

西藏罗布莎地幔橄榄岩变形显微构造特征及其地质意义

徐梦婧, 金振民

XU Meng-jing, JIN Zhen-min

中国地质大学(武汉)地球科学学院, 湖北 武汉 430074

College of Earth Science, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China

摘要:地幔橄榄岩是罗布莎蛇绿岩的主要组成成分之一,通过显微构造特征可对其变形特征进行分析,确定流变学参数,探讨地幔橄榄岩的变形历史。以蛇纹石化程度较低的二辉橄榄岩和方辉橄榄岩为研究对象,橄榄石位错特征研究显示,本区橄榄石主要发育了低温常见的直线型自由位错,局部可见位错弓弯、位错环、位错壁等高温位错,反映罗布莎地幔橄榄岩变形以低温塑性流变为主,局部经历了高温塑性流变,主导变形机制为位错蠕变。橄榄石自由位错统计结果表明,二辉橄榄岩中的橄榄石自由位错密度为 $4.422 \times 10^7/\text{cm}^2$,方辉橄榄岩中的橄榄石为 $9.137 \times 10^7/\text{cm}^2$,变形过程中所受差异应力分别为 65MPa 和 93MPa。橄榄石和斜方辉石显微组构测量采用了电子背散射衍射技术(EBSD),分析结果表明,橄榄石均发育 A 型组构,为浅部地幔常见的组构类型,该结果与金刚石、柯石英等超高压矿物所指示的形成深度不一致。

关键词:西藏罗布莎;地幔橄榄岩;橄榄石;位错;显微组构

中图分类号:P588.12⁺5; P542⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)12- 1795-09

Xu M J, Jin Z M. Deformation microstructures of mantle peridotite from Luobusha ophiolite, Tibet, China and its geological implication. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(12):1795-1803

Abstract: Mantle peridotite is one of the main compositions of Luobusha ophiolite. According to its microstructures characteristics, we can analyze the characteristics of deformation, define rheological parameters, and investigate the deformation history of mantle peridotite. In this paper, we chose lherzolite and harzburgite with weak serpentinization degree as research objects. Analysis of the dislocation configurations of olivine by oxidation decoration technique show that dislocation microstructures are dominant linear type free dislocation which usually forms at low temperature, and also include some high temperature dislocation, such as dislocation bows, dislocation loops and dislocation wall. The results propose that Luobusha mantle peridotite deformation is dominated by low temperature plastic flow, and some localized regions experience high temperature plastic flow. Based on the statistical analysis, free dislocation density of lherzolite is $4.422 \times 10^7/\text{cm}^2$, while that of harzburgite is $9.137 \times 10^7/\text{cm}^2$. Applying an olivine dislocation density piezometer, we determine that the stress on lherzolite and harzburgite during this deformation event were 65MPa and 93MPa. A-type lattice-preferred orientation (LPO) of olivine from all samples is observed by Electron Backscatter Diffraction (EBSD), which is conventional in shallow mantle. The depth is inconsistent with that indicated by diamond and coesite.

Key words: Luobusha area, Tibet; mantle peridotite; olivine; dislocation; fabric

地幔橄榄岩作为上地幔的主要成分,控制着上地幔的流变学行为^[1]。橄榄岩显微构造可以记录其所经历的变形变质过程、塑性流动等信息,可以用来

定量地研究岩石变形过程中的差异应力、应变速率、温度、压力等流变学参数,从而探讨上地幔的变形过程和变形机制^[2-5]。对天然橄榄岩和实验变形样品

收稿日期:2010-09-10;修订日期:2010-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:4880126)资助

作者简介:徐梦婧(1985-),女,在读硕士,构造地质学专业。E-mail:mengjing_xu@126.com

的研究揭示, 橄榄石在塑性流变过程中形成的结晶学优选方位 (crystallographic preferred orientation, CPO) 与含水量^[6-7]、差异应力^[7]、温度^[8]、压力^[9-11]、部分熔融^[12]等变形环境密切相关。不同的变形环境下, 橄榄石可发育 5 种组构类型, 即 A 型[100](010)滑移系^[13]、B 型[001](010)滑移系^[6]、C 型[001](100)滑移系^[6]、D 型[100](0kl)滑移系^[14-15]和 E 型[100](001)滑移系^[16]。高压变形实验和天然样品观测结果显示, 橄榄石在地幔浅部低压环境下最易发育 A 型或 E 型组构, 地幔深部高压环境下主要发育 C 型组构^[9-11], 大洋俯冲带发育 B 型组构^[17], 因此可以借助橄榄石变形组构特征推断上地幔的变形环境。

西藏罗布莎蛇绿岩位于雅鲁藏布江缝合带东段, 呈东西向展布, 主要出露地幔橄榄岩和堆晶岩, 其中赋存有中国最大的豆荚状铬铁矿床。岩石学和地球化学数据显示, 罗布莎蛇绿岩属于消减带型 (SSZ 型) 蛇绿岩^[18], 形成于中侏罗世 (177Ma±31Ma^[19] 或 162.9Ma±2.8Ma^[20]) 俯冲带之上的弧间盆地, 晚白垩世开始侵位 (85.7Ma 或 80.6Ma)^[21]。一般认为 SSZ 型蛇绿岩形成深度为 15km, 压力为 1.75~0.75GPa^[22]。然而近十几年的研究发现, 罗布莎铬铁矿和围岩中赋存有一些异常矿物^[23], 其中包括金剛石、柯石英、硅尖晶石、硅金红石等超高压矿物^[24-29], 揭示罗布莎蛇绿岩中的地幔橄榄岩可能来自于更深的地幔转换带^[24, 29]。本文将采用电子背散射衍射技术 (electron backscatter diffraction, 简称 EBSD) 对罗布莎蛇绿岩中的地幔橄榄岩进行显微组构测量, 观察橄榄石是否发育深部地幔的 C 型组构, 并结合其岩石学和位错特征, 探讨罗布莎地幔橄榄岩所经历的变形变质历史。

