

苏鲁-大别山超高压变质带迟家店和碧溪岭石榴二辉橄榄岩橄榄石组构*

宋衍茹¹ 金淑燕² 叶凯¹

SONG YanRu¹, JIN ShuYan² and YE Kai¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China

2. Earth Science Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2007-01-24 收稿, 2007-04-08 改回.

Song YR, Jin SY and Ye K. 2007. Olivine fabric in garnet lherzolite from Rongcheng and Bixiling of Sulu-Dabieshan Ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic belt, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1153–1159

Abstract Crust-derived and mantle-derived garnet lherzolite occurs at Bixiling of Dabieshan and Rongcheng of Sulu ultrahigh-pressure (UHP) metamorphic terranes respectively. Both types of lherzolite experienced UHP metamorphism due to the subduction of the Yangtze Craton under the Sino-Korean Craton. The olivine from the two kinds of garnet lherzolite have similar Lattice Preferred Orientation (LPO) with strong maxima of [100] subnormal to the foliation and strong maxima of [010] subparallel to the lineation, which is different from the high-temperature olivine LPO in mantle xenoliths and from the water-induced olivine fabric in UHP metamorphic terranes. We regard that the LPO found in Bixiling and Rongcheng garnet lherzolite was formed during medium-temperature UHP metamorphism in relative dry environment. These data witness the character of olivine from UHP metamorphic garnet peridotite during the continental deep subduction.

Key words Sulu, Dabieshan, Ultrahigh-pressure (UHP)-metamorphism, garnet lherzolite, olivine, Lattice Preferred Orientation (LPO)

摘要 大别山碧溪岭和山东荣成分别发育壳源和幔源的石榴二辉橄榄岩。它们在扬子板块向华北板块的俯冲过程中与俯冲板片一起经历了超高压变质作用。这两种原岩来源不同的石榴橄榄岩中的橄榄石具有相似的结晶学优选方位(LPO): [100]轴主极密垂直于面理面, [010]轴主极密平行于线理, 这种橄榄石结晶学优选方位明显不同于高温地幔橄榄岩包体中的橄榄石组构, 也不同于最近在超高压变质地体中发现的水导致的橄榄石组构。我们认为碧溪岭和荣成石榴二辉橄榄岩中的这种橄榄石组构可能是在相对较干的超高压变质条件下形成的。本研究为大陆深俯冲超高压变质石榴橄榄岩橄榄石组构特征提供了第一手资料。

关键词 苏鲁; 大别山; 超高压变质; 石榴二辉橄榄岩; 橄榄石; 结晶学优选方位

中图法分类号 P542.5; P578.94; P588.34

1 引言

产于超高压变质带中的超高压变质石榴橄榄岩, 根据原

岩属性的差异被分为 A 和 B 两种类型: A 类来源于俯冲带之上的地幔楔, 它们在陆壳俯冲的过程中卷入俯冲的大陆地壳经历超高压变质; B 类石榴橄榄岩的原岩为俯冲陆壳中的层状镁铁质-超镁铁质堆晶岩 (Zhang *et al.*, 2000)。这两种

* 国家重点基础研究发展规划(G1999075501)和国土资源部中国大陆科学钻探项目的共同资助。

第一作者简介: 宋衍茹, 女, 1977 年生, 博士研究生, 岩石学专业, 主要从事超高压变质岩石学和岩石流变学研究,

E-mail: songyanru@mail.iggcas.ac.cn

石榴橄榄岩在我国的苏鲁-大别山超高压变质带中均有产出。前人已对苏鲁-大别山地区的石榴橄榄岩做了大量的岩石学、地球化学研究(叶凯等, 1992; Zhang *et al.*, 1995; Hiramatsu *et al.*, 1995; 樊祺诚等, 1996b; Fan QC, *et al.*, 1966a; Chavagnac and Jahn, 1996; Yang and Jahn, 2000; Zhang *et al.*, 2000; Yang, 2003; Zheng *et al.*, 2003; Zhang *et al.*, 2004; Yoshida *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2005a, 2005b; Zheng *et al.*, 2005)。相对于深入的岩石学和地球化学研究, 超高压石榴橄榄岩的变形研究开展较少。对超高压石榴橄榄岩的变形研究可以为认识大陆深俯冲过程中的地幔岩特征和壳幔相互作用提供重要信息。研究橄榄石的组构特征为反演超高压变质过程中的应力和流体特征提供证据, 并进一步为研究大陆深俯冲过程中的地幔岩特征和壳幔相互作用打开窗口。

到目前为止, 通过高温高压实验和对天然橄榄岩样品的研究发现了 5 种典型的橄榄石组构, 分别为 A 型、B 型、C 型、D 型和 E 型。A 型和 D 型橄榄石组构均形成于低含水条件下, B 型、C 型和 E 型均为与水有关的组构(Katayama *et al.*, 2004)。

