

# 在迟家店石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中发现自然铁及其意义\*

冯有利<sup>1,2</sup> 郑轍<sup>1</sup> 郭延军<sup>1</sup> 吴军<sup>1</sup> 叶凯<sup>3</sup>

FENG YouLi<sup>1,2</sup>, ZHENG Zhe<sup>1</sup>, GUO YanJun<sup>1</sup>, WU Jun<sup>1</sup> and YE Kai<sup>3</sup>

1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2. 华北水利水电学院, 郑州 450011

3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2. North China Institute of Hydroelectric Power and Water Conservancy, Zhengzhou 450011, China

3. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2003-03-05 收稿, 2003-10-08 改回.

Feng YL, Zheng Z, Guo YJ, Wu J and Ye K. 2003. Discovery of native iron in olivine of garnet lherzolite in Chijiadian and its significance. *Acta Petrologica Sinica*, 19(4):701-706

**Abstract** Studied by High Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM), there existed exsolution minerals in garnet lherzolite, Chijiadian of Rongcheng county, Shandong province. The exsolution mineral are parallelly arranged acicular ilmenite and magnetite whose diameter is 0.2 ~ 2.0  $\mu\text{m}$  and 5 ~ 20  $\mu\text{m}$  long in olivine with rectangle topography whose length is 20  $\mu\text{m}$  and 5  $\mu\text{m}$  wide. Analysed by X-ray Energy Disperse Spectroscopy (XEDS) attached to HRTEM, the chemical composition of the mineral is Fe. Calculated from diagram of Selected Area Diffraction (SAD), the crystal structure of the mineral and the diffraction data are consistent with standard mineral native Fe- $\alpha$  and native Fe- $\gamma$  from JCPDS. At last, the calculated forming conditions such as temperature and pressure of native Fe in olive are ranged from 490 $^{\circ}\text{C}$  to 900 $^{\circ}\text{C}$  and below 8.2 GPa and the relation between native Fe and fluid reaction from deep source mantle is discussed.

**Key words** Garnet lherzolite; High Resolution Transmission Electron Microscopy (HRTEM); Native Fe- $\alpha$ ; Native Fe- $\gamma$

**摘要** 通过高分辨电子显微镜研究,发现在山东荣成迟家店石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中除钛铁矿和磁铁矿出溶物外,还有一种矩形出溶物,长为 20  $\mu\text{m}$ 、宽为 5  $\mu\text{m}$ 。能量损失 X 射线分光谱 (XEDS) 分析矩形的成分为 Fe。选区电子衍射花样计算表明该矿物与 JCPDS 中的标准矿物自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$  衍射数据一致。根据自然铁的化学成份推断橄榄石中自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$  的形成温度范围为 490 ~ 900 $^{\circ}\text{C}$ , 压力不超过 8.2 GPa, 并讨论了自然铁与深源地幔流体作用。

**关键词** 石榴石二辉橄榄岩; 高分辨透射电子显微镜; 自然铁- $\alpha$ ; 自然铁- $\gamma$

**中图分类号** P578.12 P578.942 P588.125 P575.2

石中自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$  的发现,并讨论这一发现的地质意义。

## 1 引言

应用高分辨电子显微镜对山东荣成迟家店石榴石二辉橄榄岩进行研究,在橄榄石中发现了自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$ , 这一发现不仅对认识超深俯冲过程具有重要地质意义,同样对揭示地幔流体的性状具有重要价值。本文着重报道橄榄

## 2 石榴石二辉橄榄岩地质特征

迟家店石榴石二辉橄榄岩与石榴辉石岩、尖晶石二辉橄榄岩、橄榄岩、纯橄岩一起组成杂岩块,杂岩块的下部为橄榄

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号:40072016) 国家重点基础研究发展规划(G19990755-01)

第一作者简介: 冯有利,男,1963年生,博士,高级工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业。

