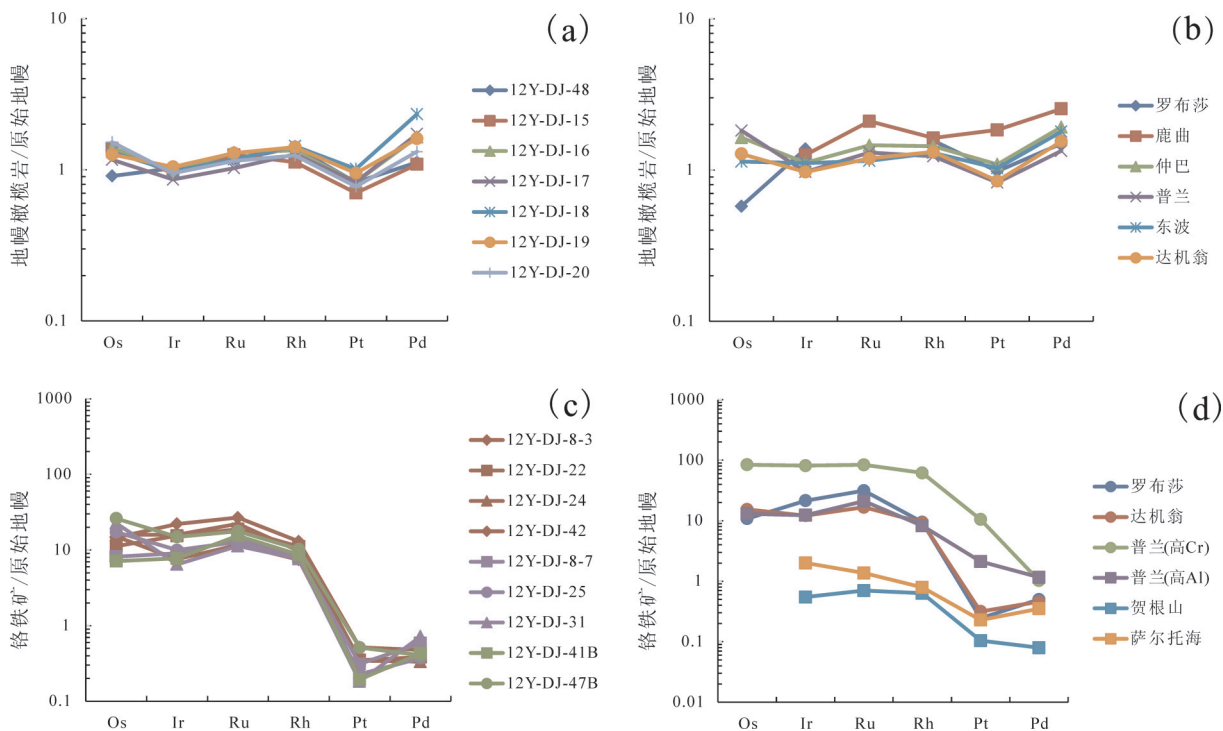


图5 方辉橄榄岩及铬铁矿铂族元素(PGE)原始地幔标准化分配模式图

a—达机翁方辉橄榄岩; b—不同蛇绿岩体中方辉橄榄岩铂族元素平均含量; c—达机翁豆荚状铬铁矿; d—不同地区的豆荚状铬铁矿的铂族元素平均含量; 原始地幔值来自文献[40]; 鹿曲方辉橄榄岩铂族元素值来自文献[8]; 仲巴方辉橄榄岩铂族元素值来自文献[7]; 罗布莎方辉橄榄岩和铬铁矿铂族元素以及贺根山和萨尔托海铬铁矿铂族元素值来自文献[6]; 东波方辉橄榄岩铂族元素值来自文献[42]; 普兰地幔橄榄岩及铬铁矿铂族元素值来自文献[26]

Fig.5 Primitive mantle-normalized PGE abundances of harzburgite and podiform chromitite

a—Harzburgite from Dajiweng ophiolite; b—Average PGE value of harzburgite from different ophiolitic massifs; c—Podiform chromitite from Dajiweng ophiolite; d—Average PGEs values of chromitite from ophiolitic massifs; primitive mantle value after reference [40]; Luqu value after reference [8]; Zhongba value after reference [7]; Luobusha, Hegenshan and Sartohay value after reference [6]; Dongbo value after reference [42]; Purang value after reference [26]

高可达  $11 \times 10^{-6}$ ,  $Pt_n/Ir_n$  变化于 0.9~4.6, 具有平坦的 PGEs 的分配模式,  $\sum PPGE/\sum IPGE$  近似等于 1; III 型的铬铁矿含有较高的贱金属硫化物的含量, 同时  $Pt_n/Ir_n > 1$ ,  $Pt_n/Pd_n < 1$ ; IV 型的铬铁矿是晚期的靠近过渡带的超镁铁堆晶岩中的铬铁矿,  $Pt_n/Ir_n > 1$ ,  $Pt_n/Pd_n > 1$ , PGEs 的含量可达  $25 \times 10^{-6}$ 。达机翁铬铁矿的  $Pt_n/Ir_n = 0.02 \sim 0.03$ , 平均值为 0.03,  $Pt_n/Pd_n = 0.25 \sim 1.26$ , 平均值为 0.74,  $\sum PPGE$  的平均含量为  $187.00 \times 10^{-9}$ , 因此属于 I 型的“正常蛇绿岩型铬铁矿”(图 6)。

Jannessary et al. [46] 对伊朗南部的 4 个地区的铬铁矿和纯橄岩的铂族元素和铂族元素矿物(PGM)进行了研究, 在大量的样品中识别出了 3 种类型的铂族矿物: ①以单一元素相或者多相包裹体形式产于铬尖晶石中, 这种类型的铂族元素矿物(PGM)有时

与贱金属硫化物(Ni 和 Cu 的硫化物、Cu 的硫化物, 主要是镍黄铁矿、针镍矿和斑铜矿)伴生产出, 有时形成独立的包裹体产出; ②产于尖晶石矿物颗粒之间的硅酸盐基质中的单一元素相或者多相的铂族元素矿物, 不与贱金属硫化物(BMS)共同产出; ③产于尖晶石颗粒之间以及纯橄岩中的与贱金属硫化物(BMS)同时产出的铂族元素矿物。伊朗南部的铬铁矿可以分为 2 类, 一类似富含硫化物的铬铁矿, 另一类是硫化物的含量较少的铬铁矿。尽管部分硫化物含量较少的铬铁矿样品的 PGEs 的总量可达  $2 \times 10^{-6}$ , 但是总体上该类型的铬铁矿的 PGEs 的总量是小于  $200 \times 10^{-9}$ 、同时  $Pt/Ir < 1$ , 属于 Burgath et al. [47] 划分的 I 型“正常蛇绿岩型”的铬铁矿。这种类型的铬铁矿中的铂族元素矿物以早期结晶的硫钉铁矿



为主,同时伴生有很少量的Os-Ir合金、Ir-Rh矿物,偶尔产出有贱金属-铂族元素硫化物和富Ni的贱金属硫化物<sup>[46]</sup>。白文吉等<sup>[48]</sup>、Yang et al.<sup>[49-50]</sup>、Xu et al.<sup>[51]</sup>在雅鲁藏布江缝合带东段的罗布莎蛇绿岩中的铬铁矿发现了大量的铂族元素和贱金属合金矿物,主要包括Os-Ir合金、Os-Ir-Ru合金、Pt-Fe合金、Ir-Ni-Fe合金、Fe-Ni-Cr合金以及Fe-Co合金,此外还发现了少量的金刚石、石墨和未定名的Cr-C、Fe-Si等合金,以及自然Fe、Ni、Cr、Cu和Si等。

达机翁铬铁矿具有较高的 $\Sigma$ IPGE/ $\Sigma$ PPGE比值,以及较低的 $Pt_n/Ir_n$ 和 $Pd_n/Ir_n$ 的比值,可能是由于铬铁矿中铂族元素矿物是以IPGEs元素矿物为主,而缺少含有Pd和Pt的矿物相<sup>[46]</sup>。不同类型的铬铁矿(即块状、豆状和浸染状铬铁矿)之间,PGE的含量及原始地幔标准化的分配模式没有明显的差异。

### 6.3 部分熔融和岩石-熔体反应

根据熔点的高低,可以将铂族元素分为2个亚族:熔点高于2000℃的Ir族元素(IPGEs,包括有Os、Ir和Ru),熔点低于2000℃的Pd亚族(PPGE,包括有Rh、Pt和Pd)<sup>[53]</sup>。地幔中的强亲铁元素HSEs(包括铂族元素PGEs,Au以及Re)主要存在于硫化物中<sup>[54]</sup>,这种观点已经被原位的质子探针分析<sup>[55,56]</sup>以及对分离出来的硫化物的分析<sup>[57,58]</sup>所证实。二辉橄榄岩中

