

郭国林, 杨经绥, 刘晓东, 等. 西藏泽当地幔橄榄岩中的异常矿物及其指示意义[J]. 中国地质, 2015, 42(5): 1483–1492.
Guo Guolin, Yang Jingsui, Liu Xiaodong, et al. Implications of unusual minerals in Zedang mantle peridotite, Tibet[J]. Geology in China, 2015, 42(5): 1483–1492(in Chinese with English abstract).

西藏泽当地幔橄榄岩中的异常矿物及其指示意义

郭国林^{1,2} 杨经绥¹ 刘晓东² 徐向珍¹ 张仲明¹ 田亚洲¹ 熊发挥¹ 武 勇¹

(1. 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;
2. 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:雅鲁藏布江蛇绿岩带内多个地幔橄榄岩体产有金刚石、碳硅石等异常矿物组合, 为了进一步探讨这些异常矿物形成的物理化学条件, 在前人已有的研究基础上, 对泽当地幔岩体中 526 kg 的方辉橄榄岩样品开展人工重砂矿物学研究工作。研究表明, 同雅鲁藏布江蛇绿岩带内的其他岩体相似, 泽当地幔橄榄岩也选出了包含金刚石、碳硅石、锆石等 30 余种矿物。异常矿物组合指示泽当地幔橄榄岩中存在局部的超高压、极还原环境, 可能经历了复杂的演化过程: 即古老地壳物质通过深俯冲或者折沉作用, 进入地幔甚至是地幔过渡带(410~660 km), 随后经历了超高压、极还原环境的改造, 在后续的地幔柱或地幔对流作用中从洋中脊上升至浅部环境并返回到地壳中。该过程中地幔橄榄岩中的异常矿物组合记录了岩石的演化信息, 因此开展地幔橄榄岩中异常矿物组合的精细矿物学研究, 对认识壳-幔物质交换以及深部地幔动力学过程都有重要的研究意义。

关键词:地幔橄榄岩; 泽当; 金刚石; 蛇绿岩; 西藏

中图分类号: P541; P588.12⁵ 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2015)05-1483-10

Implications of unusual minerals in Zedang mantle peridotite, Tibet

GUO Guo-lin^{1,2}, YANG Jing-sui¹, LIU Xiao-dong², XU Xiang-zhen¹, ZHANG Zhong-ming¹,
TIAN Ya-zhou¹, XIONG Fa-hui¹, WU Yong¹

(1. CARMA, State Key Laboratory of Continental Tectonics and Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China)

Abstract: The mineral assemblage of such minerals as diamond and moissanite has been discovered in several mantle peridotites in Yarlung Zangbo ophiolite belt. The authors collected 526 kg harzburgite rocks from Zedang mantle peridotite for artificial heavy mineral research so as to further investigate the physical and chemical environment of these unusual minerals. Diamond, moissanite and more than 30 other mineral species were discovered, similar to the result of other mantle peridotite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt. These unusual minerals show that high pressure, super-reduction conditions and numerous continental crust materials

收稿日期: 2015-06-16; 改回日期: 2015-07-08

基金项目: 国家自然科学基金(40930313, 41262002)、国家行业专项(SinoProbe-05-02)、中国地质调查局工作项目(12120115027201, 1212011121263)及中国地质科学院地质研究所基本科研业务费项目(J1526)联合资助。

作者简介: 郭国林, 男, 1979 年生, 副教授, 博士生, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 长期从事矿物学、岩石学科研与教学工作;
E-mail: gglrobin@163.com。

existed in mantle peridotite, suggesting that ancient crust might have experienced continental deep subduction or lithosphere delamination into mantle or even into mantle transition zone (410–660 km) at the early stage; subsequently these crustal materials were modified in an environment of high pressure and super-reduction in the deep mantle, and surged upward to shallow crust by mantle plume or mantle convection process. Unusual minerals were trapped within the mantle peridotite in such a recycling process. It is of great significance to understand crust mantle exchange and deep mantle dynamics for comprehensive research on mineralogy of unusual mineral assemblages in mantle peridotite.

Key words: mantle peridotite; Zedang; diamond; ophiolite; Tibet

About the first author: GUO Guo-lin, male, born in 1979, associate professor, doctor candidate, engages in study and teaching of mineralogy and petrology; E-mail: gglrobin@163.com.

国外在100多年前报道在蛇绿岩中发现了金刚石,如加拿大魁北克蛇绿岩中发现了金刚石^[1],随后在俄罗斯远东地区的阿尔卑斯型超镁铁岩中也发现了金刚石^[2]。中国在30多年前在西藏罗布莎和东巧铬铁矿中通过人工重砂的方法发现了西藏首颗金刚石^[3],随后在西藏罗布莎的康金拉矿区、香卡山矿区的铬铁矿内也陆续发现了金刚石^[4-5],而且在罗布莎铬铁矿的围岩方辉橄榄岩中也发现了金刚石等异常矿物^[6]。随着研究工作的进一步开展,在近2000 km的雅鲁藏布江缝合带中的6个地幔橄榄岩体中均发现了含有金刚石的异常矿物组合^[7-8],此外还在西藏丁青、新疆的萨尔托海以及国外如缅甸密支那、俄罗斯乌拉尔等的蛇绿岩中也发现有金刚石^[9]。根据这类金刚石的本身产状、粒径、内部包裹体特征及同位素组成的专属性特征,提出了蛇绿岩型金刚石新类型^[9-10],认为蛇绿岩中产出金刚石可能是一个普遍现象,蛇绿岩型金刚石是蛇绿岩经历的深部地质过程的记录者,可能隐藏有深部地幔信息。

尽管在世界上蛇绿岩中发现金刚石的实例越来越多,但早期学术界曾怀疑这些金刚石是选矿过程中的外来混染的结果^[11],直到最近几年在罗布莎和乌拉尔铬铁矿中发现原位金刚石^[12-13],才排除这种怀疑。事实上蛇绿岩中除了有金刚石产出之外,还伴生有许多同样具有重要环境指示意义的异常地幔矿物,如SiC、石墨、金属及自然元素类矿物、硫(砷)化合物、氧化物、硅酸盐、磷酸盐、碳酸盐类等^[14-15]。这些不寻常的地幔矿物群大多数都具有超高压结构,与深部地幔具有密切联系,因此在矿物学和地球动力学上都具有重要的研究意义。

