

雅鲁藏布江缝合带白朗县白岗尖晶石—石榴子石相二辉橄榄岩的相界反应及其意义

夏斌^{1,3)}, 周国庆²⁾, 李建峰¹⁾, 陈根文¹⁾, 刘维亮³⁾, 王冉⁴⁾, 董冰华¹⁾

1) 中国科学院广州地球化学研究, 广州, 510640; 2) 南京大学地球科学与工程学院, 南京, 210093;

3) 中山大学海洋学院, 广州, 510006; 4) 深圳中广核工程设计有限公司, 广东, 深圳, 518029

内容提要: 西藏白朗县白岗村蛇绿混杂岩中有一罕见的尖晶石石榴子石二辉橄榄岩小岩块, 被松软的蛇纹岩化尖晶石二辉橄榄岩包裹其中。岩块中发育有碎基单斜辉石、斜方辉石中出溶单斜辉石、切过出溶单斜辉石的贯入单斜辉石和外来碎粒单斜辉石及钙质辉石 + 铬尖晶石 → 钙铁石榴子石相界反应。同时, 在岩块和包壳岩石的橄榄石中出现针状硅镁石出溶物。计算这些矿物的温度压力表明, 它们的温度压力都处于 $> 800^{\circ}\text{C}$, $> 1.8\text{ GPa}$ 以上的地幔石榴子石域超高压环境, 而且, 经历过一个上升 → 俯冲 → 上升的“N”字形历程。

关键词: 蛇绿混杂岩块; 尖晶石—石榴子石相界反应; 橄榄石中硅镁石出溶物; 深俯冲—折返, 西藏白岗

白朗蛇绿岩是雅鲁藏布江缝合带出露较好的蛇绿岩之一, 位于雅鲁藏布江缝合带中段, 日喀则市东南侧。潘裕生(1980)报道了白朗蛇绿混杂岩, 对其蛇绿岩层序以及蛇绿岩两侧岩石单元进行了描述; 刘小汉等(2009)详细描述了白朗蛇绿岩剖面, 认为构造混杂岩带仅在蛇绿岩带南侧呈狭长条带断续出露, 基质为轻微透入变形的蛇纹质泥岩和硅质页岩, 岩块含基性 ~ 超基性岩及外来杂岩。至今少见关于白朗蛇绿岩的地球化学特征和构造环境报道, 研究较多的是同处雅鲁藏布江缝合带中段的日喀则蛇绿岩。Pearce and Deng (1988), Wang Ran et al. (2006) 报道了日喀则蛇绿岩的形成(110 ~ 128 Ma)和侵位年龄(55 ~ 44 Ma)。Zhang et al. (2008) 对于日喀则蛇绿岩的研究成果进行了总结, 肯定了一些共识: 根据蛇绿岩的地球化学特征将日喀则蛇绿岩分为两个类型: 第一类主要位于日喀则西侧, 以LREE亏损的基性熔岩和地幔橄榄岩为特征, 具有弧后盆地亲缘性; 而另一类主要位于日喀则东侧, LREE富集且具有明显的Nb、Ta亏损, 具有岛弧亲缘性。另外王希斌(1987)曾报道了雅鲁藏布江蛇绿岩组成岩石单元的矿物成分, 并据此判断了蛇绿岩所经历的温压路径; Hébert et al. (2003) 报道了缝合带内蛇绿岩中的铬铁矿、橄榄石、辉石等矿物成分, 并据此判断地幔橄榄岩为经历了10% ~ 40% 部

分熔融的残余, 蛇绿岩形成于超级俯冲带之上。总的来说, 前人关于雅鲁藏布江缝合带中段蛇绿岩的研究主要集中在地球化学和年代学方面, 关于蛇绿岩各个岩石单元的矿物学特征及其所代表地质意义的研究尚比较缺乏; 最近, 杨经绥等(2008)在罗布莎铬铁矿中发现了超高压矿物群, 对于铬铁矿的成因模式提出了新的挑战, 同时也说明了矿物学研究的重要意义。

白岗是西藏日喀则地区白朗县城东的一个村庄, 白岗蛇绿混杂岩属于白朗蛇绿混杂岩的一部分。笔者等在白岗村蛇绿混杂岩中发现一罕见的尖晶石石榴子石二辉橄榄岩小岩块, 被松软的蛇纹岩化尖晶石二辉橄榄岩包裹其中。本文试图着重研究尖晶石石榴子石二辉橄榄岩岩块中的尖晶石向石榴子石相转变的天然反应, 单斜辉石、硅镁石、尖晶石、橄榄石中的出溶物成分, 以及其相界反应所代表的温压环境, 一起追溯该超镁铁质岩在雅鲁藏布江缝合带演化过程中是否经历了在地幔中向深部俯冲、超高压变质和随后的向上运动的演化过程。

1 区域地质背景

雅鲁藏布江缝合带大致沿雅鲁藏布江河谷两侧呈近东西向分布。西端转向北西西, 沿印度河上游继续延伸, 展布于札达—拉孜—邛多江断裂之间, 西

注: 本文为国家自然科学基金重点项目(编号40534019)的成果。

收稿日期: 2011-08-09; 改回日期: 2012-01-06; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 夏斌, 男, 1959年生。教授, 博士生导师。主要从事构造地质学、石油地质学研究。Email: rockeasy81@163.com。

经阿依松日居延出国外,与克什米尔的印度河缝合带相接;往东延伸到缅甸境内。该带主要分布上三叠统修康群、白垩系日喀则群复理石混杂岩带和保存完整的蛇绿岩套,具有比较完整的碰撞缝合构造特征。根据蛇绿岩出露的地质特征及位置可将其分为西、中、东三段。中段从达吉岭到大竹卡,东西向长约 600km。白朗蛇绿岩位于雅鲁藏布江蛇绿岩带中段。在白朗县城附近,蛇绿岩大致沿北东—南西方向展布,宽约 15km,由地幔橄榄岩、堆积岩、辉长辉绿岩、岩墙群和玄武岩组成(图 1)。其中地幔橄榄岩和岩墙群单元最为发育,厚度可分别达 4km 和 3km,堆积岩单元不发育。蛇绿岩与其西北侧的 K₂ 日喀则群复理石沉积为断层接触,蛇绿岩向南东方向逆冲到 J₃—K₁ 砂页岩之上,该岩层中可见放射虫硅质岩和基性熔岩夹块或夹层。蛇绿岩与 J₃—K₁ 岩层之间可见有一层蛇绿混杂岩,宽约 1km 左右,因其出露于白朗县城东 12km 左右处的白岗村附近,因此笔者等称其为白岗蛇绿混杂岩。白岗蛇绿混杂岩主要由地幔橄榄岩、异剥辉石岩、糜棱岩化角闪斜长岩、异剥钙榴岩和辉绿玢岩、玄武岩和放射虫硅质岩岩块组成。

2 白岗蛇绿混杂岩中二辉橄榄岩岩块岩相学

本文研究样品采自白岗蛇绿混杂岩中的地幔橄榄岩。所采的三块样品分别位于一个大岩块(大约 1.5m × 1.5m × 1m)的核部、过渡带和包壳。根据组成矿物含量的不同,三块样品分别命名为 XG9-1、2 尖晶石二辉橄榄岩,和 XG9-3 尖晶石石榴子石二辉橄榄岩。三块样品由于所处部位不同,其构造、结构、矿物组成和蚀变等均有差异(见表 1)。

3 白朗白岗蛇绿混杂岩二辉橄榄岩岩块核部的四类辉石及相界反应

3.1 四类辉石

在 XG9-3 铬尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩的薄片可见有四类单斜辉石,分别为:碎基中重结晶单斜辉石(Cpx1)(图版 I-1)、斜方辉石中出溶的单斜辉石(Cpx2)(图版 I-4、5)、贯入单斜辉石(Cpx3)、以及碎粒单斜辉石(Cpx4)。

(1)碎基中重结晶单斜辉石(Cpx1)(图版 I-1):为残留碎基辉石颗粒重结晶作用的产物,蛇纹石化后的橄榄石假像与残留的单斜辉石颗粒间,形成具有“三连点”式平衡变晶结构(图版 I-1)。