的全岩的PGEs的丰度<sup>[59]</sup>与硫化物中的PGEs的平均含量之间的质量平衡显示,Os、Ir、Ru、Rh和Pd主要存在于硫化物相之中,而Au和Pt并非如此<sup>[60]</sup>。实验研究显示,镍黄铁矿中仅含有微量的Pt,而Pt则主要存在于硫化物与硅酸盐的接触边界。

铂族元素为强烈亲铁元素,因此可以利用岩石中的铂族元素的含量来鉴别岩石是部分熔融作用的残余还是岩浆结晶作用形成的。在地幔熔融的过程中Os表现为相容元素,因此地幔熔融的残余具有高的Os含量,而由地幔熔融形成的熔体具有极低的Os含量<sup>[42,61]</sup>。达机翁方辉橄榄岩的Os含量为 $3.09\sim 5.17\times 10^{-9}$ ,平均含量为 $4.35\times 10^{-9}$ ,远高于原始地幔的Os含量( $3.4\times 10^{-9}$ )<sup>[40]</sup>,表明达机翁方辉橄榄岩经历了较高级别的部分熔融作用,是部分熔融产生的熔体抽取后的残余地幔橄榄岩,而非岩浆结晶作用形成的岩石。达机翁地幔橄榄岩具有较高的MgO含量以及较低的 $Al_2O_3$ 和CaO等含量,同样指示了达机翁地幔橄榄岩经历了较高的部分熔融作用,与铂族元素反映的熔融程度是一致的。

富集的地幔橄榄岩源区在经历了12%~20%的部分熔融之后,地幔橄榄岩中的贱金属硫化物(BMS)会被完全消耗<sup>[45,52,59]</sup>。达机翁方辉橄榄岩是经历了>20%程度的部分熔融的残余,是非常亏损的

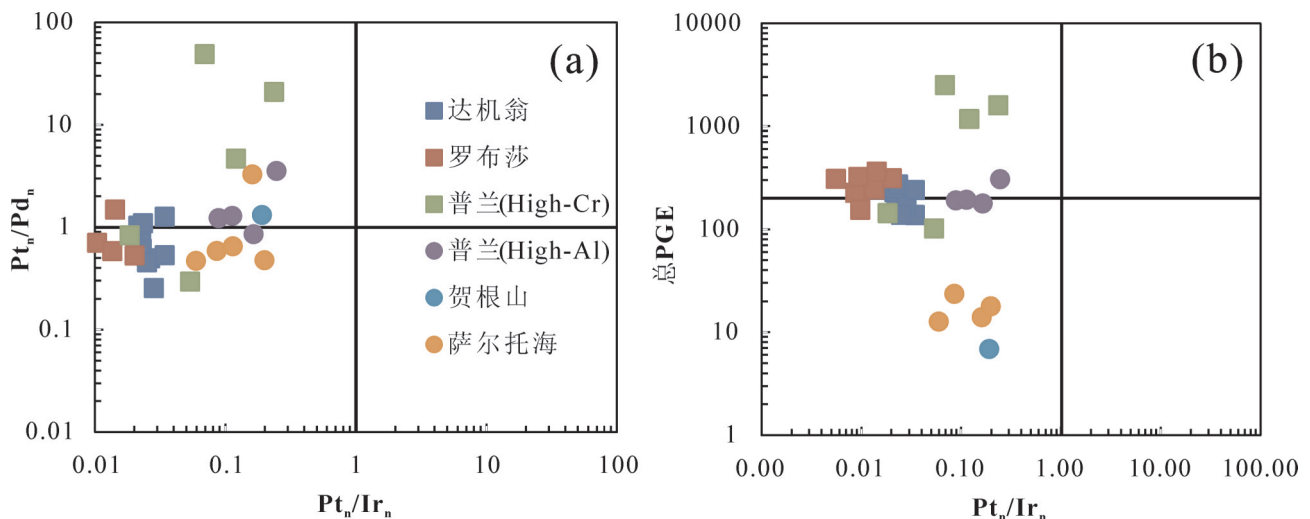


图6 不同地区豆荚状铬铁矿成分图解

a—铬铁矿的 $Pt_n/Pd_n$ — $Pt_n/Ir_n$ 图解; b—铬铁矿的总PGEs— $Pt_n/Ir_n$ 图解; 罗布莎、贺根山和萨尔托海数据来自文献[6]; 普兰数据来自文献[26]

Fig.6 Composition of podiform chromitite from different areas

a— $Pt_n/Pd_n$ — $Pt_n/Ir_n$  diagram for podiform chromitite; b—Total PGEs— $Pt_n/Ir_n$  for podiform chromitite; Luobusha, Hegenshan and Sartohay value after reference [6]; Purang value after reference [26]

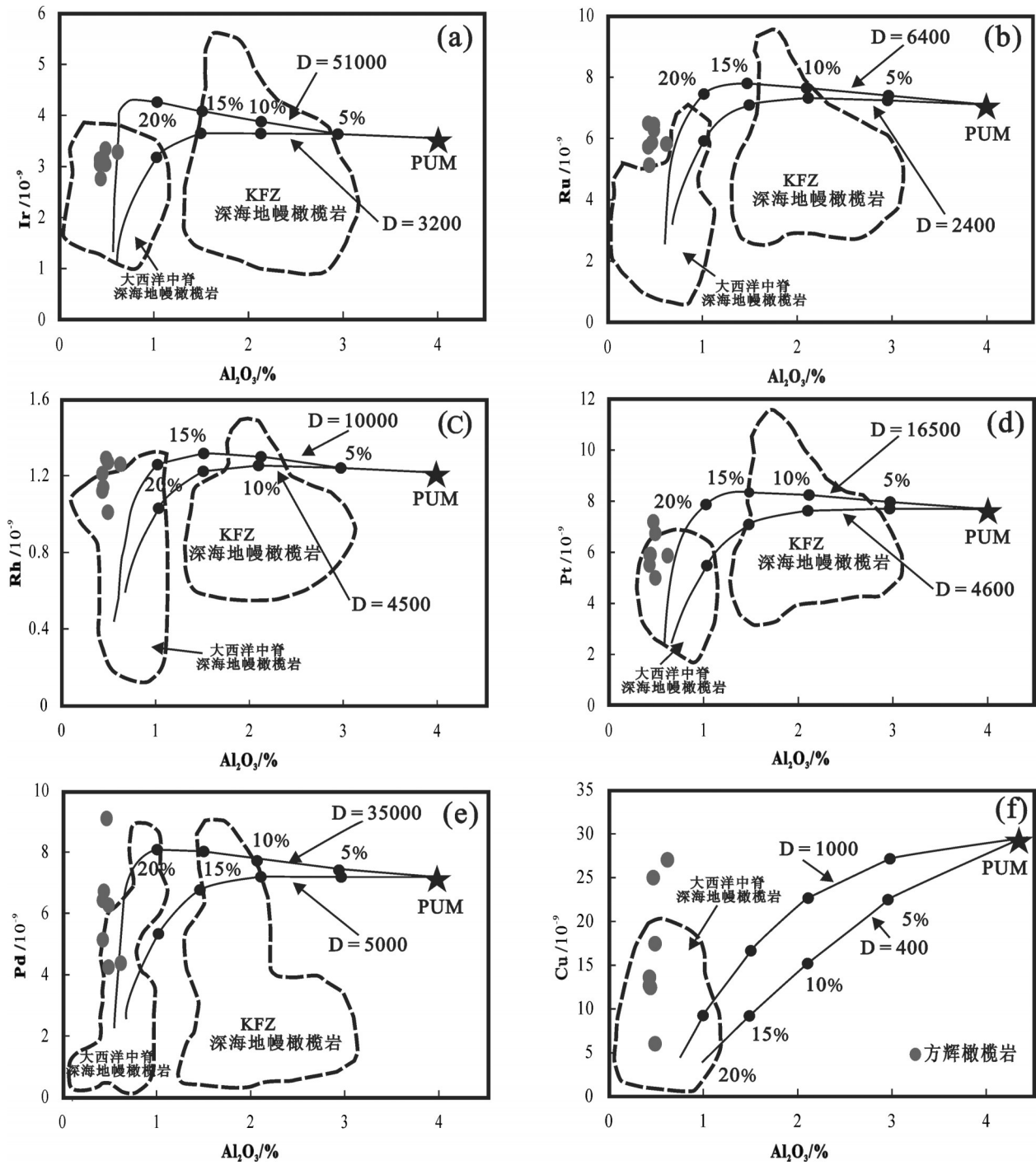


图7 达机翁方辉橄榄岩的Ir- $Al_2O_3$ (a)、Ru- $Al_2O_3$ (b)、Rh- $Al_2O_3$ (c)、Pt- $Al_2O_3$ (d)、Pd- $Al_2O_3$ (e)和Cu- $Al_2O_3$ (f)图解(据文献[45])  
 KFZ 深海地幔橄欖岩—Kane 破碎带(kane fracture zone)深海地幔橄欖岩(据文献[52]); PUM—原始上地幔

