

西藏蓬湖西镁质榴辉岩中的出溶物及其地质意义*

夏 斌^{1,2}, 刘维亮^{1,2**}, 周国庆³, 韦振权^{2,4}, 王 冉^{2,5}, 李建峰², 钟 云¹, 胡西冲¹

(1. 中山大学海洋学院, 广州, 510275; 2. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州, 510640;
3. 南京大学地球科学系, 南京, 210093; 4. 广州海洋地质调查局, 广州, 510075; 5. 长安大学, 西安, 710031)

摘要: 西藏蓬湖西发现了有别于一般榴辉岩和石榴石辉石岩的超高压镁质榴辉岩, 具有平衡变晶结构, 广泛发育复杂多期的出溶结构. 根据矿物出溶关系可分出三个世代的单斜辉石(Cpx)和三个世代的石榴石(Grt)和对应地三个单斜辉石(Cpx)-石榴石(Grt)对, 此外还有出溶的斜方辉石、铝铬铁矿和钠长石. 对具代表性的单斜辉石-石榴石和单斜辉石-斜方辉石矿物对, 得到三个阶段温度压力: 阶段 III-1 的平衡条件为 4 GPa 和 1113 °C~1129 °C; 阶段 III-2 的平衡条件为 3 GPa 和 863 °C~1033 °C; 阶段 III-3 平衡条件为 2 GPa 和 502 °C~667 °C. 蓬湖西镁质榴辉岩 P-T 路径经历了三个阶段: 阶段 I, 蓬湖西榴辉岩形成, 压力范围可能为 0.5~1.5 GPa; 阶段 II, 特提斯洋关闭, 洋壳向深部俯冲, 致使镁质榴辉岩从尖晶石二辉橄榄岩稳定域穿过石榴石二辉橄榄岩稳定域并最终到达 1400 °C 和 5 GPa 的柯石英稳定域, 形成了在超高压条件下结构均一的、稳定的“单斜辉石+石榴石+斜方辉石”固溶体; 阶段 III, 洋壳折返过程中温度和压力降低使得原来稳定的“单斜辉石+石榴石+斜方辉石”固溶体发生出溶作用, 形成多期次、多种类型的出溶物. 阶段 III 再分为三个次阶段, 其温压变化范围大, 为 2~4 GPa, 502 °C~1129 °C. 镁质榴辉岩中矿物出溶肯定与压力-温度降低有关.

关键词: 西藏, 班公湖-怒江缝合带, 蓬湖西镁质榴辉岩, 矿物出溶, 深俯冲-折返

Exsolutions in a magnesian eclogite and the geologic significance from western Peng Lake, Tibet

Xia Bin^{1,2}, Liu Wei-Liang^{1,2}, Zhou Guo-Qing³, Wei Zhen-Quan^{2,4}, Wang Ran^{2,5},
Li Jian-Feng², Zhong Yun¹, Hu Xi-Chong¹

(1. School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510275, China; 2. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, 510640, China; 3. Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093, China; 4. Guangzhou Marine Geological Survey, Guangzhou, 510075, China; 5. Chang'an University, Xi'an, 710031, China)

Abstract: Ultrahigh-pressure magnesian eclogite was found in western Peng Lake, Tibet. Different from common eclogite and garnet pyroxenite, it contains equilibrium crystalloblastic texture and complex multi-phase exsolution

* 基金项目: 国家“973”计划(2012CB214705), 中国地质调查局“青藏高原重大关键地质问题研究”计划项目(1212011120978, 1212011121259, 1212011221105)

收稿日期: 2012-11-01

** 通讯联系人, E-mail: liuweiliang1976@yahoo.com.cn

texture. According to the exsolution relationship, three generations of clinopyroxenes(Cpx)and garnets(Grt) can be identified;1. The bigger clinopyroxene and garnet are under equilibrium with a granular equilibrium crystalloblastic texture, and form a Cpx1 - Grt1 pair. 2. The host crystal forms second generation rodlike Cpx2 - Grt2 pair within the exsolution crystal of Cpx1 and Grt1 respectively. 3. In host crystal Cpx1, the two Magnesian eclogite parallel exsolution Grt3s hold several Cpx3s parallelly, and they form Grt3-Cpx3 pair. There are also orthopyroxene, aluminomagnesian and albite exsolutions. We work out the equilibrium condition, by choosing "clinopyroxene-garnet" and "clinopyroxene-orthopyroxene" pair and get the temperature and pressure of the 3 stages: Stage III - 1, the equilibrium condition of Cpx1 - Grt1 is 4 GPa and 1113 °C ~ 1129 °C; Stage III - 2, the equilibrium condition of Cpx2 - Grt2 is 3 GPa and 863 °C ~ 1033 °C; Stage III - 3, the equilibrium condition of Cpx3 - Grt3 is 2 GPa and 502 °C ~ 667 °C. The P - T path of magnesian eclogite of Western Peng Lake underwent three stages. Stage I: the eclogite is formed in a 0.5 ~ 1.5 GPa pressure range. Stage II: when Tethys ocean closed, the oceanic crust were subducted into the depth, sequentially the magnesian eclogite go from spinelherzolite stable field across Grt-herzolite stable field into Coesite stable field of 1400 °C and 5 GPa, and forming homogeneous and a stable "clinopyroxene + garnet + orthopyroxene" solid solution under ultrahigh pressure. Stage III: The decline of temperature and pressure with exhumation of the subducted oceanic crust makes the original stable "clinopyroxene + garnet + orthopyroxene" solid solution to exsolve and to form polyphasic and polytypic exsolutions. This stage can be divided into 3 secondary stages in which the range of the temperature and pressure is wider (2 ~ 4 GPa, 502 °C ~ 1129 °C). It is certain that the mineral exsolution of magnesian eclogite do have relation with the pressure-temperature decline.

Key words: Tibet, Bangong-Nujing suture, western Peng Lake, magnesian eclogite, exsolution, deep subduction-exhumation

近年来,在青藏高原上广泛发现了榴辉岩的存在^[1],如在羌塘地体中部^[1,2]、在班公湖-怒江缝合带东段^[1,3]和中段^[1,4]、拉萨地体东南部^[1,5]和雅鲁藏布缝合带^[6,7],为我们深刻认识青藏高原地质、特提斯演化和岩石圈深俯冲作用提供了宝贵的材料和信息^[1-10]。本文报道西藏蓬湖西发现了有别于一般榴辉岩和石榴石辉石岩的超高压镁质榴辉岩,它们都有广泛的出溶物产出,本文将讨论其成因和板块构造意义。

1 地质背景

蓬湖西蛇绿混杂岩位于班公湖-怒江缝合带中段西藏班戈县白拉乡蓬错的西岸,平面上呈三角形,东西长约 6km,南北宽约 5km,总体倾向北西,为一复式单斜状岩体,构造侵位于侏罗系-白垩系木嘎岗日岩群其西弄岩组下岩段中,出露总厚度约 1500 m(图 1)。其原岩应为蛇绿混杂岩,以堆晶岩为主,辉长岩绝大部分已被榴辉岩化,或已变成榴辉岩。辉橄岩中也有含石

榴石的类型。因此,石榴石橄榄辉长岩、镁质榴辉岩、蚀变镁质榴闪岩等成为特别重要的岩石组成并同其他岩石构造混杂产出。不仅石榴石橄榄辉长岩、镁质榴辉岩、蚀变镁质榴闪岩,连斜长岩中的许多矿物都有出溶物,且岩石变形明显。也有一些不具出溶结构的岩石,可能是没有经历俯冲-超高压作用的浅处混杂岩块。

2 蓬湖西镁质榴辉岩的地球化学和岩石学特征

蓬湖西镁质榴闪岩和镁质榴辉岩的主微量元素成分见表 1。镁质榴闪岩可能是镁质榴辉岩退变质产物,这样可把镁质榴闪岩和镁质榴辉岩按其主量元素成分分成两类: I 类: SiO₂ 40.35% ~ 47.72%, Al₂O₃ 13.42% ~ 16.02%, TFe₂O₃ 3.46% ~ 9.179%, CaO = 2.68% ~ 15.91%, MgO 14.54% ~ 23.44%, TiO₂ 0.03% ~ 0.11%, Na₂O 0.09% ~ 0.97%, K₂O 0.01% ~ 0.99%; II 类: SiO₂ 40.31%, Al₂O₃ 4.5%,

TFe₂O₃ 12.39%, CaO = 2.32%, MgO 35.24%, Na₂O 0.02% 和 K₂O 0.04%。两类都低 Na₂O、K₂O 和 TiO₂, 贫碱、富镁, 是一种典型的超基性、超镁铁质岩。蓬湖西镁质榴辉岩的 REE 特征显示它们具有 N - MORB 特征(表 2, 图 2)。其石榴石几乎是纯镁铝石榴石, 不像大别苏鲁石榴石辉石岩那样高 CaO, 单斜辉石富 Di 分子^[11,12]。

蓬湖西蚀变镁质榴辉岩(样品为 XPHX1, 2, 4, 7, 12, 14, 27, 36, 37, 40), 主要由单斜辉石和石榴石组成, 但石榴石相对于辉石颗粒要小。辉石和石榴石呈“三联点”平衡变晶结构(图 3A~D、G、H), 有时变晶结构被碎裂和蚀变改造, 但仍清晰可见。有些样品中的辉石和石榴石彼此呈曲线式接触, 定向排列呈带状(图 3A、C~E)。多数岩石曾经历碎裂研磨(图 3A~D), 单斜辉石碎粒粒界被研磨呈圆滑曲线(图 3A~D)。石榴石碎裂后被强烈蚀变, 主要是透闪石化、绿云母化、绿泥石化(图 3E、F)。有的绿云母化石榴石残余显棕色(图 3C、

D); 有的石榴石内部变成镶嵌绿云母片团状集合体, 外缘发育针状次闪石; 有些石榴石颗粒粗大, 并次闪石化、绿泥石化。在样品 XPHX40 中见石榴石和辉石间有一圈眼圈状绿泥石纤维垂直边界(图 3E), 怀疑原为后成合晶或次变边绿泥石化的假象。在较新鲜的石榴石中还见有针状出溶物(图 3G)。

大别山木子店地区石榴辉石岩中石榴石呈变斑晶或巨晶, 粒度可达 1.5~2.0 cm, 含单斜辉石和斜方辉石包体, 在石榴石聚晶中含极细小的针状金红石出溶体, 在单斜辉石中含有石英出溶晶片^[12]; 大别山霍山饶钹寨石榴石辉石岩的石榴石为镁铝铁铝石榴石(Prp_{25~35} Alm_{20~45} Sps_{0.9~1.1} Grs_{18~34.6}), 单斜辉石属普通钠质辉石(Jd_{10~25})^[13]; 这也和蓬湖西镁质榴辉岩不同。蓬湖西蚀变镁质榴辉岩又一典型特征是发育多期次的、复杂的出溶结构。

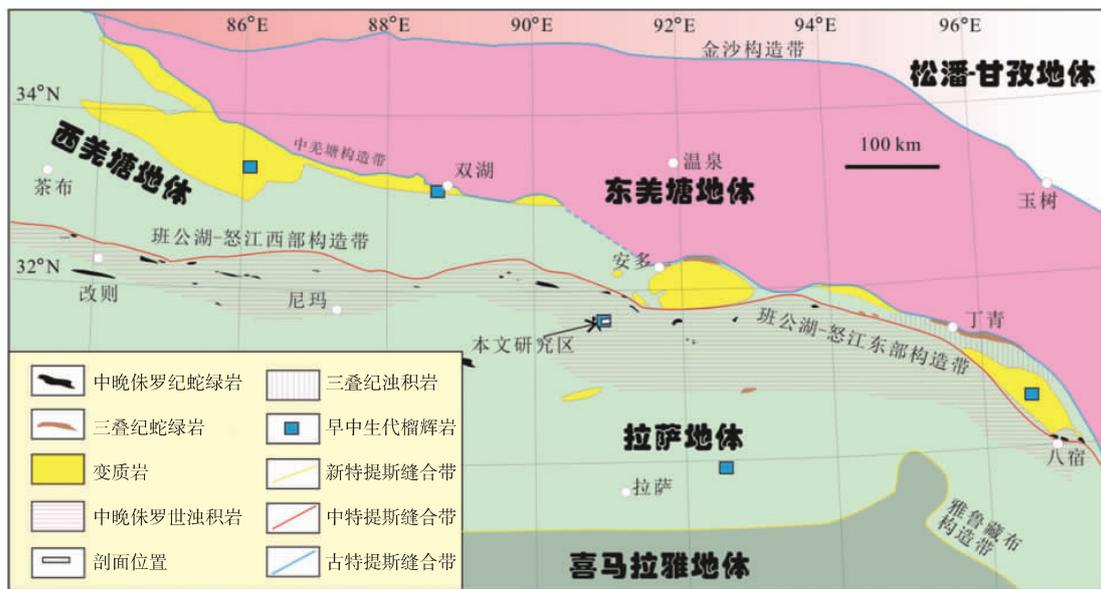


图 1 青藏高原主体构造单元及榴辉岩露头分布图(据[1]简化)

Fig. 1 Main tectonic entities and distribution of eclogites in the interior of the Tibetan Plateau(simplified after[1])

表 1 蓬湖西镁质榴辉岩和榴闪岩类岩石主量元素含量(%)和标准矿物计算

Table 1 Major elemental content of Western Peng Lake magnesian eclogite(%)and CIPW standard mineral

主量成分 分类	I 类		II 类	
	XPHX37 镁质榴 闪岩	XPHX12 镁质榴 辉岩	XPHX27 镁质榴 辉岩	XPHX14 镁质榴 辉岩
SiO ₂	44.97	47.72	40.35	40.31
TiO ₂	0.06	0.11	0.03	0.13
Al ₂ O ₃	16.02	13.42	13.99	4.5
TFe ₂ O ₃	3.46	4.4	9.17	12.39
MnO	0.04	0.07	0.1	0.15
MgO	14.54	14.95	23.44	35.24
CaO	15.91	13.4	2.68	2.32
Na ₂ O	0.87	0.97	0.09	0.04
K ₂ O	0.05	0.99	0.01	0.02
P ₂ O ₅	0.005	0.005	0.004	0.012
LOI	3.46	3.65	9.69	4.48
Total	99.39	99.68	99.55	99.6
Mg#	90.7	88.8	85.6	86.9
标准矿物				
C	0	0	11.12	0.26
Or	0.34	6.4	0.1	0.11
Ab	5.67	8.98	0.93	0.46
An	42.86	32.01	16.43	13.84
Lc	0	0	0	0
Ne	1.27	0	0	0
Wo	0	0	0	0
Di(FS)	0	0	0	0
Di(MS)	33	31.4	0	0
Hy(MS)	0	8.9	68.44	35.39
Hy(FS)	0	0	0.16	0.02
Ol(MS)	16.73	12.03	2.74	49.56
Ol(FS)	0	0	0.01	0.04
Il	0.1	0.17	0.07	0.3
Tn	0	0.07	0	0
Pf	0.03	0	0	0
Ap	0.01	0.01	0.01	0.03

表 2 蓬湖西镁质榴辉岩和榴闪岩类岩石微量和稀土元素含量(μg/g)和稀土元素参数

Table 2 Trace elemental and REE content of the western Peng Lake magnesian eclogite(μg/g)and REE parameters

