

徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 等. 西藏雅鲁藏布江缝合带东波地幔橄榄岩中金刚石的发现及地质意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1471-1482.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, et al. Diamond discovered from the Dongbo mantle peridotite in the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet[J].
Geology in China, 2015, 42(5): 1471-1482.(in Chinese with English abstract).

西藏雅鲁藏布江缝合带东波地幔橄榄岩中金刚石的发现及地质意义

徐向珍 杨经绥 巴登珠 张仲明 熊发挥 李 源

(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)

摘要:本文报道了雅鲁藏布江缝合带西段的东波蛇绿岩地幔橄榄岩中发现与罗布莎和普兰岩体相似的金金刚石和特殊地幔矿物群。东波地幔橄榄岩体以方辉橄榄岩为主, 含少量二辉橄榄岩和纯橄岩, 辉石岩和辉长岩呈脉状产于方辉橄榄岩中。岩石地球化学特征表明东波岩体形成于 MOR 环境后受到 SSZ 环境的改造。通过重砂分选实验, 在 693 kg 的地幔橄榄岩大样中发现了金刚石和碳硅石等 30 余种特殊矿物群, 包括金刚石、自然铬、自然金、自然铁、自然硅、自然铜等自然元素矿物类; 碳硅石等碳化物; 铬尖晶石、金红石、铬铁矿、刚玉、黑钨矿、铌钽铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方铁矿、锡石等氧化物; 铁铬镍合金、镍铁合金、铜锌合金等合金互化物; 辉钼矿、方铅矿、辉铋矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂和闪锌矿等硫化物; 橄榄石、辉石、锆石、蓝晶石、白云母、蛇纹石、绿帘石等硅酸盐; 萤石等氟化物。该矿物群与雅鲁藏布江缝合带的罗布莎和普兰两个岩体中发现的特殊矿物群非常类似, 同时也为蛇绿岩型金刚石这一新类型提供了佐证。

关键词: 金刚石; 地幔橄榄岩; 东波; 雅鲁藏布江缝合带; 西藏

中图分类号: P588.12⁵; P578.1⁶ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2015)05-1471-12

Diamond discovered from the Dongbo mantle peridotite in the Yarlung Zangbo suture zone, Tibet

XU Xiang-zhen, YANG Jing-sui, BA Deng-zhu,
ZHANG Zhong-ming, XIONG Fa-hui, LI Yuan

(CARMA, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper reports the discovery of unusual mantle mineral group in the mantle peridotites of Dongbo ophiolite, which lies in the western part of the Yarlung Zangbo suture zone. The Dongbo ophiolite consists mainly of harzburgite, with a small amount of lherzolite and dunite, pyroxenite and gabbro dikes cutting across the harzburgite. Geochemical characteristics suggest that

收稿日期: 2015-06-18; **改回日期:** 2015-07-29

基金项目: 国家行业专项(SinoProbe-05-02)、自然科学基金重点项目 NSFC(40930313)、自然科学基金创新群体项目 NSFC(40921001)、自然科学基金青年基金项目 NSFC(41202036)和中国地质调查局工作项目(12120115027201)联合资助。

作者简介: 徐向珍,女,1980年生,副研究员,主要从事岩石学与矿物学的研究工作;E-mail: xuxiangzhensjl@aliyun.com。

the Dongbo mantle peridotite was derived from mid-ocean ridge (MOR) but modified in a suprasubduction zone (SSZ) environment. Some grains of diamond and other unusual minerals, such as moissanite, were recovered by standard mineral separation techniques from a 693 kg sample of harzburgite. The presence of diamond, native Cr, Au, Fe, Si and Cu, together with the moissanite, indicates a strong reducing environment. The authors also found a lot of alloys, oxides, sulfides, silicates, fluoride and some other materials. These mineral assemblages recovered from the Dongbo harzburgite are very similar to those of Luobusa and Purang harzburgite, which gives evidence to the ophiolite-type diamond.

Key words: diamond; mantle peridotite; Dongbo; Yarlung Zangbo suture zone; Tibet

About the first author: XU Xiang-zhen, female, born in 1980, associate professor, engages in research on petrology and mineralogy; E-mail: xuxiangzhensjl@aliyun.com.

众所周知,地球上原生金刚石主要有三种产出类型,包括金伯利岩型,被认为来自大陆岩石圈(克拉通)下的深部地幔^[1-2];超高压变质型,通常与柯石英等超高压矿物伴生,产在造山带和板块俯冲边界的深俯冲变质岩中^[3-4];陨石撞击型,陨石中或受陨石撞击的岩石中产生的金刚石(Impact diamond)^[5-6]。

继20世纪80年代初,我国在西藏雅鲁藏布江缝合带的罗布莎和东巧蛇绿岩铬铁矿中陆续发现了金刚石^[7-9],之后杨经绥研究员率领研究团队在近2000 km长的雅鲁藏布江缝合带中的6个地幔橄榄岩体中均发现了金刚石及伴生的特殊矿物组合,并在班公—怒江缝合带的丁青蛇绿岩、缅甸的密支那蛇绿岩、新疆的萨尔托海蛇绿岩,以及俄罗斯乌拉的Ray-Iz蛇绿岩等不同地区和不同时代的蛇绿岩中均找到了金刚石,表明蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中产出金刚石等深部矿物可能是个普遍现象,从而将蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中的金刚石命名为蛇绿岩型金刚石^[10-13]。

本文选择了雅鲁藏布江缝合带西段的东波地幔橄榄岩体开展了详细的矿物学研究,报道了东波地幔橄榄岩中发现的包括金刚石等一系列异常地幔矿物组合,这也是雅鲁藏布江缝合带继罗布莎和普兰岩体之后第三个详细报道金刚石产出的地幔橄榄岩岩体。

1 地质背景

雅鲁藏布江缝合带的东波地幔橄榄岩体位于札达县,属提提斯—喜马拉雅构造带的西段,即西藏雅鲁藏布江缝合带蛇绿岩的西段。该岩体地表出露近等轴状,总面积约400 km²,中部被新近系不整合覆盖而分成两部分^[14](图1),呈北西西—南东东向展布。岩体边界与火山岩、三叠系浅变质的浅

海—半深海相碳酸盐岩—碎屑岩呈断层接触,或被第四系覆盖;西南缘也与火山岩呈断层接触,火山岩倾向岩体外侧,并在南侧见到岩体底部的炭质板岩倾向岩体内部,岩体边界的硅质岩直接盖在火山岩或地幔橄榄岩之上。岩体未被构造肢解,出露连续,岩石较新鲜,但在断层通过之处蛇纹石化明显增强,局部成蛇纹岩。

东波蛇绿岩中存在较多矿化点,并已发现20个铬铁矿矿化点,其中原生矿点12个,转石矿点8个,矿体主要集中在东波岩体的南侧(图1),矿体的延伸方向为北西向,与岩体展布的方向一致,已发现的铬铁矿矿体呈透镜状分布于方辉橄榄岩与纯橄岩中,并与方辉橄榄岩/纯橄岩呈截然的突变关系。