近年来雅江东段的罗布莎岩体及铬铁矿内获得了大量异常地幔矿物的研究成果^[10,13,16-20],而同处东段的泽当岩体矿物学研究工作相对较为薄弱。

为了进一步验证蛇绿岩是否普遍性的产出有金刚石等异常矿物,笔者开展了对雅鲁藏布江缝合带的泽当地幔橄榄岩人工重砂的矿物学研究工作,查明其异常地幔矿物种类和组成。本文报道泽当地幔橄榄岩人工重砂工作中所发现的异常地幔矿物研究结果。

1 泽当超镁铁质岩体地质特征

雅鲁藏布江缝合带是印度板块与欧亚板块的分界线,北邻拉萨地块,南接喜马拉雅构造带,带内发育的雅鲁藏布江蛇绿岩带呈东西向延伸近2000 km,被认为是喜马拉雅特提斯洋壳和地幔的残余^[21-23]。其蛇绿岩按产出位置可分为西段(萨嘎以西至中印边境)、中段(昂仁-仁布)、东段(曲水-墨脱)三部分,出露的岩体从西到东主要有东波、普兰、休古嘎布、当穷、仲巴、萨嘎、桑桑、吉定、白朗、大竹卡、泽当、罗布莎等^[24-26],其中罗布莎岩体是中国主要的铬铁矿产区^[6]。泽当岩体位于泽当县城以西20 km,距离拉萨市200 km,该岩体呈北西西向展布,东西延伸近20 km,出露宽度1~4 km不等,面积约为45 km²(图1)。泽当蛇绿岩南面与晚三叠世复理石、侏罗-白垩纪火山沉积岩以逆冲断层相接,岩体向北逆冲推覆到古近-新近系罗布莎群和冈底斯花岗岩基之上,被认为是特提斯洋的洋内汇聚边界。泽当蛇绿岩经历了复杂的构造变形,但蛇绿岩基本的岩相仍可以被识别出来,主要由地幔橄榄岩、镁铁-超镁铁质堆积杂岩、辉长-辉绿岩墙和枕状、块状玄武岩组成。泽当蛇绿岩北侧的岛弧火成岩被称为泽当地体^[27-28],该火成岩主要由蚀变程度较高的玄武-安山质火山岩、细碧岩、蚀变安山岩及凝灰岩组成,年代学研究表明,泽当地体形成于155~160 Ma晚侏罗世^[29,30]。尽管对泽当蛇绿岩的形成时代没有太多的

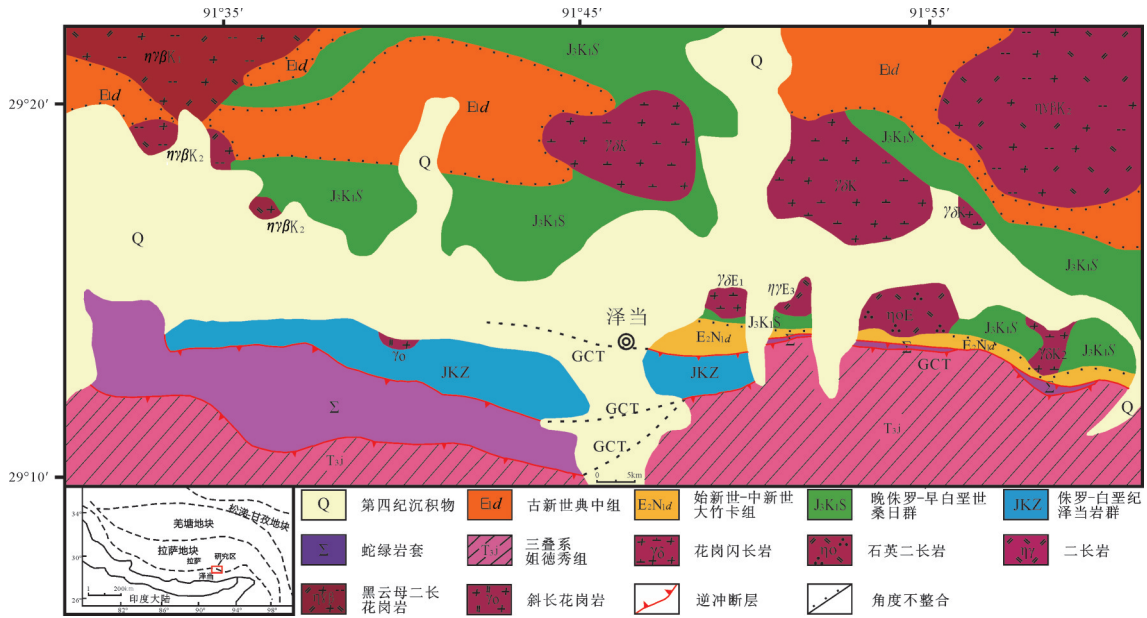


图1 泽当岩体地质简图^[33]
Fig.1 Geological map of Zedang area, Tibet

争议,但其形成的构造环境上,不同学者没有统一的认识,部分学者认为泽当地体代表了特提斯洋发展过程中的洋内岛弧的残片^[27-29,31],也有部分研究者认为泽当地体系晚侏罗纪新特提斯洋向北俯冲过程中,拉萨地块南缘发育的残片,代表了一个活动大陆边缘环境^[30,32]。