样品号 岩石名称	XPHX37 镁质榴 闪岩	XPHX12 镁质榴 辉岩	XPHX27 镁质榴 辉岩	XPHX14 镁质榴 辉岩
Sc	24.33	37.19	4.854	26.45
Ti	372.8	694.3	142.3	589.5
V	63.16	126.3	33.5	76.25
Cr	1460.6	1596.8	4415.9	2223
Mn	375.5	639.9	750.5	447.6
Co	32.04	37.86	68.52	30.51
Ni	318	236.3	986.7	247.5
Cu	3.895	123.3	192.7	3.933
Zn	0.05	13.36	38.43	13.4
Ga	5.789	6.61	6.112	9.071
Ge	1.183	1.629	0.83	1.541
Rb	1.15	30.25	0.123	11.81
Sr	30.94	85.26	10.4	97.23
Y	1.408	2.796	0.153	2.274
Zr	0.833	2.04	1.06	2.236
Nb	0.045	0.034	0.031	0.065
Cs	0.248	2.224	0.418	0.639
Ba	5.248	21.73	2.844	21.58
Hf	0.049	0.092	0.036	0.084
Ta	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
Pb	0.166	0.084	0.404	0.213
Th	0.064	0.021	0.032	0.025
U	0.018	0.002	0.013	0.012
La	0.232	0.086	0.057	0.177
Ce	0.574	0.292	0.108	0.439
Pr	0.088	0.065	0.014	0.078
Nd	0.433	0.444	0.06	0.443
Sm	0.136	0.206	0.017	0.183
Eu	0.096	0.102	0.014	0.083
Gd	0.222	0.366	0.024	0.307
Tb	0.042	0.075	0.004	0.058
Dy	0.297	0.534	0.028	0.414
Ho	0.064	0.117	0.006	0.087
Er	0.177	0.338	0.019	0.252
Tm	0.026	0.051	0.003	0.037
Yb	0.164	0.324	0.024	0.23
Lu	0.026	0.05	0.004	0.036
∑REE	2.58	3.05	0.38	2.82
∑LREE/ ∑HREE	1.53	0.64	2.39	0.99
(La/Yb) _N	0.95	0.18	1.6	0.52
(Ce/Yb) _N	0.9	0.23	1.18	0.49
(La/Sm) _N	1.07	0.26	2.13	0.61
(Gd/Yb) _N	1.09	0.91	0.81	1.08
δEu	1.69	1.13	2.2	1.07

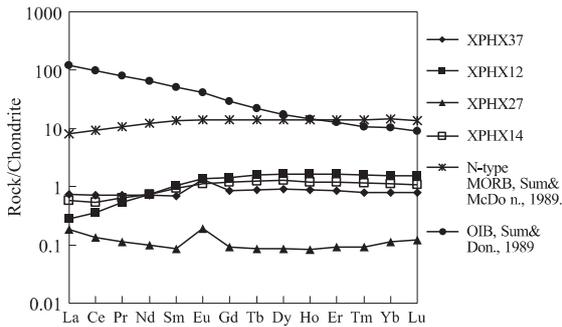


图 2 蓬湖西镁质榴辉岩和榴闪岩类岩石稀土配分曲线
 Fig. 2 Chondrite-normalized REE patterns of the magnesian eclogite from western Peng Lake

3 蓬湖西镁质榴辉岩的出溶结构和出溶矿物特征

蓬湖西镁质榴辉岩(样品 XPHX1、XPHX2、XPHX4、XPHX7 和 XPHX12)的出溶结构十分发育而复杂(图 3~13). 单斜辉石中见有多种出溶物,包括均质的棒状、粒状和不规则状的石榴石(图 3G、H、4~6、8、棒状和粒状单斜辉石(图 4A)、棒状斜方辉石(图 7A)及切面三角形铝铬铁矿(图 7B).

通过显微镜观察和电子探针及扫描电镜能谱分析,共识别出主要五种不同的出溶矿物类,他们分别是石榴石、单斜辉石、斜方辉石、铝铬铁矿和钠长石. 根据矿物出溶及其变晶平衡关系可分出三个单斜辉石(Cpx)-石榴石(Grt)对.

图 4A 左上和图 10A 中较大的单斜辉石和石榴石呈典型的“三联点”粒状平衡变晶结构,表明它们处于平衡状态,构成一单斜辉石1(Cpx1)-石榴石 1(Grt1)对;图 4B 中单斜辉石中的石榴石部分粒界呈直线,部分粒界呈圆滑曲线,是表面张力较大造成的现象而已,后来有些微错动和轻微次生变化似乎呈他形,还是属于“三联点”粒状平衡共生关系的 Cpx1 - Grt1 对;

图 4A 和图 6 中的单斜辉石 1(Cpx1)中有棒条状石榴石 2(Grt2);在图 4C 中的石榴石 1(Grt1)中有棒状单斜辉石 2(Cpx2). 这种出溶关系表明,虽然,它们没有同时一齐出现在一个矿物中,但 Cpx1 - Grt2 是处于平衡状态的,

Grt1 - Cpx2 是处于平衡状态的,而 Cpx1 - Grt1 也是处于平衡状态的,因而 Cpx2 - Grt2 也是平衡的,Cpx1 和 Grt1 各自粒内出溶物和寄主晶构成第二世代棒状单斜辉石 2(Cpx2)-棒条状石榴石 2(Grt2)对;

可以看到在主晶单斜辉石 1(Cpx1)中,两个出溶的、相互平行的石榴石 3(Grt3)之间平行夹持若干个单斜辉石片晶 3(Cpx3)(图 8A、B);它们共同组成一个外形完整的多边形晶形,这种“石榴石 Grt3+单斜辉石片晶 Cpx3”集合体,表明它们原先在 Grt1 中可能为一个成分均匀的矿物相,其成分相当于“Grt3+Cpx3”之和,并与寄主单斜辉石 1(Cpx1)处于平衡状态,后来才分解出溶的;因而“Grt3 - Cpx3”对是不同于“Cpx1 - Grt1”对和“Cpx2 - Grt2”对. 出溶后重结晶的单斜辉石 3(Cpx3)内部似乎呈双晶样,比棒状单斜辉石 2(Cpx2)相对要粗得多,晶形更完美,说明它们是在比 Cpx2 压力更低的条件下形成的,因而是处于更浅的位置和更晚的时期发育的. 图 8B 虽然没有 A 图那么外形圆滑,但那是石榴石和辉石晶体结构不同又都在同一个 Grt1 中所以晶形不同,石榴石 Grt3 向外突出,而单斜辉石片晶 Cpx3 内缩. 虽然后来发生过沿单斜辉石片晶(Cpx3)之间的滑移(8A),单斜辉石和石榴石之间仍处于新的平衡状态,构成石榴石 3(Grt3)-单斜辉石片 3(Cpx3)对.

3.1 单斜辉石 通过前面的分析,单斜辉石可分几个世代或产出状态:

(1)寄主晶单斜辉石:即为出溶物的寄主晶单斜辉石 Cpx1.

(2)与寄主晶单斜辉石 Cpx1 平衡共生的石榴石(Grt1)中的出溶棒状单斜辉石 Cpx2(图 4C). 由于石榴石本身已很小,出溶的单斜辉石更小了,长仅约 15 μm,宽度小于 5 μm.

(3)主晶单斜辉石 Cpx1 内两个出溶的相互平行的石榴石之间平行夹持的单斜辉石片晶 Cpx3(图 8A、B). 这种单斜辉石片晶(Cpx3)的光性也与主晶单斜辉石(Cpx1)是不同的(图 8C、D).

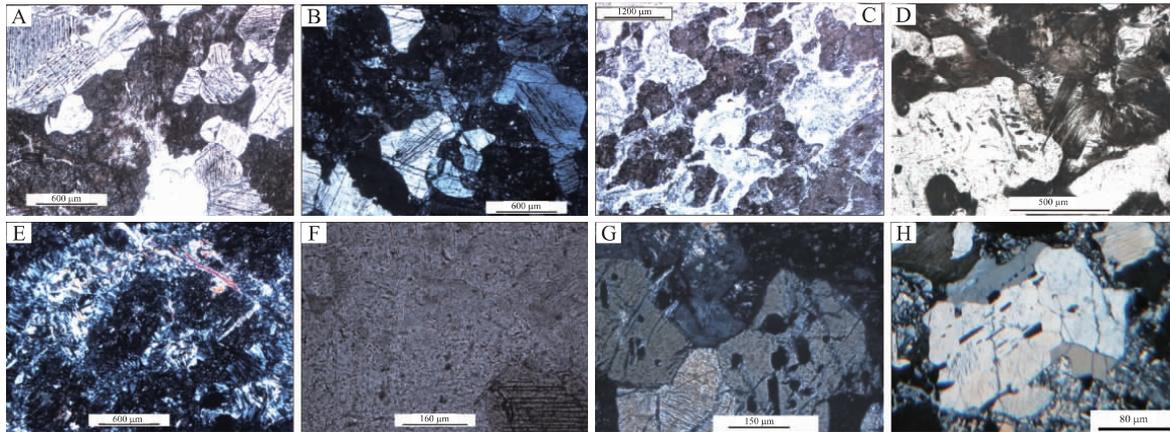


图3 蓬湖西镁质榴辉岩典型标本显微照片

(A - XPHX36, 蚀变镁质榴辉岩, 粒间为平衡变晶结构, 因研磨辉石与石榴石边界圆滑, 石榴石和辉石呈带状, 定向排列, 棕色石榴石局部绿云母化; B - XPHX43, 蚀变镁质榴辉岩, 辉石石榴石颗粒间具“三联点”平衡变晶结构, 因研磨辉石与石榴石边界圆滑或呈缝合线状, 部分石榴石蚀变为绿云母绿泥石; C - XPHX40, 碎裂带状镁质榴辉岩, 辉石石榴石彼此呈曲线式接触, 定向排列呈带状; D - XPHX27, 带状镁质榴辉岩, 辉石石榴石定向排列呈带状, 辉石碳酸盐化次闪石化, 见大量针状闪石, 呈假象, 石榴石发生绿泥石化留有出溶物残体假象; E - XPHX40, 碎裂带状镁质榴辉岩, 石榴石和辉石间有一圈眼圈状绿泥石纤维垂直边界, 疑为后成合晶或次变边绿泥石化的假象, 右上有细葡萄石脉; F - XPHX12, 碎裂蚀变镁质榴辉岩: 少量褐红色水化翳化后又绿云母化的石榴石残余, 其内有针状出溶物; G - XPHX1, 蚀变镁质榴辉岩, 辉石石榴石颗粒间具“三联点”平衡变晶结构, 同一辉石中的石榴石棒状出溶物在正交偏光镜下全消光, 石榴石中有弱葡萄石化, 隐显双晶, 粒间显平衡变晶结构; H - XPHX2, 糜棱化蚀变镁质榴辉岩, 辉石石榴石颗粒间具“三联点”平衡变晶结构, 因研磨辉石与石榴石边界圆滑或呈缝合线状, 单斜辉石中有均质石榴石棒状出溶物, 石榴石绿泥石化、葡萄石化再次闪石化

Fig. 3 Microphotos of magnesian eclogites from the western Peng Lake

(A - XPHX36 Altered magnesian eclogite: The “triple-junction” equilibrium crystalloblastic texture occurs between pyroxene and garnet grains, and the boundaries of pyroxene and garnet is smooth because of grinding. The pyroxene and garnet are direction arrange as a belt. Brown garnet is partly kmaiteized; B - XPHX43 Altered magnesian eclogite: The “Triple-Junction” equilibrium crystalloblastic texture presents between pyroxene and garnet grains, the boundaries between pyroxene and garnet grains are smooth or as suture line because of grinding. Part garnet altered to kmaite-chlorite; C - XPHX40 Cataclastic banded magnesian eclogite: Pyroxene and garnets each other present as a curve boundary and as a banded rank directionally; 4D - XPHX27 Banded magnesian eclogite: Pyroxene and garnet each other present as a banded rank directionally. Pyroxenes were carbonated and uralitized, and present as a pseudomorph filled with needle uralites; E - XPHX40 Cataclastic banded magnesian eclogite: There is a eyelike perpendicular chlorite fibre at the boundary between garnet and pyroxene, and it is suspected as pseudomorph of a symplektite or a kelyphitic border of chloritization. There are some prehnite veinlet on the top right; F - XPHX12 Cataclastic altered magnesian eclogite: Some kmaiteized-garnet remnants is brown; inner of some garnet have needle exsolution; G - XPHX1 Altered magnesian eclogite: A “Triple-Junction” equilibrium crystalloblastic texture presents between pyroxene and garnet grains, the rod-like garnets exsolution within pyroxenes are Complete extinction under crossed polarizers. and there is a weak prehnitization; 4H - XPHX2 Mylonitic altered magnesian eclogite: The “Triple-Junction” equilibrium crystalloblastic texture present between pyroxene and garnet, the boundaries between pyroxene and garnet grains are smooth or as suture line because of grinding. The rod-like garnet exsolution present within pyroxenes. Part garnet altered to chlorite, prehnite, and uralite

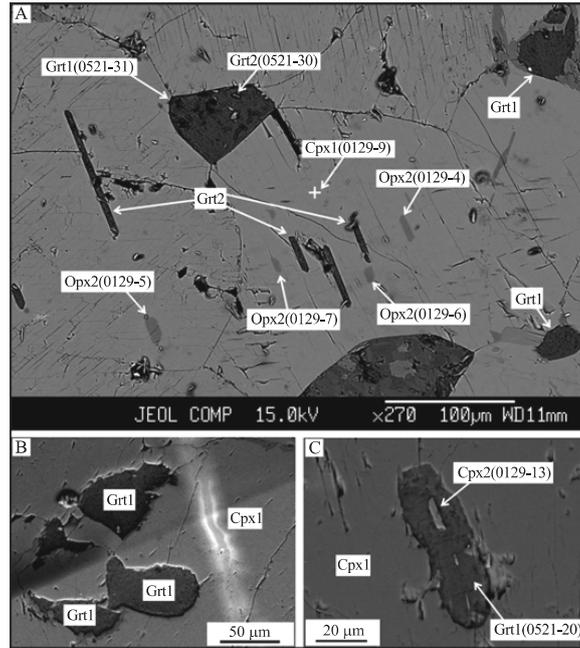


图 4 单斜辉石出溶石榴石+斜方辉石及石榴石出溶单斜辉石 (XPHX2)

A: 主晶单斜辉石内部的棒条状石榴石+斜方辉石和主晶单斜辉石颗粒之间呈平衡变晶结构的粒状石榴石;
 B: 单斜辉石内部不规则状石榴石; C: 石榴石 (Grt1) 其内有棒状出溶单斜辉石 (Cpx2)

Fig. 4 Magnesian eclogite; the rod-like garnet+orthopyroxene exsolutions within host clinopyroxenes, and clinopyroxenes exsolutions within host garnes(XPHX2).

(A: rod-like garnet+orthopyroxene exsolutions within host clinopyroxenes and garnet grains with equilibrium crystalloblastic texture occurs between pyroxene grains; B: irregular garnets inside clinopyroxene;

C: rod-like clinopyroxene exsolutions(Cpx2) inside garnet(Grt1))

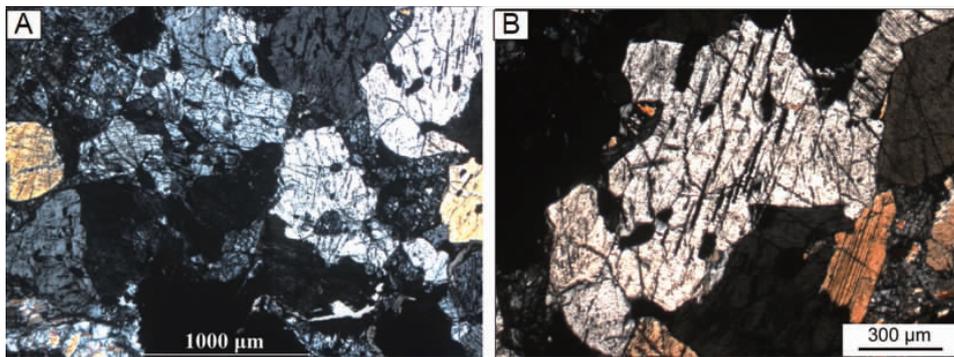


图 5 镁质榴辉岩单斜辉石出溶物显微照片 (XPHX12)

A: 碎裂蚀变镁质榴辉岩,因研磨辉石与石榴石边界圆滑或呈缝合线状,辉石有均质棒状石榴石出溶物,见少量褐红色水化-绿云母化石榴石; B: 单斜辉石中均质棒状出溶物

Fig. 5 Magnesian eclogite; clinopyroxene exsolutions(XPHX12)

A: cataclastic altered magnesian eclogite; The boundaries between pyroxene and garnet grains are smooth or as suture line because of grinding. There are some of rod-like garnet exsolutions within clinopyroxenes. Some brown garnets have been hydrated and kmaitized; B: rod-like isotrope garnet exsolutions within clinopyroxenes