(2)斜方辉石中出溶的单斜辉石(Cpx2)(图版 I-4、5):此类单斜辉石赋存于原生斜方辉石或者斜方辉石蚀变形成的绢石假像中,薄片可见出溶单

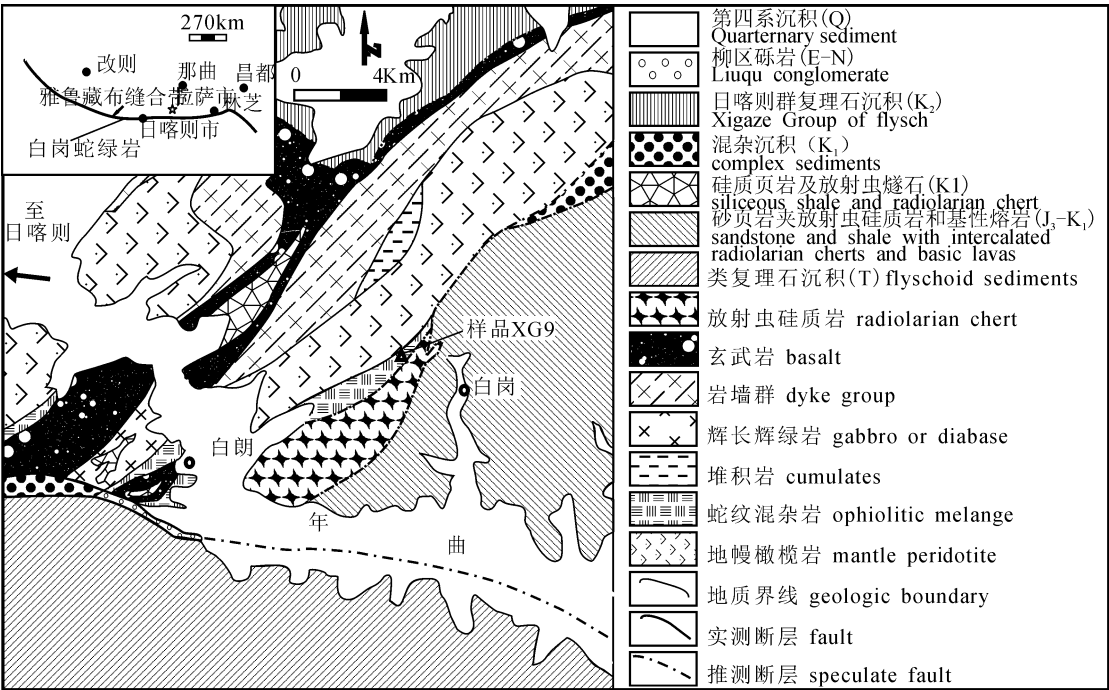


图 1 雅鲁藏布江蛇绿混杂岩白朗县白岗段地质图(据王希斌等,1987 改绘)

Fig. 1 Geological sketch map of the Yarlung Zangbo ophiolitic mélangé near Baigang, Bairang County, Xizang (Tibet) (after Wang Xibin et al., 1987)

斜辉石(Cpx2)呈细密笔直的页理片沿着斜方辉石的解理方向平行分布。

(3)斜方辉石中的贯入单斜辉石条(Cpx3)(图版 I-6):这种单斜辉石条比出溶透辉石(Cpx2)(图版 I-5)页片宽,但数量较少、分布不均匀而且与粒外同类单斜辉石连通。

(4)碎粒单斜辉石(Cpx4)(图版 I-2、4):此类单斜辉石全部呈棱角状,象钉子一样,分布不均,大小不一,以固体“冷侵入”在其它矿物内或粒间,它们之间有明显的界线。而且所有碎粒单斜辉石(Cpx4)都很新鲜,没有被蛇纹石化。而其它矿物橄榄石、斜方辉石均已蛇纹石化、绢石化。碎粒单斜辉石(Cpx4)和其他三种单斜辉石的成分明显不同。

3.2 相界反应

在 XG9-3 的薄片可以分别见到如下三种现象:①独立存在的单斜辉石或尖晶石颗粒;②尖晶石被石榴子石成环带状包围;③单独存在的石榴子石颗粒。经过分析,笔者等认为上述三种现象均与钙质辉石(包括重结晶碎基单斜辉石(Cpx1)、出溶单斜辉石(Cpx2)、贯入单斜辉石(Cpx3))+铬尖晶石→钙铁石榴子石这一相界反应有关:现象①代表当单斜辉石和尖晶石不相互接触时,该相界反应不发生,单斜辉石或尖晶石碎粒被独立保留下来;现象②应当为由于反应物钙质辉石不足而导致其消耗殆尽,使得尖晶石被反应生成的石榴子石成环带状包围,同时视参加反应的两种矿物的多少而形成宽窄不一的石榴子石反应边(图版 I-3、4、5、6);现象③

代表当单斜辉石或尖晶石碎粒被反应完全时,产物全为石榴子石并显原碎粒或出溶页片(图版 I-4、5)、贯入条的假像(图版 I-5、6)。

薄片中没有看到辉石被石榴子石包围的情况,可能是由于单斜辉石相对比尖晶石稳定,以及相界反应的发生主要是尖晶石不稳定导致的。同时从图版 I-3~6 中可见石榴子石反应边的宽窄,除了与原尖晶石碎粒的定向和形状及单斜辉石有关,还与斜方辉石中出溶单斜辉石页片和贯入单斜辉石条的方向密切相关:尖晶石粒界与出溶页片和出溶条带垂直或大角度相交时反应较强烈,石榴子石反应边较宽;如尖晶石粒界与页片和条平行或近平行,则几乎没有反应或反应很弱;介于这二者之间时,交角大比交角小的反应要强,石榴子石边也较宽。这也说明石榴子石是尖晶石与除碎粒单斜辉石外的三种单斜辉石的反应生成物。

另外薄片中可见碎裂铬尖晶石碎粒分布不均,大小不一,说明反应发生前岩石已经被剪切—碎裂。这也表明尖晶石→石榴子石相界反应之前,尖晶石二辉橄榄岩曾经在尖晶石稳定域发生过一次重要的构造作用事件。

之后,越过尖晶石→石榴子石相界趋向石榴子石稳定域,尖晶石不稳定经反应转变为石榴子石,随后被“冻结”在尖晶石—石榴子石域界上,石榴子石反应边包围残留尖晶石,反应休止。也就是说,此时,尖晶石石榴子石二辉橄榄岩发生了“俯冲”向下的运动。

表 1 白朗白岗蛇绿混杂岩中二辉橄榄岩岩块核部、过渡带和包壳样品特征对比表
Table 1 Contrast of three samples from the crustal, mantle and core zone of the
lherzolite block in the Baigang ophiolitic mélange, Bailang County, Xizang (Tibet)

样品编号、命名和采集部位	产出状态	矿物组合	显微结构特征	蚀变特征与其他
XG9-1 包壳尖晶石二辉橄榄岩	松软、构造糜棱岩化,面理褶皱发育	Ol + Spl + Opx + Cpx	辉石呈残余碎粒状,可见辉石出溶纹和扭折带	糜棱岩化→橄榄石蛇纹石化严重→斜方辉石蛇纹石化/单斜辉石次闪石化(呈毛毡状)→片理化→被褶皱。铬尖晶石被强烈氧化
XG9-2 过渡带尖晶石二辉橄榄岩	岩石风化和面理化程度介于 1 和 3 之间	Ol + Spl + Opx + Cpx + Hu	碎斑—碎基结构。碎基变质重结晶。辉石颗粒均见出溶条纹、扭折带。可见“构造冷侵入”现象	橄榄石筛孔假像中见三向针状出溶物(图版 II-1、3 和 4),铬尖晶石被强烈氧化,见细蛇纹石脉和较宽的水镁石脉。
XG9-3 核部尖晶石石榴子二辉橄榄岩	坚硬饼状,面理化轻微。	Ad + Ol + Spl + Opx + Cpx (1,2,3,4) + Hu	铬尖晶石、石榴石新鲜,可见新鲜的碎粒单斜辉石。残留单斜辉石碎基呈“三联点”式平衡变晶结构(图版 I-1)	蛇纹石化严重。橄榄石中见针状出溶物和棒状出溶物;四类单斜辉石;铬尖晶石周围见石榴石反应边