岩类,上部为石榴辉石岩和榴辉岩,呈构造透镜体产于荣成胶南混合片麻岩中,与片麻岩接触突然,二者的面理呈大角度相交。岩石为粗粒变晶结构。

石榴石二辉橄榄岩主要由橄榄石(60% ~ 75%)、斜方辉

石(5% ~ 20%)、单斜辉石(5% ~ 10%)、石榴石(5% ~ 10%)组成,另有少量金红石。其主要矿物的电子探针成分分析及其结构化学式如表1所示。

表1 迟家店石榴石二辉橄榄岩中主要矿物电子探针分析结果(%)及计算的结构化学式

Table 1 The analysis results from electronic probe of main minerals in garnet lherzolite, Chijiadian

	Ga		Opx		Cpx		Ol			
	1	2	1	2	1	2	1	2	3	4
SiO <sub>2</sub>	42.69	57.80	57.70	54.23	54.88	39.72	40.77	40.38	40.24	
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.04	0.02	0.07	0.24	0.26	0.00	0.14	0.00	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.05	0.00	0.58	1.51	6.54	0.04	0.51	0.00	0.13	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.01	0.02	0.11	0.01	0.24	0.15	0.00	0.00	0.15	
FeO	12.02	5.87	6.54	2.09	3.62	10.48	10.29	9.78	10.06	
MnO	0.60	0.29	0.22	0.15	0.41	0.23	0.35	0.23	0.23	
MgO	17.29	32.77	34.72	17.22	20.55	47.73	45.87	48.07	47.31	
CaO	3.90	0.15	0.14	21.95	12.02	0.06	0.00	0.00	0.22	
CoO	0.03	0.00	0.00	0.12	0.12	0.26	0.74	0.00	0.00	
NiO	0.00	0.58	0.00	0.04	0.62	0.81	0.29	0.19	0.56	
K <sub>2</sub> O	0.00	0.04	0.00	0.05	0.15	0.06	0.00	0.04	0.00	
Na <sub>2</sub> O	0.00	0.00	0.00	0.54	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.38	0.63	0.25	0.60	0.32	0.31	0.51	0.05	0.60	
Total	100.98	98.19	100.27	98.57	99.96	100.11	99.34	98.82	99.50	

结构化学式

Ga 1	(Mg <sub>1.83</sub> Fe <sub>0.72</sub> Ca <sub>0.30</sub> Mn <sub>0.04</sub> ) <sub>2.89</sub> (Al <sub>1.93</sub> Cr <sub>0.06</sub> ) <sub>1.99</sub> [Si <sub>3.04</sub> O <sub>12</sub> ]
Opx 1	(Mg <sub>1.71</sub> Fe <sub>0.17</sub> Ni <sub>0.02</sub> Ca <sub>0.01</sub> Co <sub>0.01</sub> ) <sub>1.96</sub> [Si <sub>2.02</sub> O <sub>6</sub> ]
Opx 2	(Mg <sub>1.78</sub> Fe <sub>0.19</sub> Ca <sub>0.01</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>1.99</sub> [(Si <sub>1.98</sub> Al <sub>0.02</sub> )O <sub>6</sub> ]
Cpx 1	(Mg <sub>0.94</sub> Ca <sub>0.86</sub> Fe <sub>0.06</sub> Al <sub>0.05</sub> Na <sub>0.04</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>1.96</sub> [(Si <sub>1.98</sub> Al <sub>0.02</sub> ) <sub>2.00</sub> O <sub>6</sub> ]
Cpx 2	(Mg <sub>1.08</sub> Ca <sub>0.45</sub> Al <sub>0.20</sub> Fe <sub>0.11</sub> Co <sub>0.06</sub> Na <sub>0.02</sub> Mn <sub>0.01</sub> Cr <sub>0.01</sub> Ti <sub>0.01</sub> ) <sub>1.97</sub> [(Si <sub>1.93</sub> Al <sub>0.07</sub> ) <sub>2.00</sub> O <sub>6</sub> ]
Ol 1	(Mg <sub>1.76</sub> Fe <sub>0.22</sub> Ni <sub>0.02</sub> ) <sub>2.00</sub> [Si <sub>0.98</sub> O <sub>4</sub> ]
Ol 2	(Mg <sub>1.78</sub> Fe <sub>0.20</sub> Mn <sub>0.01</sub> ) <sub>1.99</sub> [Si <sub>1.00</sub> O <sub>4</sub> ]
Ol 3	(Mg <sub>1.69</sub> Fe <sub>0.21</sub> Al <sub>0.02</sub> Co <sub>0.02</sub> Mn <sub>0.01</sub> Ni <sub>0.01</sub> ) <sub>1.96</sub> [Si <sub>1.01</sub> O <sub>4</sub> ]
Ol 4	(Mg <sub>1.76</sub> Fe <sub>0.21</sub> Mn <sub>0.02</sub> Ni <sub>0.01</sub> ) <sub>2.00</sub> [SiO <sub>4</sub> ]