Fig.7 Plots of Ir- $Al_2O_3$  (a), Ru- $Al_2O_3$  (b), Rh- $Al_2O_3$  (c), Pt- $Al_2O_3$  (d), Pd- $Al_2O_3$  (e) and Cu- $Al_2O_3$  (f) for Dajiweng harzburgite (after reference [45])

KFZ abyssal peridotite—abyssal peridotite from the Kane Fracture Zone(after reference [52]); PUM—primitive upper mantle

地幔橄榄岩,因此达机翁方辉橄榄岩中的铂族元素(PGEs)主要包含在难熔的PGEs的矿物相中,如Os-Ir-Ru合金、Pt-Ir-Os合金、硫钨矿( $\text{RuS}_2$ )和硫钼矿( $\text{OsS}_2$ )的固熔体系列<sup>[62-64]</sup>。杨经绥等在西藏罗布莎铬铁矿采集了2件各1t的方辉橄榄岩围岩样品,进行了人工重砂矿物的分选,通过矿物成分、激光拉曼和X射线衍射光谱的研究,从中识别出了50余种矿物,其中包含有铂族元素的矿物主要有Fe-Os-Ir合金、Ni-Fe-Ir合金以及Ru-Fe-Os-Ir合金等。由于地幔橄榄岩中的IPGE通常以合金产出或者存在于高温的硫化物中,在部分熔融的过程中较PPGE具有更强的相容性,因此部分熔融作用会导致IPGE和PPGE的分馏作用<sup>[6, 8, 65]</sup>。经过高度部分熔融的残余体中的含有铂族元素的矿物主要富集IPGEs,而亏损PPGEs,原始地幔标准化的PGEs的分配模式应当为右倾的,PPGE亏损的模式,这与达机翁方辉橄榄岩的原始地幔标准化的PGEs分配模式值矛盾,反映达机翁方辉橄榄岩不仅仅是部分熔融作用的残余。

部分熔融作用会引起CaO与Rh/Ir, Pt/Ir和Pd/Ir之间的相关性,同时Rh/Ir、Pt/Ir和Pd/Ir的值应当低于球粒陨石的值<sup>[7, 66]</sup>。达机翁方辉橄榄岩的Pt/Ir的比值低于CI球粒陨石的值,而Rh/Ir和Pd/Ir的比值则高于CI球粒陨石的值(图8-a-c)。达机翁方辉橄榄岩较高的Rh/Ir和Pd/Ir比值不能简单地用部分熔融过程来解释。

不同的地幔源区具有不同的PGEs的含量,例如原始上部地幔(PUM)和亏损的大洋中脊型地幔(DMM)具有不同的PGEs的含量<sup>[67, 68]</sup>;同时硫化物-硅酸盐在熔体抽取过程的分配系数具有一定程度的不确定性<sup>[45]</sup>。Marchesi et al.利用原始上地幔作为部分熔融的源区,对部分熔融过程中 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 与PGEs和Cu的含量变化进行了模拟<sup>[45]</sup>。根据Cu、PGEs与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的部分熔融图解(图7),所有样品均反映达机翁地幔橄榄岩经历了>20%的部分熔融程度,表明达机翁地幔橄榄岩是高度亏损的部分熔融的残余。铂族元素Ir、Ru、Rh和Pt的含量变化较为集中,但均与部分熔融的曲线有所偏移。但是考虑到部分熔融的地幔源区的不确定性以及不同硫化物与硅酸盐之间分配系数的差异性,达机翁方辉橄榄岩中Ir、Ru、Rh和Pt元素的含量与利用部分熔融模型获得

的预测值基本是一致的(图7-a-d)<sup>[45]</sup>。但是,值得注意的是,Pd和Cu元素的含量较为分散(图7-e、f),明显偏离部分熔融曲线,相对于部分熔融模型的预测值具有明显的增加的趋势(图7)。因此,达机翁地幔橄榄岩并不仅仅是部分熔融的残余,可能还遭受了其他地质作用的改造。

达机翁方辉橄榄岩的PGEs的分布特征与雅鲁藏布江缝合带东段的罗布莎铬铁矿围岩的方辉橄榄岩<sup>[69]</sup>,中段日喀则地区的鹿曲方辉橄榄岩<sup>[8]</sup>,西段的仲巴方辉橄榄岩<sup>[7]</sup>,大洋钻探项目的大西洋洋中脊的1274A钻孔的高Se的方辉橄榄岩相似<sup>[45]</sup>,这种现象被认为是由于熔体-岩石反应造成的。

根据图7-e、f,达机翁方辉橄榄岩的Cu和Pd含量变化变为较大,且具有明显增加的趋势,可能是在部分熔融过程之后,由于熔体-岩石反应,造成了富Cu-Ni的硫化物加入引起的<sup>[45]</sup>。地幔岩石中的硫化物可以分为2类:一类是以包裹体的型式存在于硅酸盐相之中,这类硫化物具较高的Os和Ir含量,以及较低的Pd/Ir比值;另一类硫化物以镍黄铁矿为主的硫化物,这类硫化物填隙状产于矿物颗粒之间,具有较低的Os和Ir含量,以及较高的Pd/Ir<sup>[60]</sup>。Olivier et al.<sup>[60]</sup>认为地幔橄榄岩中的硅酸盐中的硫化物包裹体代表着熔融过程的残余,而矿物粒间的填隙状的硫化物代表着含有硫化物的熔体结晶的产物。因此,达机翁方辉橄榄岩具有高于CI球粒陨石的Rh/Ir和Pd/Ir的比值是由于粒间具有较高的Pd/Ir和Rh/Ir比值的硫化物的加入造成的。值得注意的是,交代硫化物的加入并没有导致岩石的Pt含量的显著增加,这种现象与雅鲁藏布江蛇绿岩带内的地幔橄榄岩以及大西洋的深海地幔橄榄岩的Pt的特征是一致的<sup>[7, 26, 45, 52]</sup>。Olivier et al.<sup>[60]</sup>对地幔橄榄岩的粒间硫化物进行了PGEs分析,发现粒间硫化物的铂族元素的分配模式与全岩的地幔橄榄岩一致,Pt元素相对于相邻的Rh和Pd均有明显的负异常。在熔体-岩石反应的过程中,粒间硫化物被加入到地幔橄榄岩中,然而由于Pt与Pd和Rh在粒间填隙状硫化物之间配分系数的差异,粒间硫化物是亏损Pt元素的,因此导致了达机翁方辉橄榄岩的Pt相对于Rh和Pd的亏损。

#### 6.4 豆荚状铬铁矿中PGEs分配模式的成因

达机翁豆荚状铬铁矿为高Cr型铬铁矿,具有



IPGE 和 Rh 明显富集以及 Pt, Pd 明显亏损的特征, 与雅鲁藏布江缝合带东段罗布莎豆荚状铬铁矿<sup>[41]</sup>、西段的普兰高 Cr 型铬铁矿<sup>[26]</sup>以及伊朗南部的贫硫化物的豆荚状铬铁矿具有相似的特征<sup>[46]</sup>。

Jannesary et al.<sup>[46]</sup>指出贫硫化物的铬铁矿中, 铂族元素矿物主要以早期结晶的硫钨矿为主, 伴生有少量的 Os-Ir 合金以及 Ir-Rh 硫化物, 以及极少的含铂族元素的贱金属硫化物和富 Ni 的硫化物。最近的原位分析工作显示, 铬尖晶石的晶格中所包含的 PGEs 的含量远不足以解释全岩的 PGEs 的含量, 因此豆荚状铬铁矿中的铂族元素是受包含在铬尖晶石以及次要的硅酸盐相中的铂族元素矿物所控制的<sup>[70]</sup>。

豆荚状铬铁矿成因的研究一直是铬铁矿成因理论的焦点, 但是目前为止对铬铁矿的成因尚未取得一致的认识。在 20 世纪初及更早的时期, 豆荚状铬铁矿与层状铬铁矿均被认为是岩浆的结晶分异作用形成的<sup>[71]</sup>, 但是豆荚状铬铁矿所具有的豆状结构是层状铬铁矿所缺失的, 指示其形成条件是上地壳不具备的<sup>[72]</sup>。20 世纪 80 年代末期, 研究者提出了熔融残余理论, 认为豆荚状铬铁矿的成分与寄主橄榄岩的熔融程度有关, 并认为豆荚状铬铁矿代表小型的岩浆房, 铬铁矿在此下沉<sup>[73]</sup>。20 世纪中期至今, 豆荚状铬铁矿被认为是岩石-熔体反应的产物, 且豆荚状铬铁矿周围的纯橄岩薄壳被认为是熔体交代寄主方辉橄榄岩的产物<sup>[11, 41, 74-76]</sup>。高 Cr 和高 Al 型铬铁矿被认为是分别由不同类型的母岩浆结晶而成的, 其中高 Cr 型的铬铁矿被认为来源于玻安质岩浆, 而高 Al 型铬铁矿被认为是来源于类似 MORB 的拉斑玄武质岩浆<sup>[11]</sup>。由于豆荚状铬铁矿成因存在较大的争议, 因此对豆荚状铬铁矿的 PGEs 的分配形式具有不同的解释。