注:Ol—橄榄石;Spl—尖晶石;Opx—斜方辉石;Cpx—单斜辉石;Hu—硅镁石;Ad—钙铁石榴子石。

分散的他形石榴子石碎粒和铬尖晶石、透辉石碎粒被包在蛇纹石化的橄榄石和较大的斜方辉石粒内或粒间,说明尖晶石→石榴子石反应之后,它们曾经一起在相对更浅的条件下受过脆性变形和碎裂作用。

4 样品的矿物学分析测试方法

为了更好地分析样品的岩石学、矿相学特征,笔者等对白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩(XG9-3)样品薄片中的代表性矿物进行了电子探针分析,其分析结果和矿物分子式计算列于表2、3、4。其中无*数据是在中国科学院地质与地球物理研究所由徐平用该所法国产CAMECA SX51型探针仪完成分析测试。测试条件为V=15.00kV,A=12nA,分析细微出溶辉石页片和交代辉石条时,电子束斑为1μm。有*数据是由中国科学院广州地球化学研究所探针室用JOEL公司JXA-8100,15kV,20nA工作条件下进行。@-由中国科学院广州地球化学研究所实验室用EDAX能谱测定。*和@分析结果用Minpet 2.02计算矿物分子式及其阳离子数。

5 白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩代表性矿物成分

5.1 单斜辉石

单斜辉石(如表2)的分析所得总量是在误差范围内,证明它们是新鲜的。根据岩相学分析划分的四类单斜辉石的分子式分别为:

(1) 重结晶碎基单斜辉石(透辉石)——Cpx1(表2序号1*、2*、3@): $(\text{Mg}_{0.889 \sim 0.931}^{2+}, \text{Mn}_{0.001 \sim 0.003}^{2+}, \text{Ca}_{0.0909 \sim 0.923}^{2+}, \text{Fe}_{0.024 \sim 0.028}^{2+}, \text{Ni}_{0.000 \sim 0.001}^{2+}, \text{Na}_{0.015 \sim 0.020}^{+})$ (

表2 白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩不同单斜辉石探针分析数据

Table 2 EMPA analysis results of clino-pyroxene grains from the spinel-garnet lherzolite block in the Baigang ophiolitic mélange, Bailang County, Xizang (Tibet)

序号	1*	2*	3@	4	5	6	7
	重结晶碎基单斜辉石			出溶单斜辉石页片		贯入单斜辉石条	挤入碎粒单斜辉石
SiO ₂	52.605	52.926	53.600	50.898	52.664	49.489	52.247
TiO ₂	0.090	0.076	0.09	0.101	0.030	0.089	0.122
Al ₂ O ₃	3.414	3.092	3.48	3.340	3.767	3.156	3.309
Cr ₂ O ₃	0.821	0.824	0.83	1.239	1.049	1.113	1.012
Fe ₂ O ₃	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
MgO	16.813	17.303	17.17	16.423	17.611	24.000	17.126
CaO	23.170	23.621	23.59	23.371	23.726	15.785	22.861
MnO	0.048	0.082	0.05	0.069	0.116	0.027	0.015
FeO _i	0.907	0.810	0.92	2.493	2.479	6.310	2.551
NiO	0.027	0.018	0.02	0.027	0.000	0.000	0.065
CoO	0.000	0.000	0.02	0.000	0.000	0.000	0.000
ZnO	0.000	0.000	0.01	0.168	0.052	0.000	0.023
Na ₂ O	0.211	0.287	0.22	0.172	0.291	0.249	0.215
K ₂ O	0.003	0.000	0.000	0.002	0.025	0.031	0.000
总量	98.109	99.039	99.97	98.302	101.810	99.358	99.544
FM	3.17	2.97	2.93	2.47	0.43	0.08	5.28
Cr/ACr	0.140	0.153	0.139	0.200	0.160	0.190	0.170
O/(OH)	6	6	6	6	6	6	6
Si ⁴⁺	1.940	1.930	1.939	1.887	1.874	1.757	1.906
Ti ⁴⁺	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.003
Al ³⁺	0.148	0.133	0.149	0.145	0.158	0.132	0.142
Cr ³⁺	0.024	0.024	0.024	0.036	0.029	0.031	0.029
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.051	0.000	0.000	0.026
Mg ²⁺	0.889	0.914	0.927	0.908	0.934	1.270	0.931
Ca ²⁺	0.916	0.923	0.915	0.928	0.905	0.600	0.893
Mn ²⁺	0.001	0.003	0.000	0.002	0.003	0.001	0.000
Fe ²⁺	0.028	0.025	0.028	0.021	0.073	0.187	0.052
Ni ²⁺	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.002
Co ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Zn ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.005	0.001	0.000	0.001
Na ¹⁺	0.015	0.020	0.015	0.012	0.020	0.017	0.015
K ¹⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Σ	4.000	4.000	4.000	3.999	3.999	3.998	4.000
Wo	48.976	48.81	48.904	48.465	47.210	29.164	46.949
En	49.448	49.749	49.526	47.386	48.757	61.697	48.937
Fs	1.577	1.44	1.571	4.148	4.033	9.139	4.114

注: Wo—硅灰石, Fs—铁辉石, En—顽火辉石); FM = $\frac{n(\text{Fe}^{2+}) + n(\text{Mn})}{n(\text{Fe}^{2+}) + n(\text{Mn}) + n(\text{Mg})}$;

Cr/ACr = $\frac{n(\text{Cr})}{n(\text{Al}) + n(\text{Cr})}$ 。

$\text{Cr}_{0.024 \sim 0.027}^{3+}, \text{Al}_{0.065 \sim 0.105}^{3+})_{1.965 \sim 2.000}, (\text{Al}_{0.068 \sim 0.044}^{3+}, \text{Ti}_{0.002 \sim 0.003}^{4+}, \text{Si}_{1.930 \sim 1.953}^{4+})_{2.000} \text{O}_6$; 端元组分变化范围为: $\text{Wo}_{48.68 \sim 49.695} \text{En}_{48.862 \sim 49.749} \text{Fs}_{1.439 \sim 1.577}$ 。

(2) 出溶单斜辉石页片(透辉石)——Cpx2(表

2 序号 4、5): ($Mg_{0.908 \sim 0.934}^{2+}$, $Mn_{0.002 \sim 0.003}^{2+}$, $Ca_{0.928 \sim 0.905}^{2+}$, $Ti_{0.003 \sim 0.001}^{4+}$) $_{2.004 \sim 1.968}$ ($Al_{0.113 \sim 0.126}^{3+}$, $Si_{1.887 \sim 1.874}^{4+}$) $_{2.000}$
 $Fe_{0.026 \sim 0.074}^{2+}$, $Fe_{0.051 \sim 0.000}^{3+}$, $Ni_{0.001 \sim 0.000}^{2+}$, $Zn_{0.005 \sim 0.001}^{2+}$, O_6 ;端元组分变化范围为: $Wo_{48.465 \sim 47.210}$ $En_{47.386 \sim 48.757}$
 $Na_{0.012 \sim 0.020}^{+}$, $K_{0.000 \sim 0.001}^{+}$, $Cr_{0.036 \sim 0.029}^{3+}$, $Al_{0.032}^{3+}$, $Fs_{4.148 \sim 4.003}$ ○

(3) 贯入单斜辉石条(普通辉石)——Cpx3(表

表 3 白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石－石榴子石二辉橄榄岩尖晶石、石榴子石探针分析数据
Table 3 EMPA analysis results of spinel and garnet grains from the spinel－garnet lherzolite
block in the Baigang ophiolitic mélangé, Bailang County, Xizang (Tibet)