注:Ga-石榴石。Opx-斜方辉石。Cpx-单斜辉石。Ol-橄榄石。样品编号为RC00-34。1、3-矿物核部,2、4-矿物边部。

分析在中国地质大学电子探针室完成。分析结果列于表1。仪器型号:日本电子公司JEOL Superprobe 733

测试条件:电压15kV、电流I=2.0×10<sup>-8</sup>A。分析者:李树岩

石榴石为镁铝榴石。

斜方辉石与石榴石、橄榄石共生,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量很低(0 ~ 0.58%)。斜方辉石的核部和边部成分无明显差异。

单斜辉石为透辉石,其特征是富Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(1.51% ~ 6.54%)和MgO(17.22% ~ 20.55%)。由表1可知,它的核部和边部成分稍有差异,边部Mg、Al高,而Ca低。

橄榄石为镁橄榄石,蛇纹石化强烈,具有拉长现象、波状消光,表明岩石可能发生塑性变形。除橄榄石的核部比边部Mg稍高之外,其它无明显差异。

根据石榴石、单斜辉石、斜方辉石、橄榄石的电子探针分析结果,采用了不同地质温压计计算其结晶条件。

根据石榴石-单斜辉石矿物对计算的形成温度为678℃

(Mysen & Heier, 1972)、1025℃(Raheim & Green, 1974)、916℃(Ganguly, 1979)。石榴石-斜方辉石矿物对温度计为847℃(Harley, 1984)、1200℃(Sen & Bhattacharya, 1984)。斜方辉石温度计为968℃(Brey & Kohler, 1990)、678℃(Witt-Eickschen & Seek, 1991)。斜方辉石-单斜辉石矿物对温度计为975℃(Wood & Banno, 1973)。

石榴石-斜方辉石矿物对压力计为4.53GPa(1985)、4.37GPa(Brey *et al.* 1986)和4.56GPa(Brey & Kohler, 1990)。温度范围为678℃ ~ 1200℃,多在900℃左右、压力为4.37GPa ~ 4.53GPa。叶凯等(1992)计算得出石榴石二辉橄榄岩的形成压力为4.50GPa ~ 5.27GPa,温度为739 ± 80℃ ~ 1033 ± 95℃。白文吉(1992)计算胶东-苏北石榴石二辉橄榄

岩的形成温度为 800 ~ 1371℃, 压力为 3.5 ~ 4.98GPa。

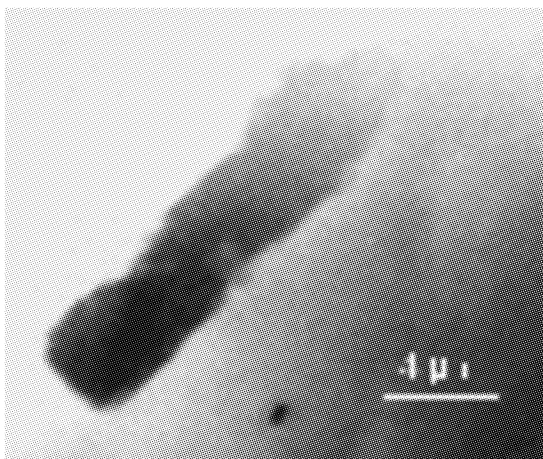
综上所述, 石榴石二辉橄榄岩的形成温度范围为 678℃ ~ 1371℃、压力范围为 3.5 GPa ~ 5.27GPa, 甚至更大。它们与榴辉岩一样经历了与消减作用有关的高压变质作用。