A 型橄榄石组构的主要特征是 [100] 轴平行于剪切方向, (010) 面平行于剪切面, 形成于低应力低含水条件下, 这种组构较多见, 发育于玄武质岩浆岩中的地幔橄榄岩包体(Jung and Karato, 2001; 金振民等, 1994)。B 型组构的橄榄石 [001] 轴平行于剪切方向, (010) 面平行于剪切面, 形成于高应力和高含水条件下(Jung and Karato, 2001; Katayama *et al.*, 2004; Kneller *et al.*, 2005)。Kneller *et al.* (2005) 通过对俯冲带高分辨热力学和应力分布的计算认为弧前地幔(地幔楔)和俯冲板片上 10 ~ 15km 较低温的薄层最适宜形成橄榄石 B 型组构。C 型橄榄石组构的 [001] 轴平行于剪切方向, (100) 面平行于剪切面, 形成于中等应力和高含水条件下(Jung and Karato, 2001; Katayama *et al.*, 2004; Kneller *et al.*, 2005)。Frese *et al.* (2003) 在欧洲阿尔卑斯造山带 Alpe Arami 和 Cima di Gagnone 两地的石榴橄榄岩中发现了橄榄石的这种 C 型组构, 它是石榴橄榄岩在含水俯冲带中经历超高压变质形成的(Frese *et al.*, 2003)。另外, 最近在苏鲁南部芝麻坊石榴橄榄岩的橄榄石中也发现这种可能是由于变质变形过程中“水”的参与导致的“C 型”组构(许志琴等, 2005)。D 型组构橄榄石的 [100] 轴平行于剪切方向, (0kl) 面平行于剪切面, 形成于高应力低含水条件下(Zhang *et al.*, 2000; Bystricky *et al.*, 2000)。E 型组构橄榄石的 [100] 轴平行于剪切方向, (001) 面平行于剪切面, 形成于低应力中等含水条件下(Katayama *et al.*, 2004)。Katayama *et al.* (2005) 在研究挪威西片麻岩区 Otrøy 石榴橄榄岩变形特征时发现, 这种可能来自于 200km 以上深度的超高压变质石榴橄榄岩中的橄榄石发育 A 型、C 型和 E 型 3 种组构。其中细粒层状石榴橄榄岩中发育一种较弱的 A 型橄榄石组构; 块状粗粒石榴橄榄岩的橄榄石组构为 C 型; 而粗粒块状石榴橄榄岩橄榄石中的位错指示 E 型组构。Katayama *et al.* (2005) 认为, 细粒

层状石榴橄榄岩中橄榄石的 A 型组构与在高温、低含水量、低应力状态条件下的实验结果对应, 块状粗粒石榴橄榄岩中橄榄石的 C 型组构形成于高含水的超高压变质过程, 块状橄榄岩中橄榄石的位错形成于中等含水 ($200 < C_{OH} < 1000$ H/ 10^6 Si) 高应力低应变的后期变质过程, 这期的位错蠕变并没有改变已有的 C 型组构。

可见, 在高压-超高压石榴橄榄岩中, 变质环境中水的含量是除了温度、应变状态以外影响橄榄石组构的又一个重要因素, 变质环境中含水量的不同对橄榄石的组构影响也大不相同。本文在对苏鲁-大别山造山带的荣成和碧溪岭石榴二辉橄榄岩进行变形研究时发现, 这两个地区的橄榄石组构与上述的 5 种组构都不相同, 是一种罕见的中温组构, 可能形成于相对较干的超高压变质环境。

2 岩石特征

本文选用的样品分别来自于苏鲁-大别山超高压变质带北部的山东荣成迟家店和南部的安徽岳西碧溪岭。苏鲁-大别山造山带位于中国东部华北板块和扬子板块的拼接部位, 发育世界上规模最大的高压-超高压变质带。苏鲁高压-超高压变质带是大别山高压-超高压变质带的东延部分, 郯庐断裂将其与大别山变质带错断并向北平移(Okay *et al.*, 1989) (如图 1a 所示)。苏鲁-大别山变质带可分为三个部分: 中部的超高压柯石英榴辉岩带, 北部的混合岩带和南部的蓝片岩-绿帘角闪岩-高压榴辉岩带。在超高压变质带中, 块状、布丁状、层状柯石英榴辉岩包裹在片麻岩、石榴橄榄岩和大理岩中, 而石榴橄榄岩仅产出在片麻岩中。这些岩石都经历了三叠纪(220 ~ 240Ma) 原位超高压变质作用(Li *et al.*, 1993, 1996; Ames *et al.*, 1996; Chavagnac and Jahn, 1996; Hacker *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 1995; Ye *et al.*, 2000; Liu *et al.*, 2001; Chavagnac *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2002; Jahn *et al.*, 2003)。

2.1 岩体特征

迟家店石榴二辉橄榄岩体位于苏鲁超高压变质带东北部的山东荣成大疃镇, 榴辉岩与石榴二辉橄榄岩共同呈定向的透镜体产出于超高压变质片麻岩中(图 1-b, 叶凯和徐平, 1992)。根据其原岩成分和地球化学特征, 迟家店石榴二辉橄榄岩来源于俯冲带之上的地幔楔, 是典型的 A 类石榴橄榄岩(Zhang *et al.*, 2000)。