2 东波岩体地幔橄榄岩特征

东波蛇绿岩包括地幔橄榄岩、基性岩脉(辉石岩、辉长岩和辉绿岩)和上覆火山—沉积盖层,地幔橄榄岩主要以方辉橄榄岩为主,含少量二辉橄榄岩和纯橄岩^[15]。方辉橄榄岩中辉石定向性明显,走向290°~340°,与超镁铁岩体走向一致,野外到处可见新鲜的方辉橄榄岩,质地坚硬,呈灰绿色,在岩体的北部区域破碎较强烈,蛇纹石化明显。方辉橄榄岩具粒状结构,块状构造,矿物组合主要为橄榄石、斜方辉石及少量的单斜辉石,副矿物包括少量的铬尖晶石和磁铁矿。其中有较多的辉绿(长)岩脉(墙)侵入,偶见粗粒单斜辉石岩脉(图2-a)。

东波岩体中的纯橄岩新鲜,呈透镜状产出于方辉橄榄岩中,地表风化为土黄色,表面出露星点状铬尖晶石(图2-b),方辉橄榄岩与纯橄岩常为截然的接触关系。纯橄岩宽度1~2 m,少数10 m以上,少量的纯橄岩有一定的延长,延长方向多为北西—南东走向。局部蛇纹石化较强,橄榄石被蛇纹石化呈网

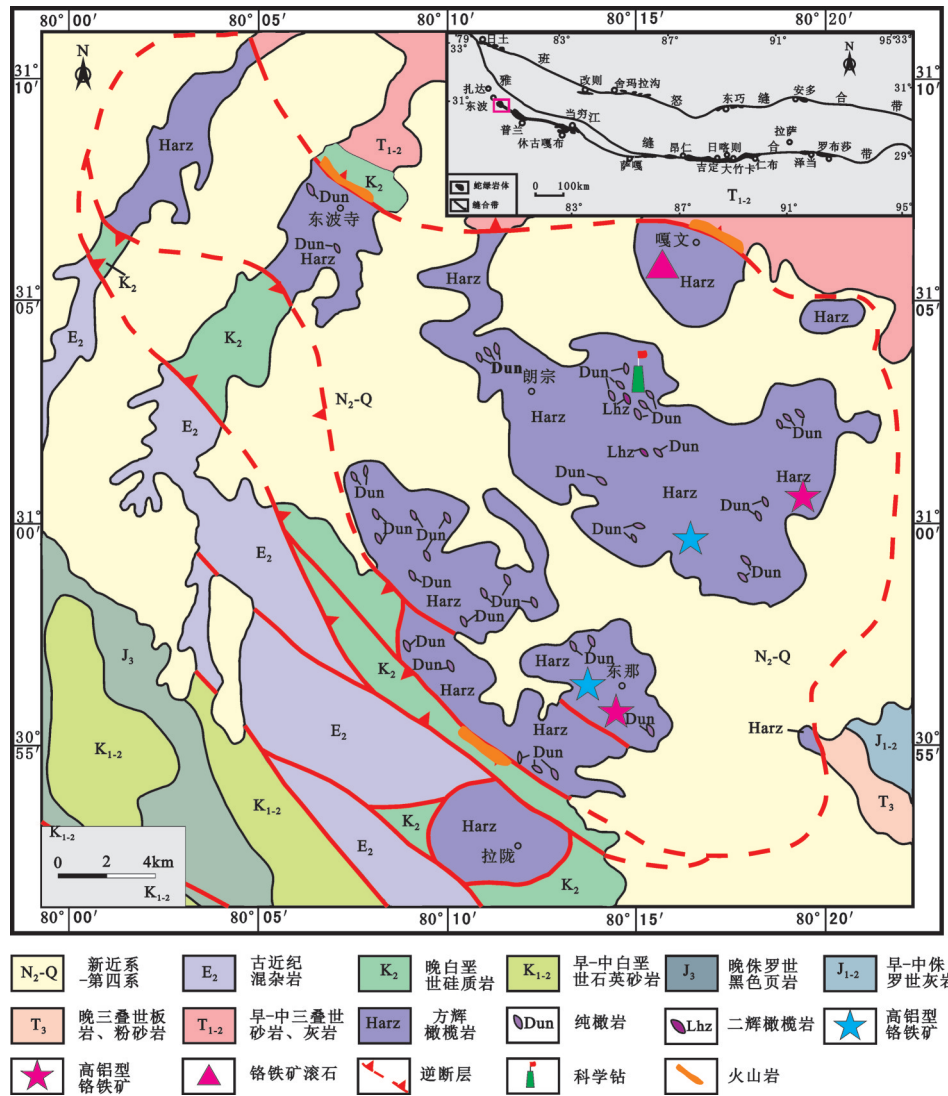


图1 雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩的地质简图(据[15])

Fig. 1 Detailed geological map of the Dongbo ophiolites in the YZSZ (modified after reference [15])

格状穿插交代。岩石主要由橄榄石95%~99%和斜方辉石2%~4%组成,含少量单斜辉石0~2%和含量约1%左右的铬尖晶石。铬尖晶石在纯橄岩中分布较多,而在方辉橄辉岩及二辉橄辉岩中偏少。在纯橄岩与方辉橄辉岩的接触部位偶见块状铬铁矿化。

少量的二辉橄辉岩也以透镜状出露于方辉橄辉岩中,宽约50 cm、长约2 m,块状构造。二辉橄辉岩中辉石含量高(>20%),样品新鲜,地表风化呈暗褐色,单斜辉石呈突起状,为翠绿色,中等粒度,并可见单斜辉石的定向性,主体方向为北西-南东向,与较低含量单辉辉石的方辉橄辉岩为渐变过渡关系。二辉橄辉岩主要由橄榄石、斜方辉石、单斜辉

石,以及少量的尖晶石组成。

辉石岩和辉长岩在方辉橄辉岩中呈脉状产出,脉体宽度由数厘米至数米不等,定向性明显,为北西-南东走向(图2-a),切割地幔橄辉岩,脉体总体走向为北西-南东向,辉石岩与辉长岩的锆石U-Pb的年龄分别为(130±0.5) Ma、(128±1.1) Ma(早白垩世中期)^[6],并具有N-MORB的特征。

东波岩体地幔橄辉岩中各岩相组合均发生中等程度的变形,片理发育,大多数片理走向与东波蛇绿岩体展布方向一致,为北西走向,向南西倾斜,倾角45°~60°不等。致密块状和稠密浸染状铬铁矿呈透镜状出露于方辉橄辉岩中,呈突变关系,铬铁