### 3 石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中自然铁的高分辨电子显微镜研究

光学显微镜下观察表明, 在石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中, 有两类不同大小和形状的出溶物, 一类为针状体, 针体直径 0.2μm ~ 2.0μm 不等, 长度在 5μm ~ 20μm 之间, 这些矿物为钛铁矿和磁铁矿。另一类为长 20μm、宽 5μm 近矩形的矿物, 边缘不平直。笔者对后者进行了高分辨电子显微镜 (HRTEM) 研究。

样品制备和实验条件: 将石榴石二辉橄榄岩磨制成光薄片, 选定橄榄石颗粒后, 用钢针轻轻刻下, 使用离子减薄仪减薄。HRTEM 实验在北京大学电子显微镜室和中国科学院物理研究所超导室电子显微镜室完成, 仪器型号为 Hitachi H-9000, 加速电压为 300kV。HRTEM 配有能量损失 X 射线分光谱 (XEDS), 拥有超薄窗检测器, 能够鉴别和测量从硼到铀的元素。在 HRTEM 下, 橄榄石中近矩形的矿物与基质橄榄石界限清楚 (照片 1)。其 XEDS 分析表明其成份主要为铁 (图 1, 表 2), 此外还有微量的 Al、Mg、Si、O。

橄榄石中的矩形矿物的选区电子衍射花样如图 2。由图 2 可以计算得出其中一套的衍射数据与 JCPDS 6-696 \* 标准自然铁-α 的特征衍射数据相同, 见表 3。另一套衍射数据与 JCPDS 31-619 标准自然铁-γ 的衍射数据相同 (JCPDS, 1988), 见表 4。



照片 1 橄榄石中自然铁的形貌像  
Photo 1 The topography of native iron in olivine in HRTEM

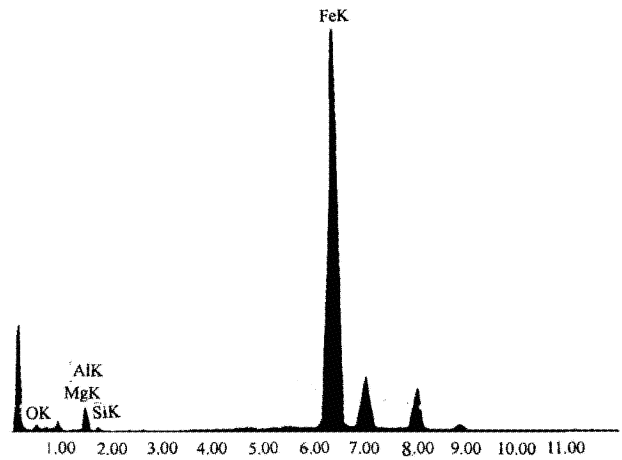


图 1 橄榄石中自然铁的 XEDS 图  
Fig. 1 The XEDS result of native iron in olivine

表 2 橄榄石中自然铁的 XEDS 分析结果  
Table 2 The analysed result of native iron in olivine by XEDS