碧溪岭岩体位于安徽省岳西县菖蒲镇, 是大别山造山带中最大的(露头约 1.5km²) 含柯石英榴辉岩岩体。岩体产出在长英质片麻岩中(如图 1-c), 主要由条带状榴辉岩和少量含石榴石超镁铁质岩成分层组成, 原岩可能是地壳中镁铁质岩浆结晶分异作用形成的镁铁-超镁铁质杂岩体。超镁铁质岩石由不同比例的石榴石、单斜辉石、斜方辉石和橄榄石组成, 根据这 4 相矿物的含量岩性可分为: 石榴二辉橄榄岩、石

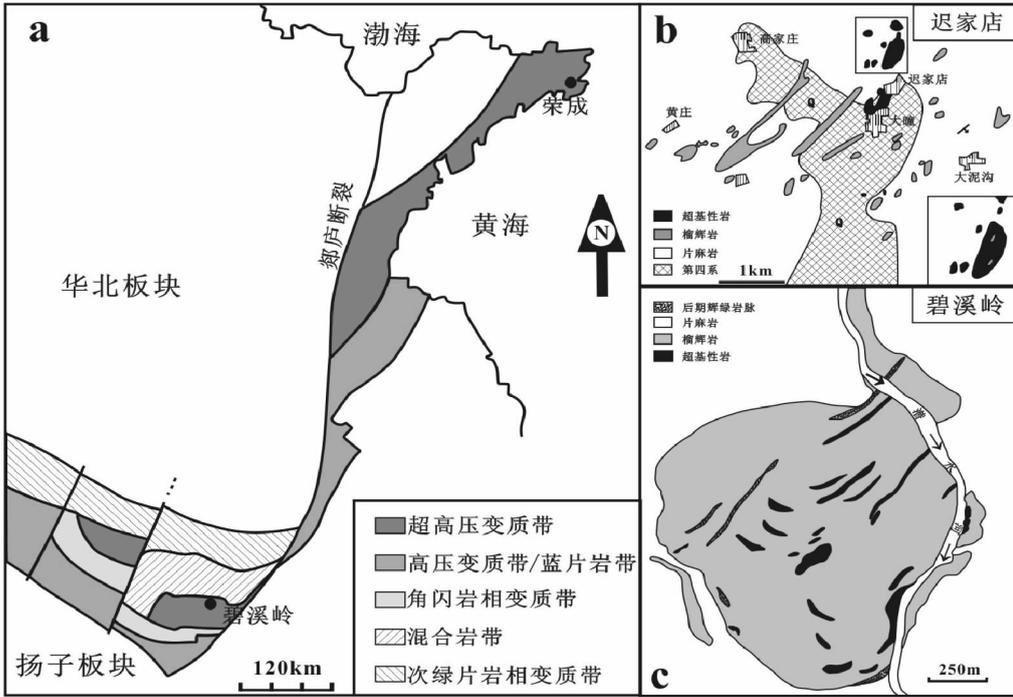


图 1 迟家店、碧溪岭石榴二辉橄榄岩产状及周边区域地质概况 (图 a 和 c 据 Zhang *et al.*, 1995; 图 b 据叶凯和徐平, 1992)
 Fig.1 Geological sketch map and localities of the Chijiadian and Bixiling garnet lherzolite (Figure a and c modified after Zhang *et al.*, 1995; Figure b modified after Ye and Xu, 1992)

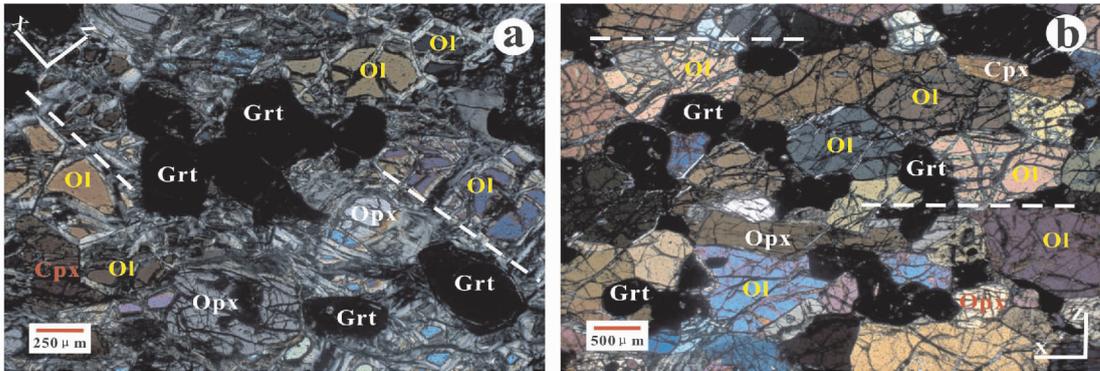


图 2 迟家店和碧溪岭石榴二辉橄榄岩显微照片
 图中虚线表示线理方向; a-迟家店石榴二辉橄榄岩显微照片 (01RC-30, 正交偏光); b-碧溪岭石榴二辉橄榄岩显微照片 (B4-1, 正交偏光)。
 Fig.2 Photomicrographs showing garnet lherzolite from Chijiadian and Bixiling. Dashed lines showing the lineations; a-Photomicrograph under cross-polarized light showing microstructures of garnet lherzolite from Chijiadian (01RC-30); b-Photomicrograph under cross-polarized light showing the lineations of garnet lherzolite from Bixiling (B4-1).