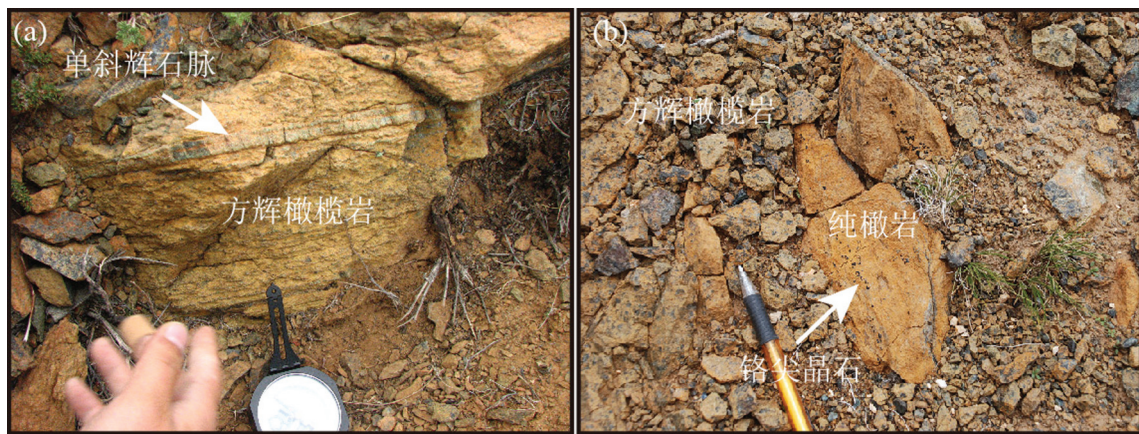


图2 东波地幔橄榄岩岩体野外照片

Fig.2 Field occurrence of the Dongbo mantle peridotite

矿体宽为1~3 m,最大长轴方向为北西-南东向,长4~5 m。

3 样品描述和研究方法

本次样品采自取自东波岩体的方辉橄榄岩,样品编号为09Y-666(31°9'36.6"N;80°3'34.8"E),总重量为693 kg。岩石大多新鲜,呈褐色,局部地区可见较强蛇纹石化。方辉橄榄岩中的橄榄石含量80%左右,基本新鲜,少数被蚀变为蛇纹石、菱镁矿等,晶体形态常为不规则半自形;斜方辉石含量15%~25%,变形强烈,常见波状消光、塑性变形和解理纹弯曲等现象,斜方辉石的大晶粒中可见有橄榄石椭圆状小晶体、单斜辉石出溶。单斜辉石在方辉橄榄岩中含量不高,通常1%~3%,通常以出溶形式存在于方辉橄榄岩中。

样品特征如下:(1)岩石部分蚀变严重:全岩分析显示岩石中H₂O含量为12.88%;CO₂为0.12%,与野外观察较强蛇纹石化和显微镜下观察十分低的碳酸岩化程度相一致。(2)岩石为典型的方辉橄榄岩:岩石中SiO₂和MgO的含量分别为39.85%和37.08%,极低含量的TiO₂(0.02%),具有低的Al₂O₃(0.97%)和CaO(0.13%),与原始地幔相比,该方辉橄榄岩以强烈亏损Al₂O₃、CaO等不相容元素为特征,与阿尔卑斯地区的蛇绿岩相似^[17]。

方辉橄榄岩球粒陨石^[18]标准化的稀土元素配分模式为LREE弱富集型(图3-a),具有V型的稀土元素配分型式,LREE/HREE=0.73,LREE轻微亏损, $\delta\text{Eu}=0.32$,强烈亏损Eu。该方辉橄榄岩稀土元素总量低,丰度为 0.46×10^{-6} ,较初始地幔亏损一个数量级,显示典型亏损地幔橄榄岩特征。

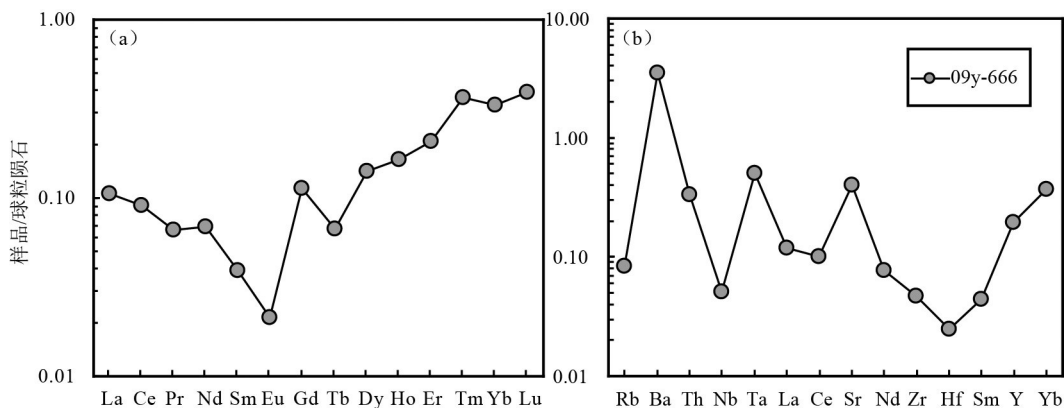


图3 东波岩体方辉橄榄岩稀土元素配分曲线和微量元素蛛网图

Fig.3 Chondrite-normalized REE patterns and trace element spider diagram of harzburgite, Dongbo ophiolite

该方辉橄榄岩的相容元素如 Cr、Ni 含量普遍高,分别为 3283 mg/g 和 2560 mg/g,大离子亲石元素 Ba 为 24.1×10^{-6} , Rb 为 0.029×10^{-6} 含量较低,与世界典型蛇绿岩相似,反映了地幔残留岩石的特征^[19]。

方辉橄榄岩微量元素蛛网图中总体显示一个左高右低的斜坡特征,其中大离子亲石元素(LILE)富集,指示流体作用的存在(图 3-b)。牛晓露等^[20]利用铂族元素的证据推测东波岩体的方辉橄榄岩可能经历了俯冲带流体的改造。

样品在中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所进行选矿,在多年的选矿经验基础上,根据矿石矿物的粒度大小,采用阶段破碎、阶段选别的工艺流程,最大限度保护目的矿物的晶体和颗粒形态

的完整,本次选矿经过大小颚式破碎机阶段破碎,筛分为 3 个粒级: <2 mm 而 >1 mm (-2+1mm); <1 mm 而 >0.5 mm (-1+0.5 mm); <0.5 mm (-0.5 mm)。不同粒级又分别采用磁选、重选、电选等方法分级选别,使不同磁性、比重、导电性的目的矿物得到有效分离和充分富集,为下一步鉴定工作确认该地幔橄榄岩中是否存在金刚石、碳硅石等超高压矿物提供方便(图 4)。试验过程中,对所有使用的设备和场地进行仔细清洗和打扫,有效防止矿样在选矿过程中受外来矿物的污染,保证了最终矿样的可靠性和准确性。对所选精矿在双目显微镜下精选鉴定,矿物鉴定使用的方法和仪器有:大陆构造与动力学国家重点实验室的日本电子 JEOL JSM-5610LV 加