2 样品描述与研究方法

泽当岩体的地幔橄榄岩主要由方辉橄榄岩、含单斜辉石的方辉橄榄岩、纯橄岩以及少量基性岩脉组成,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。在泽当岩体的地幔橄榄岩,取样时考虑到泽当岩体南界的方辉橄榄岩有轻微的蛇纹石化,而北界靠近火山岩处的岩石新鲜且辉石含量高,所以本次人工重砂大样取自泽当岩体北侧鲁朗地区,样品为编号为10Y-308,岩性为含单斜辉石的方辉橄榄岩,总重量为526 kg。所采集样品的岩石表面新鲜,质地坚硬,风化面呈灰绿色,新鲜面为淡黄绿色。镜下岩石为典型的原生粒状结构(图2-a),组成矿物粒径多在0.2~0.6 cm,但辉石斑晶粒径有时可达1 cm以上。岩石整体为中-粗粒块状构造,变质变形程度较低。含单斜辉石的方辉橄榄岩主要由橄榄石(70%~90%)和辉石(10%~25%)组成,还可见到少量的单斜辉石、尖晶石。橄

榄石最大可达8 mm,可见到扭折带构造(图2-d),经常受力碎裂成碎斑或碎基状。斜方辉石粒径变化大,最大者可达10 mm,多数在3 mm以下,呈斑晶者也多发生扭折,与橄榄石、单斜辉石呈交错镶嵌结构,斜方辉石发育出溶条纹,受构造作用的影响,扭折带、出溶条纹、解理纹都有弯曲变形现象(图2-b、c)。单斜辉石含量较少,通常小于3%,粒径也比斜方辉石小,常在1~3 mm,也可见到出溶条纹,但不如斜方辉石发育。尖晶石是呈副矿物出现的,含量小于1%,粒经常小于2 mm,自形-半自形,多与斜方辉石共生,有时与斜方辉石构成后成合晶结构。该样品中橄榄石的Fo89~92,斜方辉石的Mg[#]88~91,铬尖晶石的Cr[#]36~52,属于典型MORB型亏损地幔橄榄岩^[34]。

矿物分选工作在国土资源部郑州矿产综合利用研究所完成,选矿步骤包括岩石初碎与分级,根据矿物粒度的大小,采用阶段破碎、阶段选矿的办法,采用跳汰机、磁选、摇床、化学处理、电选以及浮选工艺流程,最大限度保护目的矿物的晶体和颗粒形态的完整,详细的选矿工艺流程参阅相关文献说明^[4,35]。初选出来的矿物在双目镜下进行人工精选鉴定,并将挑选出来的矿物制靶使用相关仪器开展矿物鉴定和研究工作。矿物鉴定在大陆动力学国家重点实验室和放射性地质与勘探技术国防重点

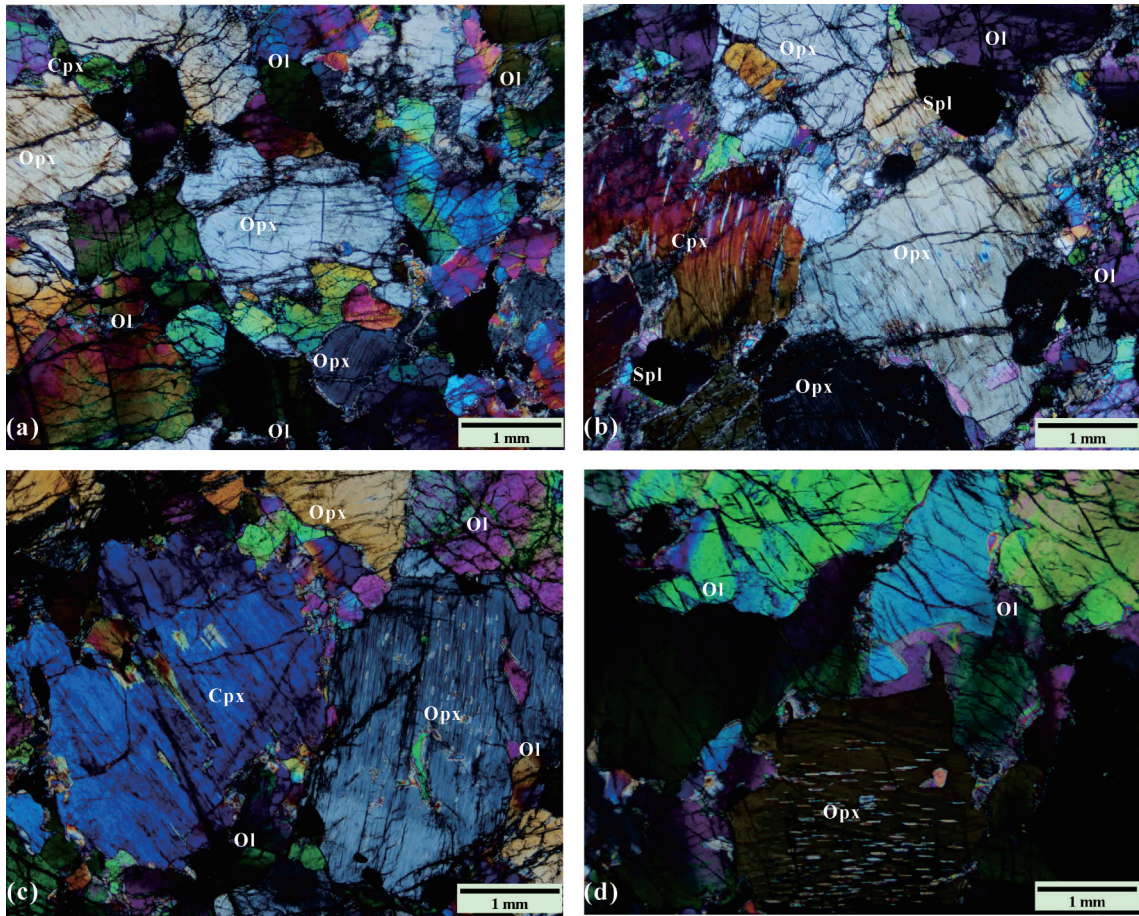


图2 泽当地幔橄辉岩显微照片

a—橄辉岩的原生粒状结构; b—构造应力作用下单斜辉石解理纹发生弯曲; c—单斜辉石和斜方辉石中显示有出溶条纹(单斜辉石); d—橄辉石发生扭折和波状消光; Ol—橄辉石; Opx—斜方辉石; Cpx—单斜辉石; Spl—尖晶石