榴异剥橄榄岩和石榴二辉石岩等。该区的石榴二辉橄榄岩属于 B 类石榴橄榄岩 (Zhang *et al.*, 2000)。碧溪岭超高压变质岩体在扬子板块俯冲的过程中进入到地幔经历超高压变质作用后快速折返 (Zhang *et al.*, 1995)。

2.2 岩相学特征

我们将采集到的 5 个天然变形石榴二辉橄榄岩样品, 在室内根据手标本的面理和线理特征定向磨制的 *xz*、*yz* 方向薄

片。对薄片进行了详细的岩相学观察, 下面结合前人研究资料分别对迟家店和碧溪岭样品的岩石特征进行描述。

2.2.1 迟家店石榴二辉橄榄岩

迟家店超高压变质超镁铁质岩为石榴二辉橄榄岩, 并遭受了不同程度的蛇纹石化 (叶凯和徐平, 1992)。本研究选用的迟家店石榴二辉橄榄岩样品 01RC-30、01RC-31 和 01RC-34 为块状构造, 近等粒粗粒结构, 主要由橄榄石、石榴石、斜方辉石和单斜辉石组成 (如图 2-a)。石榴石核部见有尖晶石、

橄榄石、单斜辉石和斜方辉石包裹体,石榴石颗粒边缘多数形成斜方辉石和单斜辉石构成的放射状次变边,沿橄榄石裂隙和颗粒边界发生不同程度的蛇纹石化,斜方辉石部分或全部退变为滑石,岩石中还有少量的角闪石。详细的岩石学研究证明岩石经历了四期的变质演化(Hiramatsu *et al.*, 1995): ① 早期尖晶石橄榄岩相变质;② 峰期超高压石榴石橄榄岩相变质;③ 后期麻粒岩相变质叠加;④ 后期角闪岩相退变质。峰期石榴石橄榄岩相变质的温压条件被估算为 780°C ~ 820°C 和 4 ~ 5 GPa (Hiramatsu *et al.*, 1995)。岩相学观察未发现含流体的超高压变质矿物,表明超高压变质可能发生于相对较干的条件下。

图 2-a 是样品 01RC-30 在垂直于面理(S 面)并平行于线理(X 轴)方向切制的定向薄片的显微照片,从照片中可以看出岩石变形较弱,橄榄石颗粒被略微定向拉长。用于测量结晶学优选方位的橄榄石为峰期超高压石榴石橄榄岩相变质的产物。

2.2.2 碧溪岭石榴二辉橄榄岩

碧溪岭超高压变质超镁铁质岩主要有:石榴二辉橄榄岩、石榴异剥橄榄岩和石榴二辉石岩。本文研究的样品(OB4-1, B4-1)均为石榴二辉橄榄岩。岩石为近等粒结构,块状构造,主要由石榴石、橄榄石、斜方辉石和单斜辉石组成。单斜辉石和斜方辉石中偶见浑圆状橄榄石包裹体。详细的岩石学研究证明,碧溪岭石榴二辉橄榄岩经历了 4 期变质演化: ① 峰期超高压石榴橄榄岩相变质,矿物组合为 Grt + En + Di + Ol,本期的石榴石颗粒较粗大,橄榄石、斜方辉石和单斜辉石均被定向拉长形成面理(如图 2-b)。② 高压石榴橄榄岩相变质,矿物组合为 Ol ± En + Di + Grt,以峰期石榴石细粒化重结晶形成细粒石榴石为特征;③ 以滑石取代早期斜方辉石,透闪石取代早期单斜辉石为特征;④ 以橄榄石和辉石的蛇纹石化和绿泥石化为特征。Zhang *et al.* (1995) 利用二辉石温度计(Wood and Banno, 1973)、Opx-Grt Fe-Mg 交换温度计(Lee and Ganguly, 1988)、Cpx-Grt Fe-Mg 交换温度计(Powell, 1985)和 Grt-Opx 压力计(Brey and Köhler, 1990)估算得到碧溪岭超镁铁质岩峰变质温压为: 800°C ± 4.7 ~ 6.7 GPa (Zhang *et al.*, 1995)。测定的橄榄石均为峰期超高压变质阶段的产物。

值得一提的是,在荣成和碧溪岭石榴二辉橄榄岩中都没有发现金云母等超高压含水矿物,这明显不同于苏鲁超高压变质带中的芝麻坊含金云母石榴二辉橄榄岩(Yang *et al.*, 1993; Zhang *et al.*, 2005b)。

3 橄榄石的组构特征

我们利用费氏台分别测量了 5 个样品(01RC-30、01RC-31 和 01RC-34、OB4-1, B4-1) XZ 方向橄榄石的结晶学优选方位。整体来看,这 5 个样品橄榄石的优选方位集中程度不是很高,都存在若干个主极密和次极密,组成了不同方向上