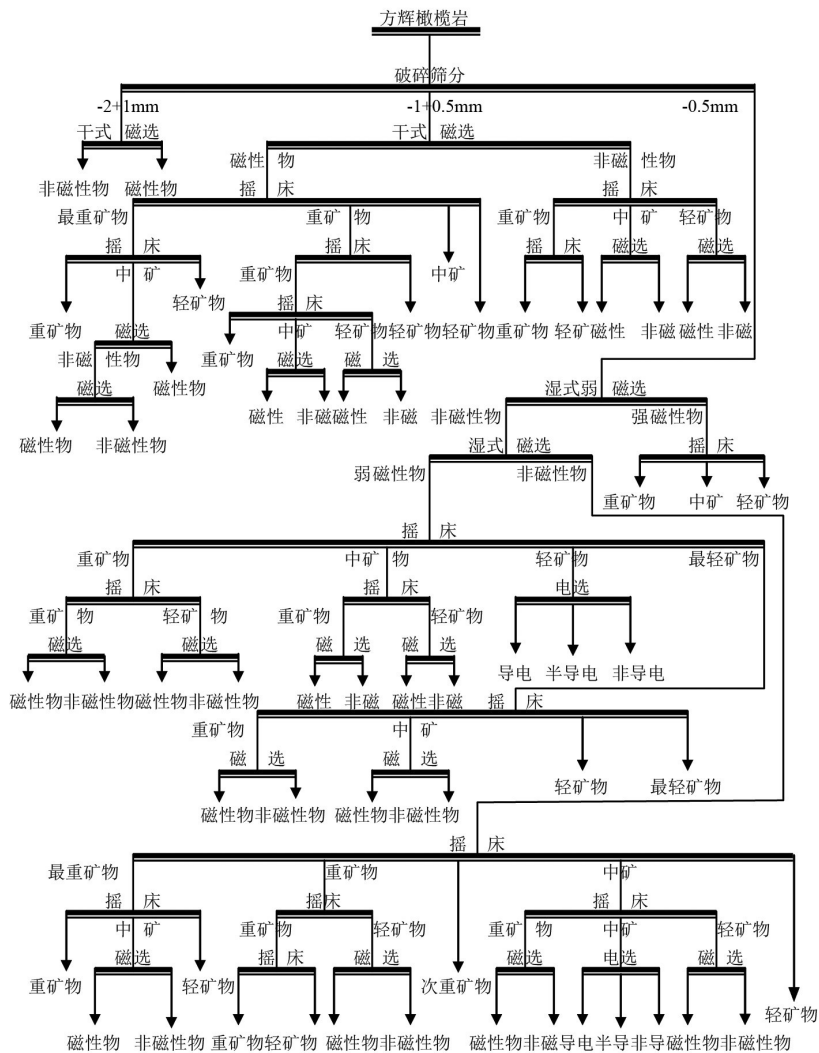


图4 东波方辉橄榄岩选矿处理工艺流程图

Fig.4 Mineral separation processing for Dongbo mantle peridotite

英国牛津公司INCA能谱仪(加速电压20 kV,工作距离20 mm,用Co标样校准)以及RENISHAW-1000型激光Raman谱仪。

4 东波地幔橄榄岩中发现金刚石等特殊矿物

初步研究表明,东波岩体方辉橄榄岩大样中至少有金刚石和碳化硅等30余种矿物,包括金刚石、自然铬、自然金、自然铁、自然硅、自然铜等自然元素矿物类;碳硅石等碳化物;铬尖晶石、金红石、铬铁矿、刚玉、黑钨矿、铌钽铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方铁矿、锡石等氧化物;铁铬镍合金、镍铁合金、铜锌合金等合金互化物;辉钼矿、方铅矿、辉铋矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂

和闪锌矿等硫化物;橄榄石、辉石、锆石、蓝晶石、白云母、蛇纹石、绿帘石等硅酸岩;萤石等氟化物。

4.1 金刚石

东波岩体的人工重砂矿物中共选出5粒金刚石颗粒,具有标准的金刚光泽,实体观察颜色为乳黄色,透明,粒度在100~200 μm ,八面体晶型,扫描电镜下可见金刚石具有很好的聚晶,金刚石的拉曼位移的峰值在1334 cm^{-1} ,为典型的金刚石位移峰(图5)。