Fig. 2 Microphotographs of Zedang mantle peridotite

a—Harzburgite with primary granular texture; b—Bending cleavage lines in clinopyroxene; c—Clinopyroxene exsolutions occurring in parallel in coarse orthopyroxene and clinopyroxene; d—Kink band and wavy extinction in olivine; Ol—Olivine; Opx—Orthopyroxene; Cpx—Clinopyroxene; Spl—Spinel

学科实验室中完成,所使用的仪器包括扫描电镜 JEOL JSM-5610LV 并配备(OXFORD)INCA 能谱仪(加速电压 20 kV,工作距离 20 mm,用 Co 标样校准能谱议)、电子探针 JEOL JXA-8100(加速电压 15 kV,工作距离 11 mm)、激光拉曼光谱仪(RENISHAW inVia)。

3 初步鉴定的异常矿物种类

本次选矿实验初步研究表明,该含单斜辉石的方辉橄辉岩大样中鉴别出金刚石、碳化硅、锆石等 30 余种矿物。其中自然元素类矿物有金刚石、自然硅、自然铜、自然金、自然锌、自然铬等;氧化物:方铁矿、刚玉、锡石、SiO₂、铬铁矿、金红石等;硅酸盐矿

物:锆石、橄辉石、斜方辉石、单斜辉石、金云母等;硫化物:黄铁矿、方镍矿、方铅矿、辉钼矿、辉铋矿、硫钨矿等;互化物:碳化硅、硅铁合金等;其它矿物如独居石、萤石等。

泽当岩体地幔橄辉岩的选矿实验中选出的金刚石共有 8 粒,颜色为浅黄绿色,粒径在 100~250 μm,呈现金刚光泽(图 3-a)。金刚石多为自形晶十二面体,晶面平直清晰,金刚石断面在扫描电镜下可见发育很好的生长纹(图 3-b)。对金刚石的激光拉曼测试显示,均为 1329~1331 cm⁻¹,为典型的金刚石位移峰(图 3-c),能谱分析的结果显示为单质碳。本次在泽当岩体的地幔橄辉岩中仅选出的 2 粒碳硅石,破碎外形,呈金刚光泽,颜色为蓝绿色,粒

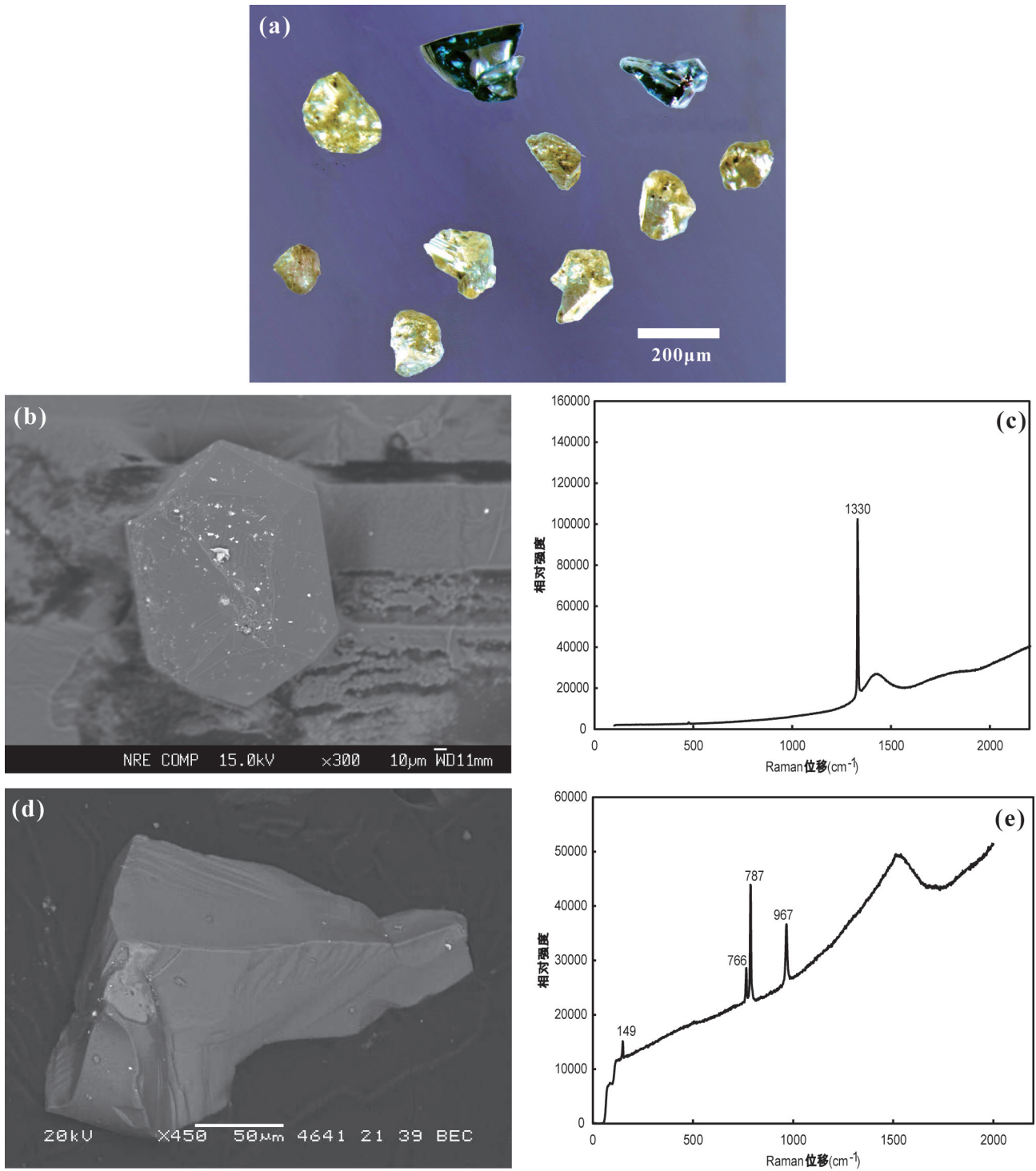


图3 泽当地幔橄榄岩中分选出的金刚石和碳硅石

a—体视镜下的金刚石(黄绿色)和碳硅石(上方蓝色颗粒); b—金刚石背散射电子像; c—金刚石拉曼谱图; d—碳硅石背散射电子像; e—碳硅石拉曼谱图

Fig. 3 Diamond and moissanite separated from the Zedang mantle peridotite

a—Diamond (yellowish green) and moissanite (blue at the upper left) under stereoscope; b—BSE image of diamond grain; c—Laser Raman spectra of diamond; d—BSE image of moissanite grain; e—Laser Raman spectra of moissanite