元素	重量%	原子%
O	0.9	3.1
Mg	0.5	1.0
Al	3.4	6.6
Si	0.3	0.6
Fe	94.8	88.7

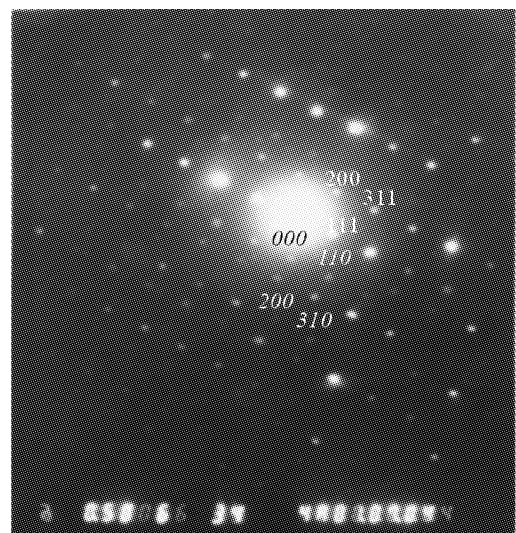


图 2 橄榄石中自然铁的衍射花样  
自然铁-α 和自然铁-γ 的衍射点指标分别用正体和斜体标于衍射点之上和之下  
Fig. 2 The diffraction pattern of native iron in olivine

表3 橄榄石中自然铁与标准自然铁- $\alpha$  特征衍射数据对照表(d 值单位 nm)

Table 3 Contrast of diffraction data between native iron in olivine and standard native- $\alpha$  (unit: nm)

	d 值(实测)	d 值(JCPDS 6-696 *)	衍射指标
1	0.2178	0.20268	110
2	0.1280	0.14332	200
3	0.0950	0.09064	310

表4 橄榄石中自然铁与标准自然铁- $\gamma$  特征衍射数据对照表(d 值单位 nm)

Table 4 Contrast of diffraction data between native iron in olivine and standard native- $\gamma$  (unit: nm)

	d 值(实测)	d 值(JCPDS 31-619)	衍射指标
1	0.2178	0.2080	111
2	0.1848	0.1800	200
3	0.1181	0.1083	311

## 4 讨论

自20世纪80年代以来,随着超高压岩石研究的不断深入,关于石榴石二辉橄榄岩及有关橄榄岩类中辉石和橄榄石中出溶物的研究已有许多论文发表(Dobrzynetskaia *et al.* 1996; 金振民等,1998; Zhang *et al.*, 1999; Harry *et al.*, 2000)。他们曾对 Alps Arami 及迟家店、大别超高压变质带橄榄岩橄榄石中的出溶物进行了较深入的研究。迄今为止,在石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中的出溶矿物相只有钛铁矿、磁铁矿的报道(从柏林等,2000)。臧启家等(1987)首次在辽宁宽甸新生代碱性(富Cr)玄武岩携带的橄榄二辉岩中发现了含Si的自然铁- $\alpha$  矿物相,这说明地幔环境中具有 $f_{O_2}$  极低的地球化学特性。Marakushov *et al.* (2000)在研究甘肃金川Cu-Ni矿床成因时,认为随着方辉橄榄岩-二辉橄榄岩-金橄榄基煌斑岩岩浆演化,碱度升高,有自然铁沉淀。Gorshkov 等(1997、2000)在辽宁胜利金伯利岩筒中发现了自然铁- $\alpha$ , 认为地幔岩石深源含S降低,在结晶期间压力降低。

迄今为止,尚无在超高压地区的石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中发现自然铁的报道,笔者在迟家店石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中发现了自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$ 。讨论自然铁的形成机制对研究深源地幔流体作用具有重要意义。

### 4.1 橄榄石中自然铁形成的温压条件

铁有三种不同的同素异性体,自然铁- $\alpha$  为体心立方格子结构,记为 bcc; 自然铁- $\gamma$ , 为面心立方格子结构,记为 fcc;  $\epsilon$ -Fe, 为立方密集结构,记为 hcp。Buddy (1965), Mannghani (1987) 和 Zhang (1999) 研究了铁的相变,给出了温度压力相

图(图3)。从图上可见,铁的 bcc 相和 fcc 相共存平衡线的温度压力较宽广。三相点,即 bcc、fcc 和 hcp 共结点压力为 8.2 GPa, 温度为 490 $^{\circ}$ C, 在此温度以上,在较低压力下,则为 bcc 和 fcc 相共存范围。迟家店二辉橄榄岩中自然铁为自然铁- $\alpha$  和自然铁- $\gamma$  相共存,据相图(图3),它们形成时的最大压力不超过 8.2 GPa, 最低温度不低于 490 $^{\circ}$ C, 最高温度为 900 $^{\circ}$ C。叶凯等(1992)据温压计计算得到的二辉橄榄岩温度和压力数值,与相图上所得到的结果比较,应该说是可以接受的,但在压力给定的情况下,温度标定大致要偏高 100 $^{\circ}$ C。

