

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.405>



阿尔巴尼亚布尔其泽纯橄岩壳中橄榄石的包裹体研究

熊发挥¹, 杨经绥¹, 徐向珍^{1*}, 郝晓琳²

1. 中国地质科学院地质研究所国土资源部深地动力学重点实验室, 地幔研究中心, 北京 100037
2. 中地宝联(北京)国土资源勘查技术有限公司, 北京 100193

摘要: 阿尔巴尼亚布尔其泽纯橄岩壳非常新鲜, 主要由橄榄石、尖晶石和单斜辉石等矿物组成, 其中橄榄石存在单斜辉石和铬尖晶石(磁铁矿)共生包裹体现象, 包裹体矿物粒度在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$, 有些甚至为纳米级 $200\sim 500\ \text{nm}$. 纯橄岩橄榄石的 Fo 值为 $94.7\sim 96.0$, 铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 为 $76.5\sim 82.4$, 远高于蛇绿岩地幔橄橄榄岩中常见纯橄岩的铬值($\text{Cr}^\# > 60$). 基于前人研究结果, 提出这种现象是由于亏损方辉橄橄岩与含钛、铬、铁熔体发生交代作用, 从而形成橄榄石的固溶体并存在 Ti^{4+} 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} , 而部分 Cr^{3+} 进入铬尖晶石结晶. 后期由于岩体在抬升过程中降温, 橄榄石中混溶的组分析出包裹体形成磁铁矿和铬尖晶石. 并且依据铬尖晶石—橄榄石的矿物化学成分, 识别出岩体内方辉橄橄岩相对较低的部分熔融程度约为 $30\%\sim 40\%$, 纯橄岩部分熔融程度约为 40% , 表明不同岩相间其形成背景存在明显差异. 因此, 认为布尔奇泽蛇绿岩具有多阶段的过程, 首先是在洋中脊环境下经历部分熔融作用形成了方辉橄橄岩, 后受到俯冲环境(SSZ)的岩石—熔体反应生成更富 Mg、Si 和 Cr 等的熔体, 致使地幔橄橄岩高度部分熔融, 形成此类纯橄岩.

关键词: 纯橄岩; 包裹体; 布尔奇泽蛇绿岩岩体; 阿尔巴尼亚; 岩石学.

中图分类号: P315

文章编号: 1000-2383(2018)05-1464-10

收稿日期: 2017-10-01

Inclusions in Olivine and Implications—Based on Mineral Research of Dunite of Bulqiza Ophiolite, Albania

Xiong Fahui¹, Yang Jingsui¹, Xu Xiangzhen^{1*}, Hao Xiaolin²

1. Institute of Geology, Key Laboratory of Deep-Earth Dynamics of Ministry of Land and Resources, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China

2. Zhongdibaolian (Beijing) Land and Resources Exploration Technology Co. Ltd., Beijing 100193, China

Abstract: Cinopyroxene and spinel (magnetite) occur as oriented intergrowths within olivine of the dunite in the Bulqiza ophiolite, Albania. The size of the inclusion minerals is $1\sim 10\ \mu\text{m}$, and some of them are nanoscale in $200\sim 500\ \text{nm}$. The fresh dunite has a mineral assemblage of olivine, spinel and cinopyroxene. The Fo content of its olivine is $94.7\sim 96.0$, and the $\text{Cr}^\#$ of spinel is about $76.5\sim 82.4$, higher than that in the spinel in common dunite from ophiolite mantle ($\text{Cr}^\# > 60$). Thus it is proposed that previously depleted mantle harzburgite reacted with the melt containing Ti, Cr, Fe, and produced an olivine solid solution added with Ti^{4+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Fe^{3+} , and some of Cr^{3+} entered interstitial chromite. Due to the fast cooling rate of the rock or rapid tectonic emplacement, the exsolution textures in olivine and compositional zones of chromite are preserved. Based on the mineral compositions of chromian spinel-olivine, it is found that the relatively low partial melting degree of the harzburgite is $30\%\sim 40\%$, and the degree of partial melting of dunite is about 40% , indicating a significant difference of tectonic setting. It is suggested that the Bulqiza ophiolite had multi-stage evolution processes. When oceanic crustal slabs were trapped in mid ocean

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41502062, 41672046, 41541017, 41641015); 行业基金项目 (No. 2015111022); 中国地质调查局工作项目 (No. DD20160023); 国际地学计划 IGCP-649 项目.

作者简介: 熊发挥 (1985—), 男, 博士, 副研究员, 矿物学、岩石学、矿床学专业. E-mail: xiongfahui@126.com

*** 通讯作者:** 徐向珍, E-mail: xuxiangzhensjl@aliyun.com

引用格式: 熊发挥, 杨经绥, 徐向珍, 等, 2018. 阿尔巴尼亚布尔其泽纯橄岩壳中橄榄石的包裹体研究. 地球科学, 43(5): 1464-1473.

ridge, they were modified by tholeiitic magmas or partial melting, which occurred interaction or metasomatism, then later re-action with boninitic magma in suprasubduction zones (SSZ) generated more Mg, Si and Cr melt, resulting in high degree of partial melting for the mantle peridotite and dunite.

Key words: dunite; inclusions; Bulqiza ophiolite; Albania; petrology.

以薄片或者定向针状均匀分布在硅酸盐矿物内的氧化物/硅酸盐通常被认为是在母体矿物质混合时形成的沉淀物,钠长石在钾长石中以针状产出就是一个很好的例子.在超高压岩石的硅酸盐矿物中发现越来越多的定向氧化物/针状硅酸盐矿物,可以用来解释这些超高压母岩的来源(Zhang and Liou, 1999),例如,橄榄石中含 Ti 的钛铁矿出溶(Dobrzhinetskaya *et al.*, 1996),以及石榴子石中针状金红石等被解释为超高压的变质过程(van Roermund *et al.*, 2000; Song *et al.*, 2004).此外,定向析出体与主晶矿物的结晶学取向关系可能具有多解性(Hwang *et al.*, 2007a, 2007b, 2015).与变质橄榄岩不同的是蛇绿岩型橄榄岩并不经历强烈的变质作用,而更多的是岩浆/熔体作用.因此,蛇绿岩型橄榄岩的橄榄石中定向包体的发现对其成因研究具有特殊的指示意义.

蛇绿岩产在板块缝合带,是古洋壳的残留物,记录了古洋盆形成和汇聚造山的历史.蛇绿岩由喷出岩、岩墙群和堆晶岩等洋壳岩石组合和地幔橄榄岩组成.蛇绿岩地幔橄榄岩中通常会产出豆荚状铬铁矿,被认为是蛇绿岩的特征矿产之一,是世界上铬铁矿的重要来源.关于蛇绿岩的分类问题(主要指构造环境分类),许多学者作过详细的讨论.大多数学者

主张采用二分法,Pearce *et al.*(1984)将蛇绿岩分为洋脊型(MORB)和俯冲型(SSZ)(消减带之上的蛇绿岩型).世界上大多数蛇绿岩在地球化学特征上多多少少都显示了 SSZ 环境下的岩浆作用特征,或完全是 SSZ 环境形成的岩石.而且许多蛇绿岩会显示出两阶段演化特征,即蛇绿岩最初可能形成于洋脊的环境,而最终受到了 SSZ 过程的改造,例如:西藏罗布莎蛇绿岩 (Malpas *et al.*, 2003).现今世界上最大、保存最好、层序最完整的 SSZ 型蛇绿岩基本上都位于特提斯构造域内,整个构造域从大西洋向东经过中东地区,穿过西藏和缅甸,最后与古太平洋构造域汇合.特提斯蛇绿岩带形成于侏罗纪到白垩纪期间,是古特提斯洋到新特提斯洋的形成与演化结果(图 1).中东地区保存了世界上最大、层序最完整的蛇绿岩体,如:阿曼的 Semail 蛇绿岩、塞浦路斯的 Troodos 蛇绿岩、阿尔巴尼亚的 Mirdita 蛇绿岩、土耳其的 Kizildag 蛇绿岩.这些蛇绿岩都具有保存完整、岩石新鲜、研究程度较高的特征,同时产出大量的豆荚状铬铁矿.