序号	1	2	3 *	4	5	6 *	7 *	8 *	9	10@	11@
矿物	铬尖晶石	铬尖晶石	铬尖晶石	铬尖晶石	石榴子石	铬尖晶石	石榴子石 -1	石榴子石 -2	石榴子石	石榴子石	石榴子石
部位	单粒核部	单粒边部	单粒	核	反应边	核	反应边	反应边	单粒	反应边	单粒
SiO ₂	0.01	0.00	0.03	0.02	35.31	0.03	36.15	36.49	35.70	35.67	36.19
TiO ₂	0.01	0.19	0.02	0.15	0.00	0.06	0.06	0.05	0.06	0.07	0.06
Al ₂ O ₃	36.91	36.00	36.70	37.61	0.54	38.17	0.71	0.73	0.72	0.53	0.71
Cr ₂ O ₃	31.43	30.28	30.72	29.43	0.49	29.99	0.17	1.13	1.41	0.11	0.17
Fe ₂ O ₃	2.13	2.62	2.61	1.67	29.34	2.50	31.50	29.47	28.98	29.33	331.44
MgO	14.74	14.41	14.45	14.88	0.08	14.83	0.09	0.18	0.10	0.09	0.09
CaO	0.06	0.07	0.14	0.00	33.49	0.18	33.96	33.92	33.55	33.54	34.25
MnO	0.30	0.18	0.18	0.16	0.06	0.20	0.02	0.05	0.02	0.43	0.21
FeO	14.78	14.61	14.78	14.36	0.00	14.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
NiO	0.22	0.16	0.17	0.18	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
CoO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
ZnO	0.18	0.18	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
Na ₂ O	0.03	0.02	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
总量	100.78	98.74	99.79	98.47	99.43	100.23	99.55	99.07	100.53	100.01	100.01
FM	36.47	36.55	36.73	35.38	29.52	35.24	8.33	12.00	10.71	73.81	57.69
Cr/ACr	36.36	36.08	36.36	34.42	0.38	34.51	13.75	51.03	56.84	11.67	13.92
O/(OH)	32.00	32.00	32.00	32.00	24.00	32.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
Si ⁴⁺	0.00	0.00	0.00	0.01	5.99	0.01	5.94	6.01	5.98	6.01	5.92
Ti ⁴⁺	0.00	0.03	0.00	0.03	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ³⁺	9.95	9.91	9.98	10.28	0.11	10.26	0.14	0.14	0.14	0.11	0.14
Cr ³⁺	5.68	5.59	5.60	5.39	0.07	5.40	0.02	0.15	0.19	0.01	0.02
Fe ³⁺	0.37	0.46	0.45	0.29	3.75	0.43	3.89	3.65	3.65	3.72	3.87
Mg ²⁺	5.02	5.02	4.97	5.14	0.02	5.04	0.02	0.04	0.03	0.02	0.02
Ca ²⁺	0.01	0.02	0.03	0.00	6.09	0.04	5.97	5.99	6.02	6.06	6.00
Mn ²⁺	0.06	0.04	0.04	0.03	0.01	0.04	0.00	0.01	0.00	0.06	0.03
Fe ²⁺	2.83	2.85	2.85	2.79	0.00	2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni ²⁺	0.04	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn ²⁺	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na ¹⁺	0.01	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ¹⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Σ	24.01	23.99	23.97	23.99	16.05	23.95	16.00	16.00	16.02	16.00	16.02
Uv					1.60		0.56	3.74	4.72	0.38	0.56
Ad					91.84		97.41	92.52	92.21	96.66	97.95
Gr					6.08		1.55	2.89	2.61	1.60	0.60
Py					0.34		0.38	0.74	0.41	0.37	0.36
Sp					0.14		0.05	0.11	0.06	1.00	0.48
Al					0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注:表中符号代表含义分别如下:Uv—钙铬榴石,Ad—钙铁榴石,Gr—钙铝榴石,Py—镁铝榴石,Sp—锰铝榴石,Al—铁铝榴石); FM = $\frac{n(Fe^{2+}) + n(Mn)}{n(Fe^{2+}) + n(Mn) + n(Mg)}$; Cr/ACr = $\frac{n(Cr)}{n(Al) + n(Cr)}$; * —广州地球化学研究所电子探针分析;@ —广州地球化学研究所扫描电镜 SEM 能谱分析。

2 序号 6): ($\text{Mg}_{1.270}^{2+}$, $\text{Mn}_{0.001}^{2+}$, $\text{Ca}_{0.600}^{2+}$, $\text{Fe}_{0.187}^{2+}$, $\text{Fe}_{0.181}^{3+}$, $\text{Na}_{0.017}^{1+}$, $\text{K}_{0.001}^{1+}$, $\text{Cr}_{0.031}^{3+}$, $\text{Ti}_{0.002}^{4+}$) $_{2.069}$ ($\text{Fe}_{0.060}^{3+}$, $\text{Al}_{0.132}^{3+}$, $\text{Si}_{1.757}^{4+}$) $_{2.000}$ O_6 ; 端元组分变化范围为: $\text{Wo}_{29.164}$ $\text{En}_{61.697}$ $\text{Fs}_{9.139}$ ○

(4) 挤入碎粒单斜辉石 (透辉石) ——Cpx 4 (表 2 序号 7): ($\text{Mg}_{0.931}^{2+}$, $\text{Ca}_{0.893}^{2+}$, $\text{Fe}_{0.052}^{2+}$, $\text{Fe}_{0.026}^{3+}$, $\text{Ni}_{0.002}^{2+}$, $\text{Na}_{0.015}^{1+}$, $\text{Cr}_{0.029}^{3+}$, $\text{Al}_{0.048}^{3+}$, $\text{Ti}_{0.003}^{4+}$) $_{1.999}$ ($\text{Al}_{0.094}^{3+}$, $\text{Si}_{1.906}^{4+}$) $_{2.000}$ O_6 ; 端元组分变化范围为: $\text{Wo}_{46.949}$ $\text{En}_{48.937}$ $\text{Fs}_{4.114}$ ○

从上列分子式分析可见: 重结晶碎基单斜辉石的成分总体上与出溶单斜辉石接近, 但是 Wo 和 En 一般稍高, 而 Fs 则略低。与碎粒单斜辉石相比, 重

结晶碎基单斜辉石 Wo 平均高 2.37%, En 平均高 0.37%, Fs 平均低 2.61%。出溶辉石页片比碎粒单斜辉石 Wo 高 1.52%, Fs 高 0.03%, En 低 1.55%。贯入单斜辉石条在四种单斜辉石中 Wo 最低, En 和 Fs 最高, 最为突出。贯入单斜辉石条与出溶单斜辉石差异明显, 前者 En 高达 61.70%, 比后者高 14.31%, 而 Wo 仅 29.16%, 比前者低 19.31%。

5.2 铬尖晶石

铬尖晶石 (如表 3) 也较为新鲜的。铬尖晶石有参与反应和未参加反应的两种:

单粒铬尖晶石: 表 3 序号 1, 2, 3 * : 单粒铬尖晶石分子式为: ($\text{Mg}_{5.023}^{2+}$, $\text{Mn}_{0.057}^{2+}$, $\text{Ca}_{0.014}^{2+}$, $\text{Fe}_{2.826}^{2+}$, $\text{Ni}_{0.040}^{2+}$,

表 4 白朗白岗蛇绿混杂岩二辉橄榄岩岩块核部、过渡带样品中针状硅镁石出溶物和蛇纹石电子探针分析数据
Table 4 EMPA analysis results of needle like humite and serpentite grains from the core and mantle zone of the Iherzolite block in the Baigang ophiolitic mélange, Bailang County, Xizang (Tibet)