1 样品制备和分析方法

本文选取的实验样品为蛇纹石化程度较低的二辉橄榄岩 (T97-68、T97-70) 和方辉橄榄岩 (T97-93、T97-95), 其中二辉橄榄岩采自罗布莎蛇绿岩带的香卡山矿区, 方辉橄榄岩采自罗布莎矿区。为了进行测试分析, 将岩石样品磨制成厚度约为 30μm 的薄片, 并采用粒度为 0.3μm 和 0.06μm 的抛光液进行抛光, 用于光学显微镜下的岩相学观察、岩石组构测量和电子探针分析。由于实验样品受到不同程度的蛇纹石化和风化作用, 手标本上未观察到明显的面理和线理, 所以未磨制定向薄片。橄

石的位错特征研究采用了氧化缀饰法^[30], 样品单面抛光, 在高温炉中加热至 900℃, 保温 1h, 淬火, 然后磨制成厚度约为 30μm 的薄片, 采用扫描电镜进行观察分析^[31]。

样品的晶格优选方位测量采用了电子背散射衍射技术^[32-33], 该技术利用不同晶体结构或方位的电子背散射衍射衬度图像 (electron backscatter diffraction pattern, 简称 EBSD) 来获得微米级的空间分辨率和 1°左右角度分辨率的晶体或矿物等物质的组构信息。本次实验分析在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室的环境扫描电镜实验室进行, 研究使用的 EBSD 系统是丹麦 HKL 技术有限公司制造的 Nordlys- II & Channel 5.0。工作条件: 20kV 加速电压, 21mm 左右的工作距离, 样品倾斜 70°, 有效束流约 5nA。测量采用人机交互模式, 手动控制分析的精度。受矿物含量及切片位置的影响, 实验中, 橄榄石和斜方辉石分别收集了 141~270 和 45~105 个颗粒的晶体取向数据。

2 橄榄岩岩石学特征

二辉橄榄岩呈灰绿色, 块状构造, 主要由橄榄石 (Ol, 61%~65%)、斜方辉石 (Opx, 20%~21%)、单斜辉石 (Cpx, 10%~12%) 及少量的铬尖晶石 (Sp)、蛇纹石 (Serp, 5%~6%) 组成。橄榄石牌号 Fo=89 (表 1), 为典

表 1 地幔橄榄岩中主要矿物的化学成分
Table 1 Chemical composition of main minerals in peridotite

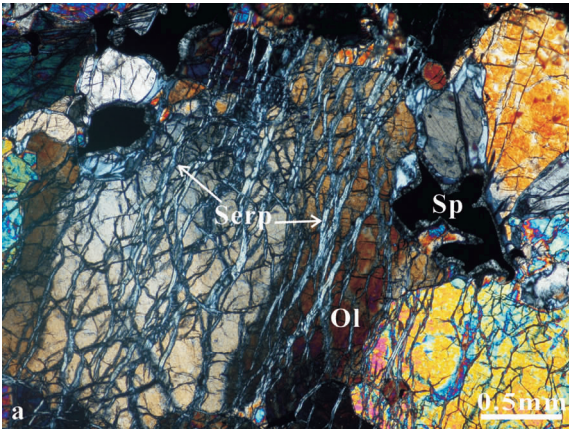
岩石	二辉橄榄岩 (T97-70)			方辉橄榄岩 (T97-95)	
矿物	Ol	Opx	Cpx	Ol	Opx
SiO ₂	40.83	54.85	52.59	41.17	56.07
TiO ₂	0.02	0.05	0.19	0.02	0.08
Al ₂ O ₃	0.04	4.35	3.28	0.02	2.91
Cr ₂ O ₃	0.00	0.78	0.81	0.00	0.77
FeO	10.28	6.80	2.18	8.81	5.71
MnO	0.11	0.14	0.07	0.10	0.13
MgO	48.36	32.35	16.67	49.62	33.42
CaO	0.01	0.51	23.79	0.01	0.52
Na ₂ O	0.00	0.00	0.13	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Total	99.63	99.85	99.73	99.75	99.63
	Fo=89	En=84	Di=86	Fo=91	En=86

注: 化学成分为电子探针数据 (wt%), 由中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针实验室测试, 使用仪器型号为 JXA-8100

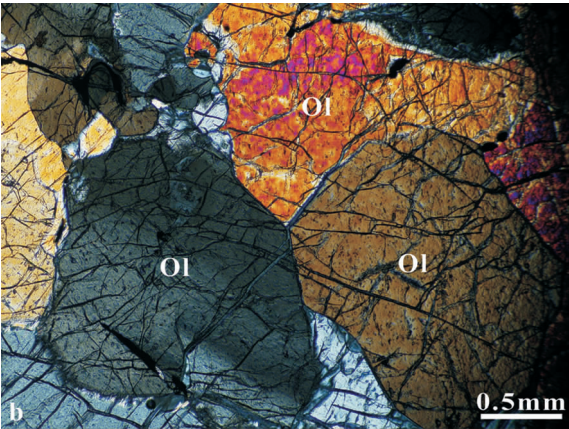
型地幔橄榄岩中的橄榄石($Fo>88$);斜方辉石为顽火辉石, $En=84$ (表 1);单斜辉石为透辉石, $Di=86$ (表 1),二级黄绿干涉色,可见一组完全解理,斜消光;铬尖晶石呈棕红色,正交偏光镜下全消光,通常具有蛇纹石边。岩石呈半自形—他形中—粗粒结构,裂隙发育,沿裂隙可见蛇纹石呈网状交代(图版 I—

a)。颗粒粒度变化较大,主要粒度集中在 2~4mm 之间,最大粒度大于 5mm,最小为 0.5mm,颗粒之间呈直线、曲线或齿状接触(图版 I—b),该结构为地幔岩中常见的原始粒状结构,是形成最早的一种粗粒粒状结构。部分橄榄石和斜方辉石发育扭折带及波状消光(图版 I—c),斜方辉石通常发育单斜辉石的