阿尔巴利亚 Mirdita 蛇绿岩也是一个具完整蛇绿岩层序的经典蛇绿岩(Dilek *et al.*, 2008),该蛇绿岩位于阿尔巴尼亚东部,南—北向延伸近 200 km,被分为西段(WMO)和东段(EMO)两部

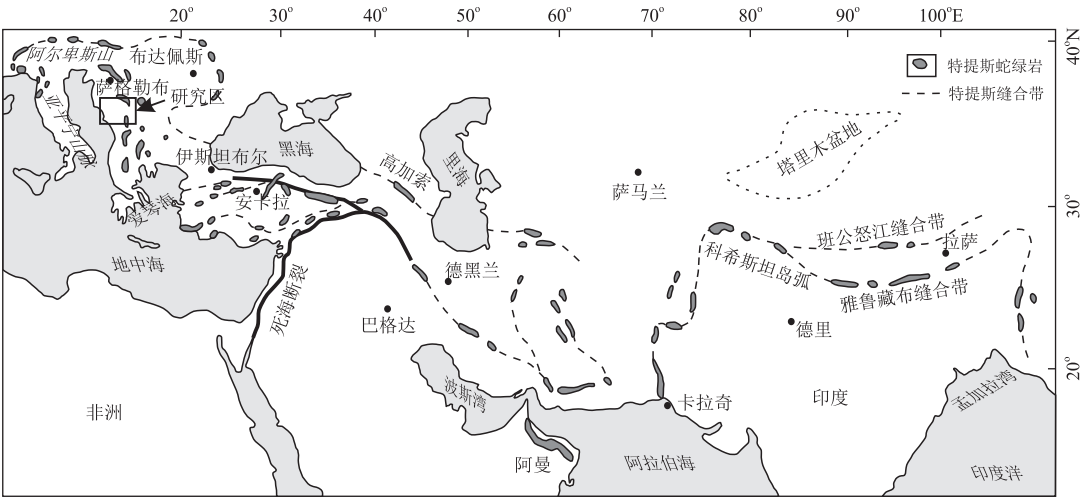


图 1 特提斯蛇绿岩的地质简图

Fig.1 Geological map of Tethys ophiolites

据 Xiong *et al.*(2015)修编

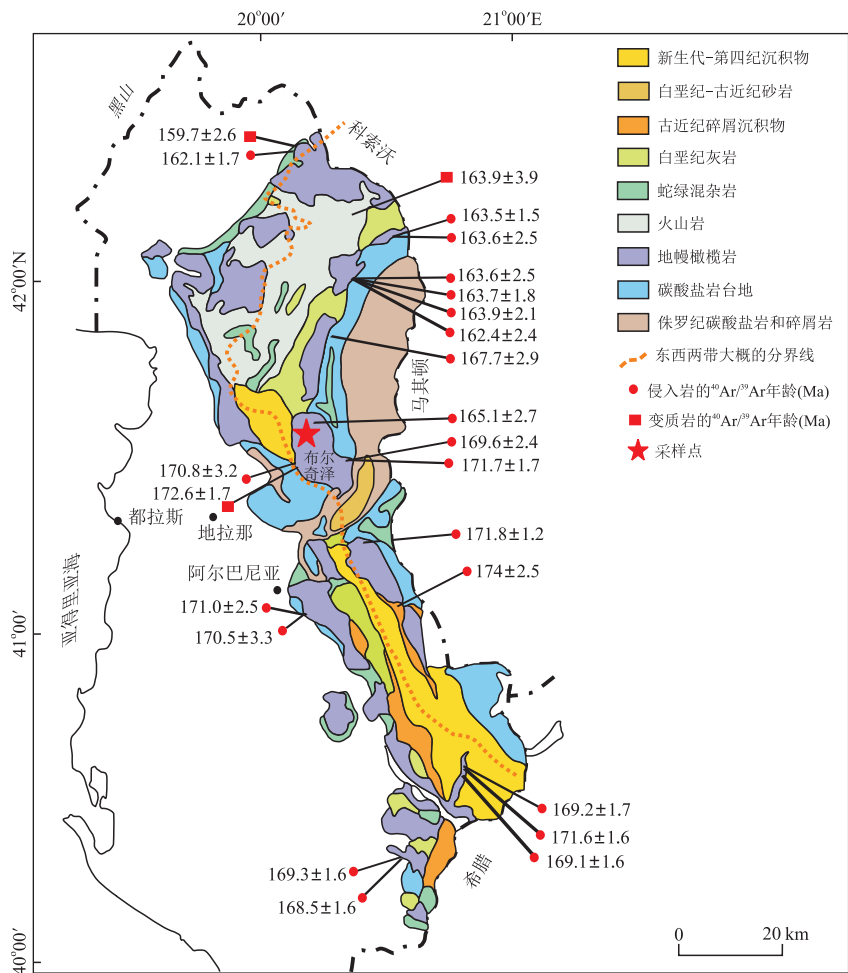


图 2 阿尔巴尼亚 Mirdita 蛇绿岩带东段布尔奇泽蛇绿岩的地质简图

Fig.2 Geological map of Bulqiza ophiolites in the eastern of Mirdita suture from Albania

据 Xiong *et al.*(2015)修编

分,分别具有 MORB 和 SSZ 特征.我们更关注于东段部分(EMO),因为它厚度达 12 km,而且还有一些世界级的铬铁矿矿床——布尔奇泽(Bulqiza)铬铁矿.该岩体呈北西—南东向带状展布,总面积约达 250 km²(图 2),岩体四周与围岩均为断层接触,西北侧为第四系沉积物,西南侧为碳酸盐岩台地,南部为侏罗纪碳酸盐岩和碎屑岩.岩体边部的超镁铁岩岩石破碎,蛇纹石化强烈,在岩体内部岩石新鲜.