熔体-岩石反应成矿是目前比较盛行的豆荚状铬铁矿的成因理论<sup>[41, 77]</sup>。达机翁豆荚状铬铁矿属于高 Cr 型铬铁矿, 根据该成因理论, 达机翁豆荚状铬铁矿是玻安质熔体与寄主的方辉橄榄岩反应的产物, 是由玻安质岩浆结晶形成的。玻安岩(boninite)于 1980 年首次被发现于日本的 Bonin Island 的始新世火山链中。Meijer<sup>[78]</sup>将“玻安岩、岛弧拉板玄武岩和钙碱性岩”称为“玻安岩系列”。玻安岩的特征是高 Mg、Cr 和 Ni, 低 TiO<sub>2</sub>, 富集 LREE, 亏损 HFSE, 斑

晶主要为斜顽火辉石或斜方辉石<sup>[79, 80]</sup>。玻安质岩浆起源于强烈亏损的上部地幔的岩石组合, 由于在形成玻安质岩浆之前, 大量的 S 已经被带走, 因此形成的玻安质熔体是 S 不饱和的岩浆<sup>[81]</sup>。形成豆荚状铬铁矿的玻安质岩浆起源于比豆荚状铬铁矿更深的形成深度, 当来源于深部的玻安质岩浆侵位到了亏损的方辉橄榄岩中, 与方辉橄榄岩发生反应, 由于方辉橄榄岩早期经历了熔体抽取作用, 因此形成了 S 更不饱和的岩浆。IPGE 被认为是在岩浆结晶的早期阶段从熔体中与尖晶石同时结晶分离出来, 而 PPGE 则被遗留在残余的岩浆熔体之中<sup>[4, 6, 82]</sup>。伴随着尖晶石的结晶, IPGEs 以硫钨矿, 硫钼矿, Os-Ir 合金等包裹体的形式加入到达机翁豆荚状铬铁矿中。由于形成达机翁豆荚状铬铁矿的岩浆是 S 强烈不饱和的岩浆, 因此在达机翁豆荚状铬铁矿形成的过程中, 没有硫化物的沉淀, 因此形成了 Pt 和 Pd 亏损的达机翁豆荚状铬铁矿。与此同时, 在豆荚状铬铁矿形成过程中, 由于富含 IPGEs 的铂族元素矿物伴随尖晶石的沉淀, 导致了玻安岩具有较高的 Pd 和 Pt 的含量, 以及很低的 Ir, Os 和 Ru 的含量<sup>[41]</sup>。值得注意的是, 尽管高 Al 型铬铁矿与高 Cr 型铬铁矿在 PGEs 具有相似的分配模式, 但是高 Cr 型铬铁矿的 PGEs 的含量总体上是高于高 Al 型铬铁矿的(图 5-c), 指示了形成铬铁矿的岩浆中 S 的饱和度对豆荚状铬铁矿 PGEs 的分配模式影响较小, 却是控制着豆荚状铬铁矿的 PGEs 含量。

鲍佩生<sup>[83]</sup>指出, 豆荚状铬铁矿的岩石-熔体反应说是建立在微量元素变异的基础上的。玻安岩中具有很低的 Cr 含量, 世界上不同地区玻安岩的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介于 0.037% ~ 0.34%, 与铬尖晶石的 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量(8.22% ~ 34.87%)相比是微不足道的, 因此, 玻安质熔体中 Cr 的含量远不足以形成几十万 t、几百万 t 规模的铬铁矿。鲍佩生等<sup>[83, 84, 86]</sup>和 Wang et al.<sup>[83]</sup>提出豆荚状铬铁矿是原始地幔岩高度熔融再造的产物, 其成矿模式包括 2 个互相平行的演化系列: 即造岩矿物(Ol、Opx、Cpx)随熔融程度的增高逐渐向富镁的方向演化, 最终形成纯橄岩; 另一系列是副矿物铬尖晶石最终形成铬铁矿, 从而导致铬铁矿与高熔杂岩带紧密伴生。IPGE 的铬铁矿-熔体分配系数远高于 PPGE, 因此在部分熔融的过程中, 相对于 Pt 和 Pd, IPGE 在铬尖晶石中具有更高的相容性<sup>[4, 87, 88]</sup>。

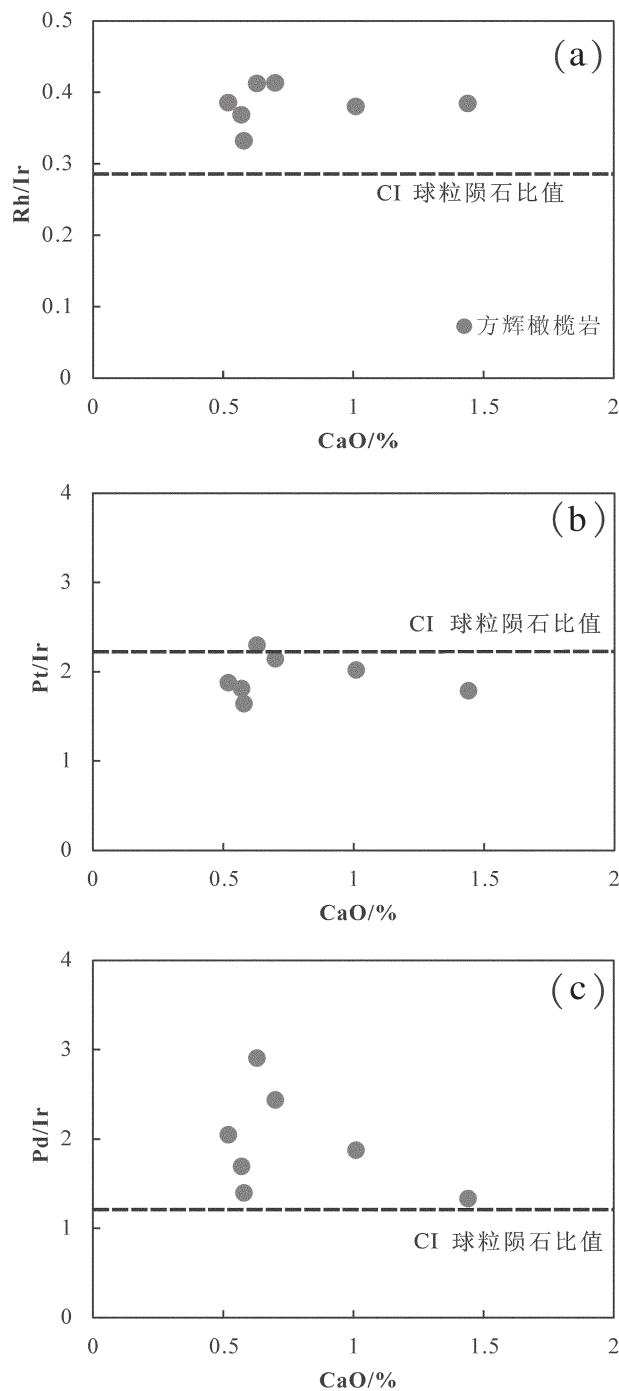


图8 达机翁方辉橄榄岩 Rh/Ir-CaO(a)、Pt/Ir-CaO(b)和 Pd/Ir-CaO(c)图解

CI 球粒陨石比值据文献[40]

Fig.8 Plots of Rh/Ir-CaO (a), Pt/Ir-CaO (b) and Pd/Ir-CaO (c) for Dajiweng harzburgite  
CI chondritic ratio after reference [40]

同时 IPGE 的高熔点<sup>[89]</sup>, 较高的结晶温度和低溶解度<sup>[90]</sup>的特点, 决定了 IPGEs 合金要早于 PPGE 合金结晶, 因此 IPGE 优先从熔体中分离出来。当原始地幔岩高度熔融时, 形成纯橄岩-方辉橄榄岩杂岩带, 细小而分散的副矿物铬尖晶石和原始地幔岩的辉石中出熔的尖晶石经过融化得到初步富集, 因此引起尖晶石含量的明显增高。当熔融程度进一步增高时, 分散在纯橄岩中的铬尖晶石逐渐融化形成分开的熔滴, 并最终聚集形成铬铁矿矿浆<sup>[83]</sup>。铬铁矿形成过程中, IPGEs 主要以硫铁矿和 Ir-Os 合金的形式作为尖晶石结晶的核心, 使铂族元素发生分离, 致使残余的熔体中亏损 Ir、Os 和 Ru, 而富集 Pt 和 Pd。由于 Pt、Pd 元素的低熔点和低分离系数, 在铬铁矿形成时没有或只有很少 Pt 和 Pd 的加入, 因此形成了达机翁豆荚状铬铁矿 Pt、Pd 亏损的 PGEs 分配模式。