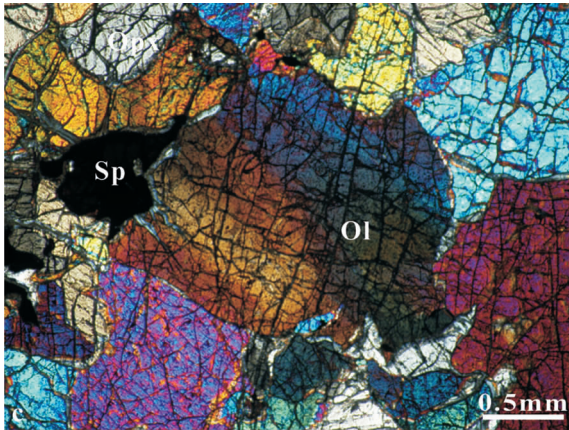
图版 I Plate I



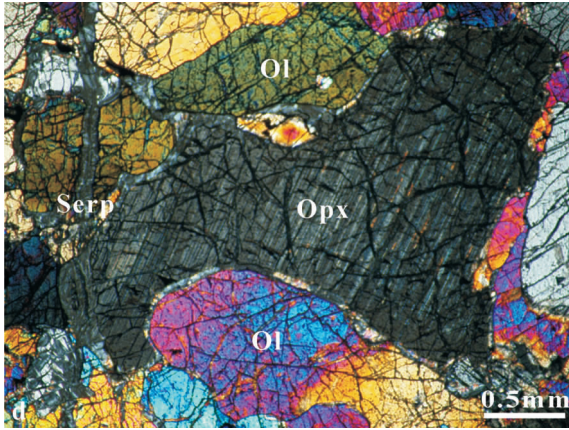
a—蛇纹石沿二辉橄榄岩(T97-70)裂隙呈网状交代



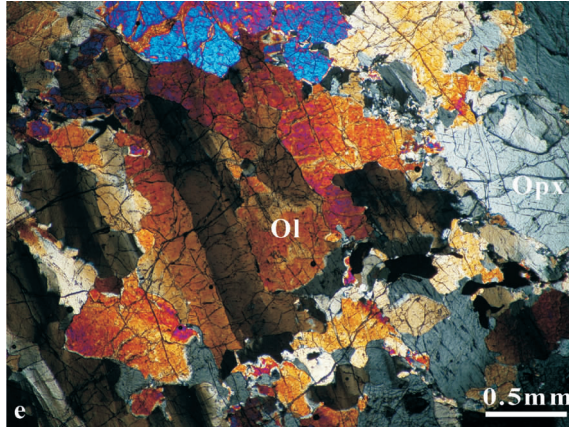
b—二辉橄榄岩(T97-70)颗粒之间呈直线或曲线接触



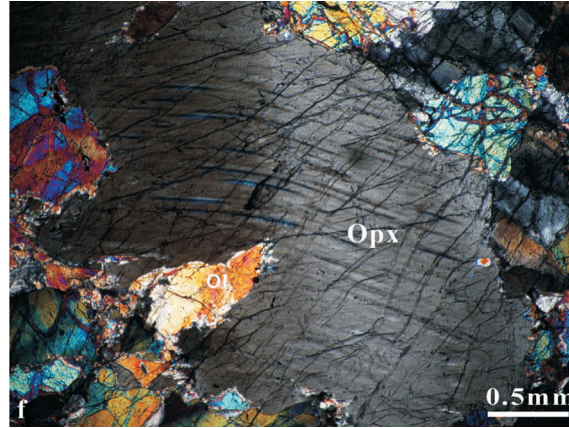
c—二辉橄榄岩(T97-70)橄榄石扭折带



d—二辉橄榄岩(T97-70)斜方辉石出溶页理



e—方辉橄榄岩(T97-95)橄榄石扭折带



f—方辉橄榄岩(T97-95)斜方辉石出溶页理发生弯曲

出溶片晶(图版 I -d),它是 2 种辉石在高温条件下形成固溶体,当温度下降后熔离而成的^[34]。

方辉橄榄岩灰绿色,块状构造,主要由橄榄石(64%~65%)、斜方辉石(28%~30%)、单斜辉石(3%~5%)及少量的铬尖晶石、蛇纹石(2%~3%)组成,橄榄石牌号 Fo=91,为镁橄榄石,斜方辉石牌号 En=86,为顽火辉石(表 1)。岩石在光学显微镜下可见一定的矿物定向,基本无蛇纹石化。岩石发育典型的碎斑结构,碎斑粒度为 1~4mm,碎基粒度小,为 0.1~0.5mm,是碎斑受应力作用破碎而形成的,部分颗粒发生重结晶,该结构表明岩石曾经历了高压塑性流动。受变形作用影响,橄榄石和斜方辉石普遍发育有

扭折带、变形纹、波状消光、晶体弯曲等现象(图版 I -e、f),斜方辉石中可见单斜辉石的出溶片晶(图版 I -f)。

3 位错显微构造特征

氧化缀饰法研究表明,本区地幔橄榄岩中的橄榄石主要发育自由位错,在背散射图像上可观察到 3 种形态的自由位错,即长短不一的平直位错线(图 1-a)、弯曲的位错线(可能为螺型位错)和大量的位错线露头(位错线方向垂直于薄片,图 1-b)。此外,部分橄榄石颗粒还发育有位错弓弯、位错环和位错壁。位错弓弯是当某一位错线的两端被钉扎时,在持