	1 *	2 *	3 *	4 *	5	6	7	8	9 *
	假像硅镁石				橄榄石变成 的蛇纹石	干算的 橄榄石	斜方辉石变 成的蛇纹石	干算的 斜方辉石	橄榄石变成 的蛇纹石
	XG9-2	XG9-2	XG9-2						
SiO ₂	35.67	31.67	32.25	32.44	41.43	47.88	38.51	44.96	33.49
TiO ₂	0.04	0.02	0.02	0.00	0.07	0.09	0.05	0.06	0.01
Al ₂ O ₃	0.63	0.62	0.78	0.91	0.79	0.91	2.54	2.97	0.85
Cr ₂ O ₃	0.05	0.02	0.00	0.11	0.02	0.02	0.99	1.15	0.32
FeO _t	1.33	1.01	1.67	1.60	7.17	8.29	6.95	8.11	24.40
MgO	28.65	33.25	30.11	30.42	36.66	42.37	35.88	41.89	23.31
CaO	0.21	0.51	0.43	0.20	0.09	0.10	0.45	0.05	0.26
MnO	0.08	0.05	0.08	0.44	0.09	0.10	0.22	0.25	0.34
NiO	0.09	0.06	0.10	0.20	0.17	0.20	0.06	0.07	0.14
CoO	0.02	0.00	0.01	0.07					0.06
ZnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	
Na ₂ O	0.05	0.04	0.06	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.09
K ₂ O	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04
总量	66.85	67.26	65.52	66.43	86.52	99.97	85.65	99.53	83.29
H ₂ O?	33.15	32.74	34.47	33.57	13.48		14.35		
Si	7.33	6.58	6.86	6.82	7.98		7.55		
Ti	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01		0.01		
Al	0.15	0.15	0.19	0.23	0.18		0.59		
Cr	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00		0.15		
Fe	0.23	0.18	0.30	0.28	1.16		1.14		
Mg	8.77	10.29	9.54	9.54	10.53		10.49		
Ca	0.05	0.11	0.10	0.04	0.02		0.09		
Mn	0.01	0.01	0.01	0.08	0.01		0.04		
Ni	0.02	0.01	0.02	0.03	0.03		0.01		
Zn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00		
Co	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00		0.00		
Na	0.02	0.02	0.03	0.01	0.00		0.00		
K	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00		0.00		
总量	16.60	17.35	17.06	17.07	19.92		20.07		

注: FeO_t—全铁作为 FeO。硅镁石总量低是后来蛇纹石化水化强烈, 但其基本成分 SiO₂ 和 MgO 的相对含量基本保持, 干算后符合硅镁石成分。

$\text{Zn}_{0.030}^{2+}, \text{Na}_{0.012}^{1+})_{8.002} (\text{Al}_{9.950}^{3+}, \text{Cr}_{5.684}^{3+}, \text{Fe}_{0.366}^{3+}, \text{Ti}_{0.001}^{4+}, \text{Si}_{0.002}^{4+})_{16.003} \text{O}_{32\circ}$

另一粒为: $(\text{Mg}_{4.968}^{2+}, \text{Mn}_{0.036}^{2+}, \text{Ca}_{0.032}^{2+}, \text{Fe}_{2.848}^{2+}, \text{Ni}_{0.032}^{2+}, \text{Na}_{0.004}^{1+})_{7.920} (\text{Al}_{9.984}^{3+}, \text{Cr}_{5.604}^{3+}, \text{Fe}_{0.452}^{3+}, \text{Ti}_{0.004}^{4+}, \text{Si}_{0.004}^{4+})_{16.048} \text{O}_{32\circ}$

前一粒从核部向边缘, Cr^{3+} 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Mn^{2+} 降低, 而 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Ca^{2+} 升高, 与铬尖晶石边缘的氧化变暗相符。

参与反应铬尖晶石(表 3 序号 4, 6 *): 石榴子石反应边包围的尖晶石成分可以有一定差别, 从其分子式可以看出:

一粒为: $(\text{Mg}_{5.142}^{2+}, \text{Mn}_{0.030}^{2+}, \text{Fe}_{2.785}^{2+}, \text{Ni}_{0.034}^{2+}, \text{Na}_{0.006}^{1+}, \text{K}_{0.000}^{1+})_{7.997} (\text{Al}_{10.277}^{3+}, \text{Cr}_{5.394}^{3+}, \text{Fe}_{0.292}^{3+}, \text{Ti}_{0.026}^{4+}, \text{Si}_{0.005}^{4+})_{15.994} \text{O}_{32\circ}$

另一粒为: $(\text{Mg}_{5.036}^{2+}, \text{Mn}_{0.040}^{2+}, \text{Ca}_{0.044}^{2+}, \text{Fe}_{2.700}^{2+}, \text{Ni}_{0.012}^{2+}, \text{Na}_{0.001}^{1+}, \text{K}_{0.001}^{1+})_{7.834} (\text{Al}_{10.256}^{3+}, \text{Cr}_{5.404}^{3+}, \text{Fe}_{0.428}^{3+}, \text{Ti}_{0.012}^{4+}, \text{Si}_{0.008}^{4+})_{16.168} \text{O}_{32\circ}$

后者 Y 位总量超 0.168, Fe^{3+} 比前一粒高, X 位 Fe^{2+} 较少, 正好少 0.168, 可能是受氧化之故。这种

表 5 白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩
各期单斜辉石温度压力计算结果

Table 5 Temperature and pressure calculation results for 4 generations of clino – pyroxene from the spinel – garnet lherzolite block in the Baigang ophiolitic mélange, Bailang County, Xizang (Tibet)

样品	单斜辉石	单斜辉石	单斜辉石	出溶单斜 辉石页片	出溶单斜 辉石页片	贯入单 斜辉石条	挤入碎粒 单斜辉石
Ca	0.916	0.923	0.923	0.928	0.905	0.6	0.893
Na	0.015	0.020	0.017	0.012	0.020	0.017	0.015
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000
Al	0.148	0.133	0.142	0.145	0.158	0.132	0.142
Cr	0.024	0.024	0.027	0.036	0.029	0.031	0.029
Fe ²⁺	0.028	0.025	0.024	0.021	0.073	0.187	0.052
Ti	0.002	0.002	0.003	0.003	0.001	0.002	0.003
Cr [#]	0.14	0.15	0.16	0.20	0.16	0.19	0.17
α – CaCrTs	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.027
α – en	0.06	0.05	0.05	0.05	0.07	0.35	0.08
A	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
B	0.14	0.15	0.16	0.20	0.16	0.19	0.17
C	1.88	1.79	1.81	1.82	1.90	2.62	2.02
D	1111.28	1056.51	1070.39	1071.25	1119.15	1542.85	1190.66
E	0.92	0.92	0.92	0.93	0.92	0.89	0.91
F	29.17	27.74	28.10	28.12	29.38	40.50	31.26
G	1314.40	1249.63	1266.05	1267.06	1323.71	1824.85	1408.30
Zero	0	0	0	0	0	0	0
T(K)	1146.43	1089.96	1104.06	1106.19	1155.28	1638.37	1236.33
t(℃)	873.28	816.81	830.91	833.04	882.13	1365.22	963.18
P(GPa)	1.868	1.870	1.857	1.926	1.906	3.655	2.265

尖晶石 Cr^{3+} 、 Fe^{3+} 和 Fe^{2+} 比单粒铬尖晶石低, 指示了这些元素通过反应进入石榴子石的趋势。

5.3 石榴子石

石榴子石(如表 3)分析所得总量更是接近 100%, 不含水, 非水榴石。石榴子石也有反应边石榴子石和单粒石榴子石之分:

(1) 反应边石榴子石(钙铁石榴子石)(表 3 序号 5, 7 *, 8 *, 10@): 成分有变化, 单位分子式中阳离子数也是变化的: $(\text{Mg}_{0.021}^{2+} \sim 0.044, \text{Mn}_{0.002}^{2+} \sim 0.062, \text{Ca}_{5.974}^{2+} \sim 6.090, \text{Ni}_{0.000}^{2+} \sim 0.011, \text{Zn}_{0.000}^{2+} \sim 0.003, \text{Na}_{0.000}^{1+} \sim 0.004, \text{K}_{0.000}^{1+} \sim 0.003)_{6.002 \sim 6.137} (\text{Al}_{0.106}^{3+} \sim 0.142, \text{Cr}_{0.014}^{3+} \sim 0.148, \text{Fe}_{3.654}^{3+} \sim 3.892)_{3.920 \sim 4.052} (\text{Ti}_{0.000}^{4+} \sim 0.008, \text{Si}_{5.936}^{4+} \sim 6.012)_{5.944 \sim 5.993} \text{O}_{24}$; 相应地端元组分在一个范围内变化, $\text{Ad}_{91.84 \sim 97.41} \text{Gr}_{1.55 \sim 6.08} \text{Uv}_{0.56 \sim 3.74} \text{Py}_{0.34 \sim 0.74} \text{Sp}_{0.05 \sim 0.14} \text{Al}_{0.00} \circ$