由此可知, 豆荚状铬铁矿的熔体-岩石反应学说和豆荚状铬铁矿地幔橄榄岩高度熔融再造学说均可解释铬铁矿的 PGEs 分配模式。近年来, Bai et al.<sup>[91]</sup>、白文吉等<sup>[48]</sup>、杨经绥等<sup>[92]</sup>在罗布莎豆荚状铬铁矿中发现了铂族元素合金和自然元素矿物等, 包含有 Os-Ir 合金、Os-Ir-Ru 合金、金刚石以及自然 Fe、Ni 等。杨经绥等<sup>[93]</sup>在极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中同样发现了金刚石和异常矿物群, 可能指示了这些超高压矿物在豆荚状铬铁矿中产出是一种普遍的现象。杨经绥等<sup>[94]</sup>提出了一种不同于金伯利岩型金刚石, 超高压变质型金刚石和陨石撞击型金刚石的一种新的蛇绿岩型金刚石。这些超高压矿物的发现, 可能指示了豆荚状铬铁矿的深部成因(>120 km), 罗布莎铬铁矿可能来自于地幔深部<sup>[99]</sup>。因此, 豆荚状铬铁矿的成因理论目前尚无定论, 豆荚状铬铁矿的 PGEs 的分配模式的成因仍然有待研究。

### 6.5 雅鲁藏布江缝合带豆荚状铬铁矿的找矿前景

铬具有质硬、耐火、耐磨、耐高温和抗腐蚀性的特征, 因此被广泛的应用于冶金工业、化工业及耐火材料和铸造业。铬铁矿是铬的最主要的来源。目前世界上已有南非、哈萨克斯坦、津巴布韦和芬兰等 40 多个国家和地区发现了铬铁矿, 但是铬铁矿的分布具有不平衡性, 其中南非和哈萨克斯坦是世界上铬铁矿资源最丰富的国家<sup>[95, 96]</sup>。中国的铬铁矿

矿产主要分布于西藏、新疆、甘肃和内蒙4省,其中罗布莎铬铁矿是中国最大的铬铁矿,资源量约为500万t<sup>[95]</sup>。2007年统计数据显示,中国铬铁矿的产量仅占全世界铬铁矿产量的0.16%。近年来随着中国国民经济的快速发展,对铬的需求量快速增长,中国对国外铬铁矿资源的依赖程度已高达90%以上<sup>[97]</sup>,因此亟需寻找大型冶金级铬铁矿来解决资源供不应求的问题,从根本上缓解对国外矿产资源的依赖。

世界上原生的铬铁矿主要包含2种类型,一类为层状铬铁矿矿床,主要产于古老地台的层状镁铁-超镁铁杂岩中;另一类为豆荚状铬铁矿矿床,主要产于显生宙以来被作为外来杂岩体的阿尔卑斯型地幔橄榄岩中,矿体边部普遍存在一定厚度的纯橄岩外壳<sup>[98]</sup>。层状铬铁矿通常分布于稳定的克拉通区域,如南非的Bushveld矿床<sup>[99]</sup>;而豆荚状铬铁矿矿床主要分布在板块结合带,如哈萨克斯坦的肯皮耳塞豆荚状铬铁矿,矿体规模最大,储量最高达上亿t<sup>[100]</sup>。中国西藏、新疆、内蒙古等地的铬铁矿属于典型的豆荚状铬铁矿矿床<sup>[75, 86, 96, 101]</sup>。罗布莎铬铁矿位于雅鲁藏布江蛇绿岩带的东段,是中国目前研究程度最高,矿床规模最大的豆荚状铬铁矿矿床<sup>[75, 77, 92, 93, 101]</sup>。雅鲁藏布江蛇绿岩带自东到西分布着多个蛇绿岩体,主要包括有罗布莎蛇绿岩、泽当蛇绿岩、大竹卡蛇绿岩、白朗蛇绿岩、吉定蛇绿岩、桑桑蛇绿岩、萨嘎蛇绿岩、仲巴蛇绿岩、西段南亚带的休古噶布蛇绿岩、普兰蛇绿岩、东波蛇绿岩以及西段北亚带的达机翁蛇绿岩等<sup>[29]</sup>。其中雅鲁藏布江蛇绿岩西段南亚带的普兰岩体(600 km<sup>2</sup>)、东波岩体(400 km<sup>2</sup>)和休古噶布岩体(700 km<sup>2</sup>)规模远大于罗布莎岩体(70 km<sup>2</sup>)<sup>[48, 96]</sup>。

杨经绥等<sup>[102]</sup>指出世界上大型的蛇绿岩型铬铁矿均产在大型的地幔橄榄岩体中,如哈萨克斯坦的肯皮耳塞铬铁矿矿床所在地幔橄榄岩的规模在2000 km<sup>2</sup>以上,仅南部铬铁矿的储量可达3亿t,俄罗斯乌拉尔的3个大型地幔橄榄岩中产有6.8亿t铬铁矿,其中最小的拉伊兹超镁铁岩体面积在100 km<sup>2</sup>以上,铬铁矿储量1.9亿t<sup>[96, 103]</sup>。杨经绥等<sup>[102]</sup>同时指出小岩体也可能成大矿,因此在雅鲁藏布江缝合带寻找铬铁矿时,不能忽略小岩体。

Zhou et al.<sup>[104]</sup>利用Sm-Nd法测定了罗布莎超基性岩体中辉长岩和辉绿岩岩脉的年龄,得出的斜

长石、辉石及2个全岩的内部等时线的年龄值为(177±31) Ma,显示该岩墙形成于中侏罗世。韦栋梁等<sup>[105]</sup>对泽当蛇绿岩中的玄武岩进行了全岩的Sm-Nd同位素分析,得到的等时线年龄为(175±20) Ma,认为泽当蛇绿岩形成于中侏罗世。刘维亮等<sup>[106]</sup>采集了泽当岩体中辉绿岩和放射虫硅质岩之间的枕状和块状的玄武岩样品,通过SHRIMP锆石U-Pb测年得到蛇绿岩中玄武岩的形成年龄为(154.9±2.0) Ma。Dai et al.<sup>[107]</sup>报道了日喀则蛇绿岩中侵入在地幔橄榄岩中的石英闪长岩,辉长岩以及辉绿岩墙的年龄,指出日喀则蛇绿岩年龄在130~120 Ma,形成于初始俯冲过程中的弧前扩张环境。韦振权等<sup>[108]</sup>应用SHRIMP锆石U-Pb法对休古噶布蛇绿岩中的辉绿岩岩墙进行了测年,获得辉绿岩的形成年龄为(122.3±2.4) Ma,代表了休古噶布-达巴特提斯洋盆形成的世代。刘钊等<sup>[19]</sup>对普兰岩体边部的辉长岩样品进行了研究,该辉长岩具有N-MORB的特征,样品的锆石LA-ICP-MS年龄为(130±3) Ma。熊发挥等<sup>[122]</sup>报道了东波地幔橄榄岩中的辉石岩和辉长岩,辉石岩和辉长岩的年龄分别为(130±0.5) Ma和(128±1.1) Ma。

沿雅鲁藏布江缝合带分布的蛇绿岩体的地幔橄榄岩单元均以方辉橄榄岩为主,同时有少量的二辉橄榄岩和纯橄岩<sup>[7, 15, 23, 36, 38, 39]</sup>。豆荚状铬铁矿多产于方辉橄榄岩中,通过对比雅鲁藏布江缝合带内方辉橄榄岩的主量元素地球化学特征(图4),笔者发现不同地区的地幔橄榄岩均相对于原始地幔均具有较高的MgO含量,以及较低的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO的含量。同时不同地区的地幔橄榄岩的铂族元素也表现出了相似的特征,均以Os、Ru和Rh、Pd分别相对于Ir和Pt的富集为特征,表明了方辉橄榄岩在经历了部分熔融之后,可能经历了熔体-岩石反应<sup>[7, 8, 16, 26]</sup>。因此,雅鲁藏布江缝合带内的蛇绿岩虽呈现东早西晚的特点,但是大量分布的超镁铁岩体在岩石组合、地球化学特征、成因以及形成时代等方面,均具有相似性。

杨经绥等<sup>[23, 96]</sup>报道了在雅鲁藏布江缝合带西段南亚带的东波和普兰超镁铁岩体中发现了豆荚状铬铁矿矿体和矿化的特征,同时雅鲁藏布江缝合带的西段北亚带的达机翁岩体同样存在有豆荚状铬铁矿。因此,雅鲁藏布江缝合带内大量分布的超镁铁岩体是中国铬铁矿找矿的有利远景区<sup>[23, 96, 109]</sup>。



## 7 结 论

(1)达机翁地幔橄榄岩具有较高的MgO含量以及较低的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO等含量,达机翁地幔橄榄岩经历了>20%的部分熔融程度,表明达机翁地幔橄榄岩是高度亏损的部分熔融的残余。