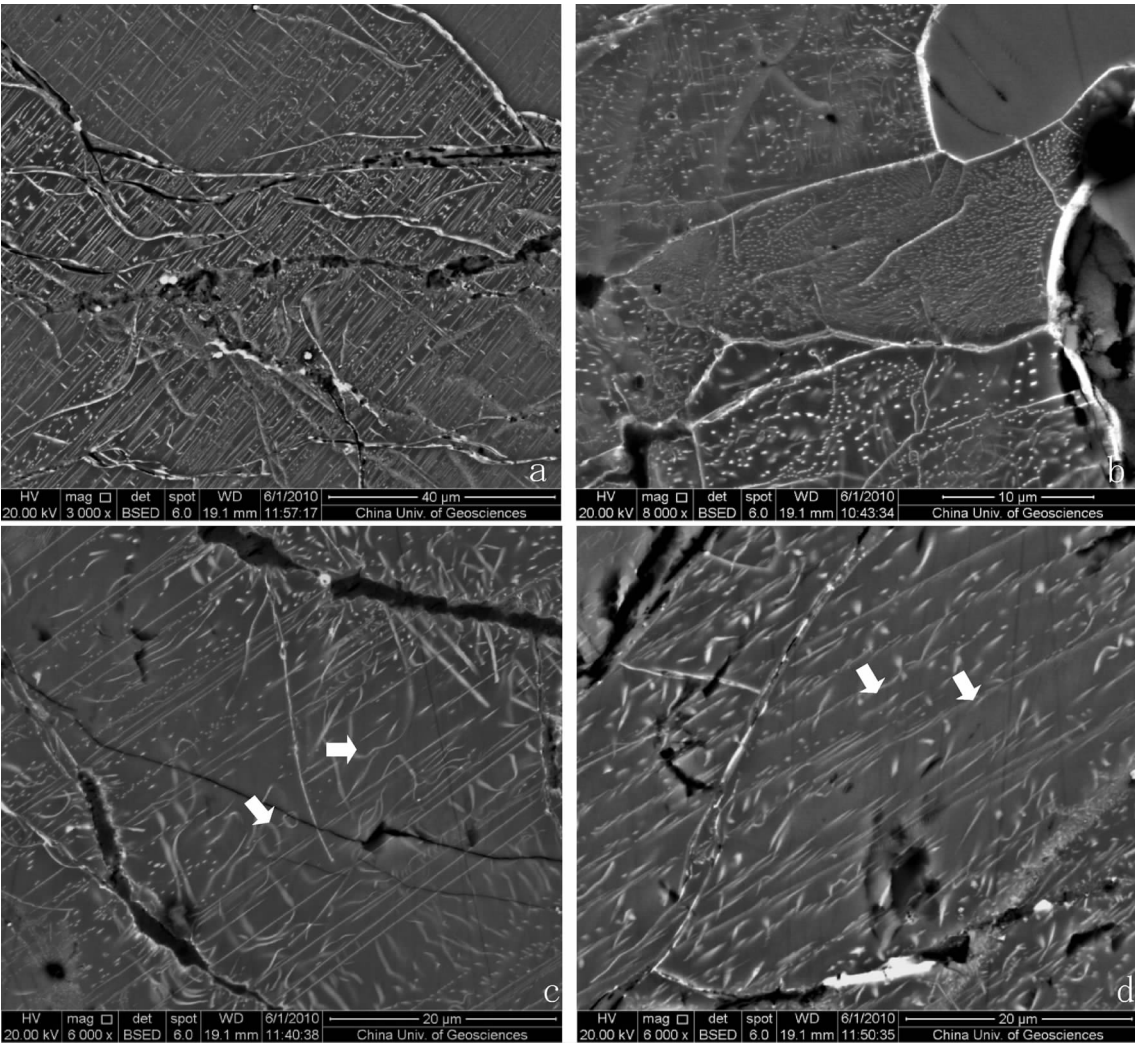


图 1 二辉橄榄岩和方辉橄榄岩中的橄榄石位错背散射图像

Fig. 1 Backscattered electron images showing dislocation microstructures of olivine in lherzolite and harzburgite
a—直线型自由位错(二辉橄榄岩 T97-70);b—位错线露头(方辉橄榄岩 T97-95);
c—白色箭头指示的是位错环和位错弓弯(二辉橄榄岩 T97-70);d—白色箭头指示的是位错壁(二辉橄榄岩 T97-70)

续的外施剪应力作用下,位错线发生弯曲时形成的弓弧状构造^[35],进一步发育便形成了位错环(图 1-c),而位错壁是在塑性变形过程中橄榄石一系列刃型位错按“几何学边界需要”,通过滑移和攀移作用形成的^[36](图 1-d)。

前人研究揭示,矿物晶体内自由位错密度主要取决于差异应力,剪切模量和伯格矢量仅通过温度产生很小的影响^[37],因此可通过自由位错密度估算差异应力,其基本函数关系为:

$$\delta_1-\delta_3=K\cdot G\cdot b\cdot\rho^n$$

式中: K 为无量纲材料系数, G 为矿物剪切模量, b 为矿物中位错的伯格斯矢量, ρ 为自由位错密度, n 为无量纲系数。本文计算采用了 Toriumi^[3]所给出的参数值, $K=3$, $G=6.5\times10^4\text{MPa}$, $b=5\times10^{-8}\text{cm}$, $n=0.5$,代入上述公式,得到

$$\delta_1-\delta_3=9.75\times10^{-3}\rho^{0.5}$$

对罗布莎地幔橄榄岩橄榄石中自由位错统计结果获得,二辉橄榄岩中橄榄石的平均位错密度为 $4.422\times10^7/\text{cm}^2$,方辉橄榄岩中橄榄石为 $9.137\times10^7/\text{cm}^2$,代入上述公式计算得到,二辉橄榄岩和方辉橄榄岩在变形过程中所受的差异应力分别为 65MPa 和 93MPa(表 2)。

4 显微组构特征

本文对上述 4 个地幔橄榄岩样品分别进行了 EBSD 测定,由于所采样品在手标本上无法观测到明显的面理和线理,所以测量采用的薄片未进行定向。根据位错理论,伯格斯矢量越短所需的应变能越低,所以在 LPO 形成过程中,晶体的滑移方向通常为伯格斯矢量最短的方向。斜方辉石中,伯格斯矢量分别为 $[100]=1.82\text{nm}$, $[010]=0.881\text{nm}$, $[001]=0.518\text{nm}$ ^[17],其中 $[001]$ 最短,因此其滑移方向将优选 $[001]$ 方向,前人的理论计算和变形实验证实了这一结论,同时研究结果也显示其滑移面一般为 (100)面^[38]。此外,在天然变形岩石中,斜方辉石通常也只展现了 (100)[001]一种典型的滑移系^[39-40],说明斜方辉石的 (100)[001]组构受物理化学条件的影响较小。因此,本文依据斜方辉石的组构特征对薄片方位进行调整,最终得到的橄榄石和斜方辉石组构图见图 2 和图 3。