前人对于布尔奇泽岩体的初步研究,提出了以下几种认识:基于地幔橄榄岩上层熔岩地球化学特征以及辉长岩/辉绿岩的特征,指示岩体可能形成于大洋中脊(MOR)环境,后期受到不同程度的俯冲带(SSZ)环境改造(Dilek *et al.*, 2008);通过研究岩体的豆荚状铬铁矿及橄榄岩矿物学和地球化学特征,提出了岩体 MOR→SSZ 的叠加演化过程(Xiong *et al.*, 2015);布尔奇泽地幔橄榄岩中超高压矿物金刚石与碳硅石的重大发现,表明布尔奇泽岩体类似于

罗布莎岩体,可能来源于深部地幔(Xiong *et al.*, 2016).上述研究表明布尔奇泽地幔橄榄岩可能为多阶段叠加的结果,而不同构造背景特征与布尔奇泽地幔橄榄岩成因联系还有待确定,每个阶段的岩相学和矿物学等痕迹尚需明确,是否存在不同构造背景的矿物结构的痕迹仍不得而知,早期研究表明蛇绿岩型超镁铁岩中的纯橄岩比较发育,存在 3 种产出类型,分别为厚层状纯橄岩、透镜状纯橄岩和薄壳状纯橄岩,透镜状纯橄岩被认为是部分熔融的结果,而厚层状和薄壳状纯橄岩为岩石—熔体反应的结果(Zhou *et al.*, 2005; 李金阳等,2012).笔者在前期工作的基础上,细化了布尔奇泽地幔橄榄岩中纯橄岩的多种类型,并在岩体内纯橄岩壳的橄榄石中发现了铬尖晶石(磁铁矿)和单斜辉石共生包体现象,提出布尔奇泽蛇绿岩多阶段的又一证据.

1 分析方法

在详细野外观测基础上,采集大量地幔橄榄岩的样品,并磨制光薄片,进而开展详细显微镜下岩相学和矿物学研究.电子探针成分分析在大陆构造与动力学重点实验室完成,仪器为配备 Inca Energy 能谱仪的 JEOL JXA-8100 型电子探针,探针束流 20 nA,加速电压 15.0 kV,电子束斑 2 μm ,激光拉曼光谱仪(RENISHAW in Via)分析其中颗粒较大的矿物,而纳米级矿物定向包裹体背散射电子图像在 FEI Versa 3D Dual Beam 上完成,此仪器是配备聚焦离子束(FIB)的场发射电镜平台,可以放大至 300 万倍超高分辨成像.

2 岩相学特征

布尔奇泽蛇绿岩主要由地幔橄榄岩、厚层状辉长岩、基性岩脉以及玄武岩和硅质岩等组成.其中基性岩脉主要包括辉长辉绿岩,常呈脉状侵入在地幔橄榄岩中,切割地幔橄榄岩;超镁铁质岩体在北部、东部和西南部仰冲到晚三叠纪灰岩之上,在火山—沉积混杂堆积岩和蛇纹岩之间形成变质基底.变质基底中的岩石发生绿片岩相—低角闪岩相变质,强烈片理化.岩体内的地幔橄榄岩以方辉橄榄岩为主,另由透镜状纯橄岩、纯橄岩壳以及少量的橄榄单斜辉石岩组成.岩体内纯橄岩、辉长/辉石岩等多呈透镜状或团块状分布于方辉橄榄岩内(图 3)(Xiong *et al.*, 2015).布尔奇泽岩体主要由方辉橄榄岩组成(占 60%~80%),岩石多新鲜呈绿色、暗绿色,少量蛇纹石化明显,并且多以粒状结构、块状构造为主.

布尔奇泽纯橄岩按其产出分为 2 类:(a)透镜状纯橄岩:其岩石较新鲜,为土黄色,呈透镜状产出于方辉橄榄岩中,并且二者的岩相通常为截然的接触关系,宽度 1~5 m,少数 10 m 以上,有一定的延长,延长方向多为北西—南东向.纯橄岩蛇纹石化较弱,粒状结构、块状构造,镜下常见橄榄石的等粒粒状结构、交代结构等.岩石主要由橄榄石组成,含量 >97%,橄榄石大小 0.5~3.0 mm,呈镶嵌状分布,裂纹发育,多有绿泥石、蛇纹石等蚀变矿物沿裂纹分布.铬尖晶石自形程度较高,分布于橄榄石颗粒之间(图 3d 和图 4b);(b)纯橄岩壳(含共生包体特征):薄壳状纯橄岩是指在铬铁矿外围以厚薄不等的“外壳”形式产出(Zhou *et al.*, 2005),与铬铁矿体以及

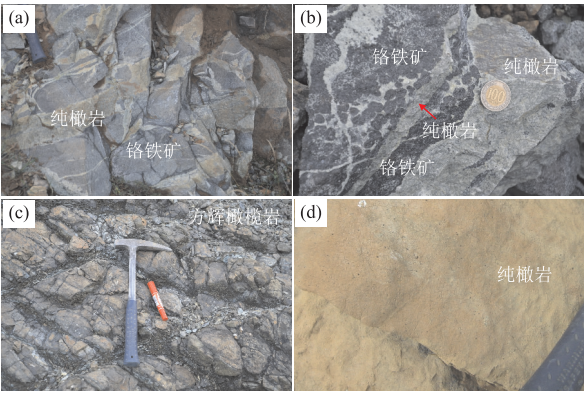


图 3 布尔奇泽蛇绿岩岩相野外照片
Fig.3 Lithologies of Bulqiza ophiolite
a,b.纯橄岩壳与豆荚状铬铁矿共生照片;c.方辉橄榄岩;d.透镜状纯橄岩中新鲜的铬尖晶石

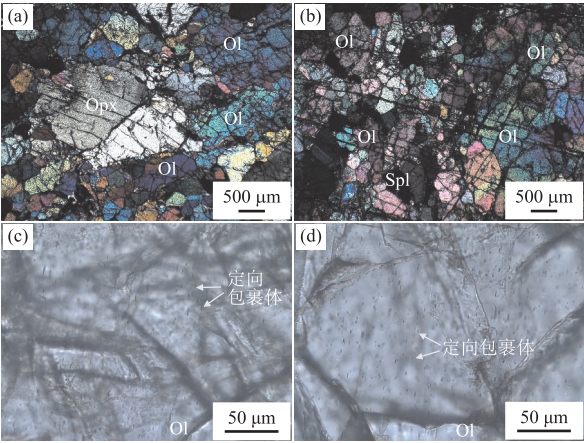


图 4 布尔奇泽各岩相镜下特征照片
Fig.4 Photomicrographs of different lithologies from Bulqiza ophiolite

a.方辉橄榄岩(正交偏光);b.透镜状纯橄岩(正交偏光);c.纯橄岩壳中橄榄石的定向包裹体(单偏光);d.纯橄岩壳中橄榄石的定向包裹体(单偏光);Ol,橄榄石;Spl,铬尖晶石;Opx,斜方辉石

外围的纯橄岩有截然的接触界线的岩石(图 3a, 3b 和图 4b).薄壳状纯橄岩岩石新鲜,呈灰绿色,块状构造,并常见细脉浸染状铬铁矿,厚度在 10 cm~2 m 不等,长度在 1~5 m 不等.其主要由 98% 镁橄榄石和 2% 的铬尖晶石组成.薄壳状纯橄岩与铬铁矿之间呈明显截然的接触关系,铬尖晶石呈半自形至自形粒状,粒度差别较大,变化在 0.1~5.0 mm,并呈不规则的定向性,不同于透镜状纯橄岩中铬尖晶石的形态.