(2)达机翁方辉橄榄岩的原始地幔标准化的PGEs分配模式以Os、Ru和Rh、Pd分别相对于Ir和Pt的富集为特征,具有较高的Rh/Ir和Pd/Ir比值,这些特征指示了达机翁地幔橄榄岩不仅仅是部分熔融的残余,同时可能遭受了地幔流体的改造作用即熔体-岩石反应。

(3)达机翁豆荚状铬铁矿具有Os、Ir、Ru和Rh相对于原始地幔明显富集,Pt和Pd明显亏损的右倾模式。

(4)雅鲁藏布江缝合带从东到西分布有多个超镁铁岩体,不同岩体在岩石组合、地球化学特征以及形成时代上均具有相似性,因此这些超镁铁岩体是中国铬铁矿找矿的有利远景区。

**致谢:** 西藏地质二队的巴登珠教授级高工、中国地质大学(武汉)的李奇维和周文达研究生、中国地质大学(北京)的张岚、赵一珏和高健研究生在野外工作中给予了大力的支持和帮助,匿名审稿人以及责任编辑杨艳老师对本文提出了很好的修改意见,在此一并致以诚挚的谢意。

### 参考文献(References):

- [1] Borisov A, Palme H. The solubility of iridium in silicate melts: New data from experiments with Ir<sub>10</sub> Pt<sub>90</sub> alloys[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(3): 481–485.
- [2] 陈道公, 支霞臣, 杨海涛. 地球化学[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1994: 1–360.  
Chen Daogong, Zhi Xiachen, Yang Haitao. *Geochemistry*[M]. Hefei: China University of Technology Press, 1994: 1–360 (in Chinese).
- [3] Keays R R, Scott R B. Precious metals in ocean-ridge basalts: implications for basalts as source rocks for gold mineralization[J]. *Economic Geology*, 1976, 71(4): 705–720.
- [4] Barnes S, Naldrett A J, Gorton M P. The origin of the fractionation of platinum-group elements in terrestrial magmas[J]. *Chemical Geology*, 1985, 53(3): 303–323.
- [5] 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.

- [6] Zhou M, Sun M, Keays R R, et al. Controls on platinum-group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high-Cr and high-Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(4): 677–688.
- [7] 熊发挥, 杨经绥, 刘钊. 豆荚状铬铁矿多阶段形成过程的讨论[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 820–839.  
Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liu Zhao. Multi-stage formation of the podiform chromitite[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 820–839 (in Chinese with English abstract)
- [8] Chen G, Xia B. Platinum-group elemental geochemistry of mafic and ultramafic rocks from the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008, 32: 406–422.
- [9] Keays R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. *Lithos*, 1995, 34(1): 1–18.
- [10] 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.
- [11] Zhou M F, Robinson P T. High-Cr and high-Al podiform chromitites, western China: Relationship to partial melting and melt/rock reaction in the upper mantle[J]. *International Geology Review*, 1994, 36(7): 678–686.
- [12] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): a peculiar oceanic lithosphere[J]. *Nature*, 1981, 294: 414–417.
- [13] Tapponnier P, Mercier J L, Proust F, et al. The Tibetan side of the India-Eurasia collision[J]. *Nature*, 1981, 294: 405–410.
- [14] Allegre C J, Courtillot V, Tapponnier P, et al. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt[J]. *Nature*, 1984, 307: 17–22.
- [15] Xu X Z, Yang J S, Ba D Z, et al. Petrogenesis of the Kangjinja peridotite in the Luobusa ophiolite, Southern Tibet[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(4): 553–568.
- [16] 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.
- [17] 李文霞, 赵志丹, 朱弟成, 等. 西藏雅鲁藏布蛇绿岩形成构造环境的地球化学鉴别[J]. *岩石学报*, 2012, 28(5): 1663–1673.  
Li Wenxia, Zhao Zhidan, Zhu Dicheng, et al. Geochemical discrimination of tectonic environments of the Yalung Zangpo ophiolite in southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(5): 1663–1673 (in Chinese with English abstract).
- [18] 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 等. 新特提斯演化的热点与洋脊相互

- 作用: 西藏南部晚侏罗世一早白垩世岩浆作用推论[J]. 岩石学报, 2008, 24(2): 225–237.
- Zhu Dicheng, Mo Xuanxue, Wang Liquan, et al. Hotspot–ridge interaction for the evolution of Neo–Tethys: Insights from the Late Jurassic–Early Cretaceous magnetism in southern Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(2): 225–237 (in Chinese with English abstract).
- [19] 刘钊, 李源, 熊发挥, 等. 西藏西部普兰蛇绿岩中的 MOR 型辉长岩: 岩石学和年代学[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3269–3279.
- Liu Zhao, Liyuan, Xiong Fahui, et al. Petrology and geochronology of MOR gabbro in the Purang ophiolite of western Tibet, China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3269–3279 (in Chinese with English abstract).
- [20] Zhu D, Zhao Z, Niu Y, et al. The origin and pre–Cenozoic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(4): 1429–1454.
- [21] Liu C Z, Wu F Y, Wilde 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): 413–422.
- [22] 熊发挥, 杨经绥, 梁凤华, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩中锆石 U–Pb 定年及地质意义[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3223–3238.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liang Fenghua, et al. Zircon U–Pb ages of the Dongbo ophiolite in the western Yarlung Zangbo suture zone and their geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(11): 3223–3238 (in Chinese with English abstract).
- [23] 杨经绥, 熊发挥, 郭国林, 等. 东波超镁铁岩体: 西藏雅鲁藏布江缝合带西段一个甚具铬铁矿前景的地幔橄榄岩体[J]. 岩石学报, 2012, 27(11): 3207–3222.
- Yang Jingsui, Xiong Fahui, Guo Guolin, et al. The Dongbo ultramafic massif: A mantle peridotite in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet, with excellent prospects for a major chromite deposit[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27: 3207–3222 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩 OIB 型玄武岩的厘定及其形成环境[J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 1909–1932.
- Liu Fei, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. Ascertainment and environment of the OIB–type basalts from the Dongbo ophiolite in the western part of Yarlung Zangbo Suture Zone[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 1909–1932 (in Chinese with English abstract).
- [25] Zhou M F, Robinson P T. Origin and tectonic environment of podiform chromite deposits[J]. *Economic Geology*. 1997, 92(2): 259–262.
- [26] 熊发挥, 杨经绥, 刘钊, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带西段发现高铬型和高铝型豆荚状铬铁矿体[J]. 岩石学报, 2013, 29(6): 1878–1908.
- Xiong Fahui, Yang Jingsui, Liu Zhao, et al. High–Cr and high–Al chromite found in western Yarlung–Zangbo suture zone in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(6): 1878–1908 (in Chinese with English abstract).
- [27] Girardeau J, Mercier J, Yougong Z. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications[J]. *Tectonics*, 1985, 4(3): 267–288.
- [28] Burg J P, Chen G M. Tectonics and structural zonation of southern Tibet, China[J]. *Nature*, 1984, 311: 219–223.
- [29] Dai J, Wang C, Hébert R, et al. Petrology and geochemistry of peridotites in the Zhongba ophiolite, Yarlung Zangbo Suture Zone: Implications for the Early Cretaceous intra–oceanic subduction zone within the Neo–Tethys[J]. *Chemical Geology*, 2011, 288(2011): 133–148.
- [30] 徐德明, 黄圭成, 雷义均. 西藏西南部休古嘎布蛇绿岩的成因: 岩石学和地球化学证据[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(4): 490–501.
- Xu Deming, Huang Guicheng, Lei Yijun, et al. Origin of the Xiugugabu ophiolite massif, SW Tibet: Evidence from petrology and geochemistry[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, 31(4): 490–501 (in Chinese with English abstract).
- [31] 潘桂棠. 东特提斯地质构造形成演化[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1–218.
- Pan Guitang. *Geological Tectonic Evolution in the Eastern Tethys*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997: 1–218 (in Chinese).
- [32] 邱瑞照, 邓晋福, 周肃, 等. 青藏高原西部蛇绿岩类型: 岩石学与地球化学证据[J]. 地学前缘, 2005, 12(2): 277–291.
- Qiu Ruizhao, Deng Jinfu, Zhou, et al. Ophiolite types in western Qianghai–Tibetan plateau: Evidences from petrology and geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 2005, 12(2): 277–291 (in Chinese with English abstract).
- [33] 吴新国, 贾建称, 崔邢涛. 雅鲁藏布江缝合带开合演化模式的探讨[J]. 现代地质, 2005, 19(4): 488–494.
- Wu Xinguo, Jia Jiancheng, Cui Xingtao. Discussion on the model of evolution of open–close structure of the Yaluzangbu Suture Zone[J]. *Geoscience*, 2005, 19(4): 488–494 (in Chinese with English abstract).
- [34] 杨经绥, 徐向珍, 李源, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带的普兰地幔橄榄岩中发现金刚石: 蛇绿岩型金刚石分类的提出[J]. 岩石学报, 2011, 27(11): 3171–3178.
- Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Li Yuan, et al. Diamonds recovered