从二辉橄榄岩的 EBSD 测量结果中可以

看出,橄榄石和斜方辉石均具有一定的结晶学优选方位(CPO)。样品 T97-68 中橄榄石 $[010]$ 和 $[001]$ 轴显示较强的晶格优选方位(图 2-a),其中 $[010]$ 轴在近垂直于面理面(即 XY 面)方向上的 Z 轴附近形成点极密,最大极密值近于平行 Z 轴方向, $[001]$ 轴极密近平行于线理方向;斜方辉石的优选方位相对分散(图 3-a),仅 $[100]$ 轴在近于垂直面理面的 Z 轴附近形成强极密, $[001]$ 轴在平行于面理面方向形成大圆环。样品 T97-70 中橄榄石 $[100]$ 轴形成最强优选方位(图 2-b),在面理面上近线理方向(即 X 轴)形成强极密,(010)面和 $[001]$ 轴组构较弱,(010)面极点形成垂直面理面的大圆环带,最强极密近平行于 Z 轴;斜方辉石优选方位同样分散(图 3-b), $[100]$ 轴形成垂直面理面的大圆环带, $[010]$ 轴所形成的大圆环带与面理面约成 30° 夹角。

方辉橄榄岩中 T97-95 样品晶格优选方位较强,其中橄榄石的 $[100]$ 轴、 $[010]$ 轴和 $[001]$ 轴分别平行于 X 轴、Y 轴和 Z 轴(图 2-d);斜方辉石的 $[001]$ 轴平行于线理, $[100]$ 轴、(010)面和 (110)面的极密在垂直于面理面的方向上形成大圆环(图 3-d)。样品 T97-93 中橄榄石 $[100]$ 轴形成 2 组极密(图 2-c),一组近平行于线理,一组近平行于 Y 轴, $[010]$ 轴的最强极密近平行于 Z 轴, $[001]$ 轴在平行于面理面方向形成大圆环,圆环内同样形成 2 组强极密,一组近平行于线理,一组近平行于 Y 轴;斜方辉石的优选方位较弱,(010)面的最强极密近平行于 Z 轴, $[010]$ 轴形成近平行面理面的大圆环(图 3-c)。

目前,用来衡量组构强度的指标包括 M 指数(M-index)和 J 指数(J-index),其中 M 指数是以不相关晶粒取向差别角度分布为基础计算得到的取向差值^[41],J 指数是取向分布函数的二阶矩^[42],本文采用第一种方法计算橄榄石和斜方辉石的组构强度。计算结果显示,样品 T97-95 的组构最强,橄榄石的

表 2 罗布莎地幔橄榄岩中的橄榄石位错密度统计和差异应力估算
Table 2 Free dislocation densities of olivine and calculation of differential stress on Luobusha peridotite

样品号	T97-70	T97-95
岩石类型	二辉橄榄岩	方辉橄榄岩
背散射图像数量	4	4
扫描电镜放大倍数	$(0.3\sim1.2)\times10^4$	$(0.8\sim3.0)\times10^4$
自由位错密度变化范围/ cm^2	$9.560\times10^6\sim8.761\times10^7$	$2.215\times10^7\sim1.875\times10^8$
平均自由位错密度/ cm^2	4.422×10^7	9.137×10^7
差异应力/MPa	65	93

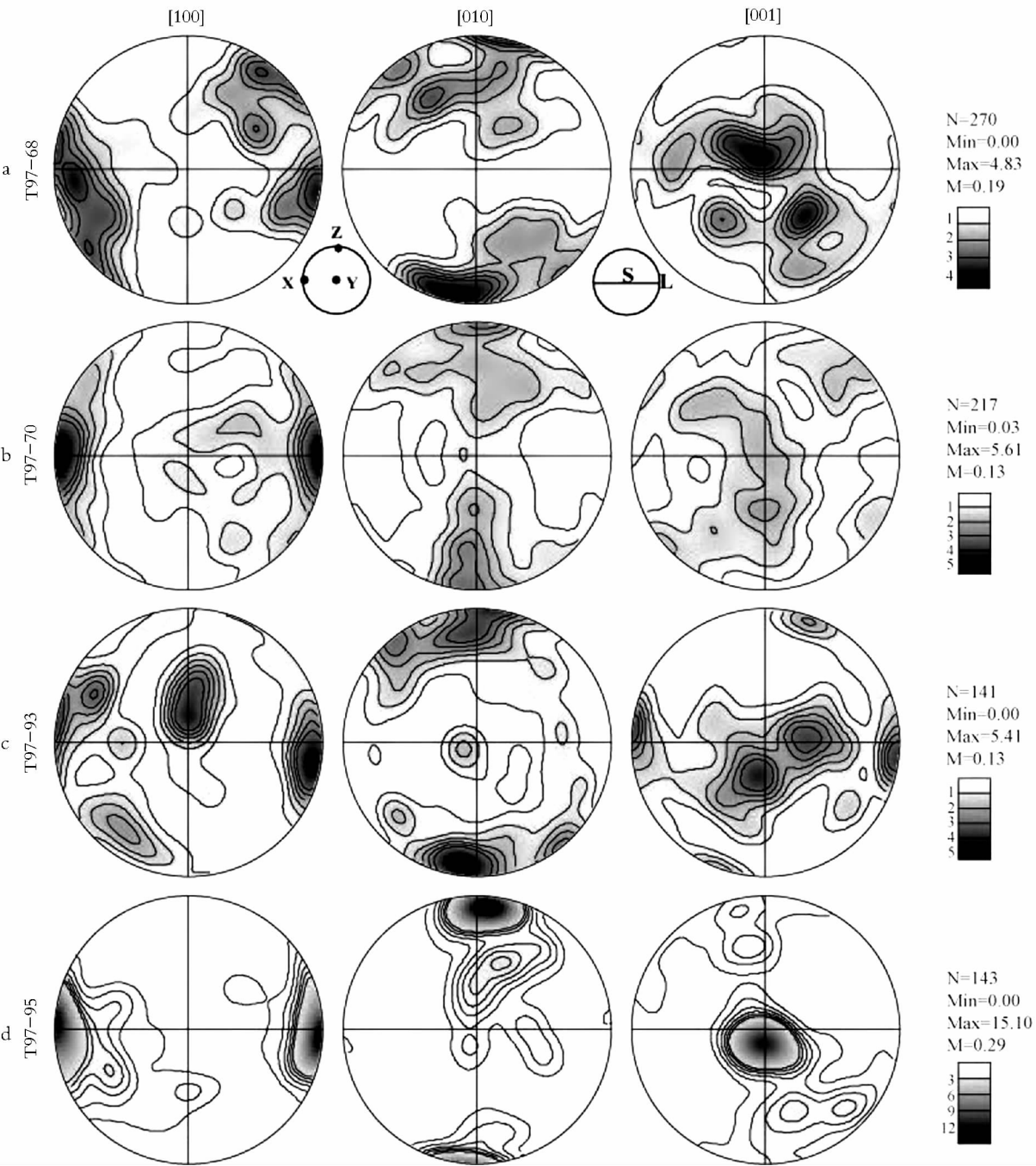


图 2 二辉橄榄岩和方辉橄榄岩中的橄榄石晶格优选方位

Fig. 2 Lattice-preferred orientation of olivine in lherzolite and harzburgite

a、b—二辉橄榄岩；c、d—方辉橄榄岩；N—实验采集数据的颗粒数；M—M 指数(组构强度)