3 纯橄岩中的共生包体结构

在布尔奇泽透镜状纯橄岩壳中存在极少量不均

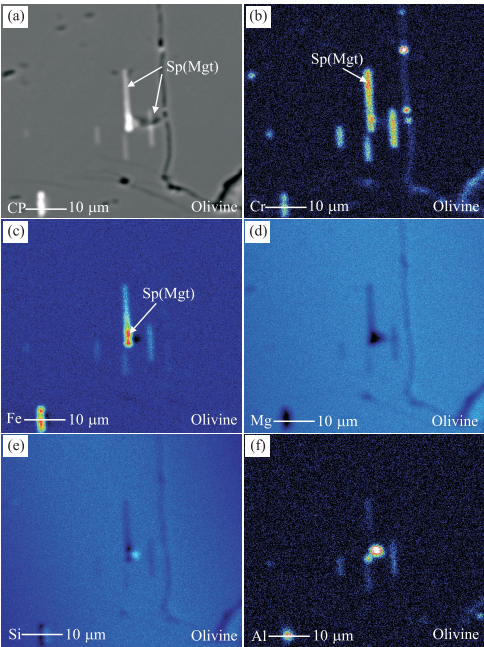


图 5 布尔奇泽纯橄岩壳中橄榄石的铬尖晶石(磁铁矿)成分(Cr、Fe、Mg、Si、Al)面扫描图

Fig.5 X-ray element (Cr、Fe、Mg、Si、Al) maps showing chemical variations in the clinopyroxene, chromian spinel (magnetite) and olivine from Bulqiza high Cr[#] dunite shell

Spl(Mgt). 铬尖晶石(磁铁矿); Olivine. 橄榄石

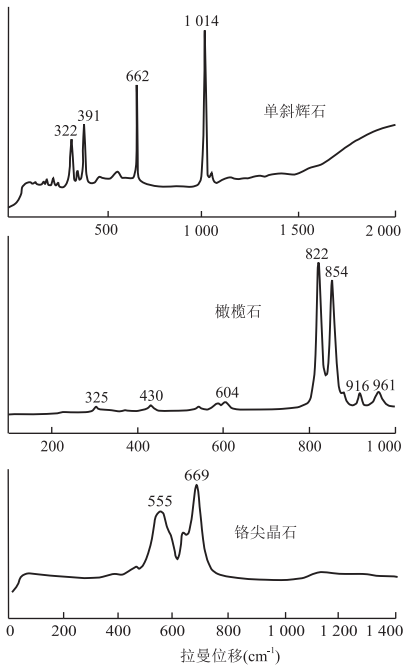


图 6 纯橄岩壳中定向包体的激光拉曼谱图

Fig. 6 Laser Raman spectra of directional intergrowth inclusions from the dunite shell

匀的现象,在部分橄榄石中见细小粒状和针状矿物(图 4, 图 5).在显微镜和电子探针下可见细粒橄

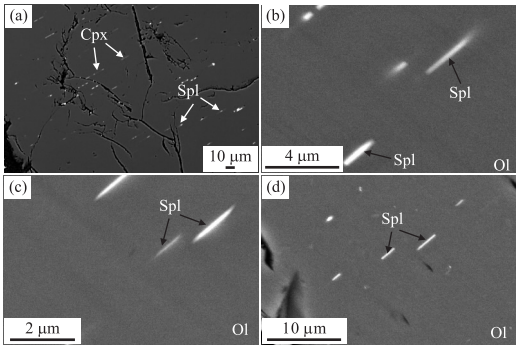


图 7 布尔奇泽纯橄岩壳中橄榄石的纳米级颗粒铬尖晶石(磁铁矿)和单斜辉石背散射照片

Fig.7 Back scattered (BSE) images of the clinopyroxene and spinel (magnetite) intergrowths in the olivine from Bulqiza dunite

Cpx.单斜辉石; Spl. 铬尖晶石; Ol. 橄榄石

石中有密集的针状包裹体,呈定向排列,具一组或二组分布方向(图 5).极少数单斜辉石粒径达到 5 μm 以上,很难通过电子探针获得其矿物组分,激光拉曼光谱分析证明定向包裹体主要为单斜辉石和铬尖晶石(图 6).经矿物成分的铬、铁、镁、硅、铝元素的面扫描分析认为包裹体主要由含铁的铬尖晶石组成,定向分布于橄榄石中(图 5).其中铬尖晶石的颗粒常为 1~2 μm 宽,1~10 μm 长,而单斜辉石更细小,为 1~2 μm 宽,1~5 μm 长(图 5),部分甚至可以达到纳米级别(图 7),其中图 7b,7c,7d 成像分别是在 (Versa 3D)2 万倍、3.5 万倍和 8 千倍下获得.鉴于大多数包裹体细小,透辉石、铬尖晶石、橄榄石成分之间互相叠加,因而无法得到准确的成分.

4 矿物化学特征

4.1 橄榄石

本文共分析了纯橄岩壳、透镜状纯橄岩和方辉橄橄岩中 80 个橄榄石的化学成分,代表性数据见表 1.结果显示所有的橄榄石都属于镁橄榄石,其 Fo 值为 91.3~96.0,透镜状纯橄岩中橄榄石的 Fo 值为 91.3~91.9, NiO 含量为 0.22%~0.41%, MnO 为 0.10%~0.16%;纯橄岩壳中橄榄石的 Fo 值为 94.7~96.0, NiO 含量为 0.42%~0.69%, MnO 为 0.03%~0.11%.

一般认为橄榄石的 Fo 值越大,说明其形成深度和熔融程度越高.布尔奇泽岩体中橄榄石 Fo 值呈连续变化特征,并且透镜状纯橄岩中橄榄石具最低的 Fo 值(图 8),指示其熔融程度与其他类型纯橄岩

表 1 布尔奇泽橄榄岩中橄榄石的电子探针分析结果(%)

Table 1 Representative microprobe analyses of olivine from Bulqiza peridotite (%)

岩性	样品号	SiO ₂	MgO	MnO	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	Na ₂ O	NiO	Total	Fo
纯橄岩壳	Al.6.4.3	41.87	52.39	0.03	0.00	0.01	0.03	0.00	4.18	0.00	0.01	0.60	99.11	95.72
	Al.6.4.3	41.57	52.53	0.05	0.01	0.03	0.02	0.00	4.17	0.00	0.00	0.63	99.00	95.74
	Al.6.4.3	41.69	51.83	0.06	0.01	0.04	0.02	0.00	5.20	0.01	0.00	0.49	99.35	94.67
	Al.6.4.3	42.04	51.74	0.11	0.03	0.00	0.00	0.00	5.33	0.02	0.00	0.59	99.86	94.54
	Al.6.4.3	41.05	54.01	0.08	0.00	0.02	0.03	0.00	4.27	0.00	0.00	0.56	100.02	95.75
透镜状纯橄岩	12Al.3.1	41.30	50.68	0.12	0.01	0.00	0.04	0.00	8.42	0.00	0.00	0.24	100.80	91.48
	12Al.5.2	41.39	50.72	0.11	0.00	0.01	0.05	0.00	8.18	0.00	0.01	0.39	100.85	91.71
	12Al.5.5	41.93	50.16	0.10	0.00	0.02	0.03	0.02	8.04	0.00	0.01	0.35	100.65	91.75
	12Al.5.7	41.33	50.61	0.12	0.01	0.02	0.03	0.00	8.16	0.00	0.00	0.36	100.64	91.70
	12Al.5.8	40.96	50.45	0.12	0.03	0.03	0.00	0.00	7.86	0.01	0.00	0.37	99.82	91.96