径 200 μm 左右(图 3-d,e),拉曼谱峰为 766 cm^{-1} , 787 cm^{-1} , 967 cm^{-1} 。泽当岩体地幔橄榄岩中选出 9 粒锆石,颜色为无色、浅紫色、紫色,透明到半透明,晶形从不完整的它形晶到长柱状、短柱状均有产出(图 4),另可见磨圆及熔蚀颗粒(图 4-b,c),粒径在 100~300 μm 。

4 泽当地幔橄榄岩成因探讨

铬铁矿及其围岩大洋地幔橄榄岩内存在不寻常的特殊地矿物,这是一个不争的事实^[9,12,14,35-38]。但同时也带来一系列需要研究者回答的科学问题,这些异常地幔矿物群原始产出环境如何? 隐含怎样的深部地球动力学过程?

4.1 泽当地幔橄榄岩中存在超高压条件

20 世纪 80 年代西藏藏南的罗布莎及藏北东巧的铬铁矿内就发现产有金刚石等异常矿物^[3],而后在极地乌拉尔铬铁矿中也发现了大量的金刚石^[12],特别是近年来康金拉 11 号铬铁矿体中发现了近千颗金刚石^[4]。不仅如此,随着研究工作的深入,在铬铁矿的围岩中也发现有金刚石产出^[6],而且这不是单个岩体独有的现象,在雅鲁藏布江发现有金刚石产出的地幔橄榄岩体有东波、普兰、当穷、日喀则、泽当、罗布莎等,此外还有缅甸密支那和藏北的丁青等,据统计已经在全球 5 个缝合带的 10 个蛇绿岩中发现产出金刚石。全球不同时代造山带内的地幔橄榄岩都产出有含金刚石的异常矿物组合^[9],指示产于板块缝合带的蛇绿岩可能普遍含有金刚石。研究者详细分析这类金刚石特有的极负的碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 为 -28‰ ~ -18‰)、包裹体类型、粒径、赋存岩石和产出背景等,发现他们与金伯利岩型金刚石、超高压变质型金刚石都完全不同,因而提出了一种新的金刚石类型—蛇绿岩型金刚石^[8-9]。

蛇绿岩中的地幔岩可能普遍含有金刚石^[9-10],说明地幔岩中存在能够形成金刚石的超高压的物理化学环境,还具备充足的碳源和极还原条件。研究表明金刚石是在氧化—还原条件位于方铁矿—磁铁矿和自然铁—方铁矿之间的还原条件下形成的,推测在距地表约 180 km 深处的岩石圈与软流圈分界线处以及 660 km 之下的下地幔环境都有可能出现狭窄的低氧逸度区间,这种物理化学条件下可结晶出金刚石^[39-46]。

4.2 泽当地幔橄榄岩中存在强还原环境

除了金刚石外,泽当地幔橄榄岩中还产出有碳硅石、硅铁合金、自然硅、自然铜、自然锌、自然铬等在低氧逸度环境下才能形成的异常矿物。实验研究发现,碳硅石在氧逸度高的条件下不稳定,只有在极低的氧逸度环境中才能形成^[47-49]。故碳硅石常被认为是来自于深部地幔,也常被发现产于陨石、金伯利岩(常与金刚石共生)和榴辉岩中^[50]。泽当地幔橄榄岩中产出有碳硅石、金刚石等只有在极还原条件下才能形成并稳定存在,说明地幔橄榄岩体中局部存在极还原环境。

4.3 泽当地幔橄榄岩中存在大量壳源物质

泽当地幔橄榄岩还发现大量的锆石矿物,其形态颜色多样,表面形态也各异,有些显示熔蚀状或浑圆状晶体形态,反映锆石成因和来源具有多样性。Robinson 等^[19]对罗布莎、东巧、阿曼、极地乌拉尔等地的地幔橄榄岩及铬铁矿中产出的锆石做了详细的矿物学和年代学研究,发现这些锆石中含有大量的壳源矿物组合的矿物包裹体,并且锆石同位素年龄介于 90~2500 Ma,比寄主岩石的年龄老得多,指示这些锆石来自于古老的地壳物质^[19]。此外地幔橄榄岩中的金刚石和碳化硅都有极轻的碳同位素值($\delta^{13}\text{C}$ 为 -18‰ ~ -28‰)^[10,51],明显不同于典型的地幔碳同位素组成($\delta^{13}\text{C}$ 为 -5‰ 左右)^[52],指示地幔橄榄岩中的金刚石和碳化硅的碳源来自于洋壳的沉积物(变质的有机质或碳酸盐)。巴西亚马逊克拉通西南部的金伯利岩管中的金刚石及其包裹体的碳同位素研究发现,来自下地幔的金刚石包裹体具有与大洋壳相似的碳同位素组成,这是玄武质的大洋地壳能够进入到下地幔提供了直接的岩石学证据^[53]。最近公布的新矿物青松矿具有超高压成因^[54],其形成深度大于 300 km,而其组成成分硼(B)被认为是地壳来源^[44,55]。以上这些证据表明,地幔中含有相当量的地壳物质,即地壳物质能通过某种形式进入深部地幔,甚至到达地幔过渡带^[56]。

5 结论与认识

尽管经典的板块构造理论认为,蛇绿岩中的地幔橄榄岩是洋中脊附近地幔部分熔融,抽取玄武质岩浆后的残留物,即认为地幔橄榄岩形成于浅部(< 50 km)。近年的研究表明铬铁矿和蛇绿岩地幔橄