(2) 单粒石榴子石(钙铁石榴子石)(表 3 序号 9, 11@): 不同的单粒石榴子石成分也有些变化, 故分子式为: $(\text{Mg}_{0.025}^{2+} \sim 0.022, \text{Mn}_{0.003}^{2+} \sim 0.030, \text{Ca}_{6.022}^{2+} \sim 5.998, \text{Na}_{0.000}^{1+} \sim 0.004)_{6.050 \sim 6.054} (\text{Al}_{0.142}^{3+} \sim 0.136, \text{Cr}_{0.187}^{3+} \sim 0.022, \text{Fe}_{3.654}^{3+} \sim 3.866)_{3.983 \sim 4.024} (\text{Ti}_{0.007}^{4+} \sim 0.008, \text{Si}_{5.981}^{4+} \sim 5.916)_{5.987 \sim 5.924} \text{O}_{24\circ}$
端元组分变化范围为:
 $\text{Ad}_{92.21 \sim 97.95} \text{Gr}_{2.61 \sim 0.60} \text{Uv}_{4.72 \sim 0.56} \text{Py}_{0.41 \sim 0.36} \text{Sp}_{0.06 \sim 0.48} \text{Al}_{0.00} \circ$

由于参与反应的尖晶石颗粒和单斜辉石颗粒的成分差别, 以及参与反应的程度不同, 因此两种石榴子石成分稍有差别, 但不大。单粒石榴子石中钙铁石榴子石、铬石榴子石和锰铝石榴子石组分比反应边石榴子石中稍高, 而钙铝石榴子石组分稍低。无论反应边石榴子石或单粒石榴子石碎粒都没有铁铝石榴子石。这与尖晶石和钙质辉石反应生成钙铁石榴子石的趋势一致。由于铬尖晶石的核部比边部高 Cr、Mg, 反应彻底的单粒石榴子石的 Uv 和 Py 分子就比反应边石榴子石高; 反应边石榴子石则更高 Ad、Gr 分子。

5.4 橄榄石、斜方辉石

在交代蚀变作用的物理化

学体系中,只有 H_2O 的进出而无其它成分的带进带出被叫做准等化学系,也就是一种准开放体系,即相对 H_2O 等挥发分流体开放,相对其它主元素封闭的体系。

由于 XG9-3 样品中绝大多数橄榄石和斜方辉石已强烈蛇纹石化无法测得原始成分。辉石的通式是: XYZ_2O_6 , 橄榄石结构通式是: $Mg_2(Mg^{2+}, Fe^{2+}, Ni^{2+})_2[SiO_4]$, 蛇纹石的结构通式是: $Mg_6[Si_4O_{10}](OH, F)_8$ 。地幔橄榄岩的橄榄石和斜方辉石(最常见是顽火辉石 $Mg_2Si_2O_6$)都是镁质的,它们和水(H_2O)反应后生成蛇纹石或绢石。笔者等把蛇纹石-绢石化当作一个仅有 H_2O 带入、没有其它成分改变的准开放体系,将表 4 中 5 列 XG9 Serp 和表 4 中 7 列 XG9 Bas 它们各自的含水量扣除干算,结果分别列于表 4 的 6 列和 8 列。计算的橄榄石假像分子式比正常的橄榄石高 SiO_2 , 低 MgO , 而计算的斜方辉石假像的分子式则比正常的斜方辉石低 SiO_2 , 高 MgO 。因此,推测蛇纹石化过程中 H_2O 的加入调整了体系的成分,使蛇纹石化后的橄榄石和斜方辉石假像成分趋向均一化。

6 尖晶石-石榴子石相界反应的讨论及其温压计算

根据上述岩相学分析得出白岗尖晶石二辉橄榄岩的经历是:① 尖晶石域原地幔尖晶石二辉橄榄岩;② 地幔变质橄榄岩底辟上升;③ 俯冲,原地幔尖晶石二辉橄榄岩进入石榴子石域:该变质橄榄岩碎基单斜辉石(Cpx1)重结晶具平衡变质结构——斜方辉石内出溶单斜辉石页片(Cpx2)——贯入单斜辉石(Cpx3)穿过出溶单斜辉石页片;单斜辉石(Cpx1, Cpx 2, Cpx 3)与铬尖晶石反应生成石榴子石;橄榄石中针状出溶物出溶;④折返,再上升,石榴子石、尖晶石和橄榄石斜方辉石及剩余单斜辉石被剪切一碎裂,后蛇纹石(绢石)化;⑤在剪切带中再受力,外来单斜辉石碎粒挤入蛇纹石化岩石中;⑥最后,蛇纹石化时析出的铁质物被氧化,氧化铁将岩石染成棕红色。这时,岩块可能已上升到地表。这样,该岩块就经历了一个“上——下——上”的“N”字形的历程。

因为目前我们还没有有效手段对这些不同阶段准确定年,只能按它们的相对时序,对不同阶段和不同作用的产物分别估算它们形成的温度、压力:①

重结晶碎基辉石阶段;② 出溶单斜辉石阶段;③ 贯入单斜辉石条阶段期;④ 钙质单斜辉石 + 铬尖晶石——钙铁石榴子石反应阶段;⑤ 橄榄石具超高压含水硅镁石阶段;⑥ 挤入的单斜辉石碎粒阶段。

6.1 1、2、3 阶段单斜辉石的温压计

鉴于白岗尖晶石-石榴子石二辉橄榄岩(XG9-3)中的橄榄石和斜方辉石已经全部蚀变为蛇纹石了,以及该岩石中有四种不同成因的单斜辉石存在,因此,笔者等选用单斜辉石地质温压计,以计算它们形成的温度压力。

最新的单个辉石温压计是 2000 年,由 Nimis 和 Taylor (2000)提出的。它的优点是:①综合了 CMS 和 CMAS-Cr 系的 $850 \sim 1500^\circ C$, $0 \sim 6.0 GPa$ 所有已有实验数据,从中得出的温压计比过去许多温压计精度高,压力不确定性在 $P < 4.0 GPa$ 时, 1σ 约 $200 MPa$; $P > 4.0 GPa$ 时,稍稍高于 $300 MPa$;② 他们收集了天然产出的从原始地幔橄榄岩(pyrolite)到难熔的高 Cr 二辉橄榄岩样品,因此适用的天然橄榄岩范围很宽;③ 它们的温压计用于石榴子石橄榄岩时,只要求同石榴子石共生的单斜辉石成分,而且,仅仅需要其中 Cr(Cr_2O_3 被限制在 $< 5\%$)、Al、Na 三个参数即可,不要求石榴子石成分。他们还指出,压力计算中 $CaCrTs$ 有低的安全线 0.003 。大多数分析数据没有 K_2O 或可忽略。虽然 Fe^{3+} 将增加 tschermak 组分数,忽略 Fe^{3+} 将导致 T 计算过低,压力计算会过高,但天然产出的橄榄岩单斜辉石低 Fe^{3+} ,可以忽略(Canil and O'Neill, 1996)因而不需校正。因此,即使是砂样中的单个单斜辉石,如果,它的来源是同石榴子石处于平衡的也可以应用此温压计;④ 他们的温度计和压力计是同时从一个岩石中的同一个单斜辉石中获得,两个公式可以联立迭代计算,同时获得温度 T 和压力 P ;⑤ 计算的温度和压力具有同样的误差,彼此没有影响。

Nimis and Taylor (2000) 以单斜辉石 Cpx 中的 $Cr^\#$ 得出压力计:

$$P = -\frac{T}{1269} \cdot \ln(\alpha_{CaCrTs}^{Cpx}) + 1.5483 \cdot \ln \frac{Cr^\#_{Cpx}}{T} + \frac{T}{713.8} + 10.78 \quad (1)$$

式中: P 的单位为 GPa , T 为绝对温度(K), $\alpha_{CaCrTs}^{Cpx} = n(Cr) - 0.81 \cdot Cr^\# [n(Na) + n(K)]$, $Cr^\# = \frac{n(Cr)}{n(Cr) + n(Al)}$ 。