表 2 布尔奇泽橄榄岩中铬尖晶石的电子探针分析结果(%)

Table 2 Representative microprobe analyses of chromian spinels from Bulqiza peridotite (%)

岩性	样品	Cr ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	MnO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	SiO ₂	NiO	Total	Mg [#]	Cr [#]
纯橄岩壳	12Al.6.4	58.81	11.18	14.06	15.27	0.21	0.00	0.01	0.01	0.16	0.02	0.11	99.84	62.50	77.92
	12Al.6.4	58.27	11.18	14.16	15.63	0.30	0.00	0.00	0.01	0.14	0.00	0.08	99.76	62.00	77.76
	12Al.6.4	58.23	11.48	13.96	15.38	0.30	0.00	0.00	0.00	0.16	0.01	0.17	99.69	62.13	77.28
	12Al.6.2	60.77	8.69	12.62	17.35	0.33	0.00	0.00	0.00	0.10	0.03	0.03	99.93	56.78	82.43
	12Al.6.2	61.05	8.66	12.57	17.18	0.30	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00	0.06	99.89	56.69	82.54
透镜状纯橄岩	12Al.3.1	57.18	10.65	9.72	21.07	0.40	0.00	0.00	0.04	0.15	0.05	0.06	99.31	45.66	78.27
	12Al.3.1	56.97	10.35	9.90	21.31	0.47	0.00	0.00	0.01	0.17	0.06	0.00	99.24	45.81	78.69
	12Al.5.1	56.71	11.72	8.90	21.73	0.42	0.02	0.01	0.01	0.05	0.03	0.07	99.67	42.47	76.45
	12Al.5.3	55.61	10.97	8.26	23.57	0.44	0.00	0.01	0.00	0.07	0.09	0.02	99.03	38.98	77.28
	12Al.5.4	56.57	11.13	8.69	22.27	0.44	0.00	0.01	0.01	0.00	0.04	0.04	99.18	41.27	77.33

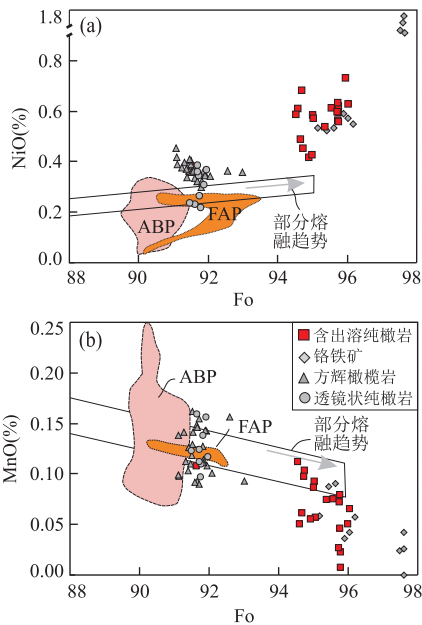


图 8 布尔奇泽蛇绿岩中不同岩相的橄榄石成分图解

Fig.8 Compositional range of olivine in different lithologies of the Bulqiza ophiolite

明显不同,橄榄石的 NiO、MnO 等组分对橄榄石的演化过程也具有重要指示意义,不同岩相中橄榄石

的 MnO 含量差异明显,并且与橄榄石的 Fo 值呈负相关性(图 8),橄榄石的矿物化学组分在各岩相的差异性或许进一步说明它们的形成条件有所差别,这与前人提出布尔奇泽蛇绿岩中不同岩相部分熔融程度不同和形成的构造背景不同较一致(Dilek *et al.*, 2008; Xiong *et al.*, 2015).

4.2 铬尖晶石

在地幔橄榄岩中,铬尖晶石都是以副矿物的形式存在,含量很低,一般都小于 5%.蛇绿岩中地幔橄榄岩(或阿尔卑斯型橄榄岩)的铬尖晶石成分存在着 Cr 和 Al 的广泛互相替换(Irvine, 1967),而形成富铬型尖晶石和富铝型尖晶石.铬尖晶石的 $Cr^{\#} [=100 \times Cr / (Cr + Al)]$ 随着地幔岩部分熔融程度的增高而增大,且不同亏损程度的地幔橄榄岩中铬尖晶石的 $Cr^{\#}$ 大小可以作为推测地幔岩熔融程度、源区亏损程度和结晶压力的灵敏指示标志(Dick and Bullen, 1984),铬尖晶石的 $Mg^{\#} [=100 \times Mg / (Mg + Fe^{2+})]$ 大小是岩石部分熔融程度的指示标志.

布尔奇泽地幔橄榄岩的 60 个铬尖晶石数据,显示不同岩相间的铬尖晶石其主要元素含量之间有较大的差别(表 2).另外结合前人对布尔奇泽岩体的研究

发现布尔奇泽地幔橄榄岩具有其特殊性,所有岩相中铬尖晶石的 Cr_2O_3 含量为 37.6%~61.5%, Al_2O_3 含量为 10.0%~22.5%,铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 为 45.5~82.3,大部分为富铬型铬尖晶石.含橄榄石包裹体的纯橄岩壳中铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 较高,为 76.5~82.4,平均值为 78.9,为富铬型尖晶石.方辉橄榄岩中的铬尖晶石, $\text{Cr}^\#$ 为 45.6~78.8,平均值为 72.2,既有富铝型尖晶石也有富铬型尖晶石,而透镜状纯橄岩中的铬尖晶石, $\text{Cr}^\#$ 为 72.9~78.9,平均值为 77.1,属于 Dick 分类图解中的Ⅲ类(Dick and Bullen, 1984).

5 讨论

在致密块状铬铁矿中呈包裹体状橄榄石的 Fe-MnO-NiO 并不在部分熔融趋势线上(图 8),这种富 Ni 的流体来源目前尚不清晰.布尔奇泽地幔橄榄岩中铬尖晶石矿物化学成分表明其具典型阿尔卑斯型橄榄岩的特征,铬尖晶石 TiO_2 含量随着 $\text{Cr}^\#$ 的增加而增加,一种解释为高温熔体地幔交代成因(Batanova and Sobolev, 2000),另一种为玻安质熔体与方辉橄榄岩反应的结果(Zhou *et al.*, 1996).另

外,从透镜状纯橄岩→纯橄岩壳→铬铁矿,铬尖晶石呈现 $\text{Mg}^\#$ 增加而 $\text{Cr}^\#$ 基本不变的特征(Xiong *et al.*, 2015).地幔橄榄岩中铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 随着部分熔融程度的增加而增大,所以从方辉橄榄岩→透镜状纯橄岩,铬尖晶石呈现 $\text{Cr}^\#$ 增加、 $\text{Mg}^\#$ 减少的过程(图 9),反映了部分熔融过程中 Mg 和 Fe 之间分配系数的变化特征(Dick and Bullen, 1984).布尔奇泽地幔橄榄岩的矿物化学特征表明其主要为 SSZ 型地幔橄榄岩的特征(图 8,图 9),这与根据洋壳岩石的地球化学分类划分其为俯冲型蛇绿岩较一致(Dilek *et al.*, 2008),其具有世界上大多数阿尔卑斯型超镁铁岩的共有特征,即 $\text{Cr}^\#$ 值随着 $\text{Mg}^\#$ 值的升高而降低(Leblanc, 1980).其中部分方辉橄榄岩的形成环境与深海橄榄岩相似,而部分方辉橄榄岩、透镜状纯橄岩和纯橄岩壳形成环境与岛弧玄武岩环境较接近,甚至在玻安岩的构造环境区域内(图 9).不同岩相间 TiO_2 的含量差别也较大,纯橄岩壳和铬铁矿具有明显富集 TiO_2 的特征(图 9b,9c).大多数岩相中铬尖晶石具有较低的 TiO_2 和 Al_2O_3 含量,显示岛弧型(或玻安质型)铬尖晶石特征(图 9c).另有研究表明铬尖晶石的化学组成可以作为其寄主