- from peridotite of the Purang ophiolite in the Yarlung – Zangbo suture of Tibet: A proposal for a new type of diamond occurrence[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (11): 3171–3178 (in Chinese with English abstract).
- [35] Yamamoto S, Komiya T, Yamamoto H, et al. Recycled crustal zircons from podiform chromitites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Island Arc*, 2013, 22(1): 89–103.
- [36] 徐向珍, 杨经绥, 郭国林, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段普兰蛇绿岩中地幔橄榄岩的岩石学研究[J]. *岩石学报*, 2012, 27(11): 3179–3196.
- Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Guo Guolin, et al. Lithological research on the Purang mantle peridotite in western Yarlung – Zangbo suture zone in Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27 (11): 3179–3196 (in Chinese with English abstract).
- [37] Bédard É, 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(1): 48–67.
- [38] 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榄岩成因及构造意义[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*, 2011, 27: 3239–3254 (in Chinese with English abstract).
- [39] Bezard R, Hébert R, Wang C, et al. Petrology and geochemistry of the Xiugugabu ophiolitic massif, western Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Lithos*, 2011, 125(1): 347–367.
- [40] McDonough W F, Sun S. The composition of the Earth[J]. *Chemical Geology*, 1995, 120(3): 223–253.
- [41] Zhou M F, Sun M, Keays R R, et al. Controls on platinum–group elemental distributions of podiform chromitites: A case study of high–Cr and high–Al chromitites from Chinese orogenic belts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(4): 677–688.
- [42] 牛晓露, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江西段东波超镁铁岩体经历了俯冲带流体的改造: 来自铂族元素的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 756–766.
- Niu Xiaolu, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. The reformation of the Dongbo ultramafic rock massif in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone by subduction– related fluids: Evidence from the platinum–group elements (PGE)[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 756– 766 (in Chinese with English abstract).
- [43] Xiong Y, Wood S A. Experimental quantification of hydrothermal solubility of platinum–group elements with special reference to porphyry copper environments[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2000, 68(1/3): 1–28.
- [44] Wood S A, Pan P, Zhang Y, et al. The solubility of Pt and Pd sulfides and Au in bisulfide solutions[J]. *Mineralium Deposita*, 1994, 29(4): 309–317.
- [45] Marchesi C, Garrido C J, Harvey J, et al. Platinum– group elements, S, Se and Cu in highly depleted abyssal peridotites from the Mid–Atlantic Ocean Ridge (ODP Hole 1274A): Influence of hydrothermal and magmatic processes[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2013, 166(5): 1521–1538.
- [46] Jannessary M R, Melcher F, Lodziak J, et al. Review of platinum–group element distribution and mineralogy in chromitite ores from southern Iran[J]. *Ore Geology Reviews*, 2012, 48: 278–305.
- [47] Burgath K P, Krauss U, Mohr M. Chromium ores and platinum–group element occurrences in Europe and Turkey: Inventory, evaluation and possibilities[J]. *Chron Rech min, no hors série*, 2002: 55–75.
- [48] 白文吉, 方青松, 杨经绥, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩豆荚状铬铁矿中的铂族元素和贱金属合金[J]. *地球学报*, 2004, 25(4): 385–396.
- Bai Wenji, Fang Qingsong, Yang Jingsui, et al. The PGE and base – metal Alloys in the Podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2004, 25 (4): 385–396 (in Chinese with English abstract).
- [49] Yang J, Dobrzhinetskaya L, Bai W, et al. Diamond– and coesite–bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- [50] Xu X Z, Yang J S, Chen Y S, et al. Unusual mantle mineral group from chromitite orebody Cr–11 in Luobusa ophiolite of Yarlung–Zangbo suture zone, Tibet[J]. *Journal of Earth Science*, 2009, 20 (2): 284–302.
- [51] Yang J S, Bai W J, Fang Q S, et al. Silicon–rutile—an ultra–high pressure (UHP) mineral from an ophiolite[J]. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(7): 528–531.
- [52] Luguet A, Lorand J, Seyler M. Sulfide petrology and highly siderophile element geochemistry of abyssal peridotites: A coupled study of samples from the Kane Fracture Zone (45 W 23 20N, MARK Area, Atlantic Ocean) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2003, 67(8): 1553–1570.
- [53] Woodland S J, Pearson D G, Thirlwall M F. A platinum group element and Re–Os isotope investigation of siderophile element recycling in subduction zones: Comparison of Grenada, Lesser Antilles Arc, and the Izu–Bonin Arc[J]. *Journal of Petrology*, 2002, 43(1): 171–198.
- [54] Mitchell R H, Keays R R. Abundance and distribution of gold, palladium and iridium in some spinel and garnet lherzolites: implications for the nature and origin of precious metal– rich

- intergranular components in the upper mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1981, 45(12): 2425–2442.
- [55] Guo J, Griffin W L, O'Reilly S Y. Geochemistry and origin of sulphide minerals in mantle xenoliths: Qilin, Southeastern China[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(7): 1125–1149.
- [56] Bulanova G P, Griffin W L, Ryan C G, et al. Trace elements in sulfide inclusions from Yakutian diamonds[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1996, 124(2): 111–125.
- [57] Pattou L, Lorand J P, Gros M. Non-chondritic platinum-group element ratios in the Earth's mantle[J]. *Nature*, 1996, 379(6567): 712–715.
- [58] Jagoutz E, Palme H, Baddenhausen H, et al. The abundances of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules[C]. *Proc Lunar Planet Sci Conf 10th*: 2031–2050.
- [59] Lorand J, Pattou L, Gros M. Fractionation of platinum-group elements and gold in the upper mantle: A detailed study in Pyrenean orogenic lherzolites[J]. *Journal of Petrology*, 1999, 40(6): 957–981.
- [60] Alard O, Griffin W L, Lorand J P, et al. Non-chondritic distribution of the highly siderophile elements in mantle sulphides[J]. *Nature*, 2000, 407(6806): 891–894.
- [61] Walker R J, Carlson R W, Shirey S B, et al. Os, Sr, Nd, and Pb isotope systematics of southern African peridotite xenoliths: implications for the chemical evolution of subcontinental mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1989, 53(7): 1583–1595.
- [62] Lorand J, Alard O, Luguët A. Platinum-group element micronuggets and refertilization process in Lherz orogenic peridotite (northeastern Pyrenees, France)[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 289(1): 298–310.
- [63] Fonseca R O, Laurenz V, Mallmann G, et al. New constraints on the genesis and long-term stability of Os-rich alloys in the Earth's mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, 87: 227–242.
- [64] Luguët A, Shirey S B, Lorand J, et al. Residual platinum-group minerals from highly depleted harzburgites of the Lherz massif (France) and their role in HSE fractionation of the mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71(12): 3082–3097.
- [65] Fryer B J, Greenough J D. Evidence for mantle heterogeneity from platinum-group-element abundances in Indian Ocean basalts[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1992, 29(11): 2329–2340.
- [66] Lorand J, Reisberg L, Bedini R M. Platinum-group elements and melt percolation processes in Sidamo spinel peridotite xenoliths, Ethiopia, East African Rift[J]. *Chemical Geology*, 2003, 196(1): 57–75.
- [67] Becker H, Horan M F, Walker R J, et al. Highly siderophile element composition of the Earth's primitive upper mantle: Constraints from new data on peridotite massifs and xenoliths[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2006, 70(17): 4528–4550.
- [68] Workman R K, Hart S R. Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 231(1): 53–72.
- [69] 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.
- [70] Pagé P, Barnes S, Bédard J H, et al. In situ determination of Os, Ir, and Ru in chromites formed from komatiite, tholeiite and boninite magmas: Implications for chromite control of Os, Ir and Ru during partial melting and crystal fractionation[J]. *Chemical Geology*, 2012, 302: 3–15.
- [71] Fisher L W. Origin of chromite deposits[J]. *Economic Geology*, 1929, 24(7): 691–721.
- [72] Thayer T P. Gravity differentiation and magmatic re-emplacment of podiform chromite deposits[J]. *Econ. Geol. Monogr.*, 1969, 4: 132–146.
- [73] Neary C R, Brown M A. Chromites from the Al'Ays Complex, Saudi Arabia, and the Semail Complex, Oman[J]. *Evolution and mineralization of the Arabian Shield. Al Shanti, AMS Ed. IAG Bull.*, 1979, 2: 193–205.
- [74] Uysal İ, Tarkian M, Sadiklar M B, et al. Platinum-group-element geochemistry and mineralogy of ophiolitic chromitites from the Kop mountains, Northeastern Turkey[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2007, 45(2): 355–377.
- [75] 周美夫, 白文吉. 对豆荚状铬铁矿床成因的认识[J]. *矿床地质*, 1994, 13(3): 242–249.  
Zhou Meifu, Bai Wenji. The origin of the podiform chromite deposits[J]. *Mineral deposits*, 1994, 13(3): 242–249 (in Chinese with English abstract).
- [76] Zhou M F, Robinson P T, Malpas J, et al. REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet[J]. *Journal of Petrology*, 2005, 46(3): 615–639.
- [77] 周二斌, 杨竹森, 江万, 等. 藏南罗布莎铬铁矿床铬尖晶石矿物学与矿床成因研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(7): 2060–2072.  
Zhou Erbin, Yang Zhusen, Jiang Wan, et al. Study on mineralogy of Cr-spinel and genesis of Luobusha chromite deposit in South Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(7): 2060–2072 (in Chinese with English abstract).
- [78] Meijer A. Primitive arc volcanism and a boninite series: Examples