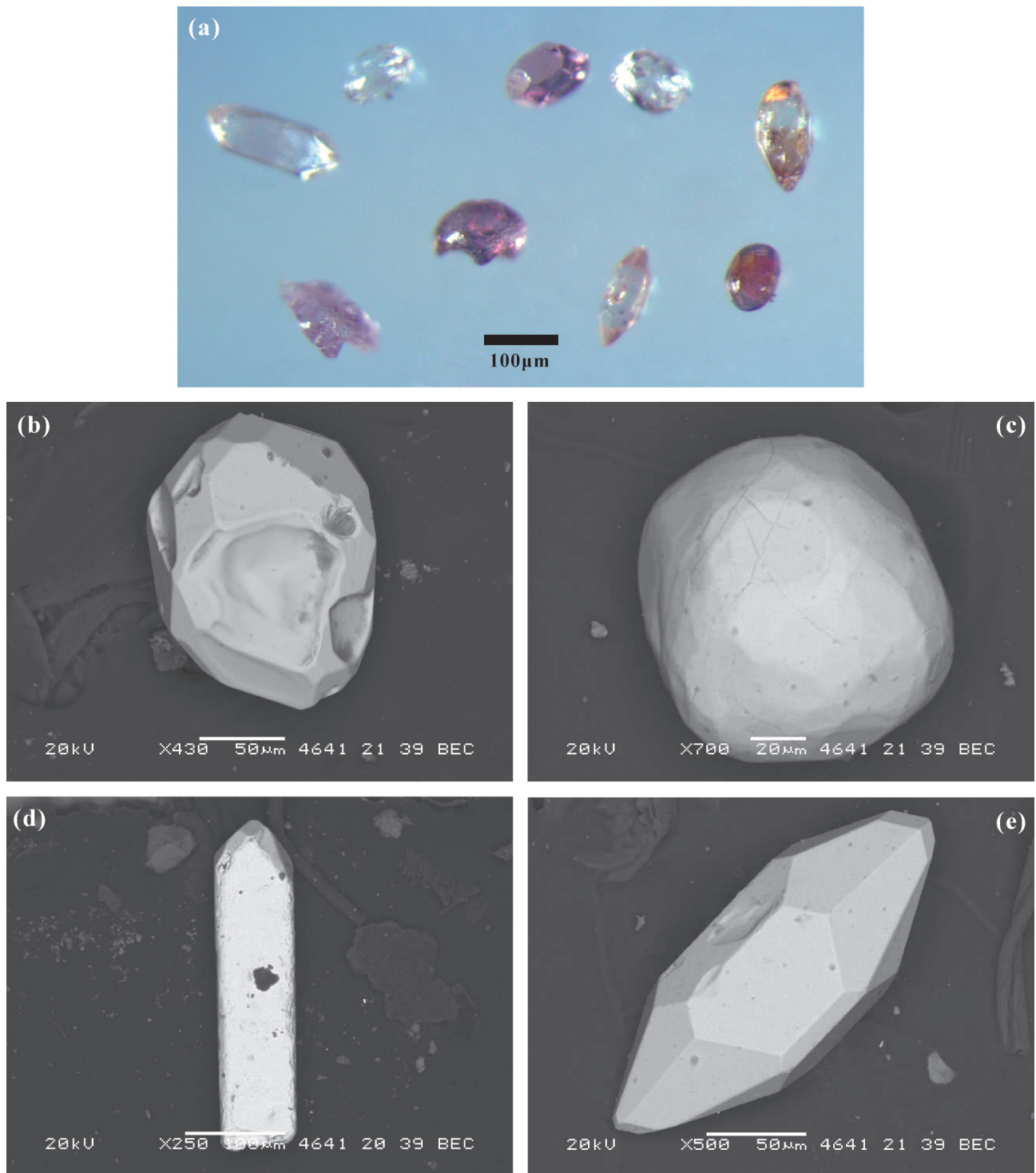


图4 泽当地幔橄榄岩中分选出的锆石

a—体视镜下不同特征的锆石; b—溶蚀状锆石; c—浑圆状锆石; d—柱状锆石; e—自形锆石

Fig. 4 Zircon separated from the Zedang mantle peridotite

a—Various zircons with different characteristics under stereoscope; b—BSE image of zircon with corrosion structure; c—BSE image of rounded zircon; d—BSE image of cylindrical zircon; e—BSE image of euhedral zircon

幔岩中普遍含有超高压、极还原环境条件下形成的矿物,而且也包含众多的壳源物质,可能系早期地壳物质进入到地幔中甚至地幔过渡带(410~660 km)并经历了高压、极还原的物理化学环境。目前研究认为通过大陆深俯冲作用或者折沉作用,壳源物质是有能力到达地幔过渡带的,而地幔过渡带物质在进一步的地幔全对流过程中可能与下部地幔发生物质交换^[56,57]。

地幔橄榄岩中产出众多的超高压、极还原矿物,并含有大量的地壳物质,使得人们逐渐重视地幔橄榄岩的深部成因研究,并提出大陆深俯冲、折沉作用和地幔柱等成因模式^[17,19,44,58-61]。尽管目前对其成因模式还有一定的争异,但在这个深循环过程中地幔橄榄岩内包含了大量的异常矿物组合,可能隐含地幔橄榄岩的成因信息。

致谢:野外地质调查工作得到了巴登珠、来盛民、黄竺等的帮助;样品制备工作、激光拉曼分析以及扫描电镜照相和能谱分析在大陆构造与动力学国家重点实验室和放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室中完成;匿名审稿人和责任编辑李亚萍老师对本文提出了宝贵修改意见,在此表示感谢。

参考文献(References):