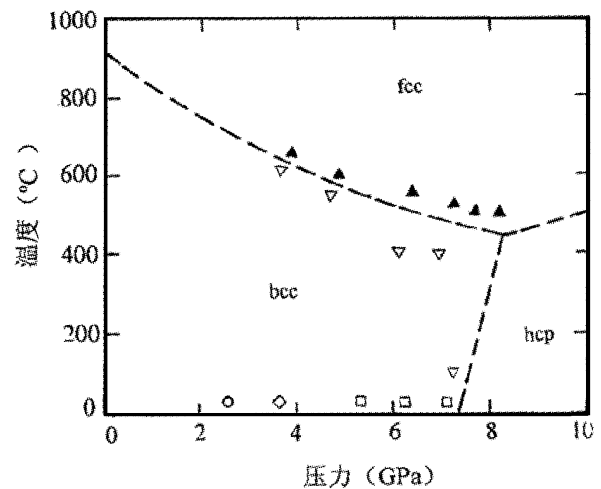


图3 铁的 bcc-fcc-hcp 相图

实心三角形: bcc 向 fcc 相转变; 空心三角形: fcc 向 bcc 相转变; 空心圆、菱形及正方形分别代表退火产物包含 bcc、bcc + fcc 和 bcc + fcc + hcp 时的压力。(引自 Zhang, 1999)

Fig. 3 The phase diagram of bcc-fcc-hcp of iron

此外, Zhang (1999) 还讨论了含 Si 铁的相变。研究表明,  $Fe_{0.91}Si_{0.09}$  和  $Fe_{0.83}Si_{0.17}$  的相变同样存在铁的 bcc 和 fcc 相变问题, 它们相变压力比纯铁要高, 可达到 8.9 GPa, 而相变最低温度也要高, 为 800 $^{\circ}$ C。同时还证明 Si 在 fcc 相中溶解度随压力增加而升高。考虑到迟家店二辉橄榄岩中自然铁, 由于形成在较低压力条件下, 所以含硅量也较低, 所形成的含硅铁化学式为  $Fe_{0.887}Si_{0.006}Al_{0.066}Mg_{0.01}O_{0.031}$ 。

### 4.2 自然铁与深源地幔流体作用

自然铁是下地幔的主要矿物之一, 与方铁矿平衡共存。因此, 可以推测来自核幔边界的低  $f(O_2)$ 、高温、富 Fe, Ni 和 Nb, Zr, Hf 等高场强元素及少量其它不相容元素的流体, 在以超深地幔柱流体上升过程中不均匀地叠加交代了克拉通耐熔的地幔橄榄岩, 地幔交代作用包括隐交代作用(如 Ni 等元素进入石榴石)和显交代作用(如锆石的形成), 地幔柱的起源与地幔的不连续面特别是核幔边界层有关(郑建平等, 2000)。迟家店石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中只发现自然铁而未发现方铁矿出溶, 其成因有待于进一步讨论。

此外,在迟家店石榴石二辉橄榄岩的橄榄石中有横断面呈浑圆状的矿物,其粒径为  $0.5\mu\text{m}$ 。Fe、Mg、Al、Si、Ti 的背散射图像表明富集 Fe、Ti,其它元素含量极低,由此判断该矿物可能是钛铁矿,这与前人在橄榄石中发现钛铁矿出溶相一致(Zhang,1999; Green,2000)。实验在中国地质科学院电子探针室完成,分析者:余静。关于橄榄石中钛铁矿的出溶机制已有多人讨论,但是仍存在许多问题需要解决(Dobrzhinetskaya, 1996; Zhang *et al.*, 1999),本文在此不再讨论。有关自然铁与橄榄石的晶体结构关系及其地质学意义有待进一步深入研究。