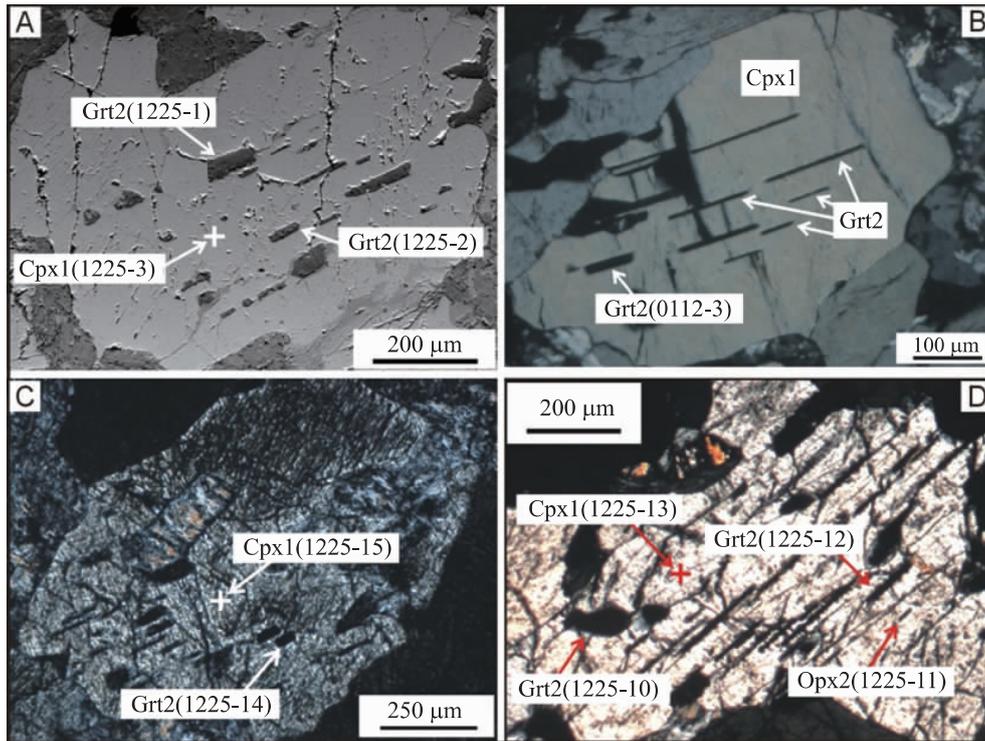


图 6 单斜辉石出溶石榴石±斜方辉石 (XPHX2, XPHX7, XPHX12)

A: XPHX2 蚀变镁质榴辉岩, 为 BSE 图像; B: XPHX2 蚀变镁质榴辉岩, 为 BSE 图像, 辉石中见有石榴石棒状出溶物; C: XPHX7, 碎裂变形蚀变镁质榴辉岩, 有些辉石中分布 (出溶) 有星点状的金属矿物; D: XPHX12, 碎裂蚀变镁质榴辉岩

Fig. 6 Garnet±orthopyroxene exsolutions within clinopyroxenes (XPHX2, XPHX7, XPHX12).

A: XPHX2 altered magnesian eclogite is a BSE image; B: XPHX2 altered magnesian eclogite; C: XPHX7 altered magnesian eclogite: rod-like garnet exsolutions within clinopyroxenes. Some ore minerals exsolutions within some clinopyroxenes; D: XPHX12 altered magnesian eclogite are microscopic photos

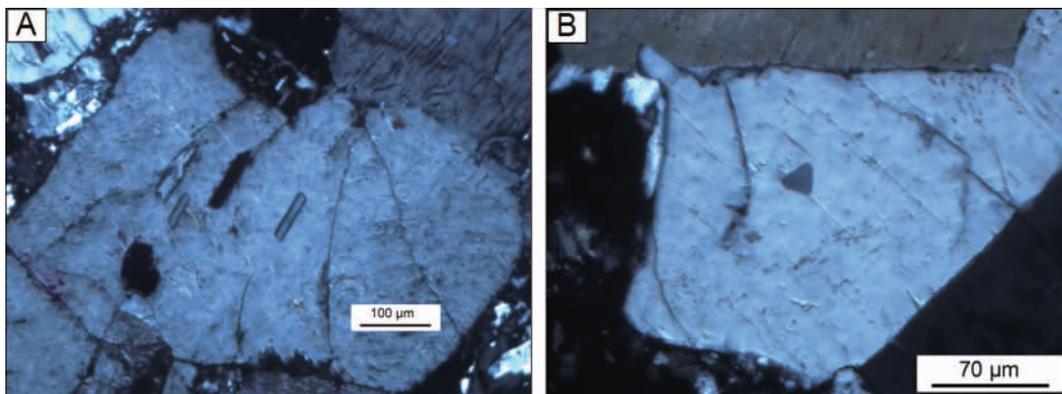


图 7 镁质榴辉岩单斜辉石出溶物显微照片 (XPHX2)

Fig. 7 Magnesian eclogite: microscopic photos of clinopyroxene exsolutions (XPHX 2)

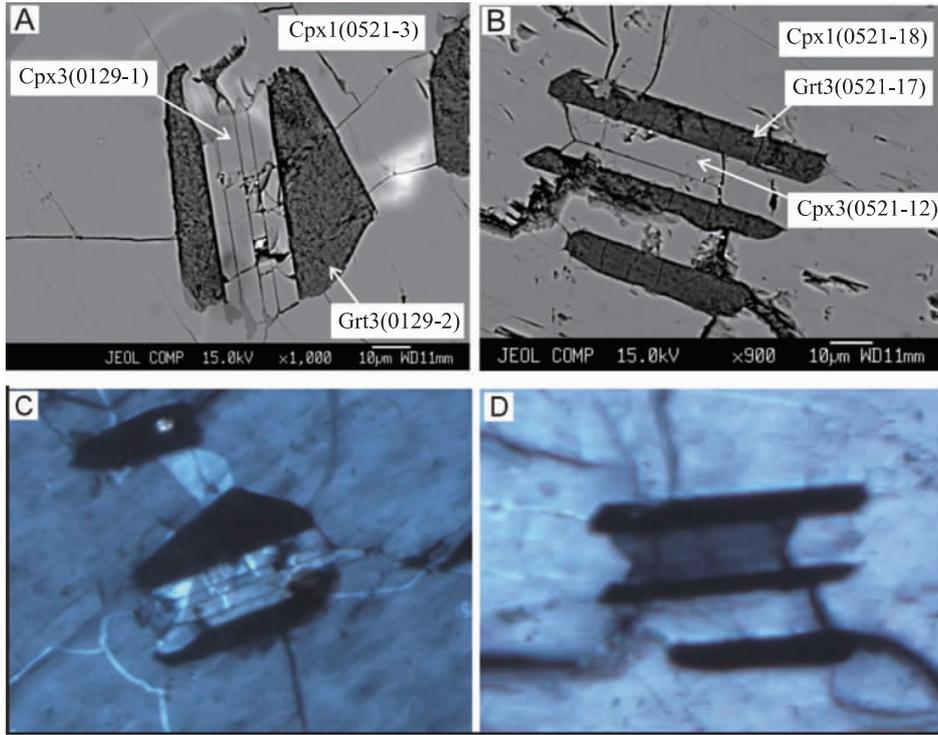


图 8 石榴石出溶单斜辉石片晶(XPHX2)

A 和 B 为 BSE 图像,C 和 D 分别为与 A 和 B 相对应的显微照片

Fig. 8 Magnesian eclogite;clinopyroxene lamellae within garnet(XPHX2)

A and B are BSE images;C and D are microscopic photos corresponding to A and B

(4)图 9A~C 镁质榴辉岩可能是另一种镁质榴辉岩(XPHX1、XPHX7),其主晶单斜辉石(Cpx1)中出溶的普通辉石(Cpx4)在正交偏光下干涉色为一级灰白,斜消光,其形状和分布特征与棒状的石榴石出溶体相似,沿主晶单斜辉石 C 轴方向平行排列(图 9),长度小于 300 μm ,宽度为 5~25 μm . Cpx4 可能相当于 Cpx2 - Grt2.

3.2 石榴石 蓬湖西镁质榴辉岩中,石榴石是单斜辉石中最常见,数量最多的出溶相.这些出溶的石榴石在正交偏光镜下均为全消光(图 6B~D,8C、D).出溶的石榴石形态大小不一,分布不均,根据上述可细分为三类:

(1)粒状石榴石 Grt1:粒状石榴石出现在几个主晶单斜辉石颗粒之间(图 4A、C,10),它们彼此显“三连点”平衡变晶结构.其中又识别出两种出溶物,一为单斜辉石 Cpx2(图 4C),二是细小棒状出溶物(图 10,成分见表 4,可能为蚀变了顽火辉石),这二者可能相当于Cpx2 -

Grt2.此外,不规则状石榴石分布于主晶单斜辉石内部及主晶单斜辉石颗粒之间,形态大小不一,无方向性,其中未见出溶物(图 4B),仍属粒状石榴石 Grt1.

(2)棒条状石榴石 Grt2:岩石中该类出溶体最多,常见数个出溶体(有时与出溶的斜方辉石一起)相互平行断续分布于主晶单斜辉石中,其延长方向与主晶单斜辉石的 C 轴方向一致(图 4A,6,11,13A、B).棒状出溶体最长者可到 250 μm (图 6).有些短柱状出溶体发育有很好的晶面,呈现完好多边形状(图 11).

(3)夹有数个平行单斜辉石片晶(Cpx3)的石榴石 Grt3.这类石榴石表现为在薄片切面中它们共同组成一个多边形,这种“石榴石+单斜辉石片晶”集合体,原先可能为一个成分均匀的矿物相,在随后温度和压力条件变化时发生出溶作用并分别重结晶(图 8),因而不同于其他石榴石.

3.3 铝铬铁矿 (Al-Chr) 和钠长石 (Ab) 在 XPHX3、XPHX4、XPHX5、XPHX14 和 XPHX15 等镁质榴辉岩的主晶单斜辉石中发育有不透明矿物铝铬铁矿 (图 12), 这些出溶体多呈方块状零星分布于主晶单斜辉石之中, 出溶体很小, 长宽多小于 $10\ \mu\text{m}$ 。在样品 XPHX1 的单斜辉石中发现极少量近圆形或椭圆形钠长石, 与普通辉石 (Cpx4) 一起作为出溶相出现于主晶单斜辉石 (Cpx1) 中 (图 9A、C)。出溶的铝铬铁矿和钠长石可能相当于 Cpx2 - Grt2。

3.4 斜方辉石 单斜辉石中出溶的斜方辉石有两种:

(1) 近等边三角形和近圆形切面的斜方辉石出溶体 Opx1 (图 13C、D)。颗粒较板条状斜方辉石大, 宽度可达 $30\ \mu\text{m}$, 与 Cpx1 - Grt1 相当。

(2) 长板条状斜方辉石 Opx2。常与棒状石榴石一起, 相互平行地分布于主晶单斜辉石之中 (图 4A, 6D, 13A、B), 长度通常小于 $80\ \mu\text{m}$, 宽度小于 $15\ \mu\text{m}$, 故而与 Cpx2 - Grt2 相当; 在正交偏光镜下干涉色有的为一级灰白, 有的近全消光 (图 6D), 可能与切面不同有关。

Opx1 和 Opx2 分别相当于 Cpx1 - Grt1 和 Cpx2 - Grt2, 可以分别组成 Cpx1 - Opx1 和 Cpx2 - Opx2 及 Opx1 - Grt1 和 Opx2 - Grt2 对。

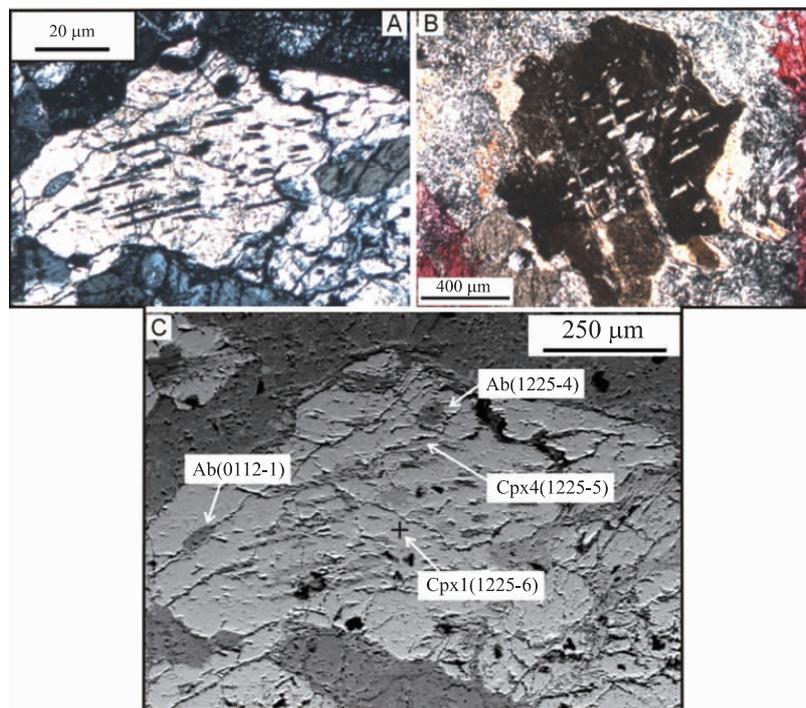


图 9 单斜辉石 (Cpx1, 透辉石) 出溶普通辉石 (Cpx4) 土钠长石 (Ab)

A: XPHX1, 蚀变镁质榴辉岩, 辉石石榴石颗粒间具“三联点”平衡变晶结构, 同一单斜辉石和长石颗粒间具平衡变晶结构; 单斜辉石中出溶棒状单斜辉石, 单斜辉石 Cpx1 中出溶普通辉石和钠长石; B: XPHX7, 碎裂变形蚀变镁质榴辉岩 (XPHX7): 单斜辉石中出溶彼此平行的棒状单斜辉石; C: XPHX7, 单斜辉石中出溶棒状单斜辉石; C 为与 B 相对应 BSE 图像

Fig. 9 Rod-like augite (Cpx4) ± albite (Ab) exsolutions (Cpx4) in diopside (Cpx1)

A: XPHX1 Altered magnesian eclogite; the triple-junction equilibrium crystalloblastic texture presents between pyroxene and garnet grains and equilibrium crystalloblastic texture presents between same pyroxene and albite. rod-like augite and albite exsolutions (Cpx4) within diopside (Cpx1); B: XPHX7 Cataclastic altered magnesian eclogite; parallel rod-like clinopyroxene exsolutions within another clinopyroxene; C: XPHX7 Cataclastic altered magnesian eclogite; rod-like clinopyroxene exsolutions within another clinopyroxene. C is a BSE image corresponding to B

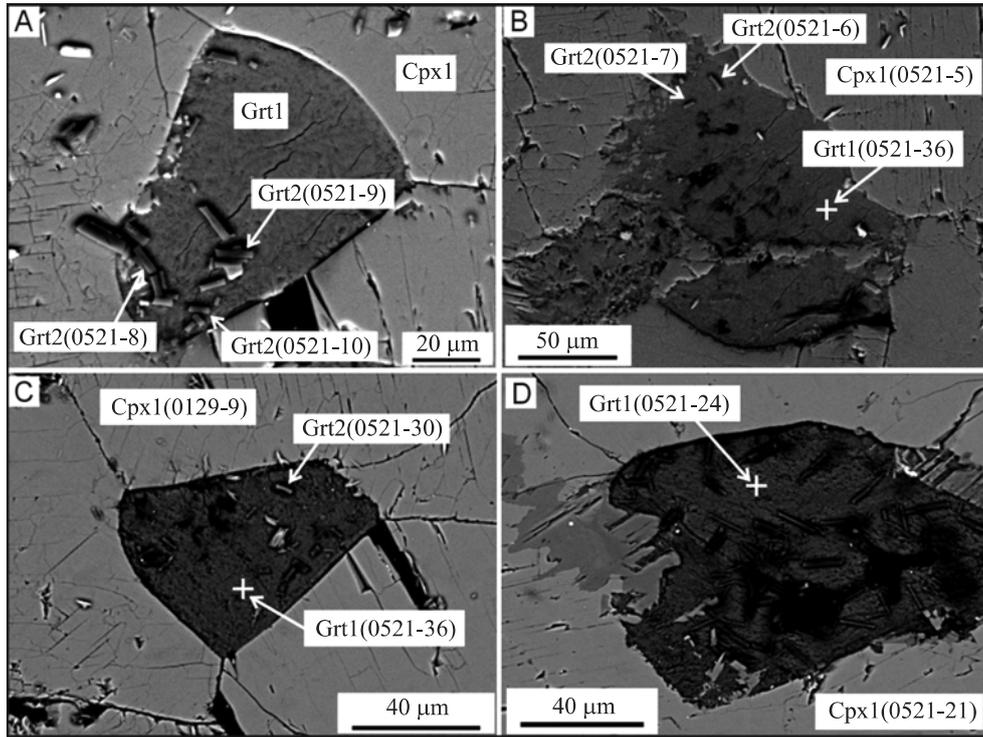


图 10 石榴石中细小棒状出溶物(XPHX2)

C 为图 5A 中单斜辉石颗粒之间呈平衡变晶结构的粒状石榴石放大

Fig. 10 Magnesian eclogite:yiny rod-like exsolutions within garnet(XPHX2)

C:a magnifying garnet shows "triple-junction" equilibrium crystalloblastic texture between clinopyroxene.