4.2 其他的特殊矿物

4.2.1 自然铬

东波岩体找到8粒自然铬,粒径150 μm 左右(图6),主要都是不规则的破碎薄片状、粒状,铅灰色。实体颗粒经过能谱分析表明,该岩体中的自然

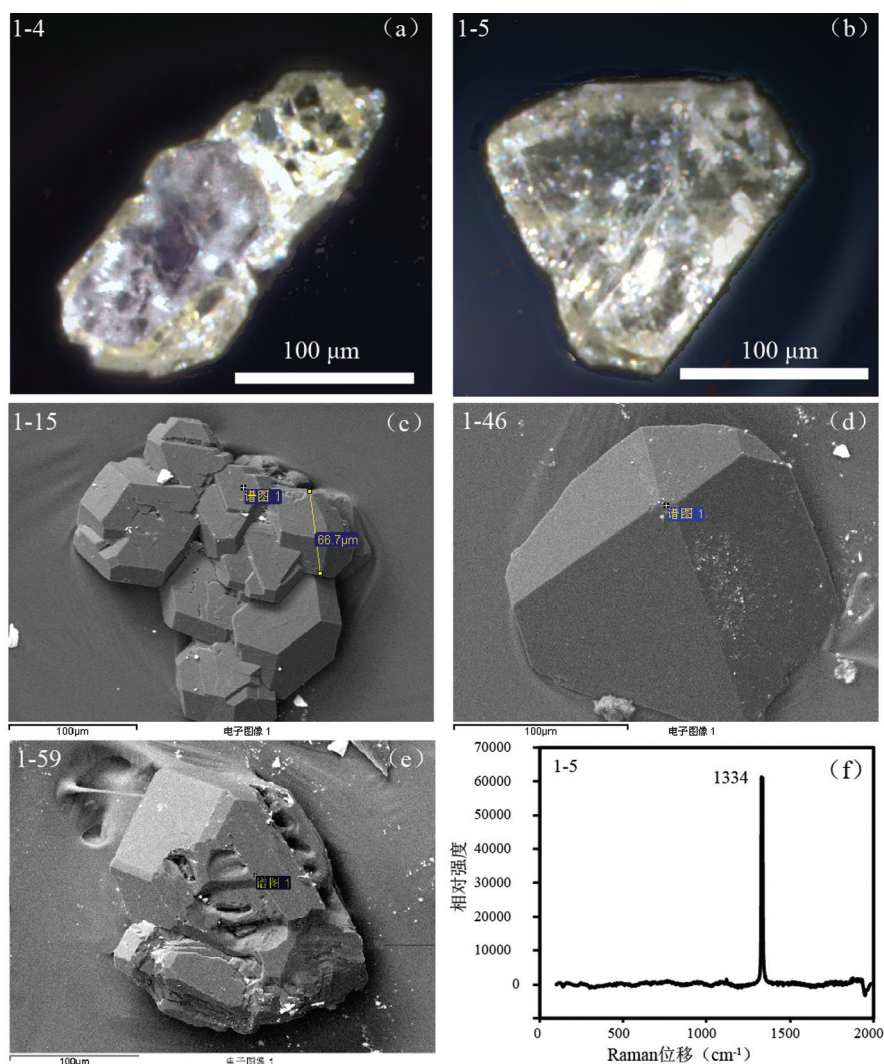


图5 东波岩体中金刚石颗粒

Fig.5 Diamond recovered from the Dongbo mantle peridotite

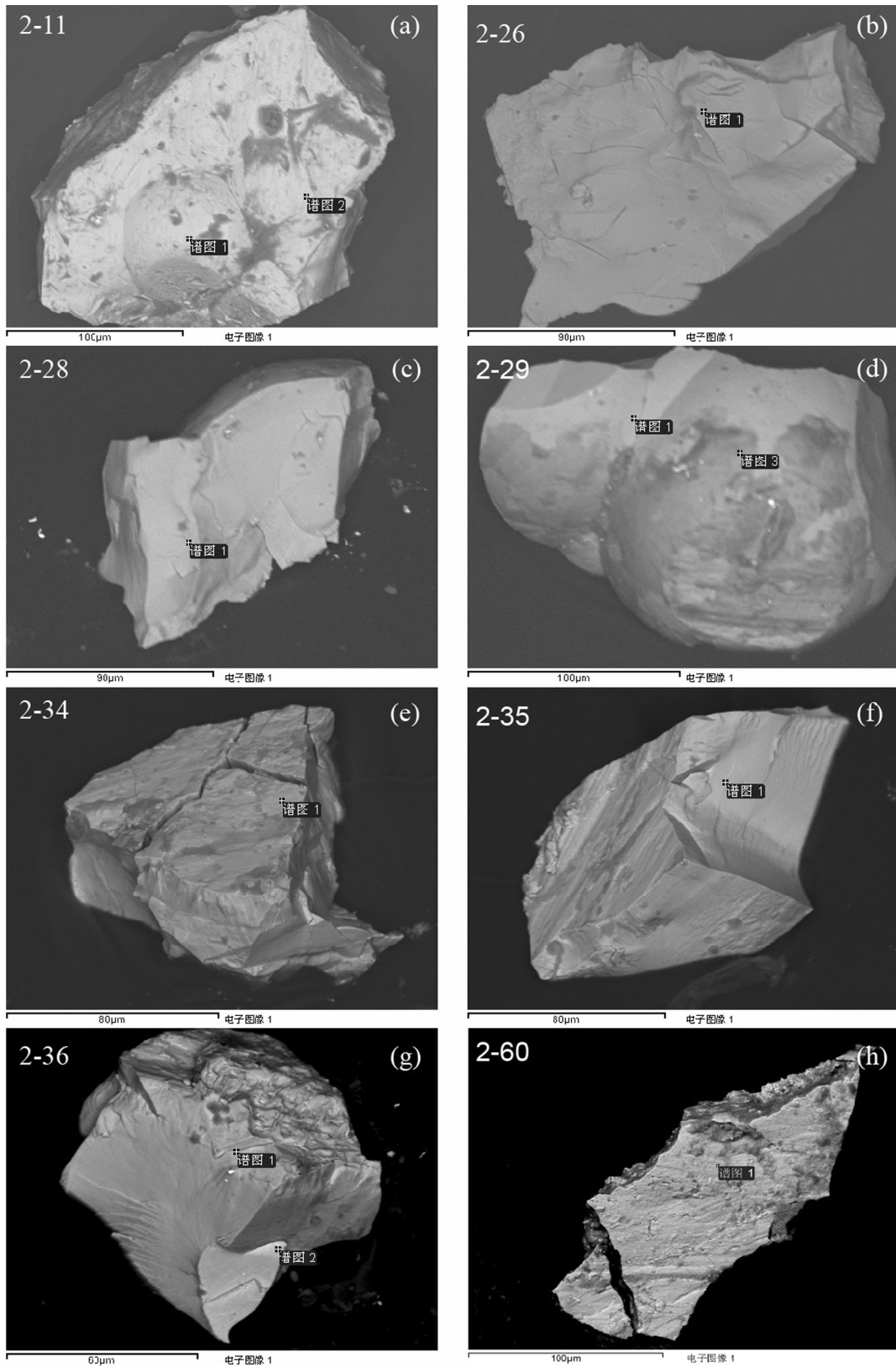


图6 东波岩体中的自然铬

Fig.6 Native chromium recovered from the Dongbo mantle peridotite

铬含少量的Mg、Si、Ca、Fe。

4.2.2 碳化硅

在西藏东波岩体中选出十余粒碳化硅,它们具有良好的板状外形,大多破碎状,呈金刚光泽,颜色多样,主要有无色、浅绿色、蓝绿色,粒径100~500 μm ,激光拉曼谱显示碳硅石典型的789~792 cm^{-1} 、966~969 cm^{-1} 和766 cm^{-1} 谱峰(图7),与罗布莎和普兰岩体产出的碳化硅相似^[10,21]。

4.2.3 其他地壳型矿物

金红石化学成分简单稳定,大部分 $\text{TiO}_2 > 99\%$,部分金红石可能含有少量的 SiO_2 、 V_2O_5 、 FeO 、 WO_3 、 Al_2O_3 等杂质,呈密黄色到褐黄色,粒度约为200 μm ,多为不规则柱状、他形粒状,偶见完整四方双锥晶形。东波岩体中选出少量的钨钼铁矿,多为长柱状,铁黑色,金属光泽,粒度为200~300 μm 。锆石数量不多,仅7粒,多为无色、浅黄色、褐色,透明到半透明,晶形从长柱状、四方双锥到不规则粒状均有,粒径在100 μm 左右。能谱分析结果显示,普兰岩体

锆石的 ZrO_2 在60%~66%, SiO_2 在33%左右,并含有少量的 Ag_2O 、 MgO 、 CaO 、 HfO_2 、 Au_2O_3 、 FeO 、 ThO_2 和 CdO 等(表1)。

蓝晶石做为高压变质作用的一种指示矿物,也出现在东波岩体中。该种矿物多为半透明,不规则的晶体碎片;颜色为淡蓝色,晶体呈长板状或刀片状,粒度可达1 mm。其化学组成稳定, Al_2O_3 为62%~65%, SiO_2 在35%~38%,并含有少量的 Na_2O 、 FeO 的组分(表2)。

5 地质意义

5.1 东波蛇绿岩岩体的构造背景

蛇绿岩是大陆造山带中残存的古代大洋岩石圈残片,记录了大洋岩石圈的岩浆演化、变质作用、构造过程,提供了古洋盆形成、发展和消亡等方面的重要信息,一直是地学界研究的热点。最初蛇绿岩被认为是一种典型的形成于大洋中脊(MOR)扩张中心的洋壳^[22-25]。然而,后来新增加的大量蛇绿