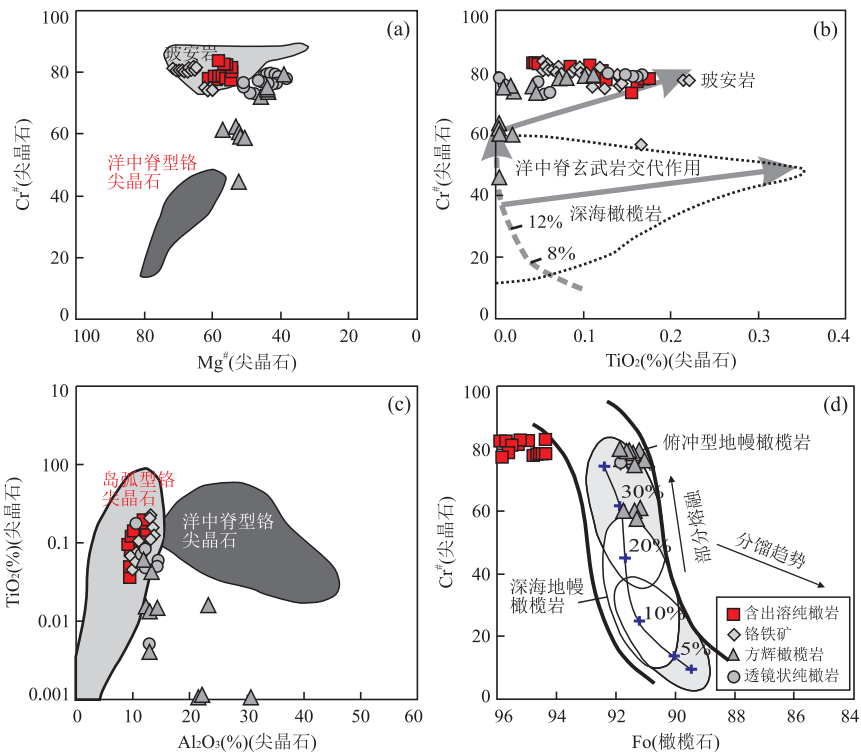


图 9 布尔奇泽地幔橄榄岩中不同岩相中铬尖晶石—橄榄石化学成分图解

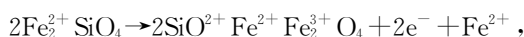
Fig.9 Mineral chemistry of different lithologies in spinel and olivine from Bulqiza ophiolite

a.布尔奇泽地幔橄榄岩中铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ vs. $\text{Mg}^\#$ 图解;b.地幔橄榄岩中铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ vs. TiO_2 ;c.地幔橄榄岩中铬尖晶石的 Al_2O_3 vs. TiO_2 ;d.地幔橄榄岩中铬尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ vs.橄榄石的 Fo 值.方辉橄榄岩和铬铁矿的数据来源于 Xiong *et al.* (2015)

岩石—地幔橄榄岩的成因指示标志,这是因为尖晶石的形成受地幔橄榄岩熔融程度、形成压力的控制(Dick and Bullen, 1984).因此利用尖晶石的 $\text{Cr}^\#$ 和橄榄石的 $\text{Mg}^\#$ 的关系可以推测其寄主岩石的部分熔融程度、形成压力及构造环境(Pearce *et al.*, 2000).基于橄榄石—铬尖晶石的矿物化学组分估算出方辉橄榄岩具有相对较低的部分熔融程度(30%~40%),透镜状纯橄岩约为 40%,而纯橄岩壳不在演化趋势线上,表明其经历了后期的橄榄石—尖晶石镁铁交换过程,指示不同岩相间部分熔融程度存在明显差异(图 9d),呈现方辉橄榄岩→透镜状纯橄岩→纯橄岩壳递增的趋势.

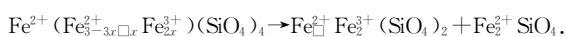
在固相或亚固相条件下的包裹体结构,是由一个物相的物质发生扩散形成晶体核,并呈定向排列的一种或多种新物相的现象(Ashworth and Chambers, 2000),在橄榄岩中常存在普遍的包裹体现象,例如橄榄石中单斜辉石和铬尖晶石的定向共生结构也属于一种包裹体现象.单斜辉石和铬尖晶石的共生包裹体结构在橄榄石中普遍被发现,这是由橄榄石的固溶体分解和橄榄石氧化分解形成的高铁橄榄石($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{SiO}_4)_2$).此后,在同步辐射微区 X 射线结构谱系定量地研究了侵入体天然橄榄石中 Fe^{3+} 的赋存方式和状态,结果表明存在 3 种可能:(1)在强还原环境下,少量的 Fe^{3+} 可以均匀地分散在铁橄榄石中;(2)在相对稳定的氧化环境下,橄榄石的边缘形成赤铁矿+非晶质 SiO_2 +高铁橄榄石或边缘完全形成了赤铁矿+非晶质 SiO_2 ,或边缘形成高铁橄榄石+铬尖晶石;(3)高温下稳定的高铁橄榄石—铁橄榄石固溶体因温度降低而分解,形成铁橄榄石和高铁橄榄石的包裹体,即在高温下存在 3 个 Fe^{3+} 替代 2 个 Fe^{2+} 和一个空穴的情况(Dyar *et al.*, 1998).

在相对稳定的氧化环境下,由于氧逸度增加,使橄榄石中 Fe^{2+} 氧化,其反应式为 (Dyar *et al.*, 1998; Ashworth and Chambers, 2000):



或者: $3\text{Fe}_2^{2+} \text{SiO}_4 \rightarrow 3\text{SiO}_2^{2+} \text{Fe}_2^{3+} \text{O}_3 + 4\text{e}^- + 2\text{Fe}^{2+}$.