M 值为 0.29，斜方辉石为 0.19,T97-93 组构最弱，橄榄石的 M 值为 0.13,斜方辉石为 0.15。通过对比 4 个样品中橄榄石和斜方辉石的组构强度发现，T97-68、T97-70 和 T97-93 三个样品中斜方辉石的组构均强于橄榄石，而 T97-95 中橄榄石的组构

强于斜方辉石。

5 讨论与结论

5.1 变形过程和变形机制

从位错组态和特征来看，本区二辉橄榄岩和方

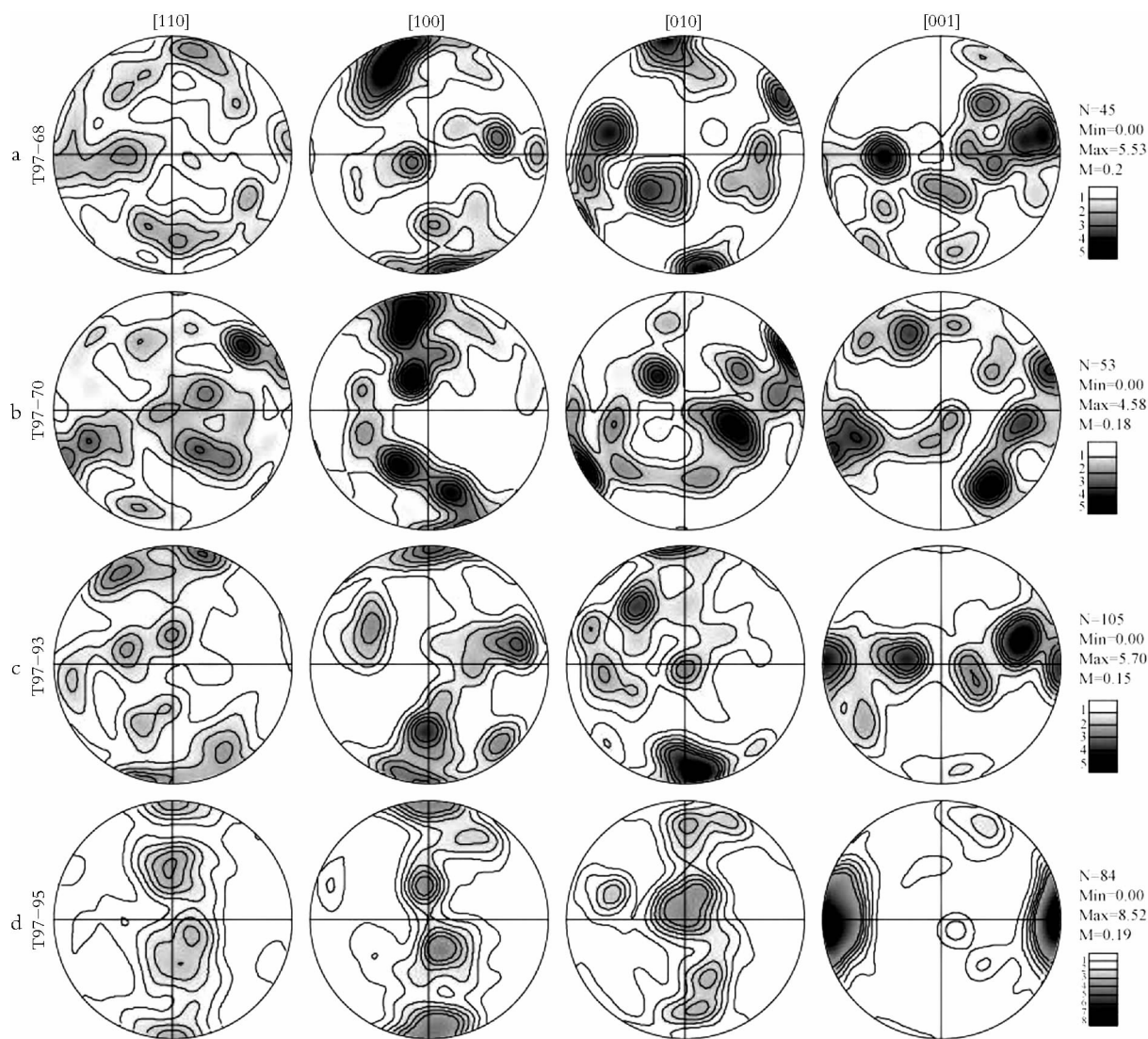


图 3 二辉橄榄岩和方辉橄榄岩中的斜方辉石晶格优选方位(图例说明同图 2)

Fig. 3 Lattice-preferred orientation of orthopyroxene in lherzolite and harzburgite

辉橄榄岩中的橄榄石均发育自由位错,局部可见位错弓弯、位错环、位错壁等位错组态,其中位错弓弯一般是在 800℃以上开始形成的,位错环则在温度高于 1000℃条件下形成^[43],而变形实验证实,在应变速率为 $10^{-5}/\text{s} \sim 10^{-8}/\text{s}$ 和温度为 600~700℃的条件下,橄榄石的自由位错以直线型为主^[44]。以上研究结果表明,橄榄石主要发育了低温位错组态,反映罗布莎地幔橄榄岩变形以低温塑性流变为主,局部经历了高温塑性流变。二辉橄榄岩和方辉橄榄岩变形过程中所受的应力分别为 65MPa 和 93MPa。