以单斜辉石 Cpx 中的 En 分子得出温度计:

$$T = [23166 + 392.8 \cdot P] / \{13.25 + 15.35 \cdot n(\text{Ti}) + 4.50n(\text{Fe}) - 1.55 \cdot [n(\text{Al}) + n(\text{Cr}) - n(\text{Na}) - n(\text{K})] + (\ln \alpha_{\text{En}}^{\text{Cpx}})^2\} \quad (2)$$

式中: T 为绝对温度 (K), P 的单位为 GPa,

$$\alpha_{\text{En}}^{\text{Cpx}} = [1 - n(\text{Ca}) - n(\text{Na}) - n(\text{K})] \cdot \left[1 - \frac{n(\text{Al}) + n(\text{Cr}) + n(\text{Na}) + n(\text{K})}{2}\right];$$

上述方程(1)、(2)式联立, 设:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{713.8} - \frac{1}{1269} \cdot \ln(\alpha_{\text{CaCrTs}}^{\text{Cpx}}), \\ B &= \text{Cr}^{\# \text{cpx}}, \\ C &= 392.8 / \{13.25 + 15.35 \cdot n(\text{Ti}) + 4.50n(\text{Fe}) - 1.55 \cdot [n(\text{Al}) + n(\text{Cr}) - n(\text{Na}) - n(\text{K})] + (\ln \alpha_{\text{En}}^{\text{Cpx}})^2\}, \\ D &= 23166 / \{13.25 + 15.35 \cdot n(\text{Ti}) + 4.50n(\text{Fe}) - 1.55 \cdot [n(\text{Al}) + n(\text{Cr}) - n(\text{Na}) - n(\text{K})] + (\ln \alpha_{\text{En}}^{\text{Cpx}})^2\}, \end{aligned}$$

得:

$$\begin{aligned} P &= A \cdot T + 1.5483 \cdot \ln(B/T) + 10.78, \\ T &= CP + D = C [A \cdot T + 1.5483 \cdot \ln(B/T) + 10.78] + D, \end{aligned}$$

简化为:

$$(1 - C \cdot A)T = 1.5483 \cdot C \cdot \ln(B/T) + 10.78 \cdot C + D,$$

设: $E = (1 - C \cdot A)$,

$$\begin{aligned} F &= 1.5483 \cdot C, \\ G &= 10.78 \cdot C + D, \end{aligned}$$

则: $E \cdot T - G = F \cdot \ln(B/T)$

或: $E \cdot T + F \cdot \ln T - F \cdot \ln B - G = 0$ 。

按上述设定将探针分析数据计算的相关阳离子数输入 Excel, 用“规划求解”函数, 迭代计算至 $E \cdot T + F \cdot \ln T - F \cdot \ln B - G = 0$, 即可求得 T , 进而求得 P 。

XG9-3 中四种单斜辉石基本上符合上述条件, 可以应用这一对温压计, 计算结果见表 5。

(1) 重结晶碎基辉石阶段: 873.28℃/1.868 GPa, 816.81℃/1.870 GPa, 830.91℃/1.857 GPa。这一组压力相对比较稳定, 在 1.86 ~ 1.87 GPa 之间, 相差仅 0.01 GPa; 而温度最大相差 56℃, 平均为 840.33℃。

(2) 出溶单斜辉石阶段(斜方辉石中残余),

833.04℃/1.926 GPa, 882.13℃/1.906 GPa, 总体和碎基辉石温度压力较为接近。这同一成因的出溶辉石温度相差 49.09℃, 压力仅相差 0.02 GPa。Nimis and Taylor (2000) 指出, 单斜辉石的 Cr 压力计中, 当 $\text{Na} = 0$, $\text{CaCrTs} = \text{M1}$ 位 Cr 摩尔分数。任何偏差仅仅对非常高 Cr 非常低 Al 有重要影响, 而天然样品中这种情况是不常见的, 因此, 对通常地幔单斜辉石压力计 $\alpha_{\text{CaCrTs}}^{\text{Cpx}}$ 不可能产生强烈的误差。但 CaAlTs , 即 $\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$, 或 CaCrTs 固溶体组分的存在将产生一个高的计算温度, 在温度越高的条件下, 计算温度越高。白岗这里的碎基辉石和出溶辉石内温度相差较大, 压力相差不大, 主要原因可能是与出溶辉石 Ca、Cr、Al、Na、 Fe^{2+} 、Si、Mg 成分不均匀有关。温度取决于 $\alpha\text{-en}$ 高低, $\alpha\text{-en}$ 高, 计算温度就高。另一方面, CaCrTs 或 CaAlTs 高, 计算的压力高。Köhler and Brey (1990) 把 Ca 在橄榄石和单斜辉石之间的分配用作压力计时也指出, Ca 的交换反应有强烈的对温度 T 的依从性。虽然白岗二辉橄榄岩的橄榄石已蛇纹石化, 单斜辉石的 Ca 对温度 T 的依从性会使高 Ca 的出溶辉石计算温度稍高。

(3) 贯入单斜辉石条阶段期: 1365.22℃/3.655 GPa。它的 $\alpha\text{-en} = 0.35$, 是最高的, 温度最高, 相应地压力也最高, 而且以贯入或注入方式挤入顽火辉石, 穿过出溶单斜辉石页片, 说明它可能是构造超高压条件下的表现。

(4) 挤入的单斜辉石碎粒阶段: 963.18℃/2.265 GPa, 高于碎基重结晶辉石和出溶辉石, 仅次于贯入单斜辉石。 $\alpha\text{-en} = 0.08$, 温度压力居于 1、2 组和 3 组之间。推测它不是尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩原有的, 而是来自一个温度压力高于 1、2 阶段含单斜辉石的岩石的。

6.2 第 4 阶段钙质单斜辉石 + 铬尖晶石 → 钙铁石榴子石反应温压估算

白岗的石榴子石探针分析总量接近 100%, 不含水, 非水榴石; 尖晶石反应生成石榴子石也不可能在生成异剥钙榴岩的低温条件下发生。因此, 白岗尖晶石—石榴子石反应, 代表了一个域界上的单变反应, 并有趋向石榴子石域一侧的趋势, 可以用来限定其反应的温压条件。但, 白岗尖晶石—石榴子石相界反应发生在钙质单斜辉石与铬尖晶石之间, 产物主要是钙铁石榴子石, 与现有以 Mg 质橄榄石、Mg 质辉石和尖晶石反应产生的以镁铝榴石为特征的尖晶石橄榄岩和石榴子石橄榄岩的相界反应实验和相关温压限定不同。另一方面, 白岗尖晶石—钙铁石

石榴子石反应处于准稳定状态,石榴子石和单斜辉石之间也只能算是准稳定平衡。目前,还没有任何尖晶石—石榴子石温压计,而石榴子石—单斜辉石 $\text{Mg}-\text{Fe}^{2+}$ 交换温压计不适用于无 $\text{Mg}-\text{Fe}^{2+}$ 交换的“Ca 质辉石 + 尖晶石 $\rightarrow$ 钙铁石榴子石”反应温度压力的限定。笔者等拟以 Mg 质矿物与尖晶石反应产生的相界,并作适当的 Ca、Cr 校正,来估算白岗尖晶石—石榴子石相界反应的温压条件。

Green and Ringwood (1967) 用设定的未分异原始地幔 pyrolite 做高压石榴子石稳定域的实验研究中,石榴子石出现的反应有两个:

(1) 尖晶石 + 斜方辉石 $\rightleftharpoons$ 橄榄石 + 石榴子石 ($\text{MgAl}_2\text{O}_4 + 4\text{MgSiO}_3 \rightleftharpoons \text{Mg}_2\text{SiO}_4 + \text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$);