- [1] Dresser J. Preliminary report on the serpentine and associated rock of Southern Quebec[J]. Memoir - Geological Survey of Canada, 1913,22: 1-103.
- [2] Shilo N, Kaminskiy F, Palandzhyan S, et al. First diamond finds in Alpine-type ultramafic rocks of the Northeastern USSR[C]. Doklady Akademiya Nauk SSSR, Earth Science Sections,1978: 179-182.
- [3] 方青松, 白文吉. 西藏首次发现含金刚石的阿尔卑斯型岩体特征[J]. 地质论评, 1981, 27(5): 445-447.
Fang Qingsong, Bai Wenji. 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).
- [4] 徐向珍, 杨经绥, 巴登珠, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩带的康金拉铬铁矿中发现金刚石[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1453-1462.
Xu Xiangzhen, Yang Jingsui, Ba Dengzhu, et al. Diamond discovered from the kangjinla chromitite in the Yarlung Zangbo ophiolite belt, tibet[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7): 1453-1462(in Chinese with English abstract).
- [5] 徐向珍. 藏南康金拉豆荚状铬铁矿和地幔橄榄岩成因研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2009.
Xu Xiangzhen. Origin of the Kangjinla Podiform Chromite Deposit and Mantle Peridotite, South Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2009(in Chinese with English abstract).
- [6] 杨经绥, 张仲明, 李天福, 等. 西藏罗布莎铬铁矿体围岩方辉橄榄岩中的异常矿物[J]. 岩石学报, 2008, 24(7): 1445-1452.
Yang Jingsui, Zhang Zhongming, Li Tianfu, et al. Unusual minerals from harzburgite, the host rock of the Luobusa chromite deposit, tibet [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(7): 1445-1452 (in Chinese with English abstract).
- [7] 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, 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] Yang J S, Paul T R, Yildirim D. Diamonds in ophiolites[J]. Elements, 2014, 10: 127-130.
- [11] Taylor W R, Milledge H J, Griffin B J, et al. Characteristics of microdiamonds from ultramafic massifs in Tibet: Authentic ophiolitic diamonds or contamination?[J]. Sixth International Kimberlite Conference: Proceedings of the International Kimberlite Conference, 1995, 6: 623-624.
- [12] 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).
- [13] Yang J S, Dobrzynetska L, Bai W J, et al. 2007. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. Geology, 35(10): 875-878.
- [14] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩中不寻常的地幔矿物群[J]. 中国地质, 2003, 30(2): 144-150.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. An unusual mantle mineral group in ophiolites of Tibet[J]. Geology in China, 2003, 30(2):144-150(in Chinese with English abstract).

- [15] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 西藏蛇绿岩的超高压矿物: FeO、Fe、FeSi、Si 和 SiO₂ 组合及其地球动力学意义[J]. 地球学报, 2002, 23(5): 395–402.
Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. Ultra-High Pressure Minerals: FeO, Fe, FeSi, Si and SiO₂ Assemblage from Ophiolite in Tibet and Its Earth Dynamic Significance [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2002, 23(5): 395–402(in Chinese with English abstract).
- [16] McGowan N M, Griffin W L, Gonzalez-Jimenez J M, et al. Tibetan chromitites: Excavating the slab graveyard[J]. Geology, 2015, 42(27): 179–182.
- [17] Xiong F H, Yang J S, Robinson P T, et al. Origin of podiform chromitite, a new model based on the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. Gondwana Research, 2015, 27: 525–542.
- [18] 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(3): 314–322.
- [19] 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.
- [20] Xu X Z, Yang J S, Robinson P T, et al. Origin of ultrahigh pressure and highly reduced minerals in podiform chromitites and associated mantle peridotites of the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. Gondwana Research, 2015, 27(0): 686–700.
- [21] Nicolas A, Girardeau J, Marcoux J, et al. The Xigaze ophiolite (Tibet): a peculiar oceanic lithosphere[J]. Nature, 1981, 294: 414–417.
- [22] 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等. 西藏蛇绿岩[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
Wang Xibin, Bao Peisheng, Deng Wanming, et al. Tibet Ophiolite[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987(in Chinese with English abstract).
- [23] 肖序常, 王方国. 中国蛇绿岩概论[J]. 中国地质科学院院报, 1984, 9: 19–30.
Xiao Xuchang, Wang Fangguo. An introduction to the ophiolite of China[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1984, 9: 19–30(in Chinese with English abstract).
- [24] 黄圭成, 莫宣学, 徐德明, 等. 西藏西南部达巴—休古嘎布蛇绿岩带的形成与演化[J]. 华南地质与矿产, 2006, 3: 1–9.
Huang Guicheng, Mo Xuanxue, Xu Deming, et al. Origination and evolution of Daba–Xiugugabu ophiolite belt in the southwestern Tibet[J]. Geology and Mineral Resources of South China, 2006, 3: 1–9(in Chinese with English abstract).
- [25] 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.
Pan Guitang, Chen Zhiliang, Li Xingzhen. Geological–tectonic Evolution in the Eastern Tethys [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(in Chinese with English abstract).
- [26] Dai J G, Wang C S, 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(3/4): 133–148.
- [27] Aitchison J C, Davis A M, Liu J, et al. Remnants of a Cretaceous intra-oceanic subduction system within the Yarlung–Zangbo suture (southern Tibet) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2000, 183(1): 231–244.
- [28] McDermid I R C, Aitchison J, Davis A M, et al. The Zedong terrane: a Late Jurassic intra-oceanic magmatic arc within the Yarlung–Tsangpo suture zone, southeastern Tibet[J]. Chemical Geology, 2002, 187(3/4): 267–277.
- [29] 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 Zedang ophiolite in Tibet and its geological implications[J]. Geological Bulletin of China, 2013, 32(9): 1356–1361(in Chinese with English abstract).
- [30] Zhang L L, Liu C Z, Wu F Y, et al. Zedong terrane revisited: An intra-oceanic arc within Neo-Tethys or a part of the Asian active continental margin?[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 80: 34–55.
- [31] 李强, 夏斌, 黄强太, 等. 雅鲁藏布江蛇绿岩带东段泽当蛇绿岩起源及演化[J]. 地质学报, 2014, 88(2): 145–166.
Li Qiang, Xia Bin, Huang Qiangtai, et al. The origin and evolution of Zedang ophiolite in the eastern Yarlung–Zangbo suture zone, southern Tibet[J]. Acta Geological Sinica, 2014, 88(2): 145–166(in Chinese with English abstract).
- [32] 吴福元, 刘传周, 张亮亮, 等. 雅鲁藏布蛇绿岩——事实与臆想[J]. 岩石学报, 2014, 30(2): 293–325.
Wu Fuyuan, Liu Chuanzhou, Zhang Liangliang, et al. Yarlung Zangbo ophiolite: a critical updated view [J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 293–325(in Chinese with English abstract).
- [33] 赵珍. 西藏冈底斯泽当矿田构造岩浆演化与成矿作用[D]. 北京: 中国地质科学院, 2013.
Zhao Zhen. Tectonic–magmatic evolution and mineralization of Zedang orefield in Gangdese, Tibet[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Science, 2013(in Chinese with English abstract).
- [34] 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: 54–76.
- [35] 白文吉, 周美付, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金金刚石及伴生矿物成因[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
Bai Wenji, Zhou Meifu, Robinson P T, et al. Origin of Podiform Chromitites, Diamonds and Associated Mineral Assemblage in