C corresponds to Fig. 5A

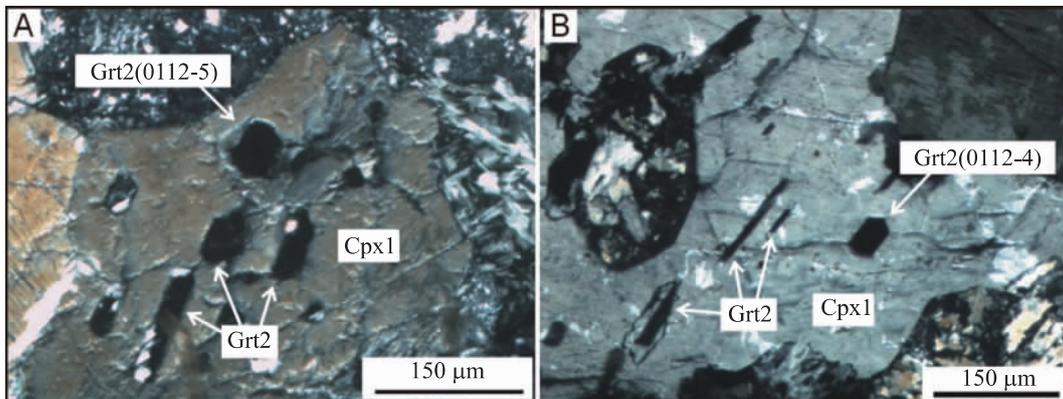


图 11 单斜辉石出溶棒条状石榴石(A: XPHX1,B: XPHX2)

Fig. 11 Rod-like garnet exsolutions within clinopyroxene(XPHX1, XPHX2)

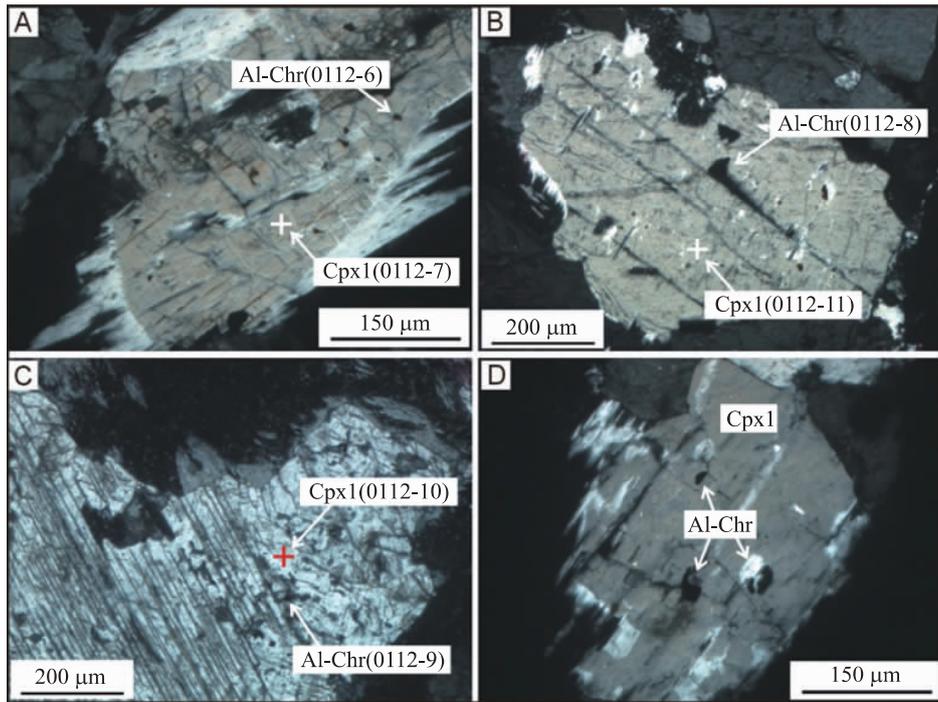


图 12 单斜辉石出溶铝铬铁矿 (XPHX4)

Fig. 12 Magnesian eclogite: alumchromite exsolutions within clinopyroxene (XPHX4)

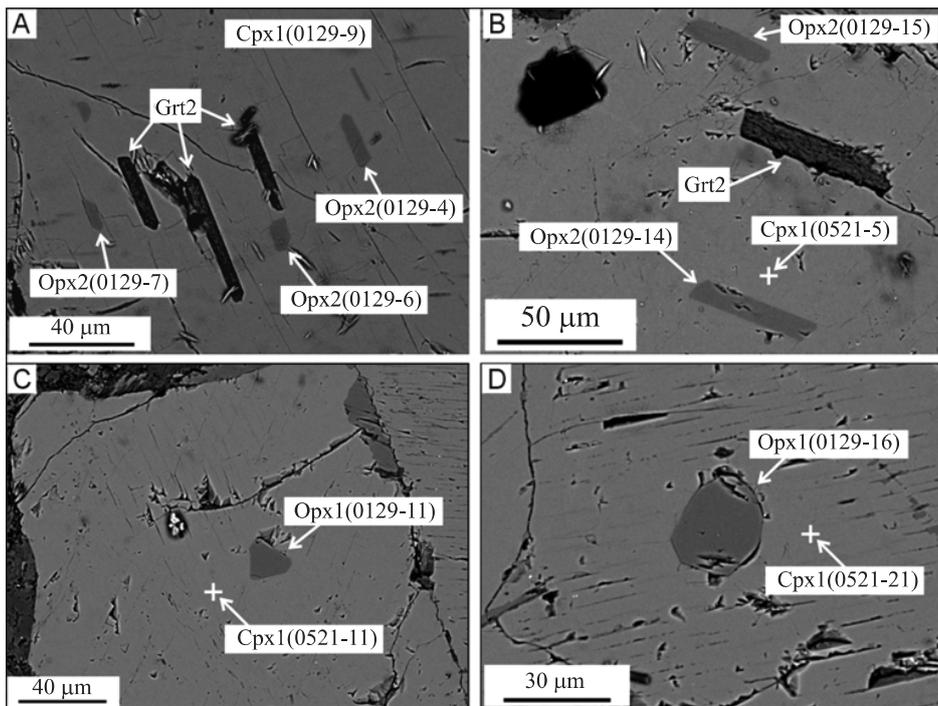


图 13 单斜辉石出溶斜方辉石的 BSE 图像 (XPHX2)

Fig. 13 Magnesian eclogite: orthopyroxene exsolutions within clinopyroxene. BSE image (XPHX2)

4 矿物成分及矿物化学

4.1 分析方法及数据处理 蓬湖西镁质榴辉岩中的主晶矿物及其出溶物的化学成分分析主要是在中国科学院广州地球化学研究所同位素年代学和地球化学重点实验室完成,使用的仪器为 JEOL 公司 JXA - 8100M 型电子探针,工作电压 15.0 kV,工作电流 2.0×10^{-8} A,分析时使用 $1 \mu\text{m}$ 电子束斑. 分析采用美国标样为: SiO_2 - Py - MgCa - 21, TiO_2 - Gar - MgAl - 37, Al_2O_3 - Jadeite - 28, Cr_2O_3 - Cr_2O_3 - 17, FeO - Py - CaMn - 10, MgO - Py - Cr - 16, NiO - Oli - MgFe - 34, CoO - Cal - STD, MnO - Py - CaMn - 10, CaO - Py - Cr - 16, Na_2O - Ka - CaNa - 29, K_2O - fe - kinpet. 部分测点的分析在中国科学院广州地球化学研究所边缘海地质重点实验室的 SEM 实验室完成,使用仪器为 EDAX ZAF Quantification Stan-

ardless SEC 能谱仪.

主晶矿物及其出溶物的电子探针及能谱分析数据见表 3~9(带“*”的测点为能谱分析数据,其余不带“*”为电子探针分析数据),分析矿物的产出特征和相互关系见图 4~13. 分析结果表明,主晶单斜辉石和出溶的斜方辉石分析所得总量是在误差范围内,不是含水矿物或水合物;而单斜辉石中出溶的单斜辉石和铝铬铁矿以及石榴石中出溶的单斜辉石分析所得总量稍有不足,可能是矿物稍有水化所致. 因为,有些石榴石全部已蚀变为绿泥石,无法测得原始成分;但仅有在石榴石晶体轮廓范围内的水化,处于准等化学体系状态,除水加入外,保持主要成分不变. 因此,在扣除烧失量水,即探针分析总量不足部分之后,再归一化为 100%,其成分相当于石榴石成分. 应用 Minpet 2.02 版进行主晶矿物及其出溶物的阳离子数、端元组分的计算和 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 调整.

表 3 主晶单斜辉石(Cpx1)电子探针及能谱分析结果

Table 3 Host clinopyroxene(Cpx1) compositions by EPMA and BSE in magnesian eclogites from western Peng Lake

样品	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX12 镁质榴辉岩	XPHX7 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩
测点	1225 - 3	0129 - 9	1225 - 6	1225 - 13	1225 - 15	0112 - 7	0112 - 10	0112 - 11
矿物	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1
SiO_2	52.688	52.495	53.189	52.839	51.312	52.013	51.81	52.531
TiO_2	0.158	0.167	0.211	0.205	0.334	0.223	0.228	0.226
Al_2O_3	2.123	2.001	2.09	1.958	2.733	2.475	2.215	1.756
Cr_2O_3	0.313	0.27	0.271	0.562	0.856	0.978	0.665	0.586
FeO	4.041	3.846	3.904	3.745	3.572	3.278	3.471	3.629
MgO	17.426	16.81	16.679	16.403	15.727	16.18	16.464	17.028
MnO	0.073	0.1	0.08	0.084	0.161	0.089	0.067	0.156
NiO	0.074	0	0.055	0.055	0.043	0.021	0	0.086
CoO	0	0	0.028	0.016	0.071	0.016	0.055	0
ZnO	0	0	0.033	0.033	0.111	0	0.033	0.037
CaO	22.509	23.175	23.2	23.359	23.696	24.117	23.897	23.359
Na_2O	0.255	0.359	0.271	0.285	0.371	0.355	0.283	0.246
K_2O	0.004	0.012	0.003	0	0.029	0.005	0.007	0.015
P_2O_5	0	0	0.017	0.011	0	0.003	0.005	0.032

续表 3

Table 3 (Continued)

样品	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX12 镁质榴辉岩	XPHX7 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩
测点	1225-3	0129-9	1225-6	1225-13	1225-15	0112-7	0112-10	0112-11
矿物	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1	Cpx1
Total	99.664	99.235	100.031	99.555	99.016	99.753	99.2	99.687
TSi	1.922	1.925	1.94	1.939	1.897	1.903	1.905	1.921
TAl	0.078	0.075	0.06	0.061	0.103	0.097	0.095	0.076
TFe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0.003
M1Al	0.013	0.011	0.03	0.023	0.016	0.009	0.001	0
M1Ti	0.004	0.005	0.006	0.006	0.009	0.006	0.006	0.006
M1Fe ³⁺	0.065	0.073	0.029	0.031	0.071	0.073	0.082	0.067
M1Fe ²⁺	0	0	0.018	0.026	0.011	0.001	0	0
M1Cr	0.009	0.008	0.008	0.016	0.025	0.028	0.019	0.017
M1Mg	0.906	0.904	0.907	0.897	0.867	0.882	0.891	0.907
M1Ni	0.002	0	0.002	0.002	0.001	0.001	0	0.003
M2Mg	0.041	0.015	0	0	0	0	0.011	0.021
M2Fe ²⁺	0.058	0.045	0.071	0.059	0.028	0.027	0.025	0.04
M2Mn	0.002	0.003	0.002	0.003	0.005	0.003	0.002	0.005
M2Ca	0.88	0.91	0.907	0.918	0.939	0.945	0.941	0.915
M2Na	0.018	0.026	0.019	0.02	0.027	0.025	0.02	0.017
M2K	0	0.001	0	0	0.001	0	0	0.001
Σ	4	3.999	4	4	3.999	4	4	3.999
Wo	45.047	46.681	46.852	47.505	48.864	48.96	48.211	46.711
En	48.525	47.113	46.866	46.415	45.124	45.703	46.216	47.378
Fs	6.428	6.206	6.282	6.08	6.012	5.337	5.573	5.911
WEF	98.125	97.353	98.028	97.913	97.204	97.361	97.888	98.186
Jd	0.318	0.352	1	0.902	0.507	0.294	0.027	0
Ae	1.557	2.294	0.972	1.185	2.289	2.345	2.085	1.814

续表 3

Table 3 (Continued)

样品	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩
测点	0129-18	0129-20	0129-21	0521-03*	0521-05*	0521-21*	0521-11*	0521-18*
矿物	Cpx1							
SiO ₂	53.874	52.6	52.479	52.04	51.93	53.05	52.57	52.53
TiO ₂	0.205	0.215	0.202	0.92	0.74	0.41	0.62	0.51
Al ₂ O ₃	1.932	1.994	1.906	1.91	2.01	1.93	1.97	1.99
Cr ₂ O ₃	0.27	0.349	0.437	0.53	0.49	0.27	0.48	0.37
FeO	3.571	3.794	3.584	3.57	4.21	4.28	3.64	3.7
MgO	16.597	16.841	16.176	16.25	16.46	17.77	16.78	16.47
MnO	0.089	0.053	0.117	0.39	0.27	0.19	0.22	0.11
CaO	23.818	23.281	24.244	24.04	23.4	21.84	23.38	23.94
Na ₂ O	0.353	0.472	0.365	0.32	0.46	0.26	0.31	0.35
K ₂ O	0.016	0.035	0.025	0.03	0.03	0.01	0.03	0.02
Total	100.725	99.634	99.535	100	100	100.01	100	99.99
TSi	1.949	1.919	1.923	1.903	1.896	1.929	1.917	1.916
TAl	0.051	0.081	0.077	0.082	0.086	0.071	0.083	0.084
TFe ³⁺	0	0	0	0.014	0.017	0	0	0
M1Al	0.032	0.005	0.006	0	0	0.012	0.002	0.002
M1Ti	0.006	0.006	0.006	0.025	0.02	0.011	0.017	0.014
M1Fe ³⁺	0.025	0.088	0.074	0.054	0.082	0.047	0.056	0.068
M1Fe ²⁺	0.034	0	0.018	0.019	0	0	0	0.009
M1Cr	0.008	0.01	0.013	0.015	0.014	0.008	0.014	0.011
M1Mg	0.895	0.891	0.884	0.886	0.883	0.922	0.911	0.896
M1Ni	0	0	0	0	0	0	0	0
M2Mg	0	0.026	0	0	0.013	0.041	0.001	0
M2Fe ²⁺	0.048	0.028	0.017	0.022	0.029	0.083	0.055	0.035
M2Mn	0.003	0.002	0.004	0.012	0.008	0.006	0.007	0.003
M2Ca	0.923	0.91	0.952	0.942	0.916	0.851	0.914	0.936
M2Na	0.025	0.033	0.026	0.023	0.033	0.018	0.022	0.025
M2K	0.001	0.002	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0.001
Σ	3.999	3.998	3.999	3.999	3.999	4	3.999	3.999
Wo	47.857	46.827	48.839	48.326	46.986	43.631	47.002	48.042
En	46.401	47.132	45.34	45.452	45.987	49.395	46.937	45.988
Fs	5.742	6.041	5.822	6.221	7.027	6.974	6.061	5.97
WEF	97.465	96.525	97.308	97.644	96.597	98.11	97.73	97.433
Jd	1.412	0.192	0.186	0	0	0.38	0.079	0.069
Ae	1.123	3.282	2.507	2.356	3.403	1.511	2.191	2.499

表4 出溶单斜辉石(Cpx2、Cpx3和Cpx4)电子探针分析结果

Table 4 Clinopyroxene exsolutions(Cpx2,Cpx3 and Cpx4) compositions in magnesian eclogites from western Peng Lake