**致谢** 在野外工作期间得到了中国科学院地质与地球物理研究所赵中岩研究员、刘景波博士、苏文博士、北京大学陈斌博士的大力支持和帮助,并与他们进行了有益的探讨。在室内工作期间,得到了中国地质大学李树岩教授、北京大学电镜室张小平工程师、陈晶博士、中国地质科学院陈方远高级工程师、余静高级工程师、中国科学院物理研究所周玉清研究员等的大力支持和帮助,在此对他们表示诚挚地感谢。

## References

- Bai WJ, Hu XF & Zhou MF. 1992. The forming conditions and age of lherzolite in Jiaodong-North Jiangsu. *Petrology and Mineral Magazine*, 11(4):299-305 (in Chinese with English abstract)
- Brey GT, Koler T. 1990. Geothermobarometry in four phase lherzolites, part II: new thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *J. Petrol.*, 31: 1353-1378
- Bundy FP. 1965. Pressure-temperature phase diagram of iron to 200 kbar, 900°C. *J. Appl. Phys.*, 36: 616-620
- Cong BL, Wang QC. 2000. The new thinking produced by continental deep subduction. *Progress in Natural Science*, 10(9):777-782 (in Chinese with English abstract)
- Dobrzhinetskaya L *et al.* 1996. Alpes Arami: A peridotite massif from depths of more than 200 kilometers. *Science*, 271:1841-1845
- Dobrzhinetskaya L, Bozhilov KN, Green HW. 1999. The solubility of  $\text{TiO}_2$  in olivine: implication for the mantle wedge environment. *Chem. Geol.*, 160(4): 357-370
- Ganguly J. 1979. Garnet and clinopyroxene solid solutions, and geothermometry based on Fe-Mg distribution coefficient. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43:1021-1029
- Gorshkov AI, Bao YN, Bershov LV *et al.* 1997. Inclusions of native metals and other minerals in diamond from kimberlite pipe 50, Liaoning, China. *Geokhimiya*, 8:794-804
- Gorshkov AI, Bao YN, Titkov SV *et al.* 2000. Composition of mineral inclusions and formation of polycrystalline diamond aggregate (Bort) from the Shengli kimberlite pipe, China. *Geochemistry International*, 38(7): 698-705
- Green HW, Dobrzhinetskaya L, Riggs EM, Jin ZM. 1997. Alpes Arami: a peridotite massif from the mantle transition zone? *Tectonophysics*, 279(1-4):1-21
- Green HW, Dobrzhinetskaya LD, Bozhilov KN. 2000. Mineralogical and experimental evidence for very deep exhumation from subduction zones. *J. Geodynamics*, 30: 61-76
- Haggerty SE. 1994. Superkimberlites: a geodynamic diamond window to the Earth's core. *Earth and Planetary Science Letters*, 122:57-70
- Harley SL. 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86: 359-373
- Compiling Group of *Identify Handbook of X-ray Powder of Minerals*. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences. 1987. Beijing: Science Press (in Chinese)
- JCPDS-Selected Power Diffraction Data for Mineral Databank. 1974. First Edition. Joint Committee on Power Diffraction Standard, U. S. A. 92
- JCPDS-International Centre for Diffraction Data, Set 31-32, 1988. Published by the International Centre for Diffraction Data, U. S. A. 209
- Jin ZM, Jin SY, Gao S *et al.* 1998. Is the forming depth of ultra-high pressure rocks in Dabie Mountain between 100-150 km? — The discovery of titanium and iron-bearing magnetite and its dynamic significance. *Chinese Science Bulletin*, 43(7):767-771 (in Chinese)
- Manghnani MH, Ming LC, Nakagiri N. 1987. Investigation of the native Fe- $\alpha$   $\leftrightarrow$   $\epsilon$ -Fe phase transition by synchrotron radiation. In: Manghnani M, Syono Y (eds.). *High pressure research in mineral physics (TERRAPUB)*, Tokyo. 155-163
- Marakushov A A, Zotov I A, Lo Z H *et al.* 2000. The Dzhenchuan copper-nickel deposit in China, and the relation of the PGE mineralization to the ultrabasic rock alkalinity. *Geology of Ore Deposits*, 42(5):397-413
- Mysen BO and Heier KS. 1972. Petrogenesis of eclogite in high grade metamorphic gneisses, exemplified by the Hareidland eclogite, western Norway. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 36: 73-94
- Raeim A and Green DH. 1974. Experimental determination of the temperature and pressure dependence of the Fe-Mg partition coefficient for coexisting garnet and clinopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 48:179-203
- Sen SK and Bhattacharya A. 1984. An orthopyroxene-garnet thermometer and its application to the Madras charnockites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 88: 64-71
- Sharp T, Chen M, El Goresy A. 1997. Mineralogy and microstructures of shock-induced melt in the Tenham (L6) chondrite. *LPS*, 28:1283-1284
- Witt-Eickchen G and Seck HA. 1991. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 106:431-439
- Wood BJ and Banno S. 1973. Garnet-orthopyroxene-orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 42:109-124
- Xie XD, Chen M. 1998. The ultra-pressure minerals and their combination of natural mantle: The important progress in researching on mineralogy of vein body occurred by meteorolite impact. In: Ouyang ZY (ed.). *Review and prospect of mineralogy, petrology and geochemistry in the turn of century*. Beijing: Atomic Publishing House, 1-6 (in Chinese)
- Ye K, Xu P. 1992. Petrogenesis of eclogites and related peridotitic rocks in Datuan area of Rongcheng county, Shandong province. *Acta Petrologica Sinica*, 8(1): 17-39 (in Chinese with English