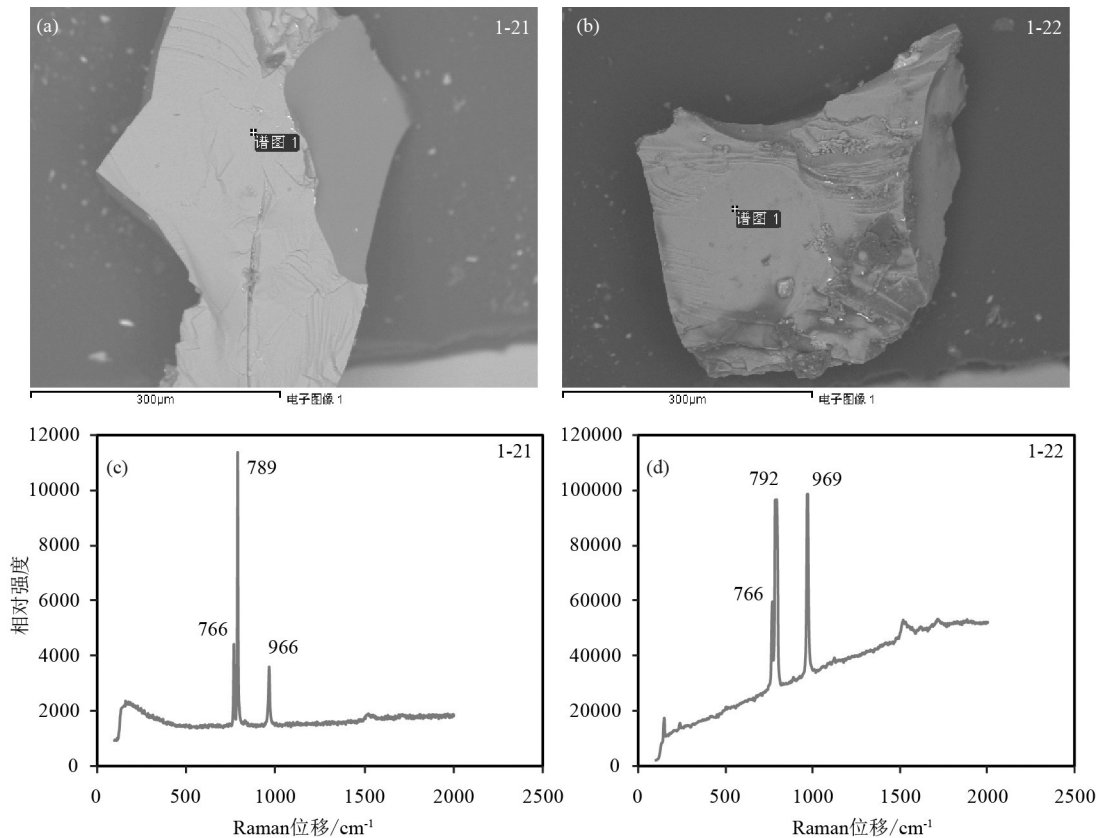


图7 东波岩体中的碳化硅颗粒

Fig.7 Moissanite separated from the Dongbo mantle peridotite

表1 东波地幔橄榄岩岩体中锆石成分(%)

Table 1 Compositions of the zircons in the Dongbo mantle peridotite

样品号	Ag ₂ O	MgO	SiO ₂	CaO	FeO	ZrO ₂	HfO ₂	UO ₃	CdO	ThO ₂	Σ
1-10	-	-	33.35	-	-	63.73	2.11	-	0.81		100
1-11	-	0.46	33.29	-	-	63.74	1.37	1.13	-		99.99
1-12	2.16		35.94			60.66	0.17	1.07			100
1-14	-	-	33.71	-	-	66.29	-	-	-		100
C1-4	1.95	1.07	34.56			60.59	1.83				100
C1-14			34.47			62.75	2.78				100
C1-42			32.29	0.47	0.95	61.05	2.32			2.91	99.99

表2 东波地幔橄榄岩岩体中蓝晶石成分(%)

Table 2 Compositions of the kyanite in the Dongbo mantle peridotite

样品号	SiO ₂	Na ₂ O	FeO	Al ₂ O ₃	Σ
1-25	35.49	0.44	0.62	63.48	100.00
1-26	35.74	-	-	64.26	100.00
1-27	37.33	-	-	62.67	100.00

岩和洋盆研究数据表明板片俯冲是蛇绿岩形成过程的重要阶段,并将这种由于板片俯冲形成的蛇绿岩命名为上俯冲带(SSZ)型蛇绿岩^[26-30]。于是Pearce等^[31]在前人研究基础上根据蛇绿岩形成的构造环境将蛇绿岩分为MOR型和SSZ型。Dilek and Furnes^[32]将蛇绿岩分为俯冲相关的蛇绿岩和俯冲无关的蛇绿岩,前者包括俯冲带型和火山弧型,形成于大洋盆地闭合阶段;后者包括大陆边缘型、洋中脊型和地幔柱型,形成于伸展过程。

东波蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带西段,由地幔橄榄岩、辉石岩和辉长岩等组成。地幔橄榄岩主要为方辉橄榄岩、纯橄岩和少量二辉橄榄岩。地幔橄榄岩中有少量辉石岩和辉长岩的脉岩,宽约1 m,走向北西,与岩体的构造线方向基本一致。方辉橄榄岩和纯橄岩的地球化学特征显示出岩体形成于MOR环境,后受到SSZ环境的改造^[33]。东波蛇绿岩的岩石地球化学特征显示其洋中脊叠加洋岛的构造背景^[33]。东波蛇绿岩岩体的上覆火山-沉积盖层从上到下包括块状灰岩、硅质灰岩、红色硅质岩、泥页岩、粉砂质泥页岩夹薄层砂岩、玄武岩和玄武火山碎屑岩,玄武岩具有与洋岛玄武岩(OIB)相似的地球化学特征^[34]。雅鲁藏布江缝合带普遍存在

OIB型基性岩,它可以产出于不同的构造背景中,如洋中脊、洋脊与地幔柱相互作用、大陆边缘和俯冲带环境等^[35]。刘飞等^[34]认为东波蛇绿岩岩体上覆火山岩层序为一套稳定的海相层序,具有典型海山特征,与世界上典型的地幔柱型蛇绿岩可对比,属于地幔柱热点活动的产物。

各岩相岩石地球化学研究表明,东波蛇绿岩的岩相存在较大的差异,而地幔橄榄岩中辉石岩、辉长岩脉与洋中脊玄武岩(MORB)相似,形成于洋中脊环境,并受后期俯冲流体作用的改造^[15,33]。

5.2 蛇绿岩型金刚石的启示

通过东波岩体693 kg的方辉橄榄岩人工重砂大样分选和双目显微镜下挑选矿物,已经发现30余种矿物,包括金刚石、自然铬、自然金、自然铁、自然硅、自然铜等自然元素矿物类;碳硅石等碳化物;铬尖晶石、金红石、铬铁矿、刚玉、黑钨矿、铌钽铁矿、磁铁矿、赤铁矿、方铁矿、锡石等氧化物;铁铬镍合金、镍铁合金、铜锌合金等合金互化物;辉钼矿、方铅矿、辉铋矿、黄铁矿、黄铜矿、毒砂和闪锌矿等硫化物;橄榄石、辉石、锆石、蓝晶石、白云母、蛇纹石、绿帘石等硅酸岩;萤石等氟化物。我们发现在西藏雅鲁藏布江缝合带除了东部的罗布莎岩体和西部的普兰岩体,还在西部的东波地幔橄榄岩体中也发现了金刚石,表明雅鲁藏布江缝合带中的众多蛇绿岩型地幔橄榄岩可能均具有一个共同相似的地质背景。

国际上对地幔柱的研究日益高涨,很大的原因在于人们不仅在地球上发现越来越多的地幔柱存在证据,在火星和金星上也同样发现了存在地幔柱的证据^[36]。地震层析的研究表明,板块边界俯冲下