- from western Pacific island arcs[J]. *The Tectonic and Geologic Evolution of Southeast Asian Seas and Islands*, 1980: 269–282.
- [79] Kyser T K, Cameron W E, Nisbet E G. Boninite petrogenesis and alteration history: Constraints from stable isotope compositions of boninites from Cape Vogel, New Caledonia and Cyprus[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 93(2): 222–226.
- [80] Hickey R L, Frey F A. Geochemical characteristics of boninite series volcanics: Implications for their source[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1982, 46(11): 2099–2115.
- [81] Hamlyn P R, Keays R R. Sulfur saturation and second-stage melts; application to the Bushveld platinum metal deposits[J]. *Economic Geology*, 1986, 81(6): 1431–1445.
- [82] Keays R R. The role of komatiitic and picritic magmatism and S-saturation in the formation of ore deposits[J]. *Lithos*, 1995, 34(1): 1–18.
- [83] 鲍佩声. 再论蛇绿岩中豆荚状铬铁矿的成因——质疑岩石/熔体反应成矿说[J]. *地质通报*, 2009, 28(12): 1941–1961.  
Bao Peisheng. Further discussion on the genesis of the podiform chromite deposits in the ophiolites——questioning about the rock/melt interaction metallogeny[J]. *Geological Bulletin of China*. 2009, 28(12): 1941–1961 (in Chinese with English abstract).
- [84] 鲍佩声. 北京: 中国铬铁矿床[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
Pao Peisheng. *Chromite Deposit in China*[M]. Beijing: Science Press, 1999: 98–142 (in Chinese with English abstract).
- [85] Xibin W, Peisheng B. Genesis of podiform chromite deposits—Evidence from the Luobosa chromite deposits, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*(English edition), 1987, 61(2): 77–94.
- [86] 鲍佩声, 张让民. 对富铝型豆荚状铬铁矿矿床成因的新认识: 以新疆萨尔托海铬铁矿矿床为例[J]. *矿床地质*, 1990, 9(2): 97–111.  
Bao Peisheng, Zhang Rangmin. A new idea about the genesis of the aluminum-rich podiform chromite deposit: With the Sartuohai Chromite Deposit of Xinjiang as an example[J]. *Mineral Deposits*, 1990, 9(2): 97–111 (in Chinese with English abstract).
- [87] Capobianco C J, Hervig R L, Drake M J. Experiments on crystal/liquid partitioning of Ru, Rh and Pd for magnetite and hematite solid solutions crystallized from silicate melt[J]. *Chemical Geology*, 1994, 113(1): 23–43.
- [88] Fleet M E, Stone W E, Crocket J H. Partitioning of palladium, iridium, and platinum between sulfide liquid and basalt melt: Effects of melt composition, concentration, and oxygen fugacity[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55(9): 2545–2554.
- [89] Barin I, Knacke O, Kubaschewski O. Thermochemical properties of inorganic substances: Supplement[M]. Springer-Verlag Berlin, 1977.
- [90] Tredoux M, Lindsay N M, Davies G, et al. The fractionation of platinum-group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism[J]. *South African Journal of Geology*, 1995, 98(2): 157–167.
- [91] Bai W, Robinson P T, Fang Q, et al. The PGE and base-metal alloys in the podiform chromitites of the Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *The Canadian Mineralogist*, 2000, 38(3): 585–598.
- [92] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述)[J]. *地球学报*, 2008, 29(3): 263–274.  
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Ultrahigh-pressure minerals and new minerals from the Luobusa ophiolitic chromitites in Tibet, A review[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(3): 263–274 (in Chinese with English abstract).
- [93] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 极地乌拉尔豆荚状铬铁矿中发现金刚石和一个异常矿物群[J]. *中国地质*, 2007, 34(5): 950–952.  
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Discovery of diamond and an unusual mineral group from the podiform chromite, Polar Ural[J]. *Geology in China*, 2007, 34(5): 950–952 (in Chinese with English abstract).
- [94] 杨经绥, 徐向珍, 张仲明, 等. 蛇绿岩型金刚石和铬铁矿深部成因[J]. *地球学报*, 2013, 34(6): 643–653.  
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Zhang Zhongming, et al. Ophiolite-type diamond and deep genesis of chromitite[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2013, 34(6): 643–653 (in Chinese with English abstract).
- [95] 周二斌. 豆荚状铬铁矿床的研究现状及进展[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(3): 530–542.  
Zhou Erbin. Present situation and advances in the study of podiform chromite deposits[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(3): 530–542 (in Chinese with English abstract).
- [96] 杨经绥, 巴登珠, 徐向珍, 等. 中国铬铁矿床的再研究及找矿前景[J]. *中国地质*, 2010, 37(004): 1141–1150.  
Yang Jingsui, Ba Dengzhu, Xu Xianzhen, et al. A restudy of podiform chromite deposits and their ore-prospecting vista in China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(004): 1141–1150 (in Chinese with English abstract).
- [97] 马建明. 世界矿产资源年评(2002–2003)[M]. 北京: 地质出版社, 2004.  
Ma Jianming. *Evaluation of World Mineral Resources (2002–2003)* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004 (in Chinese).
- [98] Thayer T P. Geologic features of podiform chromite deposits[J]. *Methods of Prospection for Chromite*. Organization for Economic

- Cooperation and Development. Paris, 1964.
- [99] Naldrett A J, Kinnaird J, Wilson A, et al. Chromite composition and PGE content of Bushveld chromitites: Part 1—the Lower and Middle Groups[J]. *Applied Earth Science*, 2009, 118(3–4): 3–4.
- [100] Melcher F, Grum W, Simon G, et al. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(10): 1419–1458.
- [101] 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: 166–183.  
Wang Xibin, Bao Peisheng. The genesis of podiform chromite deposits: A case study of the Luobusha chromite deposit, Tibet[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1987, 2: 166–183 (in Chinese with English abstract).
- [102] Melcher F, Grum W, Simon G, et al. Petrogenesis of the ophiolitic giant chromite deposits of Kempirsai, Kazakhstan: A study of solid and fluid inclusions in chromite[J]. *Journal of Petrology*, 1997, 38(10): 1419–1458.
- [103] Lennykh V I, Valizer P M, Beane R, et al. Petrotectonic evolution of the Maksyutov Complex, Southern Urals, Russia: Implications for ultrahigh– pressure metamorphism[J]. *International Geology Review*, 1995, 37(7): 584–600.
- [104] Zhou S, Mo X X, Mahoney 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(2): 144–147.
- [105] 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]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2006, 27(1): 31–34 (in Chinese with English abstract).
- [106] 刘维亮, 夏斌, 刘鸿飞, 等. 西藏泽当蛇绿岩玄武岩 SHRIMP 锆石 U–Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1356–1361.  
Liu Weiliang, Xia Bin, Liu Hongfei, et al. Zircon U–Pb dating of basalt from Zetang ophiolite in Tibet and its geological implications. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1356–1361 (in Chinese with English abstract).
- [107] Dai J G, Wang C S, Polat A, et al. Rapid forearc spreading between 130–120 Ma: Evidence from geochronology and geochemistry of the Xigaze ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2013, 172–173 (2013): 1–16
- [108] 韦振权, 夏斌, 张玉泉, 等. 西藏休古嘎布蛇绿岩中辉绿岩锆石 SHRIMP 定年及其地质意义[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(1): 93–97.  
Wei Zhenquan, Xiabin, Zhang Yuquan, et al. Shrimp zircon dating of diabase in the Xiugugabu ophiolite in Tibet and its geological implications[J]. *Geotectonica et Metatogenia*, 2006, 30(1): 93–97 (in Chinese with English abstract).
- [109] 姜枚, 杨经绥, 张聿文, 等. 西藏泽当岩体含铬超镁铁岩体的深部构造特征与找矿前景探讨[J]. *中国地质*, 2013, (3): 780–789.  
Jiangmei, Yang Jingsui, Zhang Yuwen et al. Deep tectonic characteristics and ore-prospecting potential of the Zetang Cr-bearing ultramafic rock mass in Tibet[J]. *Geology in China*, 2013, (3): 780–789(in Chinese with English abstract).