abstract)

- Zang QJ, Ding KS. 1987. New discovery of Si-bearing  $\alpha$ -Fe in mantle rock from Kuandian of Liaoning Province. *Acta Mineralogica Sinica*, 7(2):169-172 (in Chinese with English abstract)
- Zhang J, Guyot F. 1999. Experimental study of the bcc-fcc phase transformations in the Fe-rich system Fe-Si at high pressures. *Phys. Chem. Minerals*, 26: 419-424
- Zhang RY, Liu JG. 1999. Exsolution lamellae in minerals from ultrahigh-pressure rocks. *International Geol. Review.*, 41:981-993
- Zheng JP, Lu FX, Zheng S *et al.* 2000. Coexisting body of iron-nonstoichiometric mineral in peridotite xenolith and its significance on fluid-rock interaction. *Geological Science and Technology Information*, 19(2):28-30 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 白文吉, 胡旭峰, 周美付. 1992. 胶东-苏北石榴石二辉橄榄岩形成条件及年代. *岩石矿物学杂志*, 11(4):299-305
- 从柏林, 王清晨. 2000. 大陆深俯冲作用引起的新思维. *自然科学进展*, 10(9):777-782
- 金振民, 金淑燕, 高山等. 1998. 大别山超高压岩石形成深度局限于100~150km吗? ——针状含钛铬磁铁矿的发现及动力学意义的思考. *科学通报*, 43(7):767-771
- 谢先德, 陈鸣. 1998. 天然产出的地幔超高压矿物及其组合——陨石冲击脉体矿物学研究的重要进展. 见: 欧阳自远编. 世纪之交矿物学岩石学地球化学的回顾和展望. 北京: 原子能出版社, 1-6
- 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):17-39
- 臧启家, 丁奎首. 1987. 辽宁宽甸地幔岩中新发现的含 Si  $\alpha$ -Fe. *矿物学报*, 7(2):169-172
- 郑建平, 路凤香, 郑曙等. 2000. 地幔中自然铁-偏离正常矿物化学成分的矿物共生体与深源流体-岩作用. *地质科技情报*, 19(2):28-30
- 中国科学院贵阳地球化学研究所《矿物 X 射线粉晶鉴定手册》编著组. 1978. *矿物 X 射线粉晶鉴定手册*. 北京: 科学出版社