罗布莎地幔橄榄岩橄榄石中发育丰富的位错组态,同时样品的显微构造显示橄榄石和斜方辉石均

可见扭折带、波状消光等特征,反映罗布莎地幔橄榄岩的变形机制以位错蠕变为主导。

5.2 橄榄石组构类型

本区地幔橄榄岩组构的测量结果显示,橄榄石的滑移方向为[100],滑移面为(010),经与前人研究结果对比分析,本区橄榄石均发育有 A 型组构。T97-93 样品中同时发育滑移方向为[001]的晶格优选方位(图 2-c),可能是由该岩石的碎斑结构所引起的。碎斑结构是在后期应力作用下,原始颗粒边缘发生破碎而形成的,破碎形成的碎基可发生部分或全部重结晶,其晶格优选方位在后期应力作用下形成。Warren 等^[45]在研究橄榄石在剪切应力作用下晶

格优选方位的演化中发现,如果橄榄石中存在一定的晶格优选方位,后期的剪切应变达到 168%~258% 才能使其重新定向。该岩石中的碎斑可能未发生足够大的应变,因此保留了原始的晶格优选方位。

高压变形实验和理论计算结果表明, $T=1100\sim 1400^{\circ}\text{C}$, $p\leq 5\text{GPa}$ 时,橄榄石的主滑移系为 $[100](010)$, $p\geq 5\text{GPa}$ 时,主滑移系为 $[001](010)^{[9,11]}$ 。此外,天然样品研究显示,大陆俯冲带中形成于 4~7GPa 的石榴子石橄榄岩中橄榄石发育 C 型 $[001](100)$ 滑移 $^{[46]}$ 。在大陆俯冲带环境下,深度大于 150km,橄榄石发育 C 型组构;深度小于 150km,橄榄石发育 A 型组构 $^{[9-10]}$ 。罗布莎二辉橄榄岩和方辉橄榄岩中的橄榄石均发育 A 型组构,反映本区地幔橄榄岩形成于地幔浅部,该结果与金刚石、柯石英等超高压矿物所指示的形成深度不一致。因此,罗布莎含异常矿物橄榄岩来自地幔深部成因 $^{[24,29]}$ 的观点仍需做进一步的研究。

综上所述,可以得出以下结论。

(1)橄榄石位错显微构造研究显示,罗布莎地幔橄榄岩变形以低温塑性流变为主,局部经历了高温塑性流变,二辉橄榄岩和方辉橄榄岩在变形过程中所受应力分别为 65MPa 和 93MPa。变形机制以位错蠕变为主导。

(2)罗布莎二辉橄榄岩和方辉橄榄岩中橄榄石均发育 A 型组构,未见深部地幔所发育的 C 型组构,与白文吉等 $^{[29]}$ 和杨经绥等 $^{[24]}$ 所提出的深部来源不一致,对其成因需进一步探讨。

6 进一步研究的方向

蛇绿岩中的地幔橄榄岩形成及演化过程复杂,其显微构造往往受多期构造事件的影响,在后期构造侵位过程中,橄榄石的晶格优选方位可能因物理化学条件的变化而发生转换 $^{[13]}$ 。为了能够更好地探讨其形成过程及变形历史,还需要进一步开展以下 2 个方面的工作。

(1)系统采集不同类型的罗布莎地幔橄榄岩样品(二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩),详细厘定样品的变形期次,对不同变形程度的橄榄岩进行组构测量,观察橄榄石组构的变化,查明是否存在深部地幔发育的 C 型组构。

(2)测定地幔橄榄岩中的含水量。实验研究证实,橄榄石中的含水量对滑移系具有重要的影响 $^{[6-7]}$ 。

因此,测试橄榄石中水的含量对确定橄榄石组构和探讨橄榄岩的变形过程均有重要意义。

致谢:感谢章军锋教授、刘祥文教授、王永峰副教授、徐海军博士在样品制备、实验测试、数据处理分析和成文过程中给予的指导。

参考文献

- [1]金振民, Ji S C, 金淑燕. 橄榄石晶格优选方位和上地幔地震波各向异性[J]. 地球物理学报, 1994, 37(4): 469-476.
- [2]Chopra C N, Paterson M S. The role of water in the deformation of dunite[J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 7861-7876.
- [3]Toriumi M. Relation between dislocation density and subgrain size of naturally deformed olivine in peridotites [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1979, 68(2): 181-186.
- [4]王永峰, 郑有业, 金振民. 西藏东巧方辉橄榄岩的显微构造特征及其流变学意义[J]. 地球科学, 2005, 30(1): 52-60.
- [5]董云鹏, 周鼎武, 刘良. 松树沟蛇绿岩中橄榄石位错构造及其流变学意义[J]. 岩石矿物学杂志, 1996, 15(1): 46-52.
- [6]Jung H, Karato S. Water-induced fabric transitions in olivine [J]. Science, 2001, 293(5534): 1460-1463.
- [7]Jung H, Katayama I, Jiang Z, et al. Effect of water and stress on the lattice-preferred orientation of olivine [J]. Tectonophysics, 2006, 421 (1/2): 1-22.
- [8]Carter N L, Avé Lallemant H G. High temperature flow of dunite and peridotite [J]. Geological Society of America Bulletin, 1970, 81(8): 2181-2202.
- [9]Raterron P, Chen J, Li L, et al. Pressure-induced slip-system transition in forsterite: Single-crystal rheological properties at mantle pressure and temperature [J]. American Mineralogist, 2007, 92(8/9): 1436-1445.
- [10]Mainprice D, Eacute A, Tommasi A, et al. Pressure sensitivity of olivine slip systems and seismic anisotropy of Earth's upper mantle [J]. Nature, 2005, 433: 731-733.
- [11]Couvry H, Frost D J, Heidelbach F, et al. Shear deformation experiments of forsterite at 11 GPa -1400°C in the multianvil apparatus [J]. European Journal of Mineralogy, 2004, 16(6): 877-889.
- [12]Holtzman B K, Kohlstedt D L, Zimmerman M E, et al. Melt segregation and strain partitioning: Implications for seismic anisotropy and mantle flow [J]. Science, 2003, 301(5637): 1227-1230.
- [13]Karato S, Jung H, Katayama I, et al. Geodynamic significance of seismic anisotropy of the upper mantle: New insights from laboratory studies [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2008, 36: 59-95.
- [14]Katayama I, Jung H, Karato S. A new type of olivine fabric at modest water content and low stress [J]. Geology, 2004, 32(12): 1045-1048.
- [15]Bystricky M, Kunze K, Burlini L, et al. High shear strain of olivine aggregates: Rheological and seismic consequences [J]. Science, 2000, 290(5496): 1564-1567.