去的大陆地壳可以穿过 670 km 深度的地幔不连续面, 达至 2900 km 的核幔边界的 D" 层, 在那里影响核-幔的反应, 通过地幔对流, 有可能再上升, 记录了地幔底辟和上升的历史。另一方面, 俯冲岩片也会造成地幔的不均匀性, 通过研究深部地幔矿物, 聚焦地幔物质组成、深部物理化学环境和地幔运动轨迹, 尤其是含有异常地幔矿物和地幔超高压矿物的铬铁矿如何从深部地幔被运移到浅部地幔等深部地幔动力学科学问题, 有可能为开拓地幔柱这一目前国际上研究热点和前沿新领域做出贡献^[37]。

最近雅鲁藏布江蛇绿岩各组合岩石 He、Ne 含量和同位素组成的分段加热测定结果显示, 雅鲁藏布江蛇绿岩中蛇纹岩在 700°C 释放出的气体具有 32.66 Ra 的 He 同位素组成, 表明该蛇纹岩含有深部地幔流体; 辉绿岩样品在低温部均表现出具有热点特征的、远高于 MORBs 的 R 值(地球上的热点起源于深部地幔, 具有超过 30 Ra 的 R 值); 在 Ne 同位素体系图中, Ne 同位素数据主要沿 Loihi Line 分布; 所有证据均显示雅鲁藏布江蛇绿岩各组合岩石的流体组分主要源于深部地幔, 说明该特提斯洋形成环境有地幔柱的参与^[38]。

产在蛇绿岩地幔橄榄岩和铬铁矿中的金刚石, 不同于产在大陆克拉通的金伯利岩型金刚石, 也不同于产在板块俯冲带中的超高压变质型金刚石和陨石撞击成因的金刚石, 杨经绥等^[10]将他们归为地球上一种新的金刚石产出类型, 命名为蛇绿岩型金刚石。蛇绿岩型金刚石的主要特征是粒度普遍较小, 多数在 200~500 μm, C 同位素显示极低的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 值 (-28‰~-18‰), 显示可能的地壳成因, 比典型金伯利岩型金刚石更负值。

豆荚状铬铁矿主要产于显生宙的蛇绿岩中, 最近在西藏罗布莎和俄罗斯乌拉尔的豆荚状铬铁矿中均发现有深部地幔矿物, 认为铬铁矿来自深部地幔, 不是产自浅部地幔橄榄岩^[39]。而熊发挥等^[40]利用豆荚状铬铁矿的形态特征、产出规律、矿物化学、铂族元素的分布模式, 以及发现的超高压矿物等特点提出豆荚状铬铁矿形成过程存在四个阶段, 分别为铬的来源阶段、铬尖晶石及超高压矿物的结晶阶段、铬铁矿的成矿阶段、铬铁矿的就位阶段。

西藏罗布莎和东巧蛇绿岩、阿曼蛇绿岩以及乌拉尔蛇绿岩中的铬铁矿发现了大量锆石、石英、刚

玉、金红石等矿物与金刚石和碳硅石共生, 尤其是罗布莎和乌拉尔铬铁矿中发现了原位的金金刚石。锆石的微量元素与低压包裹体(石英、云母、钾长石、金红石、钛铁矿)组合特征指示锆石的大陆地壳成因。蛇绿岩中保存在铬铁矿和地幔橄榄岩中的大陆地壳成因矿物暗示了在蛇绿岩形成过程中与镁铁质熔体有效隔离。大多数地壳矿物都来自于俯冲板片部分, 并被上升中的软流圈和俯冲带岩浆的铬铁矿颗粒包裹。软流圈地幔橄榄岩上升进入俯冲带, 可能出现板片剥离, 从而允许超高压矿物、强还原矿物和地壳型矿物共生, 并在蛇绿岩型铬铁矿和地幔橄榄岩中共存^[41]。

虽然矿物数量规模比较小, 但超高压矿物、强还原矿物和地壳型矿物确实可能广泛存在于洋壳地幔。蛇绿岩中的豆荚状铬铁矿按其矿物化学组分分为高铝型和高铬型两类^[42], 而我们目前也已在高铬和高铝铬铁矿中均报道有金刚石、碳硅石等超高压矿物组合存在^[10,11,21,37,43-44]。金刚石的存在可以指示形成深度超过 150 km, 然而罗布莎蛇绿岩铬铁矿中存在斯石英假象的柯石英可暗示其形成深度大于 300 km^[45]。Yamamoto 等^[46]在罗布莎豆荚状铬铁矿中利用原位透射电镜分析发现很多针状、片状透辉质斜辉石和柯石英出溶层, 认为指示超过 12.5 GPa 超高压和深度超过 380 km 的形成环境。

东波蛇绿岩中的方辉橄榄岩和纯橄岩地球化学特征显示岩体形成于 MOR 环境, 后受到 SSZ 环境的改造^[15,33]。通过东波岩体方辉橄榄岩中发现的金刚石超高压矿物以及碳硅石等超强还原矿物可能来自深部地幔, 但同时也存在锆石、金红石、铬铁矿、刚玉等一系列地壳型矿物, 说明地幔中有可能保留了俯冲下去的地壳物质, 记录了壳-幔反应的过程。

致谢: 野外工作得到了中国地质科学院李金阳博士的帮助, 样品制作准备工作和激光拉曼分析在大陆构造与动力学国家重点实验室闫玲的帮助下完成; 能谱分析在大陆构造与动力学国家重点实验室陈方远帮助下完成; 匿名审稿人及责任编辑李亚萍老师对本文提出了宝贵修改意见, 在此一并表示由衷的感谢。

参考文献(References)

- [1] Shirey S B, Richardson S H, Harris JW. Integrated models of diamond formation and craton evolution[J]. *Lithos*, 2004, 77(1):