的不完整环带。

以迟家店样品 01RC-34 为例, [100] 轴在垂直于面理面方向和与面理法线大约 30° 角的方向上均存在主极密,在平行于面理方向和其它方向上存在若干个次极密; [010] 轴在线理附近存在主极密,在垂直于面理方向和面理面上都存在次极密,可以构成弱的 [010] (100) 滑移系。样品 01RC-30 和 01RC-31 的橄榄石组构特征与样品 01RC-34 类似,但极密程度比样品 01RC-34 稍差。碧溪岭样品的橄榄石组构与样品 01RC-34 特征完全相同,也存在若干个主极密和次极密。样品 OB4-1 的 [010] 轴在线理附近存在主极密,在垂直于面理方向存在几个弱的次极密。可见,迟家店和碧溪岭超高压变质石榴橄榄岩中橄榄石的组构特征基本相同。五个样品的 [001] 轴主极密都位于面理面上接近垂直于线理的位置,说明这两个地区的石榴二辉橄榄岩中的橄榄石在变形过程中 [001] 轴都没有发生滑移。

4 讨论

4.1 迟家店、碧溪岭橄榄石组构与 B、C 和 E 型组构(水导致的)的对比

在高温低应变速率条件下,上地幔橄榄石通过以 [100] (010) 滑移系为主的位错滑移和攀移作用(包括亚颗粒旋转)和颗粒边界迁移(包括动态重结晶作用)产生塑性变形,并形成强烈的晶格优选方向。根据 Carter and Avé Lallemant (1970) 的经典研究,橄榄石的变形组构主要依赖于变形的物理条件,尤其是应变速率(应力大小)和温度。而高温高压实验发现,除了上述因素以外,水对橄榄石的组构有很重要的影响(Jung and Karato, 2001; Katayama *et al.*, 2004)。

Jung and Karato (2001) 报道了水导致的两种新型组构——B 型和 C 型(如图 4 所示)。在这些组构中,橄榄石的 [001] 轴平行于剪切方向, (010) (B 型) 或 (100) (C 型) 分别平行于剪切面,它们对应的滑移系分别为 [001] (010) 和 [001] (100)。Katayama *et al.* (2004) 进一步设计了新的变形实验,他们发现了另外一种与水有关的橄榄石组构——E 型组构(图 4)。在这种组构中,橄榄石的 [100] 轴平行于剪切方向, (001) 面平行于剪切面,对应的滑移系为 [100] (001)。这些水导致的组构很好地解释了大洋俯冲带等含水环境下异常的地震波各向异性观测。

为了与本研究的组构对比,图 4 中给出了典型的 A 型组构以及 Jung and Karato (2001) 和 Katayama *et al.* (2004) 通过实验得出的橄榄石在有水参与条件下形成的 B、C 和 E 型组构。从图 4 中不难看出水的加入最明显的特征就是启动了 [001] 轴的滑移。荣成迟家店和大别山碧溪岭石榴二辉橄榄岩中的橄榄石的 [001] 轴均没有发生滑移(图 3), 明显不同于已报道的水导致的组构(B、C 和 E 型)。

4.2 迟家店、碧溪岭橄榄石组构与 A、D 型组构的对比

A 型橄榄石组构的主要特征是 [100] 轴平行于剪切方

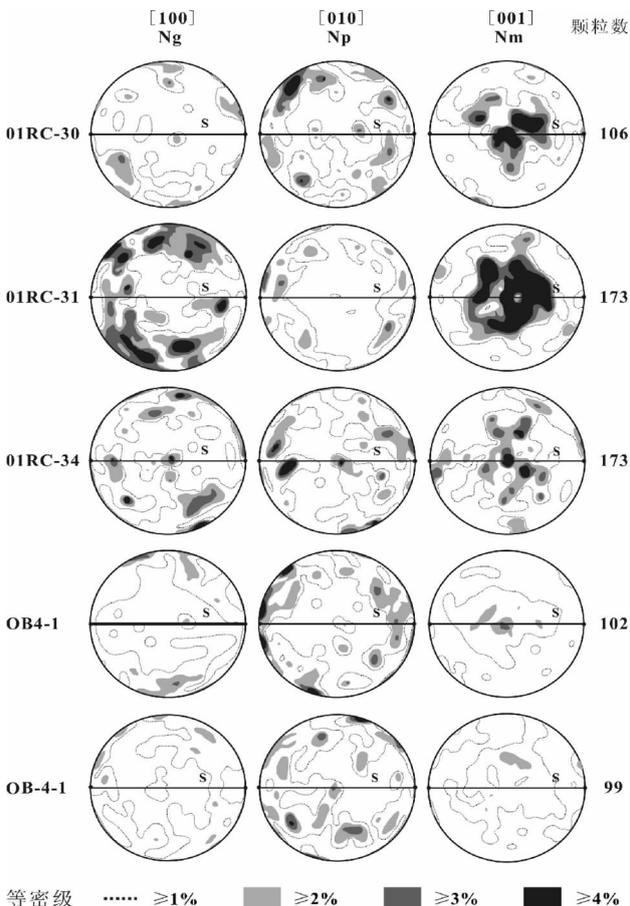


图3 荣成(RC)、碧溪岭(OB)石榴二辉橄榄岩橄榄石结晶学优选方位图。面理面(S)平行于纸面(黑线),线理(L)平行于东西方向(黑点)

Fig. 3 Olivine lattice preferred orientation in the Rongcheng and Bixiling garnet lherzolite. The foliations(S) subnormal to the paper surface, the lineations subparallel to the EW direction.