- [16] Nicolas A, Christensen N I. Formation of anisotropy in upper mantle peridotites—A review[C]//Fuchs K, Froideveaux C. Composition, structure and dynamics of the lithosphere—asthenosphere system. Washington, DC: American Geophysical Union, 1987: 407–433.
- [17] Zhang S, Karato S, Fitz Gerald J, et al. Simple shear deformation of olivine aggregates[J]. *Tectonophysics*, 2000, 316(1/2): 133–152.
- [18] 钟立峰, 夏斌, 崔学军, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩壳层熔岩地球化学特征及成因[J]. *大地构造与成矿学*, 2006, 30(2): 231–240.
- [19] 周肃, 莫宣学, Mahoney J J, 等. 西藏罗布莎蛇绿岩中辉长辉绿岩 Sm–Nd 定年及 Pb, Nd 同位素特征[J]. *科学通报*, 2001, 46(16): 1387–1390.
- [20] 钟立峰, 夏斌, 周国庆, 等. 藏南罗布莎蛇绿岩辉绿岩中锆石 SHRIMP 测年[J]. *地质论评*, 2006, 52(2): 224–229.
- [21] Malpas J, Zhou M, Robinson P T, et al. Geochemical and geochronological constraints on the origin and emplacement of the Yarlung Zangbo ophiolites, Southern Tibet[C]//Dilek Y, Robinson P T. *Ophiolites in Earth History*. London: Geological Society Special Publications, 2003: 191–206.
- [22] 周国庆. 蛇绿岩研究新进展及其定义和分类的再讨论[J]. *南京大学学报(自然科学版)*, 2008, 44(1): 1–24.
- [23] 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(2): 144–150.
- [24] 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.
- [25] 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 蛇绿岩中的一种超高压矿物——硅金红石[J]. *自然科学进展*, 2002, 12(11): 102–104.
- [26] 方青松, 白文吉. 西藏首次发现含金刚石的阿尔卑斯型岩体[J]. *地质论评*, 1981, (5): 445–447.
- [27] 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.
- [28] Yang J S, Dobrzinetskaya L, Bai W J, et al. Diamond- and coesite-bearing chromitites from the Luobusa ophiolite, Tibet[J]. *Geology*, 2007, 35(10): 875–878.
- [29] 白文吉, 周美付, Robinson P T, 等. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿、金刚石及伴生矿物成因[M]. 北京: 地震出版社, 2000.
- [30] Kohlstedt D L, Goetze C, Durham W B, et al. New technique for decorating dislocations in olivine[J]. *Science*, 1976, 191(4231): 1045–1046.
- [31] Jin Z M, Green H W, Borcha R S. Microstructures of olivine and stresses in the upper mantle beneath Eastern China [J]. *Tectonophysics*, 1989, 169(1/3): 23–50.
- [32] 徐海軍, 金淑燕, 郑伯让. 岩石组构学研究的最新技术——电子背散射衍射(EBSD)[J]. *现代地质*, 2007, 21(2): 213–225.
- [33] 曹淑云, 刘俊来. 岩石显微构造分析现代技术——EBSD 技术及应用[J]. *地球科学进展*, 2006, 21(10): 1091–1096.
- [34] 杨风英, 肖绪琦, 周梅馨. 藏南阿尔卑斯型橄榄岩中辉石的出溶特征及有关问题讨论[C]. 北京: 地震出版社, 1990: 159–162.
- [35] 金振民, Green H W. 橄榄石位错构造及其上地幔流变学意义——以河北省大麻坪二辉橄榄岩为例[J]. *地球科学*, 1988, 13(4): 365–374.
- [36] 金振民, 金淑燕, Green H W, 等. 台湾海峡上地幔流变学状态及其构造意义[J]. *地质学报*, 1995, 69(1): 31–41.
- [37] Kohlstedt D L, Weathers M S. Deformation-induced microstructures, paleopiezometers, and differential stresses in deeply eroded fault zones[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1980, 85(B11): 6269–6285.
- [38] Ross J V, Nielsen K C. High-temperature flow of wet polycrystalline enstatite[J]. *Tectonophysics*, 1978, 44(1/4): 233–261.
- [39] Christensen N I, Lundquist S M. Pyroxene orientation within the upper mantle[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1982, 93(4): 279–288.
- [40] Skemer P, Katayama I. Deformation fabrics of the Cima di Gagnone peridotite massif, Central Alps, Switzerland: evidence of deformation at low temperatures in the presence of water[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, 152(1): 43–51.
- [41] Skemer P, Katayama I, Jiang Z, et al. The misorientation index: Development of a new method for calculating the strength of lattice-preferred orientation[J]. *Tectonophysics*, 2005, 411(1/4): 157–167.
- [42] Bunge H. *Texture analysis in materials science: Mathematical methods*[M]. London: Butterworths, 1982.
- [43] 郑伯让, 金振民, 金淑燕. 河北省大麻坪幔源包体橄榄石位错特征的透射电子显微镜研究[J]. *矿物岩石学论丛*, 1988, 4: 1–9.
- [44] Phakey P, Dollinger G, Christic J. Transmission electron microscopy of experimentally deformed olivine crystals [C]//Heard H C. *Flow and fracture of rocks*. Washington DC: American Geophysical Union, 1972: 139–156.
- [45] Warren J M, Hirth G, Kelemen P B. Evolution of olivine lattice preferred orientation during simple shear in the mantle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2008, 272(3/4): 501–512.
- [46] Xu Z Q, Wang Q, Ji S C, et al. Petrofabrics and seismic properties of garnet peridotite from the UHP Sulu terrane (China): Implications for olivine deformation mechanism in a cold and dry subducting continental slab[J]. *Tectonophysics*, 2006, 421: 111–127.