样品	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩
测点	0129-13	0129-1	0129-12	1225-5	1225-9	0129-3
矿物	Cpx2	Cpx3	Cpx3	Cpx4	Cpx4	Cpx4
SiO ₂	48.416	51.975	51.549	55.227	57.303	56.078
TiO ₂	0.144	0.196	0.186	0.148	0.049	0.07
Al ₂ O ₃	4.57	1.952	1.976	2.488	0.434	0.919
Cr ₂ O ₃	0.283	0.354	0.335	0.329	0.159	0.032
FeO	3.992	3.249	3.578	5.163	2.58	3.764
MgO	18.8	16.457	16.608	20.721	22.517	22.315
MnO	0.174	0.064	0.131	0.189	0.106	0.145
NiO	0	0	0	0	0.052	0
CoO	0	0	0	0	0.044	0
ZnO	0	0	0	0.037	0	0
CaO	19.511	23.434	23.205	12.331	13.497	12.348
Na ₂ O	0.315	0.493	0.295	0.598	0.096	0.311
K ₂ O	0.029	0.015	0	0.037	0.015	0.021
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0.007	0
Total	96.234	98.189	97.863	97.268	96.859	96.003
TSi	1.807	1.923	1.917	2.04	2.113	2.084
TAl	0.193	0.077	0.083	0	0	0
TFe ³⁺	0	0	0	0	0	0
M1Al	0.007	0.008	0.003	0.108	0.019	0.04
M1Ti	0.004	0.005	0.005	0.004	0.001	0.002
M1Fe ³⁺	0	0.083	0.081	0	0	0
M1Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0
M1Cr	0.008	0.01	0.01	0.01	0.005	0.001
M1Mg	0.98	0.893	0.901	0.878	0.974	0.957
M1Ni	0	0	0	0	0.002	0
M2Mg	0.066	0.015	0.02	0.263	0.264	0.279
M2Fe ²⁺	0.125	0.018	0.031	0.159	0.08	0.117
M2Mn	0.005	0.002	0.004	0.006	0.003	0.005
M2Ca	0.78	0.929	0.924	0.488	0.533	0.492
M2Na	0.023	0.035	0.021	0.043	0.007	0.022
M2K	0.001	0.001	0	0.002	0.001	0.001
Σ	3.999	3.999	4	3.998	3.999	3.999
Wo	39.881	47.904	47.155	27.196	28.764	26.584
En	53.468	46.809	46.959	63.587	66.766	66.844
Fs	6.65	5.288	5.886	9.217	4.47	6.572
WEF	97.723	96.33	97.787	95.442	99.266	97.634
Jd	2.277	0.342	0.086	4.558	0.734	2.366
Ae	0	3.328	2.127	0	0	0

表 5 出溶斜方辉石 (Opx1 和 Opx2) 电子探针分析结果

Table 5 Orthopyroxene(Opx1 and Opx2) compositions by EPMA in magnesian eclogites from Western Peng Lake

样品	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX12 镁质榴 辉岩							
测点	0129 - 11	0129 - 16	0129 - 4	0129 - 5	0129 - 6	0129 - 7	0129 - 14	0129 - 15	1225 - 11
矿物	Opx1	Opx1	Opx2						
SiO ₂	55.417	55.151	55.04	55.158	54.816	55.213	55.071	55.053	54.494
TiO ₂	0.057	0.111	0.035	0.129	0.151	0.07	0.044	0.074	0.118
Al ₂ O ₃	1.709	1.562	1.865	1.695	1.726	1.869	1.521	1.566	2.082
Cr ₂ O ₃	0.176	0.14	0.243	0.194	0.171	0.225	0.261	0.171	0.375
FeO	10.069	9.46	9.871	9.698	9.722	9.432	9.616	9.791	10.904
MgO	31.987	32.103	31.528	31.532	31.341	31.131	31.634	31.679	30.847
MnO	0.158	0.151	0.207	0.109	0.106	0.113	0.12	0.144	0.188
CaO	0.615	0.576	0.556	0.596	0.62	0.939	0.762	0.624	0.675
Na ₂ O	0.043	0	0.036	0.033	0.076	0.042	0.028	0.026	0.02
K ₂ O	0.016	0	0.009	0	0.015	0.03	0.002	0.013	0.018
Total	100.247	99.254	99.39	99.144	98.744	99.064	99.059	99.141	99.751
TSi	1.934	1.94	1.939	1.947	1.943	1.952	1.945	1.943	1.923
TAl	0.066	0.06	0.061	0.053	0.057	0.048	0.055	0.057	0.077
TFe ³⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1Al	0.004	0.005	0.016	0.018	0.015	0.029	0.008	0.008	0.009
M1Ti	0.001	0.003	0.001	0.003	0.004	0.002	0.001	0.002	0.003
M1Fe ³⁺	0.057	0.045	0.039	0.025	0.036	0.013	0.04	0.043	0.054
M1Fe ²⁺	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M1Cr	0.005	0.004	0.007	0.005	0.005	0.006	0.007	0.005	0.01
M1Mg	0.932	0.943	0.937	0.948	0.941	0.95	0.944	0.942	0.924
M1Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0
M2Mg	0.732	0.74	0.719	0.711	0.715	0.691	0.721	0.724	0.699
M2Fe ²⁺	0.237	0.233	0.251	0.261	0.253	0.266	0.244	0.246	0.268
M2Mn	0.005	0.004	0.006	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.006
M2Ca	0.023	0.022	0.021	0.023	0.024	0.036	0.029	0.024	0.026
M2Na	0.003	0	0.002	0.002	0.005	0.003	0.002	0.002	0.001
M2K	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001
Σ	3.999	4	4	4	3.999	3.999	4	3.999	3.999
Wo	1.158	1.092	1.063	1.143	1.195	1.816	1.455	1.19	1.292
En	83.807	84.683	83.89	84.169	84.023	83.773	84.034	84.025	82.136
Fs	15.035	14.225	15.047	14.688	14.783	14.411	14.511	14.785	16.572
WEF	99.699	100	99.746	99.768	99.463	99.705	99.803	99.817	99.858
Jd	0.021	0	0.073	0.095	0.157	0.205	0.033	0.028	0.021
Ae	0.28	0	0.18	0.137	0.38	0.09	0.164	0.155	0.122

表6 石榴石(绿泥石化)电子探针分析结果

Table 6 Garnet(chloritization)compositions by EPMA in magnesian eclogites from western Peng Lake

样品	XPHX1 镁质榴 辉岩	XPHX1 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX7 镁质榴 辉岩	XPHX12 镁质榴 辉岩	XPHX12 镁质榴 辉岩
测点	1225-8	0112-5	1225-1	1225-2	0112-3	0112-4	0129-2	1225-14	1225-10	1225-12
矿物	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2	Grt3	Grt2	Grt2	Grt2
SiO ₂	30.58	31.62	32.56	32.32	30.93	31.92	31.547	32.96	31.31	30.4
TiO ₂	0.02	0	0	0.03	0.03	0	0.035	0.03	0	0.04
Al ₂ O ₃	18.56	17.37	16.83	17.66	15.63	17.64	15.666	17.56	17.27	16.18
Cr ₂ O ₃	0.25	0.29	0.28	0.27	0.3	0.18	0.228	0.52	0.51	0.42
FeO	7.21	7.4	7.67	7.54	8.62	7.81	8.418	6.36	8.45	9.48
MgO	25.51	27.26	26.81	27.03	26.54	26.71	26.585	27.32	27.25	26.92
MnO	0.12	0.09	0.17	0.09	0.13	0.1	0.042	0.06	0.14	0.1
NiO	0.07	0.01	0.11	0	0.03	0.11	0	0.1	0.06	0.07
CoO	0.02	0.05	0	0	0	0.11	0	0.04	0	0.03
ZnO	0.04	0	0	0.05	0	0.06	0	0	0	0.06
CaO	0.34	0.39	0.26	0.33	0.25	0.14	0.182	0.44	0.24	0.32
Na ₂ O	0.11	0.08	0.04	0.08	0.16	0.27	0.181	0.08	0.05	0.06
K ₂ O	0.1	0.03	0.05	0.08	0.1	0.31	0.176	0.07	0.04	0.04
P ₂ O ₅	0	0	0	0.01	0	0	0	0.02	0	0
Total	82.93	84.58	84.77	85.49	82.71	85.36	83.06	85.54	85.31	84.13

表7 石榴石(Grt1)中细小棒状出溶物(绿云母)能谱分析结果(/扣除4.5% H₂O 归一化计算)Table 7 Compositions of tiny rod-like exsolutions(kmaite ?)within garnet(Grt 1)by EPMA and BSE in magnesian eclogites from western Peng Lake (normalization after deducting 4.5% H₂O)

样品	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩
测点	0521-06*	0521-07*	0521-08*	0521-09*	0521-10*	0521-30*
矿物	绿云母	绿云母	绿云母	绿云母	绿云母	蓝闪石?
SiO ₂	28.84/30.2	34.9/36.54	31.28/32.75	31.16/32.63	26.68/27.94	33.87/35.47
TiO ₂	0.18/0.19	0.22	0.14	0.11	0.22	0.3
Al ₂ O ₃	17.58/18.41	19.57/20.49	19.08/19.98	18.52/18.39	14.83/15.53	18.74/19.62
Cr ₂ O ₃	0.33	0.42	0.27	0.28	0.23	0.45
FeO	3.69/3.86	6.34/6.64	4.35/4.55	4.17/4.37	3.23/3.38	5.11/5.35
MgO	47.25/49.48	36/37.70	42.62/44.63	43.58/45.63	51.9/54.45	28.17/29.50
MnO	0.16	0.35	0.21	0.14	0.18	0.34
CaO	0.45/0.47	0.51/0.53	0.36/0.38	0.39/0.41	0.67/0.79	3.2/3.35
Na ₂ O	1.13/1.18	1.25/1.31	1.32/1.38	1.39/1.46	1.62/1.70	7.33/7.68
K ₂ O	0.39/0.41	0.44/0.46	0.37/0.38	0.27/0.28	0.44/0.46	2.47/2.59
Total	100/95.50	100/95.50	100/95.50	100.01/95.50	100/95.50	99.98/95.50

表 8 石榴石归一化计算结果
Table 8 Garnet data by normalization after deducting H₂O

样品	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX1 镁质榴 辉岩	XPHX1 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩	XPHX2 镁质榴 辉岩
测点	0521-20*	0521-24*	0521-31*	0521-36*	1225-8	0112-5	1225-1	1225-2
矿物	Grt1	Grt1	Grt1	Grt1	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2
SiO ₂	39.03	37.85	37.83	37.92	36.87	37.38	38.41	37.80
TiO ₂	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0	0	0.03
Al ₂ O ₃	18.72	19.9	18.63	18.8	22.38	20.53	19.85	20.66
Cr ₂ O ₃	0.11	0.15	0.18	0.32	0.31	0.34	0.33	0.31
FeO	9.59	9.27	10.67	11.02	8.70	8.75	9.04	8.82
MgO	32.17	32.28	32.16	31.52	30.76	32.22	31.62	31.62
MnO	0.02	0.03	0.02	0.07	0.14	0.11	0.20	0.11
NiO	0	0	0	0	0.08	0.01	0.13	0
CoO	0	0	0	0	0.03	0.06	0	0
ZnO	0	0	0	0	0.05	0	0	0.06
CaO	0.19	0.18	0.19	0.14	0.42	0.47	0.31	0.38
Na ₂ O	0.07	0.17	0.12	0.08	0.13	0.10	0.05	0.10
K ₂ O	0.08	0.16	0.16	0.11	0.12	0.03	0.06	0.09
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0	0	0.01
Total	99.99	100.01	99.98	100	100	100	100	100
FeO_Calc	9.111	8.807	10.137	10.469	8.26	8.32	8.59	8.38
Fe ₂ O ₃ _Calc	0.533	0.515	0.593	0.612	0.48	0.49	0.50	0.49
TSi	2.657	2.57	2.581	2.595	2.51	2.54	2.62	2.57
TAl	0.343	0.43	0.419	0.405	0.49	0.47	0.38	0.43
SUM_T	3	3	3	3	3	3	3	3
Al_VI	1.158	1.161	1.078	1.11	1.31	1.18	1.21	1.23
Fe ³⁺	0.027	0.026	0.03	0.031	0.03	0.03	0.03	0.03
Ti	0.001	0.001	0.001	0.001	0.00	0	0	0.00
Cr	0.006	0.008	0.01	0.017	0.02	0.02	0.02	0.02
SUM_A	1.192	1.196	1.119	1.16	1.35	1.22	1.26	1.27
Fe ²⁺	0.519	0.5	0.578	0.599	0.47	0.47	0.49	0.48
Mg	3.265	3.267	3.271	3.216	3.12	3.26	3.21	3.21
Mn	0.001	0.002	0.001	0.004	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.014	0.013	0.014	0.01	0.03	0.03	0.02	0.03
Na	0.009	0.022	0.016	0.011	0.02	0.01	0.01	0.01
SUM_B	3.808	3.804	3.881	3.84	3.65	3.78	3.74	3.73
SUM_CAT	8	8	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12	12	12
And	0.22	0.042	0.614	0.449	0.222	0.255	0.932	0.101
Prp	99.389	99.455	99.386	99.551	98.794	98.646	99.068	98.898
Uv	0.392	0.503	0	0	0.984	1.099	0	1.002

续表 8

Table 8 (Continued)

样品	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX7 镁质榴辉岩	XPHX12 镁质榴辉岩	XPHX12 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩	XPHX2 镁质榴辉岩
测点	0112-3	0112-4	1225-14	1225-10	1225-12	0129-2	0521-17*
矿物	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2	Grt2	Grt3	Grt3
SiO ₂	37.40	37.40	38.53	36.70	36.14	37.98	38.54
TiO ₂	0.04	0.01	0.03	0	0.05	0.04	0.01
Al ₂ O ₃	18.89	20.66	20.52	20.24	19.24	18.86	18.95
Cr ₂ O ₃	0.37	0.22	0.61	0.60	0.50	0.27	0.16
FeO	10.42	9.15	7.43	9.90	11.27	10.13	9.72
MgO	32.08	31.29	31.94	31.94	32.00	32.01	32.25
MnO	0.16	0.11	0.07	0.17	0.12	0.05	0.01
NiO	0.03	0.13	0.11	0.07	0.08	0	0
CoO	0	0.13	0.05	0	0.03	0	0
ZnO	0	0.07	0	0	0.07	0	0
CaO	0.31	0.17	0.52	0.28	0.38	0.22	0.19
Na ₂ O	0.19	0.31	0.09	0.06	0.07	0.22	0.1
K ₂ O	0.12	0.36	0.08	0.04	0.05	0.21	0.08
P ₂ O ₅	0	0.00	0.02	0	0	0	0
Total	100	100	100	100	100	100	100.01
FeO_Calc	9.90	8.69	7.06	9.41	10.71	8.00	9.234
Fe ₂ O ₃ _Calc	0.58	0.51	0.41	0.55	0.63	0.47	0.54
TSi	2.55	2.56	2.62	2.50	2.47	2.59	2.622
TAl	0.45	0.45	0.38	0.50	0.53	0.41	0.378
SUM_T	3	3	3	3	3	3	3
Al_VI	1.07	1.22	1.26	1.12	1.02	1.10	1.14
Fe ³⁺	0.03	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.028
Ti	0.00	0	0.00	0	0.00	0.00	0.001
Cr	0.02	0.01	0.03	0.03	0.03	0.02	0.009
SUM_A	1.12	1.26	1.31	1.18	1.08	1.15	1.177
Fe ²⁺	0.57	0.50	0.40	0.54	0.61	0.55	0.525
Mg	3.26	3.19	3.23	3.24	3.26	3.25	3.271
Mn	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.001
Ca	0.02	0.01	0.04	0.02	0.03	0.02	0.014
Na	0.03	0.04	0.01	0.01	0.01	0.03	0.013
SUM_B	3.88	3.74	3.69	3.82	3.92	3.85	3.823
SUM_CAT	8	8	8	8	8	8	8
O	12	12	12	12	12	12	12
And	0.975	0.49	1.267	0.816	1.189	0.702	0.041
Prp	99.025	99.51	98.733	99.184	98.811	99.298	99.396
Uv	0	0	0	0	0	0	0.563

表 9 铝铬铁矿和钠长石电子探针分析结果

Table 9 Alumoehromite and albite compositions by EPMA in magnesian eclogites from western Peng Lake

样品	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX4 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩	XPHX1 镁质榴辉岩
测点	0112 - 13	0112 - 6	0112 - 9	1225 - 4	0112 - 1
矿物	Al - Chr	Al - Chr	Al - Chr	Ab	Ab
SiO ₂	0	0.409	0.119	65.31	63.273
TiO ₂	0.444	0.255	0.278	0.009	0.002
Al ₂ O ₃	20.543	24.199	19.788	20.915	22.496
Cr ₂ O ₃	38.754	35.088	36.895	0.023	0
FeO	30.692	26.394	34.421	0.115	0.263
MgO	7.914	9.219	4.682	0.325	0.821
MnO	0.386	0.387	0.521	0.073	0.011
NiO	0.05	0.091	0.12	0.009	0
CoO	0.027	0.015	0	0.004	0
ZnO	0.214	0.285	0.163	0	0
CaO	0.11	0.619	0.408	1.085	1.44
Na ₂ O	0.022	0.018	0.053	10.875	10.214
K ₂ O	0	0	0.007	0.471	0.802
P ₂ O ₅	0	0.025	0	0.012	0.002
Total	99.156	97.004	97.455	99.226	99.324
O/(OH)	4	4	4	32	32
Si ⁴⁺	0	0.013	0.004	11.59	11.265
Ti ⁴⁺	0.011	0.006	0.007	0.001	0
Al ³⁺	0.800	0.930	0.802	4.371	4.717
Cr ³⁺	1.012	0.904	1.003	0	0
Fe ³⁺	0	0	0	0	0
Fe ²⁺	0.847	0.719	0.989	0.017	0.039
Mg ²⁺	0.390	0.448	0.240	0.086	0.218
Mn ²⁺	0.011	0.011	0.015	0.011	0.002
Ni ²⁺	0.001	0.002	0.003	0	0
Co ²⁺	0.001	0.000	0	0	0
Zn ²⁺	0.005	0.007	0.004	0	0
Ca ²⁺	0.004	0.022	0.015	0.206	0.275
Na ¹⁺	0.001	0.001	0.004	3.742	3.526
K ¹⁺	0	0	0.000	0.107	0.182
Σ	3.083	3.064	3.088	20.131	20.224
Ab				92.3	88.5
An				5.1	6.9
Or				2.6	4.6

4.2 矿物成分及矿物化学

4.2.1 辉石 包括主晶单斜辉石、出溶单斜辉石及斜方辉石

4.2.1.1 主晶单斜辉石 Cpx1(表3).