- Luobusa Ophiolite, Tibet [M]. Beijing: Seismological Press ,2000 (in Chinese with English abstract).
- [36] 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).
- [37] 白文吉, 杨经绥, 方青松, 等. 寻找超高压地幔矿物的储存库[J]. 地学前缘, 2005, 8(3): 111–121.
Bai Wenji, Yang Jingsui, Fang Qingsong, et al. Study on a storehouse of ultrahigh pressure mantle minerals—Podiform chromite deposits[J]. Earth Science Frontiers, 2005, 8(3): 111–121 (in Chinese with English abstract).
- [38] 杨经绥, 徐向珍, 戎合, 等. 蛇绿岩地幔橄榄岩中的深部矿物: 发现与研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2013, 32(2): 159–170.
Yang Jingsui, Xu Xiangzhen, Rong He, et al. Deep minerals in ophiolitic mantle peridotites: discovery and progress [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2013, 32(2): 159–170(in Chinese with English abstract).
- [39] Haggerty S E. Carbonado: Physical and chemical properties, a critical evaluation of proposed origins, and a revised genetic model[J]. Earth–Science Reviews, 2014, 130(0): 49–72.
- [40] Hart B, Richardson S.H. Mineral inclusions in diamonds track the evolution of a Mesozoic subducted slab beneath West Gondwanaland[J]. Gondwana Research, 2012, 21: 236–245.
- [41] Hart B. Diamond formation in the deep mantle: the record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle zones[J]. Mineralogical Magazine, 2010, 74: 189–215.
- [42] Haggerty S E. A diamond trilogy: superplumes, supercontinents, and supernovae[J]. Science, 1999, 285: 851–860.
- [43] Haggerty S E. Diamond genesis in a multiply constrained model[J]. Nature, 1986, 320: 34–38.
- [44] 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).
- [45] Cartigny P. Stable isotopes and the origin of diamond[J]. Elements, 2005, 1: 79–84.
- [46] Stachel T, Brey G P, Harris J W. Inclusions in sublithospheric diamonds: Glimpses of deep earth[J]. Elements, 2005, 1: 73–78.
- [47] Ulmer G, Grandstaff D E, Woermann E, et al. The redox stability of moissanite (SiC) compared with metal–metal oxide buffers at 1773 K and at pressures up to 90 kbar[J]. Neues Jahrbuch Fur Mineralogie Monatshefte, 1998, 172: 279–307.
- [48] Dobrzynetskaya L F, Green H W. Experimental studies of mineralogical assemblages of metasedimentary rocks at Earth's mantle transition zone conditions[J]. Journal of Metamorphic Geology, 2007, 25: 83–96.
- [49] Mathez E A, Fogel R A, Hutcheon I D, et al. Carbon isotopic composition and origin of SiC from kimberlites of Yakutia, Russia[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(4): 781–791.
- [50] Hazen R M, Downs R T, Jones A P, et al. Carbon mineralogy and crystal chemistry[J]. Review in Mineralogy & Geochemistry, 2013, 75: 7–46.
- [51] Trumbull R B, Yang J S, Robinson P T, et al. The carbon isotope composition of natural SiC (moissanite) from the Earth's mantle: New discoveries from ophiolites[J]. Lithos, 2009, 113(3): 612–620.
- [52] Burgess R, Cartigny P, Harrison D, et al. Volatile composition of microinclusions in diamonds from the Panda kimberlite, Canada: Implications for chemical and isotopic heterogeneity in the mantle[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2009, 73(6): 1779–1794.
- [53] Walter M, Kohn S, Araujo D, et al. Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions[J]. Science, 2011, 334(6052): 54–57.
- [54] Williams P, Hatert F, Pasero M, et al. New minerals and nomenclature modifications approved in 2013[J]. Mineralogical Magazine, 2013, 77(6): 2695–2709.
- [55] Dobrzynetskaya L F, Yang J S, Hutcheon I D, et al. Qingsongite, natural cubic boron nitride: The first boron mineral from the Earth's mantle[J]. American Mineralogist, 2014, 99: 764–772.
- [56] Billen M I. Slab dynamics in the transition zone[J]. Physics of the Earth & Planetary Interiors, 2010, 183(1/2): 296–308.
- [57] Niu F L, Levander A, Ham S, et al. Mapping the subducting Pacific slab beneath southwest Japan with Hi– net receiver functions[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2005, 239: 9–17.
- [58] Huang M X, Yang J J, Powell R, et al. High– pressure metamorphism of serpentinized chromitite at Luobusha (southern Tibet) [J]. American Journal of science, 2014, 314(1): 400–433.
- [59] Zhou M F, Robinson P T, Su B X, et al. Compositions of chromite, associated minerals, and parental magmas of podiform chromite deposits: The role of slab contamination of asthenospheric melts in suprasubduction zone environments[J]. Gondwana Research, 2014, 26(1): 262–283.
- [60] Liou J G, Tsujimori T. The fate of subducted continental crust: evidence from recycled UHP–UHT minerals[J]. Elements, 2013, 9 (4): 248–250.
- [61] Liou J G, Tsujimori T, Yang J S, et al. Recycling of crustal materials through study of ultrahigh– pressure minerals in collisional orogens, ophiolites, and mantle xenoliths: A review[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 96: 386–420.