向,(010)面平行于剪切面,形成于低应力低含水条件下,这种组构较多见,发育于地幔橄榄岩包体(Jung and Karato, 2001;金振民等,1994)。D型组构橄榄石的[100]轴平行于剪切方向,{0kl}面平行于剪切面,形成于高应力低含水条件下(Zhang *et al.*, 2000;Bystricky *et al.*, 2000)。荣成迟家店和大别山碧溪岭石榴二辉橄榄岩中橄榄石的组构与典型A型和D型组构的共同特征是[001]轴均没有滑移(图3),说明荣成迟家店和大别山碧溪岭石榴二辉橄榄岩中的橄榄石在超高压变质和变形过程中并没有大量水的参与,岩相学观察中没有金云母等含水矿物相也证明了这一点。荣成迟家店和大别山碧溪岭石榴二辉橄榄岩中较弱的橄榄石组构明显不同于经典的A型和D型组构,也不同于新近发现的水导致的B型、C型和E型组构,而类似于Phakey *et al.* (1972)通过橄榄石位错推断的在中温中应变速率条件下形成的橄榄石[010](100)滑移系。

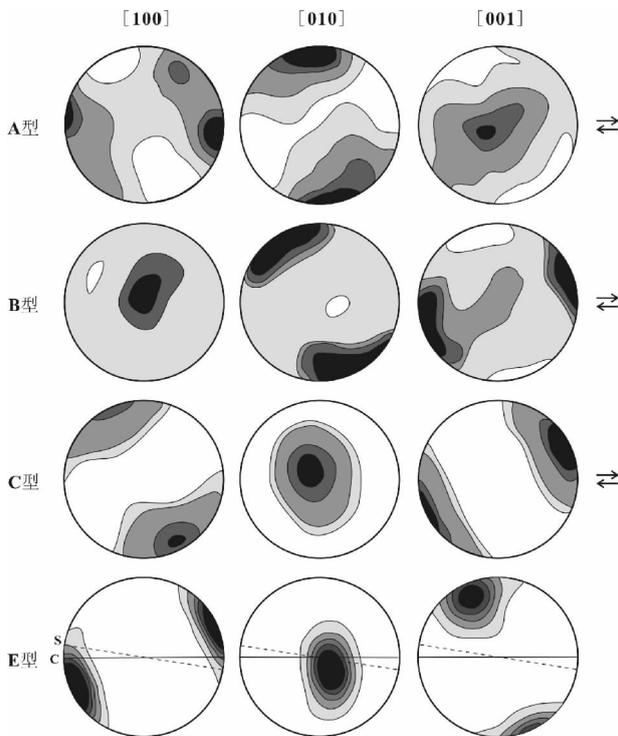


图4 变形橄榄石结晶学优选方位实验结果(A型、B型、C型据Jung and Karato, 2001; E型据Katayama *et al.*, 2004)

Fig. 4 Figures of crystallographic orientation of deformed olivine from experiments (Type A, B, C after Jung and Karato, 2001; Type E after Katayama *et al.*, 2004)

5 结论

迟家店和碧溪岭超高压变质石榴二辉橄榄岩中峰期变质形成的橄榄石组构特征基本相同。[001]轴主极密都位于面理面上接近垂直于线理的位置,石榴二辉橄榄岩中的橄榄石在变形过程中并没有启动[001]轴方向的滑移,说明荣成迟家店和大别山碧溪岭石榴二辉橄榄岩中的橄榄石在超高压变质和变形过程中并没有大量水的参与,这和岩相学观察中没有金云母等含水矿物相吻合。根据这种橄榄石的组构特征推断的[010](100)滑移系类似于中温中应变速率条件下形成的橄榄石滑移系(Phakey *et al.*, 1972)。对这两类橄榄岩的岩石学研究证明,所研究的橄榄石形成于超高压变质(700℃~800℃, 4~7GPa)条件,这种压力极高的变质条件由于温度较低(<1000℃)不利于橄榄石组构的形成,但是如果变质过程中存在丰富的流体,则可能形成像许志琴等(2005)报道的苏鲁芝麻坊石榴二辉橄榄岩橄榄石的典型的C型组构。但是我们研究的荣成迟家店和岳西碧溪岭的石榴二辉橄榄岩峰期超高压变质阶段的橄榄石组构很弱,且完全没有启动[001]轴的滑移,这可能是变质作用过程中局部流体较

少造成的。

由于大洋板块富含流体,在大洋板块的俯冲过程中,含水矿物依次脱水分解析出流体,交代上覆地幔楔(Schmidt and Poli, 1998),可导致俯冲大洋板块之上的地幔楔橄榄岩发育水导致的橄榄石组构。与大洋板块相比,大陆板块中的流体含量非常低,在大陆深俯冲过程中很难析出大量流体,因此深俯冲大陆板块之上的地幔楔可能不会以强烈的水导致的组构为主。我们的研究为解释大陆深俯冲板片之上的地幔楔的组构特征提供了重要的第一手资料。