分子式为: $(\text{Mg}_{0.867-0.963}^{2+} \text{Mn}_{0.002-0.012}^{2+} \text{Ca}_{0.851-0.952}^{2+} \text{Fe}_{0.025-0.089}^{2+} \text{Fe}_{0.025-0.088}^{3+} \text{Ni}_{0.000-0.003}^{2+} \text{Na}_{0.017-0.033}^{1+} \text{K}_{0.000-0.002}^{1+} \text{Cr}_{0.008-0.028}^{3+} \text{Al}_{0.000-0.032}^{3+})_{1.998-2.001} (\text{Fe}_{0.000-0.017}^{3+} \text{Al}_{0.051-0.103}^{3+} \text{Si}_{1.896-1.949}^{4+})_{1.999-2.000} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{43.631-48.96} \text{En}_{45.124-49.395} \text{Fs}_{5.337-7.027}$.

4.2.1.2 出溶单斜辉石 Cpx2、Cpx3 和 Cpx4(表4)

Cpx2-粒状石榴石(Grt1)中出溶的单斜辉石(0129-13).

分子式为: $(\text{Mg}_{1.046}^{2+} \text{Mn}_{0.005}^{2+} \text{Ca}_{0.78}^{2+} \text{Fe}_{0.125}^{2+} \text{Fe}_{0.000}^{3+} \text{Na}_{0.023}^{1+} \text{K}_{0.001}^{1+} \text{Cr}_{0.008}^{3+} \text{Al}_{0.007}^{3+}, \text{Ti}_{0.004}^{4+})_{1.999} (\text{Al}_{0.193}^{3+} \text{Si}_{1.807}^{4+})_{2.000} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{39.881} \text{En}_{53.468} \text{Fs}_{6.65}$.

Cpx3-夹持于两个石榴石中间的单斜辉石片晶(0129-1,0129-12):

分子式为: $(\text{Mg}_{0.908-0.921}^{2+} \text{Mn}_{0.002-0.004}^{2+} \text{Ca}_{0.924-0.929}^{2+} \text{Fe}_{0.018-0.031}^{2+} \text{Fe}_{0.081-0.083}^{3+} \text{Na}_{0.021-0.035}^{1+} \text{K}_{0.000-0.001}^{1+} \text{Cr}_{0.01}^{3+} \text{Al}_{0.003-0.008}^{3+} \text{Ti}_{0.005}^{4+})_{1.999-2.000} (\text{Al}_{0.077-0.083}^{3+} \text{Si}_{1.917-1.923}^{4+})_{2.000} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{47.155-47.904} \text{En}_{46.809-46.959} \text{Fs}_{5.288-5.886}$.

Cpx4-主晶单斜辉石中出溶的普通辉石(1225-5,1225-9,0129-3).

分子式为: $(\text{Mg}_{1.141-1.238}^{2+} \text{Mn}_{0.003-0.006}^{2+} \text{Ca}_{0.488-0.553}^{2+} \text{Fe}_{0.08-0.159}^{2+} \text{Fe}_{0.000}^{3+} \text{Ni}_{0.000-0.002}^{2+} \text{Na}_{0.007-0.043}^{1+} \text{K}_{0.000-0.001}^{1+} \text{Cr}_{0.001-0.01}^{3+} \text{Al}_{0.019-0.108}^{3+} \text{Ti}_{0.001-0.004}^{4+})_{1.889-1.961} (\text{Al}_{0.000}^{3+} \text{Si}_{2.04-2.113}^{4+})_{2.04-2.113} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{26.584-28.764} \text{En}_{63.587-66.844} \text{Fs}_{4.47-9.217}$.

4.2.1.3 出溶斜方辉石 Opx1 和 Opx2(表5)

Opx1-主晶单斜辉石中近等边三角形和近圆形切面的斜方辉石出溶体.

分子式为: $(\text{Mg}_{1.664-1.683}^{2+} \text{Mn}_{0.004-0.005}^{2+} \text{Ca}_{0.022-0.023}^{2+} \text{Fe}_{0.233-0.237}^{2+} \text{Fe}_{0.045-0.057}^{3+} \text{Ni}_{0.000}^{2+} \text{Na}_{0.000-0.003}^{1+} \text{K}_{0.000-0.001}^{1+} \text{Cr}_{0.004-0.005}^{3+} \text{Ti}_{0.001-0.003}^{4+})_{1.999-2.000} (\text{Fe}_{0.000}^{3+} \text{Al}_{0.06-0.066}^{3+} \text{Si}_{1.934-1.94}^{4+})_{2.000} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{1.092-1.158} \text{En}_{83.807-84.683} \text{Fs}_{14.225-15.035}$.

Opx2-主晶单斜辉石中出溶的长板条状斜方辉石.

分子式为: $(\text{Mg}_{1.623-1.666}^{2+} \text{Mn}_{0.003-0.006}^{2+} \text{Ca}_{0.021-0.036}^{2+} \text{Fe}_{0.244-0.268}^{2+} \text{Fe}_{0.013-0.054}^{3+} \text{Ni}_{0.000}^{2+} \text{Na}_{0.000-0.005}^{1+} \text{K}_{0.000-0.001}^{1+} \text{Cr}_{0.005-0.01}^{3+} \text{Ti}_{0.001-0.004}^{4+})_{1.999-2.002} (\text{Fe}_{0.000}^{3+} \text{Al}_{0.048-0.077}^{3+} \text{Si}_{1.923-1.952}^{4+})_{2.000} \text{O}_6$; $\text{Wo}_{1.063-1.816} \text{En}_{82.136-84.169} \text{Fs}_{14.411-16.572}$.

以上数种辉石在 Wo-En-Fs 分类图上(图14)分别投在不同区域. 主晶单斜辉石 Cpx1 的 Wo 为 43.63~48.96, En 为 45.12~49.40, 在分类图上全部投在透辉石区域; 夹持于两个石榴石中间的单斜辉石片晶 Cpx3 的成分几乎和主晶单斜辉石 Cpx1 相同, 在分类图上二者重叠在一起.

两种出溶斜方辉石 Wo(1.063~1.683)最小, En(82.136~84.683)最大, 端元组成变化小, 在分类图上相互重叠投在顽火辉石区域.

粒状石榴石(Grt1)中出溶的单斜辉石 Cpx2 和主晶单斜辉石中出溶的普通辉石 Cpx4 的 Wo 和 En 介于 Cpx1 和 Opx1(或 Opx2)之间, 虽然在分类图上 Cpx2 和 Cpx4 都投在普通辉石区域, 但也显示差异性, 二者 Fs 较为接近(分别为 4.47~9.217 和 6.65), 但 Cpx4 的 En 较 Cpx2 的大, 而 Wo 较 Cpx2 的小, 因此在分类图上二者分离, Cpx4 落在靠近易变辉石的普通辉石区域的左下角, 而 Cpx2 则落在靠近透辉石的普通辉石区域的左上角. 这两种出溶单斜辉石成分上的差异可能是与其主晶矿物不同有关.

4.2.2 石榴石 电子探针结果(表6)表明, 单斜辉石中出溶的石榴石已经全部蚀变为绿泥石, 因此无法测得原始成分. 但是, 如果我们把绿泥石化当作一个准开放体系, 即仅有 H₂O 的带入, 其他成分没有改变, 那么, 我们可以将表6中由石榴石变成的绿泥石减去各自的含水量, 干算, 反推其原来相应的原始石榴石的成分, 计算结果与能谱分析数据一起列于表8. 从表8可以看出, 这些出溶物的 SiO₂、Al₂O₃ 和 MgO 等主要成分含量较稳定, 分别为 36.14%~39.03%、18.63%~22.38% 和 30.76%~32.28%, 平均值分别为 37.72%、19.79% 和 31.86%. FeO 含量变化稍大, 介于 7.43%~

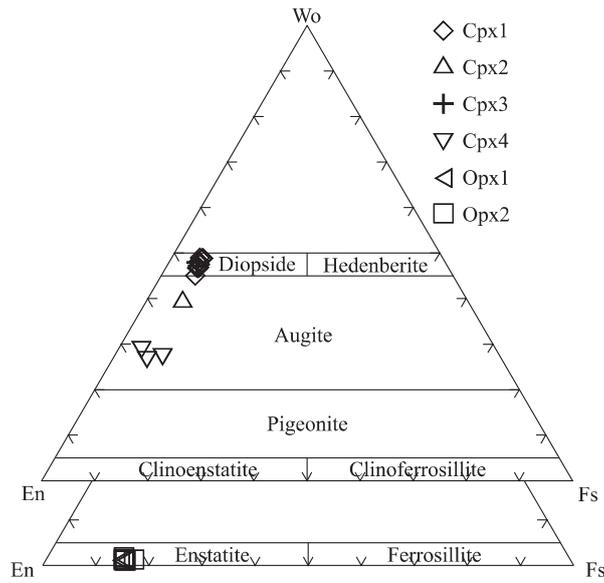


图 14 单斜辉石和斜方辉石分类图(底图据[14])

(Diopside:透辉石;Hedenberite:钙铁辉石;Augite:普通辉石;Pigeonite:易变辉石;Clinoenstatite:单斜顽火辉石;Clinoferrosillite:单斜铁辉石;Enstatite:斜方顽火辉石;Ferrosillite:斜方铁辉石;Cpx1:主晶单斜辉石;Cpx2:石榴石中出溶的单斜辉石;Cpx3:夹持于两个石榴石中间的单斜辉石片;Cpx4:主晶单斜辉石中出溶的普通辉石;Opx1:主晶单斜辉石中近等边三角形和近圆形切面的斜方辉石出溶体;Opx2:主晶单斜辉石中出溶的长板条状斜方辉石)

Fig. 14 Classification of clinopyroxenes and orthopyroxenes(after[14])

(Di: Diopside; Hedenberite; Augite; Pigeonite; Clinoenstatite; Clinoferrosillite; Enstatite; Ferrosillite; Cpx1-host clinopyroxene; Cpx2-clinopyroxene exsolutions within garnet; Cpx3-clinopyroxene lamellae clamped between two garnet grains; Cpx4-augite exsolutions within host clinopyroxene; Opx1-triangle and circular orthopyroxene exsolutions within host clinopyroxene; Opx2-lath shape orthopyroxene exsolutions within host clinopyroxene)

11.27%之间,总体上与石榴石的成分完全一致.通过与前人在超高压变质带中单斜辉石出溶石榴石的研究成果^[15~17]对比,并结合出溶石榴石形态、产出特征及其电子探针分析结果,确认本研究样品中单斜辉石中出溶的是石榴石.

各类石榴石化学式及端元组分变化如下:

1) 粒状石榴石 Grt1. 分子式为:
 $(Mg_{3.216-3.271}^{2+} Mn_{0.001-0.04}^{2+} Ca_{0.01-0.014}^{2+} Fe_{0.500-0.599}^{2+} Na_{0.009-0.022}^{1+})_{3.804-3.881} (Al_{1.078-1.161}^{3+} Cr_{0.006-0.017}^{3+} Fe_{0.026-0.031}^{3+} Ti_{0.001}^{4+})_{1.119-1.196} (Al_{0.343-0.430}^{3+} Si_{2.57-2.657}^{4+})_3 O_{12}$. 端元组分变化范围为: $And_{0.042-0.614}$, $Prp_{99.386-99.551}$, $Uv_{0.000-0.503}$, 其中镁铝石榴石分子接近 100%.

2) 棒条状石榴石 Grt2. 分子式为:

$(Mg_{3.124-3.262}^{2+} Mn_{0.004-0.011}^{2+} Ca_{0.012-0.038}^{2+} Fe_{0.401-0.612}^{2+} Na_{0.006-0.042}^{1+})_{3.650-3.918} (Al_{1.020-1.307}^{3+} Cr_{0.012-0.033}^{3+} Fe_{0.021-0.032}^{3+} Ti_{0.000-0.003}^{4+})_{1.082-1.350} (Al_{0.381-0.529}^{3+} Si_{2.471-2.619}^{4+})_3 O_{12}$. 端元组分变化范围为: $And_{0.101-1.267}$, $Prp_{98.646-99.510}$, $Uv_{0.000-1.099}$, 镁铝石榴石分子仍很高,最低者为 98.65,但较 Grt1 稍有降低,而钙铁石榴石分子稍有增加.

3) 夹有数个平行单斜辉石片晶的石榴石 Grt3. 分子式为:
 $(Mg_{3.25-3.271}^{2+} Mn_{0.001-0.003}^{2+} Ca_{0.014-0.200}^{2+} Fe_{0.525-0.550}^{2+} Na_{0.013-0.030}^{1+})_{3.823-3.850} (Al_{1.100-1.140}^{3+} Cr_{0.009-0.020}^{3+} Fe_{0.028-0.030}^{3+} Ti_{0.001-0.002}^{4+})_{1.150-1.177} (Al_{0.378-0.410}^{3+} Si_{2.590-2.622}^{4+})_3 O_{12}$. 端元组分变化范围为: $And_{0.041-0.702}$, $Prp_{99.298-99.369}$, $Uv_{0.000-0.563}$, 其中镁铝石榴石分子亦接近 100%, And 和 Uv 分子也都与 Grt1 相似.