- 923–944.
- [2] Gurney J J, Helmstaedt H H, Richardson S H, et al. Diamonds through time[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 689–712.
- [3] Sobolev N V, Schatsky V. Diamond inclusions in garnet from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation[J]. *Nature*, 1990, 343: 742–745.
- [4] Xu S T, Okay A I, Ji S Y, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80–82.
- [5] Koerber C, Masaitis V L, Shafranovsky G I, et al. Diamonds from the Popigai impact structure, Russia[J]. *Geology*, 1997, 25: 967–970.
- [6] Karczewska A, Jakubowski T, Vergas F. Different diamonds in meteorites—DaG 868 and NWA 3140 ureilites[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2009, 37: 292–297.
- [7] 中国地质科学院地质研究所金刚石组. 西藏阿尔卑斯型超基性岩中发现金刚石[J]. *地质评论*, 1981, 27: 455–457. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences. The discovery of alpine-type diamond bearing ultrabasic intrusions in Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 1981, 27(5): 445–447 (in Chinese with English abstract).
- [8] Bai W J, Zhou M F, Robinson P J. Possibly diamond-bearing mantle peridotites and podiform chromitites in the Luobusa and Dongqiao ophiolites, Tibet[J]. *Can. J. Earth Sci.*, 1993, 30: 1650–1659
- [9] 白文吉, 杨经绥, Robinson P T, 等. 西藏蛇绿岩铬铁矿中的金刚石研究[J]. *地质学报*, 2001, 75(3): 404–409. Bai Wenji, Yang Jingsui, Robinson P T, et al. Study of Diamonds from chromitites in the Luobusa Ophiolite, Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 75(3):404–409(in Chinese with English abstract).
- [10] 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辉岩中发现金刚石: 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. Diamond 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)
- [11] 杨经绥, 徐向珍, 白文吉, 等. 蛇绿岩型金刚石的特征[J]. *岩石学报*, 2014, 30(8): 2113–2124. Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Bai Wenji, et al. Features of diamond in ophiolite[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(8): 2113–2124 (in Chinese with English abstract)
- [12] Yang J S, Robinson P T, Dilek Y. Diamonds in ophiolites[J]. *Element*, 2014, 10:127–130.
- [13] Yang J S, Meng F C, Xu X Z, et al. Diamonds, native elements and metal alloys from chromitites of the Ray–Iz ophiolite of the Polar Urals[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 459–485. DOI: 10.1016/j.gr.2014.07.004.
- [14] 黄圭成. 西藏雅鲁藏布江西段蛇绿岩及铬铁矿研究[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2006. Huang Guicheng. Study on the Ophiolite and Chromite in the Western Part of the Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), PhD Thesis, 2006(in Chinese with English abstract).
- [15] 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辉岩体[J]. *岩石学报*, 2011, 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(11): 3207–3222 (in Chinese with English abstract).
- [16] 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*, 27(11): 3223–3238(in Chinese with English abstract).
- [17] Melcher F, Meisel T, Puhl J, et al. Petrogenesis and geotectonic setting of uliramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry[J]. *Lithos*, 2002, 65: 69–112.
- [18] Taylor S R, McLennan S M. The continental crust: its composition and evolution[M]. Oxford: Blackwells Scientific, 1985.
- [19] 张旗, 周国庆. 中国蛇绿岩[M]. 北京: 科学出版社, 2001. Zhang Qi, Zhou Guoqing. Ophiolite in China[M]. Beijing: Science Press, 2011(in Chinese).
- [20] 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).
- [21] 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]. 中国地质科学院博士学位论文. 2009. Xu Xiangzhen. Origin of the Kangjinla podiform chromite deposit and mantle peridotite, South Tibet[D]. Chinese Academy of Geological Science, PhD Thesis, 2009 (in Chinese with English abstract).
- [22] Gass I G. Is the Troodos Massif of Cyprus a fragment of Mesozoic ocean floor? [J]. *Nature*, 1968, 220: 39–42.
- [23] Moores E M, Vine F J. The Troodos Massif of Cyprus, and other

- ophiolites as ocean crust: evaluation and implications[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1971, 268: 443-467.
- [24] Girardeau J, Mercier J C C, Zao Y G. Structure of the Xigaze ophiolite, Yarlung Zangbo suture zone, southern Tibet, China: Genetic implications[J]. *Tectonics*, 1985, 4: 267-288.
- [25] Nicolas A, Boudier F. Where ophiolites come from and what they tell us[J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 2003, 373: 137-152.
- [26] Pearce J A. Basalt geochemistry used to investigate past tectonic environments on Cyprus[J]. *Tectonophysics*, 1975, 25: 41-67.
- [27] Pearce J A. Supra-subduction zone ophiolites: the search for modern analogues[J]. *Geological Society of America, Special Paper*, 2003, 373: 269-293.
- [28] Robinson P T, Malpas J, Xenophontas C. The Troodos Massif of Cyprus: its role in the evolution of the ophiolite concept[J]. *Geological Society of America Special Papers*, 2003, 373: 295-308.
- [29] Rollinson H, Adetunji J. Mantle podiform chromitites do not form beneath mid-ocean ridges: A case study from the Moho transition zone of the Oman ophiolite[J]. *Lithos*, 2013, 177: 314-327.
- [30] Dilek Y, Furnes H. Ophiolites and their origins[J]. *Elements*, 2014, 10: 93-100.
- [31] Pearce J A, Lippard S J, Roberts S. Characteristics and tectonic significance of supra-subduction zone ophiolites[J]. *Geological Society, London Special Publication*, 1984, 16: 77-94.
- [32] Dilek Y, Furnes H. Ophiolite genesis and global tectonics: geochemical and tectonic fingerprinting of ancient oceanic lithosphere[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2011, 123: 387-411.
- [33] 熊发挥,杨经绥,李源,等.西藏雅鲁藏布江缝合带西段东波蛇绿岩的构造背景特征[J]. *地球学报*, 2015, 36(1): 31-40.
Xiong Fahui, Yang Jingsui, Li Yuan, et al. Tectonic setting of Dongbo ophiolite in the western portion of the Yarlung Zangbo Suture Zone, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2015, 36(1): 31-40 (in Chinese with English abstract).
- [34] 刘飞, 杨经绥, 陈松永, 等. 雅鲁藏布江缝合带西段基性岩地球化学和Nd-Pb同位素特征: 新特提斯洋内俯冲的证据[J]. *中国地质*, 2013, 40(3): 742-755.
Liu Fei, Yang Jingsui, Chen Songyong, et al. Geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopic composition of mafic rocks in the western part of Yarlung Zangbo suture zone: Evidence for intra-oceanic supra-subduction within the Neo-Tethys[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 742-755 (in Chinese with English abstract)
- [35] Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotopic systematic of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[C]//aunders A D, Norry M J (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Geological Society, London, Special Publications, 1989, 42(1): 313-345.
- [36] Condie K C. *Mantle Plumes and Their Record in Earth History*[M]. Cambridge University Press, 2001: 1-306.
- [37] 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).
- [38] 叶先仁,陶明信,余传鳌,等.用分段加热法测定的雅鲁藏布江蛇绿岩的He、Ne同位素组成:来自深部地幔的信息[J]. *中国科学(D辑)*, 2007, 37(5): 573-583.
Ye Xianren, Tao Mingxin, Yu Chuanao, et al. Helium and neon isotopic compositions in the ophiolites from the Yarlung Zangbo River, Southwestern China: The information from deep mantle[J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(5): 573-583 (in Chinese).
- [39] 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(4): 1141-1150.
Yange Jingsui, Ba Dengzhu, Xu Xiangzhen, et al. A restudy of podiform chromite deposits and their ore-prospecting vista in China[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 1141-1150 (in Chinese with English abstract).
- [40] 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).
- [41] Robinson P T, Trumbull R B, Schmitt A, et al. The origin and significance of crustal minerals in ophiolitic chromitites and peridotites[J]. *Gondwana Research*, 2015, 27: 486-506
- [42] Thayer T P. Chromite segregation as petrogenetic indicator[J]. *Geological Society of South Africa Special Publication*, 1970, 1: 380-390
- [43] Huang Z, Yang J S, Robinson P T, et al. The discovery of diamonds in chromitites of the Hegenshan ophiolite, Inner Mongolia, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 341-350
- [44] Tian Y Z, Yang J S, Robinson P T, et al. Diamond discovered in high-Al chromitites of the Sartohay ophiolite, Xinjiang Province, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2015, 89(2): 332-340
- [45] Yang J S, Larissa D, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875-878.
- [46] 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 Luobusa ophiolite, southern Tibet[J]. *Lithos*, 2009, 109: 314-322.