致谢 本文是第一作者在中国地质大学(武汉)攻读硕士研究生期间的部分成果,感谢导师金振民先生和地球科学学院杜远生院长以及中国地质大学(武汉)的老师们的培养和支持。感谢国家地震局地质研究所林传勇老师和中国地质大学(武汉)钟增球老师提出的有益意见。

References

- Ames L, Zhou GZ and Xiong B. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15(2): 472–489
- Bystricky M, Kunze K, Burlini L *et al.* 2000. High shear strain of olivine aggregates: rheological and seismic consequences. *Science*, 290: 1564–1567
- Carswell D A. 1989. Eclogite Facies Rocks. Published in the USA by Chapman and Hall, 271–273
- Chavagnac V and Jahn BM. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 133: 29–51
- Chavagnac V, Jahn BM, Villa I *et al.* 2001. Multichronometric evidence for an in situ origin of the ultrahigh-pressure metamorphic terrane of Dabieshan, China. *Journal of Geology*, 109(5): 633–646
- Fan QC, Liu RX, Zhang Q *et al.* 1996a. Petrology and high-pressure mineral assemblage of mafic-ultramafic rocks of ultrahigh-pressure metamorphic zone in the Dabie Mountains. *Science in China, Ser. D*, 39(3): 329–336
- Fan QC, Liu RX, Xu P *et al.* 1996b. Petrogenetic Significance of Ti-Clinohumite (\pm Ti-Chondrorite) + Magnesite Assemblage in Ultrahigh Pressure Metamorphic Mafic-Ultramafic Rocks in Dabie Area. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 15(1): 5–9 (in Chinese with English abstract)
- Frese K, Trommsdorff V and Kunze K. 2003. Olivine [100] normal to foliation; lattice preferred orientation in prograde garnet peridotite formed at high H_2O activity, Cima di Gagnone (Central Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.* 145: 75–86
- Hacker BR, Sharp T, Zhang RY *et al.* 1997. Determining the Origin of Ultrahigh-Pressure Lherzolites. *Science*, 278: 702–704
- Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. *Journal of Geophysical Research*, 105(B6): 13339–13364
- Hiramatsu N, Banno S, Hirajima T *et al.* 1995. Ultrahigh-pressure garnet lherzolite from Chijiadian, Rongcheng County, in the Su-Lu region of eastern China. *The Island Arc*, 4: 324–333
- Ismail WB and Mainprice D. 1998. An olivine fabric database: an overview of upper mantle fabrics and seismic anisotropy. *Tectonophysics*, 296: 145–157
- Jahn BM, Fan QC, Yang JJ *et al.* 2003. Petrogenesis of the Maowu pyroxenite-eclogite body from the UHP metamorphic terrane of Dabieshan; chemical and isotopic constraints. *Lithos*, 70: 243–267
- Jin ZM, Green HW II and Borch RS. 1989. Microstructures of olivine and stresses in the upper mantle beneath Eastern China. *Tectonophysics*, 169(2–3): 23–50
- Jin ZM, Ji SC and Jin SY. 1994. Lattice preferred orientation of olivines and seismic anisotropy in the upper mantle. *Chinese Journal of Geophysics*, 37: 469–477 (in Chinese with English abstract)
- Jung H and Karato S. 2001. Water-induced fabric transitions in olivine. *Science*, 293: 1460–1463
- Katayama I, Jung H and Karato S. 2004. New type of olivine fabric from deformation experiments at modest water content and low stress. *Geology*, 32(12): 1045–1048
- Katayama I, Karato S and Brandon M. 2005. Evidence of high water content in the deep upper mantle inferred from deformation microstructures. *Geology*, 33(7): 613–616
- Kaminski É. 2002. The influence of water on the development of lattice preferred orientation in olivine aggregates. *Geophysical Research Letters*, 29(12): 17
- Kneller EA, Keken PE, Karato S *et al.* 2005. B-type olivine fabric in the mantle wedge: Insights from high-resolution non-Newtonian subduction zone models. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 781–797
- Li SG, Xiao YL, Liu DL *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes; *Chemical Geology*, 109: 89–111
- Li SG, Xiao YL, Ge NJ *et al.* 1996. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: I. Sm-Nd isotope system. *Science in China (series D)*, 39: 597–609
- Liou JG, Zhang RY and Jahn BM. 2000. Petrological and Geochemical Characteristics of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks from the Dabie-Sulu Terrane, East-Central China. *International Geology Review*, 42(4): 328–352
- Liu FL, Xu ZQ, Liou JG *et al.* 2002. Ultrahigh-pressure mineral inclusions in zircons from gneissic core samples of the Chinese Continental Scientific Drilling Site in eastern China. *European Journal of Mineralogy*, 14: 499–512
- Liu JB, Ye K, Maruyama S *et al.* 2001. Mineral inclusions in zircon from gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China. *Journal of Geology*, 109: 523–535
- Mainprice D, Tommasi A, Couvy H *et al.* 2005. Pressure sensitivity of olivine slip systems and seismic anisotropy of Earth's upper mantle. *Nature*, 433: 731–733
- Mizukami T, Wallis SR and Yamamoto J. 2004. Natural examples of olivine lattice preferred orientation patterns with a flow-normal a-axis maximum. *Nature*, 427: 432–436
- Nakamura D and Hirajima T. 2000. Granulite-facies overprinting of ultrahigh-pressure metamorphic rocks, northeastern Su-Lu Region, eastern China. *Journal of Petrology*, 41(4): 563–582
- Nicolas A and Poirier JP. 1976. *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks*. Wiley J and Sons, 389–411
- Okay AI, Xu ST and Seng r A. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. *European Journal of Mineralogy*, 1: 595–598
- Phakey P, Dollinger G and Christie JM. 1972. Transmission electron microscopy of experimentally deformed olivine crystals. Flow and Fracture of rocks, *Geophys. Monograph.*, 16, American Geophysics Union, 139–156
- Risold AC, Trommsdorff V and Grob ty B. 2001. Genesis of ilmenite rods and palisades along humite-type defects in olivine from Alpe Arami. *Contrib. Mineral. Petrol.* 140: 619–628
- Schmidt MW and Poli S. 1998. Experimentally based water budgets for dehydrating slabs and consequences for arc magma generation. *Earth and Planetary Science Letters*, 163: 361–379
- Xu ZQ, Chen J, Wang Q *et al.* 2005. Type-C olivine fabric in the Zhimafang garnet peridotite of the southern Aulu ultrahigh-pressure