总体上三类出溶石榴石的成分变化不大,均为镁铝石榴石分子接近 100% 的石榴石。

此外,粒状石榴石中细小棒状出溶物的能谱分析结果(表 7)显示,主要成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 和 MgO ,三者含量分别为 26.68~34.9%、14.83~19.57% 和 28.17~51.90%,平均为 31.12%、18.05% 和 41.59%。总体上它们 MgO 高,不含 Ca ,都含 Na ,测点 0521-30 的 Na_2O 达 7.33, K_2O 达 2.47,怀疑它们是绿云母(?)。

4.2.3 铝铬铁矿和钠长石

铝铬铁矿主要成分为 FeO 、 Cr_2O_3 、 Al_2O_3 和少量 MgO ,含量分别为 26.39%~34.41%、35.09%~38.75%、19.79%~24.20% 和 4.68%~9.22%,平均值分别为 30.50%、36.91%、21.51% 和 7.27%(表 9)。根据电子探针分析结果,确定其为尖晶石族的铝铬铁矿。

钠长石主要由 SiO_2 、 Al_2O_3 和 Na_2O 组成,三者平均含量分别为 64.29%、21.71% 和 10.54%(表 9),端元组分变化范围为 $\text{Ab}_{88.5-92.3}\text{An}_{5.1-6.9}\text{Or}_{2.6-4.6}$ 。

5 蓬湖西镁质榴辉岩的 $P-T$ 路径

岩相学研究及电子探针分析结果表明,蓬湖西镁质榴辉岩中的出溶相包括石榴石、斜方辉石、单斜辉石、铝铬铁矿细粒和钠长石等,推测主晶单斜辉石和出溶相组成的集合体原先是一个在超高压条件下成分均匀的未出溶的单斜辉石,在后来温度和压力条件发生改变时发生出溶作用形成多期次、多种类型的出溶物。通过对研究区镁质榴辉岩出溶结构的观察和 $P-T$ 条件估算有助于我们重建这些岩石从形成→深俯冲→折返上升→构造侵位的演化过程。

蓬湖西镁质榴辉岩中的棒状石榴石、斜方辉石和单斜辉石总是出现于粗粒的单斜辉石晶体中,这些矿物常沿着平行主晶单斜辉石的 C 轴方向分布。这些特征表明这样的形貌取向连生的共生(topotactical intergrowth)是由于出溶作用形成的,而不是原生交生矿物(primary intergrowth)或定向附生的交代作用(epitaxial

replacement)形成的。这些特征在其他地方的天然共生组合(parageneses)^[20,21]和实验室模拟生成的共生组合^[22]中也多有报道。

前人已进行了有关 $\text{MgSiO}_3 - \text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 系统的许多实验,目的是为了了解在地幔环境下辉石和石榴石的相关关系。研究表明,顽火辉石在镁铝榴石中的溶解度随压力增大而增大。单斜辉石中形成石榴石通常被解释为原生单斜辉石出溶的结果^[23~25]。例如来自 Roberts Victor 金伯利岩筒的一个榴辉岩捕虏体主要由石榴石和含有石榴石出溶页片的强烈钙镁闪石化的单斜辉石组成。为了确定单个辉石相和随后石榴石出溶的稳定域,Harte 等使用由单个单斜辉石晶体加上石榴石页片组成的母岩混合物作为初始材料,在 1100 °C~1400 °C 和 2.0~3.8 GPa 条件下进行了一系列的实验。实验结果确定了单个辉石(接近于初始成分)在固相线之下(在 1380 °C~1400 °C 时约 3.4~3.8 GPa,在 1370 °C 时约 2.6 GPa)的一个楔形的 $P-T$ 稳定域。随着温度的降低,在大约 1400 °C 和 3.4~3.6 GPa 时石榴石开始出现,出溶的石榴石与单斜辉石相连,形成一个“单斜辉石+石榴石”的集合体。因此,榴辉岩捕虏体中单斜辉石出溶石榴石被认为主要是与从接近固相线条件向正常地幔岩石圈温度冷却转变有关^[24]。

Roberts Victor 金伯利岩中榴辉岩捕虏体中的“石榴石+单斜辉石”集合体的初始相(precursor phase)被认为是原辉石(primary pyroxene),最初的 $\text{Cpx} + \text{Grt}$ 集合体形成于大约 1400 °C 和 3.4~3.8 GPa^[24]。蓬湖西镁质榴辉岩中主晶单斜辉石的成分较稳定, Al_2O_3 含量很低,平均仅为 2.09%。即使以出溶石榴石总体积占主晶单斜辉石总体积的 20%(实际远未达到 20%)来推算,“主晶单斜辉石+石榴石”集合体的 Al_2O_3 含量(计算结果为 6%±)也要低于 Roberts Victor 金伯利岩中榴辉岩捕虏体中的“石榴石+单斜辉石”集合体的初始相的 Al_2O_3 含量(13.6%),说明研究区镁质榴辉岩中的“单斜辉石+出溶相”集合体的固相线条件可能发生在更高的 5 GPa(温度 1400 °C),而

与日照榴辉岩中 Grt + Ilm + Cpx 集合体 (Al₂O₃ 为 5.8%) 的温度压力条件相当^[16]. 我们推测研究区镁质榴辉岩中“单斜辉石+出溶相”集合体的初始相在上地幔环境(图 15, 普通辉石+斜长石)的镁质榴辉岩固相线之下但靠近该固相线的 P-T 条件下是稳定的.

阶段 III (图 15) 以镁质榴辉岩中“单斜辉石+出溶相”集合体的初始相在阶段 II 之后的温度和压力降低过程中, 依次出溶如前面所述的不同期次的石榴石、单斜辉石及斜方辉石等矿物为特征. 由于缺乏合适的压力计, 我们只能在石榴石稳定域的压力条件下估算不同期次出溶矿物的平衡条件. 我们选用岩石中具代表性的“单斜辉石-石榴石”和“单斜辉石-斜方辉石”矿物对, 分别在假定的 4 GPa、3 GPa 和 2 GPa 三个条件下, 应用文献^[26, 27]标定估算石榴石和单斜辉石的平衡条件, 应用文献^[28~30]的二辉石温度计估算出溶斜方辉石和主晶单斜辉石的平衡条件.

与蓬湖西镁质榴辉岩有关的温度压力计算结果分别列于表 10 和 11. 用于计算平衡条件的“单斜辉石-石榴石”和“单斜辉石-斜方辉石”

矿物对的产出特征和相互关系见图 15.

在一个给定压力 4 GPa 的压力条件下, 三个“Cpx1 - Grt1”矿物对的平衡温度差别较大: “0521 - 21/0521 - 24”的为 1113 °C ~ 1129 °C, 而“0129 - 9/0521 - 31”和“0521 - 5/0521 - 36”的温度范围仅为 665 °C ~ 817 °C. 显微镜观察结果表明, 前者主晶单斜辉石中仅有 Opx2 (对应于 Grt1) 出溶, 而后者主晶单斜辉石中有 Opx1 (对应于 Grt2) 和 Grt2 出溶, 说明后者主晶单斜辉石 (Cpx1) 与石榴石 (Grt1) 达到平衡之后又出溶 Opx1 和 Grt2, 平衡条件已遭破坏, 因而前者计算结果很好反应了前述 Cpx1 - Grt1 对的平衡条件 (~ 4 GPa, 1113 °C ~ 1129 °C), 我们把这个阶段定为阶段 III - 1.

Cpx1 - Grt2 和 Cpx2 - Grt1 矿物对的计算结果反映的是 Cpx1 和 Grt1 形成之后又分别各自出溶棒状石榴石 (Grt2) 和单斜辉石 (Cpx2) 的条件 (阶段 III - 2), 这一阶段温度压力条件应比阶段 III - 1 要低. 但是, Cpx1 - Grt2 和 Cpx2 - Grt1 矿物对仅仅是相对的准稳定平衡关系, 在假定的 3 GPa 条件下, 三个 Cpx1 - Grt2 矿物对的平衡温度介于 863 °C ~ 1033 °C;

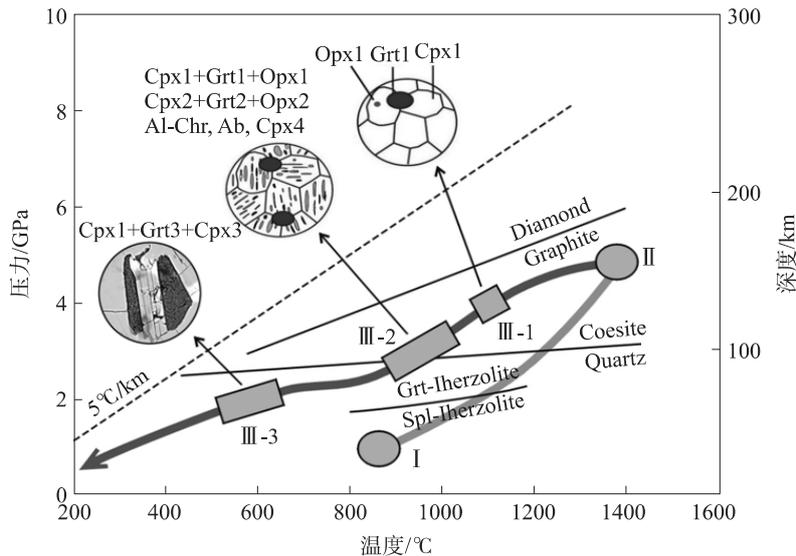


图 15 重建的蓬湖西镁质榴辉岩的 P-T 路径

Spl-Iherzolite: 尖晶石二辉橄榄岩; Grt-Iherzolite: 石榴石二辉橄榄岩;
Quartz: 石英; Coesite: 柯石英; Graphite: 石墨; Diamond: 金刚石

Fig. 15 Reconstructed P-T path of Western Peng Lake magnesian eclogite

而 Cpx2 - Grt1 矿物对“0129 - 13/0521 - 20”的温度是 1262 °C ~ 1265 °C,即使在 2 GPa 时的温度 1213 °C ~ 1216 °C 也比阶段 III - 1 要高很多,显然是不合理的,可能还与出溶的单斜辉石遭受后期蚀变(电子探针分析总量仅为 96.23%)有关. 因此阶段 III - 2 的平衡条件为 ~3 GPa 和 863 °C ~ 1033 °C 土.

阶段 III - 3 以两个出溶的、相互平行的石榴石 3(Grt3)之间平行夹持若干个单斜辉石片 3(Cpx3)为特征. 温度压力计算结果表明,该阶段的平衡温度是最低的,与我们所划分的阶段是相符的. Cpx3 - Grt3 平衡条件为 ~2 GPa 和 502 °C ~ 667 °C.

表 10 单斜辉石-石榴石温度(°C)压力计算结果

Table 10 calculated "Clinopyroxene-Garnet" temperature(°C) pressure(GPa)

Sample	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX7	XPHX12	XPHX2	XPHX2
Cpx - Grt	0521 - 21/ 0521 - 24	0129 - 9/ 0521 - 31	0521 - 05/ 0521 - 36	0129 - 13/ 0521 - 20	1225 - 3/ 1225 - 1	1225 - 15/ 1225 - 14	1225 - 13/ 1225 - 12	0129 - 1/ 0129 - 2	0129 - 12/ 0521 - 17
	Cpx1 - Grt1	Cpx1 - Grt1	Cpx1 - Grt1	Cpx2 - Grt1	Cpx1 - Grt2	Cpx1 - Grt2	Cpx1 - Grt2	Cpx3 - Grt3	Cpx3 - Grt3
	P=4 GPa								
(a)	1129.45	817.51	677.33	1314.93	963.86	925.23	1074.89	586.52	729.85
(b)	1112.96	787.49	644.55	1311.55	938.98	898.96	1055.4	553.12	679.89
P=3 GPa									
(a)	1085.62	783.43	647.61	1265.31	925.29	888.01	1032.9	559.67	698.51
(b)	1069.65	754.36	615.86	1262.05	901.2	862.59	1014.05	527.32	667.56
P=2 GPa									
(a)	1041.78	749.35	617.88	1215.69	886.72	850.79	990.92	532.82	667.17
(b)	1026.35	721.23	587.16	1212.55	863.42	826.22	972.69	501.53	637.23

(a)Ellis and Green,1979,文[26];(b)Powell,1985,文[27]

表 11 单斜辉石-斜方辉石温度(°C)压力计算结果

Table 11 calculated "Clinopyroxene-Orthopyroxene" temperature(°C) pressure(GPa)

Sample	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX2	XPHX12
Cpx - Opx	0521 - 21/ 0129 - 16	0521 - 05/ 0129 - 14	0521 - 05/ 0129 - 15	0129 - 9/ 0129 - 4	0129 - 9/ 0129 - 6	1225 - 13/ 1225 - 11
	Cpx1 - Opx1	Cpx1 - Opx2	Cpx1 - Opx2	Cpx1 - Opx2	Cpx1 - Opx2	Cpx1 - Opx2
	P=40 GPa					
(a)	1094.12	920.15	919.21	977.49	976.86	956.83
(b)	1076.67	779.64	779.4	880.91	881.42	862.46
(c)	1062.82	789.42	787.61	848.17	848.49	842.32
P=30 GPa						
(a)	1094.12	920.15	919.21	977.49	976.86	956.83
(b)	1076.67	779.64	779.4	880.91	881.42	862.46
(c)	1044.2	777.06	775.27	834.3	834.62	826.4
P=2 GPa						
(a)	1094.12	920.15	919.21	977.49	976.86	956.83
(b)	1076.67	779.64	779.4	880.91	881.42	862.46
(c)	1025.59	764.7	762.94	820.43	820.74	810.47

计算公式:(a)[28];(b)[29];(c)[30]

近等边三角形和近圆形切面的斜方辉石出溶体(Opx1)和长板条状斜方辉石(Opx2)分别相当于 Grt1 和 Grt2, 分别对应于阶段 III-1 和 III-2. 二辉石温度计的计算结果(表 10)表明 Cpx1 - Opx1 的平衡温度要比 Cpx1 - Opx2 的要高, 说明我们的分析是正确的. 在 4GPa 时 Cpx1 - Opx1 的平衡温度为 1063 °C ~ 1094 °C, 稍低于 Cpx1 - Grt1 的 1113 °C ~ 1129 °C (~4 GPa), 但比阶段 III-2 的 Cpx1 - Grt2 的 863 °C ~ 1033 °C (~3GPa) 要高. Cpx1 - Opx2 在 3 GPa 时的平衡温度为 775 °C ~ 977 °C, 与阶段 III-2 的 Cpx1 - Grt2 的 863 °C ~ 1033 °C (~3 GPa) 基本一致, 明显高于阶段 III-3 的 502 °C ~ 667 °C (~2 GPa).

总结上述温度压力数据并把它们投入图 15 中, 我们可以看到:

(1) 蓬湖西镁质榴辉岩最初形成时的温度已无从获得, 我们只能从出溶的矿物对依次计算得到出溶时的温度压力. 以 30 km 深度压力增加 1 GPa 的压力梯度进行换算, 其形成时的压力范围可能为 0.5 ~ 1.5 GPa (阶段 I).

(2) 特提斯洋关闭, 洋壳俯冲向深部, 致使镁质榴辉岩从尖晶石二辉橄榄岩稳定域穿过石榴石二辉橄榄岩稳定域并最终到达 1400 °C 和 5 GPa 的柯石英稳定域(阶段 II), 形成了在超高压条件下结构均一的、稳定的“单斜辉石 + 石榴石 + 斜方辉石”固溶体.

(3) 洋壳折返过程中温度和压力降低使得原来稳定的“单斜辉石 + 石榴石 + 斜方辉石”固溶体发生出溶作用, 形成多期次、多种类型的出溶物(阶段 III). 根据矿物出溶关系及温度压力计算结果, 这一阶段又可细分为三个次阶段, 与各期次出溶矿物相对应(图 15). 三个阶段的温度变化范围很大(2 ~ 4 GPa, 502 °C ~ 1129 °C), 即使在压力条件尚未得到十分确定的情况下, 仍能反映研究区镁质榴辉岩中矿物的出溶肯定与温度降低有关.

(4) 单斜辉石中出溶铝铬铁矿和钠长石可能均相当于阶段 III-2. 随着温度和压力继续降低, 辉石晶格中的三价阳离子在压力释放以后析出形成尖晶石类矿物(铝铬铁矿), 类似的现

象也见于河北万全大麻坪二辉橄榄岩^[31]和大椅山玄武岩中幔源透辉石岩中^[32]. Ringwood 等用玄武质岩石当初始材料, 通过实验研究玄武岩向辉长岩、辉石麻粒岩、石榴石麻粒岩和榴辉岩的相转换. 研究结果发现, 随着压力的加大, 斜长石变得越来越富钠, 压力超过 2 GPa 时, 钠长石分解, 作为硬玉进入单斜辉石, 构成“绿辉石”^[22]. 本研究电子探针分析结果表明(表 3), 包含钠长石的主晶单斜辉石 Cpx1 (分析点 1225-6) (图 9A、C) 的硬玉分子(Jd) 含量为 1%, 仅次于分析点 0129-18 的 Jd = 1.412%, 而明显高于其他没有出溶钠长石的主晶单斜辉石的 Jd 含量, 说明钠长石是高压条件下稳定的“绿辉石”在压力降低时出溶形成的.