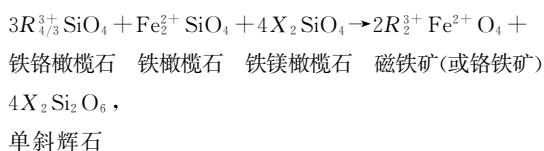
而在高温下稳定的高铁橄榄石分解形成包裹体的过程,其反应式为(Dyar *et al.*, 1998):



高铁橄榄石 高铁橄榄石 铁橄榄石

当铁橄榄石经过氧化形成高铁橄榄石后,高铁橄榄石和铁橄榄石在高温下呈固溶体,随着降温时进一步的分解,生成高铁橄榄石+铁橄榄石包裹体。在高温状态下 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 可以进入橄榄石晶格,当

温度降低时,橄榄石因晶体结构收缩, Fe^{3+} 和 Si^{4+} 达到临界尺寸时电荷排斥强烈,使其结构不稳定,生成铬尖晶石(或磁铁矿)和单斜辉石,二者之间形成共生包裹体结构,其反应式为:



其中: $R = \text{Fe}, \text{Cr}$, $X = \text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}$ 。据前人的实验, 橄榄石端元 Fe_2SiO_4 - CaFeSiO_4 之间、 CaMgSiO_4 - CaFeSiO_4 之间和 Fe_2SiO_4 - Mg_2SiO_4 之间在高温下是完全混溶的, Mg_2SiO_4 - CaMgSiO_4 之间具很宽的不混溶区间, 在温度降低时这些固溶体发生结晶析出现象 (Markl *et al.*, 2001; Petaev and Brearley, 1994)。由于 Ca 的离子半径比 Fe、Mg、Mn 大, 因而在铁镁橄榄石中一般不可能加入 Ca。即使是在高温高压的条件下, Ca 在橄榄石中的含量也极少。目前所知橄榄石中 CaO 一般小于 0.5%。实验研究表明, 在橄榄石-熔体体系中当熔体中 CaO、 Na_2O 和 Fe^{2+} 的含量越高时, 橄榄石中 Ca 的含量也越高, 但该含量与所处的温度、压力、氧逸度的高低无关 (Libourel, 1999)。如若橄榄石中存在三价离子, Ca 原子总是进入单斜辉石而不是富 Ca 的橄榄石。橄榄石的 Ca 含量低说明在橄榄石中的 Ca 扩散速度非常快, 促进低温再平衡, 所以这种橄榄石的包裹体结构不易保持下来。因此, 橄榄石的矿物析出因与后期岩浆冷却有关, 在冷却过程中氧逸度较高, 当橄榄石发生充分再平衡时, 这些现象便消失了 (Mikouchi *et al.*, 2000)。

结合布尔奇泽纯橄岩的橄榄石共生包裹体现象,可以解释为地幔岩与含 Cr、Al、Ti、Ca 的熔体相互作用生成了橄榄石,随着温度的降低而形成了析出结构的现象.因此,只有富含 Cr、Al、Ti 和 Ca 熔体的交代方辉橄岩,辉石和橄榄石与熔体再平衡,进一步重结晶,同时伴随其成分的改变.由于氧逸度增大,熔体中 Fe^{3+} 离子增多,少量的 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 可以加入到橄榄石中,在高温下 ($<970^{\circ}\text{C}$) 橄榄石结晶,形成稳定的橄榄石固溶体,或橄榄石捕获熔体,形成包体 (Ren *et al.*, 2008). 随着温度降低,橄榄石固溶体分解, Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 进入铬尖晶石相中,而 Ca^{2+} 、 Na^{+} 进入透辉石相中,形成了透辉石和铬尖晶石的共生结构.后期因岩石冷却速率较快或构造侵位时间较短,使橄榄石中的析出体未发生充分的调整而保存下来,铬尖晶石也结晶而形成纯橄岩,并且这种析出现象存在于特提斯蛇绿岩东段雅鲁藏

布江缝合带的蛇绿岩岩体内,例如罗布莎岩体中橄榄石的单斜辉石和铬尖晶石针状包裹体现象等(Ren *et al.*, 2008; 梁凤华等, 2014), 指示了特提斯蛇绿岩的构造背景演化过程相似性. 然而与高压—超高压变质有关的橄榄石中的出溶体和出溶机制完全不同, 他们的出溶体比较简单, 如铬尖晶石、钛铁矿等, 无硅酸盐相伴, 这种出溶体的成因可能与 β -橄榄石的减压相变有关(Dobrzhinetskaya *et al.*, 1996; 冯有利等, 2003; Song *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2004; 赵文霞等, 2006). 因此, 布尔奇泽纯橄岩中橄榄石的共生包裹体, 可能是俯冲环境(SSZ)的岩石—熔体反应生成更富 Mg、Si 和 Cr 等的熔体, 致使地幔橄榄岩高度部分熔融而形成.

6 结论

(1) 布尔奇泽纯橄岩壳的橄榄石中存在共生的透辉石和铬尖晶石(磁铁矿)包裹体现象, 这是由于亏损地幔方辉橄榄岩与含铬、钠、铝、钙等熔体发生交代, 使得 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cr^{3+} 加入到橄榄石的固溶体中. 由于岩石或构造的上升侵位过程引起降温, 橄榄石中的这些成分析出形成单斜辉石和铬尖晶石(磁铁矿), 铬尖晶石结晶而形成了现在的纯橄岩.

(2) 布尔奇泽地幔橄榄岩岩相学特征显示岩体经历了多期次的部分熔融作用, 依据矿物组合、矿物化学成分及地幔橄榄岩的地球化学结果, 显示岩体存在两次部分熔融作用, 与洋壳岩石的分类一致, 为典型俯冲型蛇绿岩.

致谢: 电子探针测试在国土资源部深地动力学重点实验室由戎合研究员辅助完成, 论文撰写过程中与迈阿密大学 Yildirim Dilek 教授和加拿大达霍西大学 Paul Robinson 教授进行了有益讨论. 在此, 一并致以诚挚的谢意!

References

Ashworth, J. R., Chambers, A. D., 2000. Symplectic Reaction in Olivine and the Controls of Intergrowth Spacing in Symplectites. *Journal of Petrology*, 41(2): 285–304. <https://doi.org/10.1093/petrology/41.2.285>

Batanova, V. G., Sobolev, A. V., 2000. Compositional Heterogeneity in Subduction-Related Mantle Peridotites, Troodos Massif, Cyprus. *Geology*, 28(1): 55–58. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2000\)28<55:CHISMP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2000)28<55:CHISMP>2.0.CO;2)

Dick, H. J. B., Bullen, T., 1984. Chromian Spinel as a Petroge-

netic Indicator in Abyssal and Alpine-Type Peridotites and Spatially Associated Lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86(1): 54–76. <https://doi.org/10.1007/BF00373711>

Dilek, Y., Furnes, H., Shallo, M., 2008. Geochemistry of the Jurassic Mirdita Ophiolite (Albania) and the MORB to SSZ Evolution of a Marginal Basin Oceanic Crust. *Lithos*, 100(1–4): 174–209. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.026>

Dobrzhinetskaya, L., Green, H. W., Wang, S., 1996. Alpe Arami, a Peridotite Massif from Depths of More than 300 Kilometers. *Science*, 271(5257): 1841–1845. <https://doi.org/10.1126/science.271.5257.1841>

Dyar, M. D., Delaney, J. S., Sutton, S. R., et al., 1998. Fe^{3+} Distribution in Oxidized Olivine: A Synchrotron Micro-XANES Study. *American Mineralogist*, 83: 1361–1365. <https://doi.org/10.2138/am-1998-1227>

Feng, Y. L., Zheng, Z., Guo, Y. J., et al., 2003. Discovery of Native Iron in Olivine of Garnet Lherzolite in Chijiadian and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4): 701–706 (in Chinese with English abstract).