- metamorphic terrane: Formation conditions and tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (2): 389 - 397 (in Chinese with English abstract)
- Yang JJ and Jahn BM. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP metamorphic terrane in China. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 167 - 180
- Yang JJ. 2003. Relict edenite in a garnet lherzolite from the Chinese Su-Lu UHP metamorphic terrane: implications for metamorphic history. *American Mineralogist*, 88: 180 - 188
- Ye K and Xu P. 1992. Petrogenesis of eclogites and related peridotitic rocks in Datuan area of Rongcheng county, Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 8 (1): 27 - 39 (in Chinese with English abstract)
- Ye K, Yao YP, Katayama I *et al.* 2000. Large areal extent of ultrahigh-pressure metamorphism in the Sulu ultrahigh-pressure terrane of East China; New implications from coesite and omphacite inclusions in zircon of granitic gneiss. *Lithos*, 52: 157 - 164
- Yoshida D, Hirajima T and Ishiwatari A. 2004. Pressure-temperature path recorded in the Yangkou garnet peridotite, in Su-Lu ultrahigh-pressure metamorphic belt, eastern China. *Journal of Petrology*. 45 (6): 1125 - 1145
- Zhang RY, Liou JG and Cong BL. 1995. Talc-, Magnesite- and Ti-Clinohumite-Bearing Ultrahigh-Pressure Meta-Mafic and Ultramafic Complex in the Dabie Mountains, China. *Journal of Petrology*, 36 (4): 1011 - 1037
- Zhang RY, Liou JG, Yang JS *et al.* 2000a. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China. *J. metamorphic Geol.*, 18: 149 - 166
- Zhang RY, Liou JG, Yang JS. *et al.* 2004. Garnet peridotites in UHP mountain belts of China. *International Geology Review*, 46: 981 - 1004
- Zhang RY, Liou JG, Zheng JP *et al.* 2005a. Petrogenesis of the Yangkou layered garnet-peridotite complex, Sulu UHP terrane, China. *American Mineralogist*, 90: 801 - 813
- Zhang RY, Yang JS and Wooden JL. 2005b. U-Pb SHRIMP geochronology of zircon in garnet peridotite from the Sulu UHP terrane, China: Implications for mantle metasomatism and subduction-zone UHP metamorphism. *Earth and Planetary Science Letters*, 237: 729 - 743
- Zhang SQ, Karato S, Gerald JF *et al.* 2000b. Simple shear deformation of olivine aggregates. *Tectonophysics*, 316: 133 - 152
- Zheng JP, Zhang RY, Griffin WL *et al.* 2005. Heterogeneous and metasomatized mantle recorded by trace elements in minerals of the Donghai garnet peridotites, Sulu UHP terrane, China. *Chemical Geology*, 221: 243 - 259
- Zheng YF, Yang JJ, Gong B *et al.* 2003. Partial equilibrium of radiogenic and stable isotope systems in garnet peridotite during ultrahigh-pressure metamorphism. *American Mineralogist*, 88: 1633 - 1643

附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新, 徐平等. 1996b. 大别山超高压变质镁铁-超镁铁岩中钛斜硅镁石(±钛粒硅镁石)-菱镁矿组合成因。矿物岩石地球化学通报, 15(1): 5 - 9
- 金振民, 嵇少丞, 金淑燕. 橄榄石晶格优选方位和上地幔地震波各向异性。地球物理学报, 1994, 37: 469 - 477
- 许志琴, 陈晶, 王勤等. 2005. 南苏鲁芝麻房石榴石橄榄岩中橄榄石的“C”类组构及其形成条件探讨。岩石学报, 21(2): 389 - 397
- 叶凯, 徐平. 1992. 山东荣成大疃榴辉岩成因岩石学研究。岩石学报, 8(1): 27 - 39