(5) 大洋地壳折返上升并构造侵位至地表, 后期地质作用使石榴石绿泥石化后转变成绿泥石, 从而留下石榴石的假像晶. 而石榴石内部出溶的单斜辉石以及单斜辉石中出溶的普通辉石也受到不同程度的影响, 电子探针分析总量只有 96% ~ 97.3%.

6 蓬湖西镁质榴辉岩的地质意义 ——中特提斯洋壳俯冲与折返

自 1984 年在西阿尔卑斯^[33]和挪威^[34]发现含柯石英包体的镁铝榴石石英岩和榴辉岩以来, 超高压变质作用与碰撞构造的研究已成为固体地球科学的热点之一. 什么是超高压变质作用? 一般将石英/柯石英相变曲线之上的高压变质相系部分定义为超高压变质作用^[35]. 这个定义主要强调了变质环境的低地温梯度(小于 10 °C/km), 而不是用压力和温度的绝对值来划分变质相系^[36].

近年来国际上对超高压变质作用的研究方兴未艾, 尤其是超高压变质岩在地下约 90 km 或更深处形成后, 又快速折返至地壳浅处, 而这在传统的板块构造理论中是没有认识到的, 这一地覆天翻的认识向传统的地球动力学观提出了挑战, 并在一系列地球科学研究领域带来了重大突破^[35]. 而对于超高压变质岩形成深度问题的研究具有非常重要意义, 因为了解折返至

地壳的超高压岩石的峰期变质深度是讨论造山带深部变质作用、岩浆形成和流体活动的关键^[37,38]。目前认为可能来源于地球深部过渡带和下地幔的岩石和矿物样品,主要是在地表收集到的低压矿物橄榄石、石榴石等造岩矿物中发现的大量其他矿物的定向包裹体,认为这些矿物在高温高压下本是固溶体,只是在温度压力降低时发生了矿物的出溶^[39,40]。这些高压-超高压条件下稳定的矿物固溶体出溶现象的发现,为超高压变质岩形成深度的研究提供了重要的依据^[16,37,39~41]。

目前已在世界范围内十几条造山带中都发现了超高压变质岩石,它们大多集中在欧亚大陆造山带中,并且大都以具有相似的大陆地壳成分的原岩为特征,大洋地壳岩石经历超高压变质的极为少见^[42~46]。虽然地球物理和深源地震研究表明洋壳岩石可以俯冲到600 km 甚或更深的地幔中^[47],但由于洋壳岩石比重比较大,俯冲的洋壳与陆壳断开后继续向地幔深处拆沉,很难再返回到地表而保存下来^[48]。因此,到目前为止洋壳岩石经历过高压-超高压变质的有关报道只有西阿尔卑斯的 Zermatt-Saas 带和横贯于中亚的南天山造山带(吉尔吉斯斯坦境内的 Atbashi、Makbal 榴辉岩-蓝片岩带^[49,50],我国境内的西南天山榴辉岩-蓝片岩带^[51],西阿尔卑斯 Zermatt-Saas 蛇绿岩套代表西瑞士-意大利阿尔卑斯特提斯古洋壳经历了与俯冲有关的超高压变质以及其后的折返抬升和退化变质作用过程^[52,53]。

显微镜观察和电子探针及能谱分析结果表明,镁质榴辉岩中发育很好的出溶结构,出溶相包括石榴石、斜方辉石、单斜辉石、尖晶石类(铝铬铁矿)及钠长石等。对蓬湖西镁质榴辉岩 P-T 路径研究表明,该镁质榴辉岩曾经就位于地表以下 150 km(5 GPa)的深部,并经历过超高压变质作用。我们推测,特提斯洋关闭期间,洋壳俯冲向深部,导致超高压变质作用发生;而在随后的陆陆碰撞时期,由于两边夹挤,将俯冲带之上的楔形区挤出,是导致上述这些岩石折返上升的动力。

致谢 本文承张开均教授和刘良教授审查,对他们的建设性意见深表谢意。

References

- [1] Zhang K J, Tang X C. Eclogites in the interior of the Tibetan plateau and their geodynamic implications. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54 (15): 2556~2567. (张开均,唐显春. 青藏高原腹地榴辉岩研究进展及其地球动力学意义. *科学通报*, 2009, 54: 2556~2567).
- [2] Zhang K J, Cai J X, Zhang Y X, *et al.* Eclogites from central Qiangtang, northern Tibet (China) and tectonic implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 245(3), 722~729.
- [3] Zhang K J, Zhang YX, Tang XC, *et al.* First report of eclogites from central Tibet, China: Evidence for ultradeep continental subduction prior to the Cenozoic India-Asian collision. *Terra Nova*, 2008, 20(4), 302~308.
- [4] Wei Z Q. Petrology and Geochemistry of the Ophiolite, the Exsolutions in the Eclogites and Their Tectonic Implications in the West of the Penghu Lake, the Northern Lhasa Block (in Chinese). Dissertation for the Doctoral Degree, Chinese Academy of Sciences, 2007, 1~90. (韦振权. 西藏蓬湖西蛇绿岩岩石学、地球化学和榴辉岩中的出溶物及其构造意义. 中国科学院广州地球化学研究所博士学位论文, 2007. 1~90).
- [5] Yang J S, Xu Z Q, Geng Q R, *et al.* A possible new HP/UHP (?) metamorphic belt in China: Discovery of eclogite in the Lhasa terrane, Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80 (12): 1787~1792. (杨经绥,许志琴,耿全如等. 中国境内可能存在一条新的高压/超高压(?)变质带——青藏高原拉萨地体中发现榴辉岩带. *地质学报*, 2006, 80(12): 1787~1792).
- [6] Xia B, Zhou G Q, Li J F, *et al.* A study on mineralogical phase confines reaction from spinel to garnet in Baigang lherzolite of the Yarlung Zangbo Suture Zone, and Its geological implication. *Geological Review*, 2012, 58(3): 453~470. (夏斌,周国庆,李建峰等. 雅鲁藏布江缝合带白朗县白岗尖晶石-石榴石相二辉橄榄岩的相界反应及其意义. *地质论*

- 评. 2012, 58(3):453~470).
- [7] Bai W J, Shi N C, Yang J S, *et al.* Two new varieties of iron nickel from amphibolites, Tibet. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(3):201~206. (白文吉, 施倪承, 杨经绥等. 西藏蛇绿岩中二种合金矿物新变种. *矿物学报*, 2002, 22(3):201~206).
- [8] Zhang K J, Zhang Y X, Tang X C, *et al.* Late Mesozoic tectonic evolution and growth of the Tibetan plateau prior to the Indo-Asian collision. *Earth-Science Reviews*, 2012, 114:236~249.
- [9] Bai W J, Yang J S, Fang Q S, *et al.* Discovery and its significance of unusual mantle mineral group. *Scientific Chinese*, 2005, (2):78~79. (白文吉, 杨经绥, 方青松, 颜秉刚. 不寻常地幔矿物群的发现和意义. *科学中国人*, 2005, (2):78~79).
- [10] Shen K, Zhang Z M, Santosh M, *et al.* Origin and geological significance of high-density CO₂ fluid inclusions in Charnockites from the Gangdese batholith, Lhasa terrane, southern Tibet. *Journal of Nanjing University (Nature Science)*, 2012, 48(3):278~294. (沈 昆, 张泽明, Santosh M 等. 西藏拉萨地体冈底斯岩基紫苏花岗岩中的高密度 CO₂ 包裹体成因及其地质意义. *南京大学学报(自然科学)*, 2012, 48(3):278~294).
- [11] Zeng L S, Yang T N. Rongcheng Ultra-Calcic Garnet Pyroxenite; Its Geochemistry, Origin and Implications for Pre-UHP Tectonics in the Sulu UHP Metamorphic Belt. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2006, 31(4):0488~0496. (曾令森, 杨天南. 山东荣成高钙石榴辉石岩的地球化学特征及其成因. *地球科学-中国地质大学学报*, 2006, 31(4):0488~0496).
- [12] Zhang Z M, Zhong Z Q, You ZD, *et al.* Granulite-Facies Retrograde Metamorphism of Garnet Pyroxenite in Muzidian, Northern Dabie Mountains. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2000, 25(3):295~301. (张泽明, 钟增球, 游振动等. 北大别木子店石榴辉石岩的麻粒岩相退变质作用. *地球科学:中国地质大学学报*, 2000, 25(3):295~301).
- [13] You Z D, Zhong Z Q, Suo S T. A petrogenetic study of the garnet pyroxenite enclaves in spinel peridotite, North Dabieshan, China. *Science in China (Series D): Earth Sciences*, 2000, 43 (Supp):189~199.
- [14] Morimoto N. Nomenclature of pyroxenes. *Mineralogy and Petrology*, 1988, 39(1):55~76.
- [15] Wu Q Y. Phase equilibrium modeling and P-T estimation of eclogites at Bixiling, Dabie Mountains. *Journal of Nanjing University (Nature Science)*, 2011, 47(6):718~730. (吴倩怡. 大别山碧溪岭榴辉岩相平衡模拟及温压计算. *南京大学学报(自然科学)*, 2011, 47(6):718~730).
- [16] Zhang R. Y, Liou J G. Clinopyroxenite from the Sulu ultrahigh-pressure terrane, eastern China: Origin and evolution of garnet exsolution in clinopyroxene. *American Mineralogist*, 2003, 88(10):1591~1600.
- [17] Yang J J. Ca-rich Garnet-Clinopyroxene Rocks at Hujialin in the Su-Lu Terrane (Eastern China): Deeply Subducted Arc Cumulates? *Journal of Petrology*, 2006, 47(5):965~990.
- [18] Coleman R G. Ophiolites; ancient oceanic lithosphere? Springer-Verlag Berlin, 1977:1~229.
- [19] Zhou G Q. Ophiolite; Some key aspects regarding its definition and classification. *Journal of Nanjing University (Nature Science)*, 2008, 44(1):1~24. 周国庆. 蛇绿岩研究新进展及其定义和分类的再讨论. *南京大学学报(自然科学)*, 2008, 44(1):1~24.
- [20] Dawson T J, A Hulbert. Standard metabolism, body temperature, and surface areas of Australian marsupials. *American journal of physiology*, 1970, 21(8):1233~1238.
- [21] Sautter V, O Jaoul, F Abel. Aluminum diffusion in diopside using the ²⁷Al(p, gamma)²⁸Si nuclear reaction: preliminary results. *Earth and Planetary Science Letters*, 1988, 89:109~114.
- [22] Ringwood A, D Green. An experimental investigation of the gabbro-eclogite transformation and some geophysical implications. *Tectonophysics*, 1966, 3(5):383~427.
- [23] Dawson T J, A Hulbert. Standard metabolism, body temperature, and surface areas of Australian marsupials. *American journal of physiology*, 1970, 218:1233~1238.
- [24] Harte B, J Gurney. Evolution of clinopyroxene and garnet in an eclogite nodule from the Roberts Victor kimberlite pipe, South Africa. *Physics and*

- Chemistry of the Earth, 1975, 9: 367~387.
- [25] Fei Y. Effects of temperature and composition on the bulk modulus of (Mg, Fe)O. *American Mineralogist*, 1999, 84(3): 272~276.
- [26] Ellis D, D Green. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe - Mg exchange equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, 71(1): 13~22.
- [27] Powell R. Regression diagnostics and robust regression in geothermometer/geobarometer calibration: the garnet - clinopyroxene geothermometer revisited. *Journal of Metamorphic Geology*, 1985, 3(3): 231~243.
- [28] Wood B J, Banno S. Garnet-orthopyroxene and orthopyroxene-clinopyroxene relationships in simple and complex systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, 42(2): 109~124.
- [29] Nehru C E, P J Wyllie. Electron microprobe measurement of pyroxenes coexisting with H₂O - undersaturated liquid in the join CaMgSi₂O₆ - Mg₂Si₂O₆ - H₂O at 30 kilobars, with applications to geothermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1974, 48(3): 221~228.
- [30] Brey G, T Köhler. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 1990, 31(6): 1353~1378.
- [31] Zhou Y Z. Study on a fragmented pyroxene phenocrystal in Damaping spinel-lherzolite rock body. *Contributions To Geology and Mineral Resources Research*, 1990, 5(2): 50~53. (周永璋. 大麻坪尖晶石二辉橄榄岩岩体中辉石碎斑的研究. *地质找矿论丛*, 1990, 5(2): 50~53).
- [32] Luo Z H, Su S G. Pyroxene exsolution in diopside pyroxenite in Dayinshan basalt and its geological significance. *Geosciences*, 2001, 15(2): 184~188. (罗照华, 苏尚国. 大椅山玄武岩中幔源透辉石岩的辉石出溶作用及其地质意义. *现代地质*, 2001, 15(2): 184~188).
- [33] Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps; a first record and some consequences. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1984, 86(2): 107~118.
- [34] Smith D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics, *Nature*, 1984, 310: 641~644.
- [35] Cong B L, Wang Q C. The Dabie-Sulu UHP rocks belt: review and prospect. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(12): 1074~1085.
- [36] Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts. *Journal of Petrology*, 1961, 2(3): 277~311.
- [37] Jin Z M, Jin S Y, Gao S *et al.* Is the formation depth of the Dabie UHP rocks restricted to 100~150 km? *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(7): 761~771.
- [38] Liu X W, Jin Z M, Qu J *et al.* Discovery and its significance of several exsolution in ultrahigh-pressure metamorphic rocks. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 2004, 23(004): 465~465. (刘祥文, 金振民, 曲晶等. 超高压变质岩中几种出溶体的发现及其意义. *电子显微学报*, 2004, 23(004): 465~465).
- [39] Dobrzhinetskaya L, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilometers. *Science*, 1996, 271(5257): 1841~1845.
- [40] Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 2000, 407(6805): 734~736.
- [41] Xu Z Q, Zhang Z M, Liu F L, *et al.* Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, central China. *Acta Geologica Sinica*, 2003, 77(4): 433~450. (许志琴, 张泽明, 刘福来等. 苏鲁高压-超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 2003, 77(4): 433~450).
- [42] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 1995, 374(6517): 49~52.
- [43] Schreyer W. Ultradeep metamorphic rocks: The retrospective viewpoint. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(B5): 8353~8366.
- [44] Liou J, Zhang R. Petrogenesis of an ultrahigh pressure garnet bearing ultramafic body from Maowu, Dabie Mountains, east central China. *Island Arc*, 1998, 7(1-2): 115~134.
- [45] Carswell D, Brueckner H, Cuthbert S, *et al.* The

- timing of stabilisation and the exhumation rate for ultra high pressure rocks in the Western Gneiss Region of Norway. *Journal of Metamorphic Geology*, 2003, 21(6): 601~612.
- [46] Liou J, Tsujimori T, Zhang R, *et al.* Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalayan model. *International Geology Review*, 2004, 46(1): 1~27.
- [47] Widiyantoro S, Hilst R V. Structure and evolution of lithospheric slab beneath the Sunda arc, Indonesia. *Science*, 1996, 271(5255): 1566~1570.
- [48] Huw D J, Blanckenburg F V. Slab breakoff: a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth and Planetary Science Letters*, 1995, 129(1): 85~102.
- [49] Reinecke T. Very-high-pressure metamorphism and uplift of coesite-bearing metasediments from the Zermatt-Saas zone, Western Alps. *European Journal of Mineralogy*, 1991, 3(1): 7~17.
- [50] Tagiri M, Yano T, Bakirov A, *et al.* Mineral parageneses and metamorphic P-T paths of ultra-high pressure eclogites from Kyrghyzstan Tien Shan. *Island Arc*, 1995, 4(4): 280~292.
- [51] Zhang L F, David J E, Ai Y L, *et al.* Ultra-high pressure metamorphic eclogite in western Tianshan Mountains, Xinjiang. *Acta Petrologica et Minerologica*, 2002, 21(4): 371~386. (张立飞. 新疆西天山超高压变质榴辉岩. *岩石矿物学杂志*, 2002, 21(4): 371~386).
- [52] Stampfli G, Mosar J, Marquer D, *et al.* Subduction and obduction processes in the Swiss Alps. *Tectonophysics*. 1998, 296(1~2): 159~204.
- [53] Li X P, Zhang L F, Ai Y L. Discovery and its geological significance of associated rodingite of ophiolitic mélangé in Changawuzi area in West Tianshan, Xinjiang. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(7): 754~760. (李旭平, 张立飞, 艾永亮. 新疆西天山长阿吾子蛇绿混杂岩中与榴辉岩伴生的异剥钙榴岩的发现及其地质意义. *自然科学进展*, 2003, 13(7): 754~760).