Hwang, S. L., Shen, P., Chu, H. T., et al., 2015. Origin of Rutile Needles in Star Garnet and Implications for Interpretation of Inclusion Textures in Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks. *Journal of Metamorphic Geology*, 33(3): 249–272. <https://doi.org/10.1111/jmg.12119>

Hwang, S. L., Shen, P., Yui, T. F., et al., 2007a. TiO_2 Nanoparticle Trails in Garnet: Implications of Inclusion Pressure-Induced Microcracks and Spontaneous Metamorphic Reaction Healing during Exhumation. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(4): 451–460. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00705.x>

Hwang, S. L., Yui, T. F., Chu, H. T., et al., 2007b. On the Origin of Oriented Rutile Needles in Garnet from UHP Eclogites. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(3): 349–362. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1314.2007.00699.x>

Irvine, T. N., 1967. Chromian Spinel as a Petrogenetic Indicator: Part 2. Petrologic Applications. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 4(1): 71–103. <https://doi.org/10.1139/e67-004>

Leblanc, M., 1980. Chromite Growth, Dissolution and Deformation from a Morphological View Point: SEM Investigations. *Mineralium Deposita*, 15(2): 201–210. <https://doi.org/10.1007/BF00206514>

Li, J. Y., Yang, J. S., Ba, D. Z., et al., 2012. Origin of Different Dunites in the Luobusa Ophiolite, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 28(6): 1829–1845 (in Chinese with English abstract).

Liang, F. H., Yang, J. S., Xu, Z. Q., et al., 2014. Chromium in the Olivine Lattice: Chromium-Rich Olivines and Their Impli-

- cation of Deep Mantle Origin in the Luobusa Mantle Peridotite and Chromitite, Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 30 (8): 2125—2136 (in Chinese with English abstract).
- Libourel, G., 1999. Systematics of Calcium Partitioning between Olivine and Silicate Melt: Implications for Melt Structure and Calcium Content of Magmatic Olivines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 136 (1—2): 63—80. <https://doi.org/10.1007/s004100050524>
- Malpas, J., Zhou, M. F., Robinson, P. T., et al., 2003. Geochemical and Geochronological Constraints on the Origin and Emplacement of the Yarlung Zangbo Ophiolites, Southern Tibet. *Geological Society, London, Special Publications*, 218 (1): 191—206. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.218.01.11>
- Markl, G., Marks, M., Schwinn, G., et al., 2001. Phase Equilibrium Constraints on Intensive Crystallization Parameters of the Ilímaussaq Complex, South Greenland. *Journal of Petrology*, 42 (12): 2231—2257. <https://doi.org/10.1093/petrology/42.12.2231>
- Mikouchi, T., Yamada, I., Miyamoto, M., 2000. Symplectic Exsolution in Olivine from the Nakhla Martian Meteorite. *Meteoritics and Planetary Science*, 35 (5): 937—942. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01483.x>
- Pearce, J. A., Barker, P. F., Edwards, S. J., et al., 2000. Geochemistry and Tectonic Significance of Peridotites from the South Sandwich Arc-Basin System, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139 (1): 36—53. <https://doi.org/10.1007/s004100050572>
- Pearce, J. A., Lippard, S. J., Roberts, S., 1984. Characteristics and Tectonic Significance of Supra-Subduction Zone Ophiolites. In: Kokelaar, B. P., Howells, M. F., eds., *Marginal Basin Geology*. *Geological Society, London, Special Publication*, 16 (1): 77—89. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1984.016.01.06>
- Petaev, M. I., Brearley, A. J., 1994. Exsolution in Ferromagnesian Olivine of the Divnoe Meteorite. *Science*, 266 (5190): 1545—1547. <https://doi.org/10.1126/science.1228851>
- Ren, Y. F., Chen, F. Y., Yang, J. S., et al., 2008. Exsolutions of Diopside and Magnetite in Olivine from Mantle Dunite, Luobusa Ophiolite, Tibet, China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2 (82): 377—384. <https://doi.org/10.1111/j.1755-6724.2008.tb00587.x>
- Song, S., Zhang, L., Niu, Y., 2004. Ultra-Deep Origin of Garnet Peridotite from the North Qaidam Ultrahigh-Pressure Belt, Northern Tibetan Plateau, NW China. *American Mineralogist*, 89 (8—9): 1330—1336. <https://doi.org/10.2138/am-2004-8-922>
- van Roermund, H. L. M., Drury, M. R., Barnhoorn, A., et al., 2000. Non-Silicate Inclusions in Garnet from an Ultra-Deep Orogenic Peridotite. *Geological Journal*, 35 (3—4): 209—229. <https://doi.org/10.1002/gj.858>
- Xiong, F., Yang, J., Paul, R. T., et al., 2016. Diamonds and Other Exotic Minerals Recovered from Peridotites of the Dangqiong Ophiolite, Western Yarlung-Zangbu Suture Zone, Tibet. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90 (2): 425—439.
- Xiong, F. H., Yang, J. S., Robinson, P. T., et al., 2015. Petrology and Geochemistry of High Cr[#] Podiform Chromitites of Bulqiza, Eastern Mirdita Ophiolite (EMO), Albania. *Ore Geology Reviews*, 70: 188—207. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.04.011>
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., 1999. Exsolution Lamellae in Minerals from Ultrahigh-Pressure Rocks. *International Geology Review*, 41 (11): 981—993.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Yang, J. S., et al., 2004. Garnet Peridotites in UHP Mountain Belts of China. *International Geology Review*, 46 (11): 981—1004. <https://doi.org/10.2747/0020-6814.46.11.981>
- Zhao, W. X., Hu, Y. X., Li, X. M., et al., 2006. The Compositional Inhomogeneity of the Needle-Exsolution Magnetites in Olivine from Bixiling Garnet Peridotite. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 25 (1): 40—44 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Malpas, J., et al., 1996. Podiform Chromitites in the Luobusa Ophiolite (Southern Tibet): Implications for Melt-Rock Interaction and Chromite Segregation in the Upper Mantle. *Journal of Petrology*, 37 (1): 3—21. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.1.3>
- Zhou, M. F., Robinson, P. T., Malpas, J., et al., 2005. REE and PGE Geochemical Constraints on the Formation of Dunites in the Luobusa Ophiolite, Southern Tibet. *Journal of Petrology*, 46 (3): 615—639. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh091>

附中文参考文献

- 冯有利, 郑轍, 郭延军, 等, 2003. 在迟家店石榴石二辉橄橄岩的橄榄石中发现自然铁及其意义. *岩石学报*, 19 (4): 701—706.
- 李金阳, 杨经绥, 巴登珠, 等, 2012. 西藏罗布莎蛇绿岩中不同产出的纯橄岩及成因探讨. *岩石学报*, 28 (6): 1829—1845.
- 梁凤华, 杨经绥, 许志琴, 等, 2014. 铬在橄榄石中的赋存状态: 西藏罗布莎地幔橄橄岩和铬铁矿中的富铬橄榄石及对深部地幔成因的启示. *岩石学报*, 30 (8): 2125—2136.
- 赵文霞, 胡育贤, 李雪梅, 等, 2006. 碧溪岭石榴石橄橄岩的橄榄石中针状磁铁矿出溶体成分的不均匀性. *岩石矿物学杂志*, 25 (1): 40—44.