(2) 含铝辉石 $\rightleftharpoons$ 石榴子石 + 辉石 (低铝)。

他们指出,低压组合中尖晶石的作用对温度和总成分很敏感;1300℃ 以上,pyrolite 中尖晶石是不存在的。石榴子石在 2.4 GPa, 1300℃/3.1 GPa, 1500℃, 可通过反应 (2) 首次出现。而在 2.1 GPa, 1100℃/2.4 GPa, 1300℃, 即 < 1300℃, 石榴子石通过反应 (1) 消耗尖晶石而出现。通过反应 (1), 形成的石榴子石量取决于辉石中的 Al_2O_3 , 在 1100 ~ 1500℃ 范围内, 反应生成的石榴子石量会显著增加, 相应的会消耗更多的辉石中的 Al_2O_3 。Medaris et al. (1990) 介绍了另一个消耗尖晶石形成石榴子石的例子。波希米亚地块 Mohelno 尖晶石—石榴子石橄榄岩岩体也是靠消耗尖晶石形成石榴子石, 其形成的条件是 1265℃, 2.79 GPa 到 1070℃, 2.34 GPa。白岗的情况就是通过靠消耗尖晶石以形成石榴子石的反应 (1), 若如此, 其形成条件在 1100 ~ 1300℃, 2.3 ~ 2.7 GPa 之间。

Ringwood (1967) 在 0 ~ 25 GPa, 900℃ 左右, 研究了石榴子石构造中辉石固溶体溶解度并指出, “10 GPa 左右, 镁铝石榴子石中顽火辉石的溶解度突然增加, 导致成分为 $\text{Mg}_3(\text{AlMg}_{0.5}\text{Si}_{0.5})\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 石榴子石形成。这种结果意味着一种辉石—石榴子石转变的出现, 这种新生石榴子石热动力学上是稳定的。地幔中这种转变可能是重要的, 在地幔中这种转变发生在约 350 km 深处, 标志着过渡带开始”。O' Hara et al. (1971) 指出, 尖晶石二辉橄榄岩和石榴子石二辉橄榄岩之间的相界在 1300℃ 和 1450℃ 之间强烈弯曲; 在 1200℃ 之下, 相界几乎平行于 $P-T$ 图的 T 轴。相界所处深度对于地温梯度的变化并不敏感。在正常陆壳中, 石榴子石橄榄岩相对于尖晶石橄榄岩是准稳定的。Kalt and Altherr (1996) 报

道德国 Variscan 和 Schwarzwald 两个石榴子石—尖晶石橄榄岩处在 680 ~ 770℃, 1.4 ~ 1.8 GPa 的石榴子石—尖晶石稳定域内, 其中一个经历过 790℃, < 1.8 GPa 的尖晶石橄榄岩稳定域发育史。另一个保留了石榴子石和尖晶石的橄榄岩可能是在更高压力下在石榴子石橄榄岩稳定域中达到平衡的。Milholland and Presnall (1998) 报告一个关于确切在干固相线上 1575℃, 3 GPa 石榴子石二辉橄榄岩向尖晶石二辉橄榄岩的转变实验。白岗尖晶石—石榴子石的反应关系证明它的反应在石榴子石稳定域发生, 而尖晶石被保留了下来。

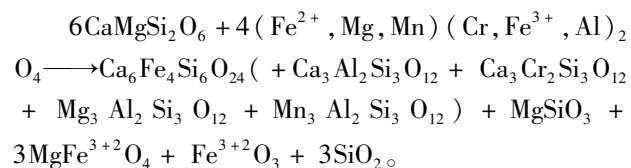
Ca 在尖晶石—石榴子石反应中的作用对白岗样品非常重要。Ringwood (1967) 根据上述实验还指出, “类似的关系在富 Ca 辉石和石榴子石中也存在”。这就是说, 这种辉石—石榴子石转变也是适用于白岗的。Obata and Morten (1987) 指出, 尖晶石二辉橄榄岩中, 尖晶石转变为石榴子石时, 石榴子石成核速率缓慢, Ca 的扩散速率快到足以将温度降低到 ~800 ~ 850℃ 而在辉石之间维持着平衡。Shah et al. (2005) 描述的波希米亚地块 (Bohemian Massif) Uhrov 蛇纹石化石榴子石橄榄岩中富 Cr 尖晶石在石榴子石和单斜辉石中成包体, 石榴子石累进地按尖晶石反应形成富 Mg (Py69, Grs11, Alm18) 石榴子石, 而尖晶石为富 Al 铬铁矿 $\text{Mg}_{0.54}\text{Fe}_{0.47}\text{Al}_{0.73-1.0}\text{Cr}_{0.8-1.19}\text{O}_8$ 。形成条件约 4 GPa, 1000℃。他们指出, 在榴辉岩中富 Ca 石榴子石的存在表明, 降压紧跟着快速冷却。看来, Ca 在辉石—石榴子石反应中扩散速率快, 可能导致反应趋向降温降压。但是, Ca^{2+} 离子半径比 Mg^{2+} 和 Fe^{2+} 大, 在高压下参与钙质辉石反应生成钙质石榴子石时, 势必要求比镁/铁质石榴子石更高的压力。陈鸣和谢先德 (2000) 在谈到陨石中天然冲击超高压相新矿物时表示, “钙铁辉石是石陨石中的常见矿物, 它在高压下发生固态相变成为钙铁榴石是预料之中的, 笔者相信将来有可能在陨石中找到其天然产状”。

值得注意的是 Cr 的影响。MacGregor (1970) 和 O'Neill (1981) 指出, Cr 优先使含尖晶石组合稳定, 而 Fe^{2+} 相反, 使 Spl - Grt 转变转向更低压力。Obata and Morten (1987) 谈到意大利 Nonsberg 含 Grt + Spl 的尖晶石二辉橄榄岩时指出, 尖晶石二辉橄榄岩中尖晶石的 $\text{Cr}^\# = 0.13 \sim 0.16$ 不及石榴子石 + 尖晶石二辉橄榄岩的 0.38 ~ 0.50 高。Spl - Grt 转变反应随着 $\text{Cr}/(\text{Cr} + \text{Al})$ 比值增高而移向更高的压力, 尖晶石必定作为一个准稳定相保留下来, 因为, 石榴

子石成核速率缓慢。Stephan (2004) 的高温高压简化成分实验中,从尖晶石橄榄岩向石榴子石橄榄岩转变, $\text{MgCr}_2\text{O}_4 + 2\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6 = \text{Mg}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12} + \text{Mg}_2\text{SiO}_4$ 单变反应,在 1200℃ 和 1600℃ 之间的 P-T 域中有一个负斜率。Cr 会把石榴子石出现 (garnet-in) 的反应转向比以前预期的更高的压力。而且,在含 Cr 系中, P-T 域存在在石榴子石和尖晶石共生域。

Akaogi and Akimoto (1977) 对 4.1 ~ 20 GPa, 850 ~ 1450℃ 的 $\text{Mg}_4\text{Si}_4\text{O}_{12} - \text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 系和 3 ~ 10.5 GPa, 1000 ~ 1300℃ 的 $\text{Fe}_4\text{Si}_4\text{O}_{12} - \text{Fe}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$ 系作了辉石—石榴子石固溶体平衡实验研究。他们说,假定是 pyrolite 地幔,在 150 km 左右,辉石开始同已经存在的富镁铝石榴子石的石榴子石反应。在 > 400 km 时,辉石—石榴子石转变广泛发生,但是,转变为复杂的石榴子石固溶体的最有效转变发生在 450 ~ 540 km, 540 ~ 590 km 间预期是稳定的。在更大的深度,它将分解为变化了的尖晶石或尖晶石、斯石英和石榴子石固溶体,固溶体带有少量辉石。

不同铬尖晶石颗粒或铬尖晶石颗粒不同部位的成分、单斜辉石的成分和数量及反应程度不一样,铬尖晶石 + 单斜辉石 → 石榴子石这个反应难以准确定量,白岗“尖晶石—石榴子石反应生成钙铁石榴子石”的反应可能是:



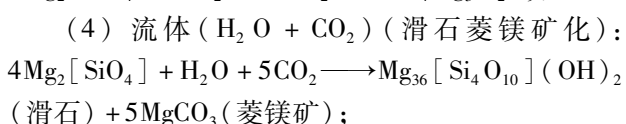
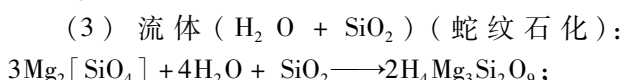
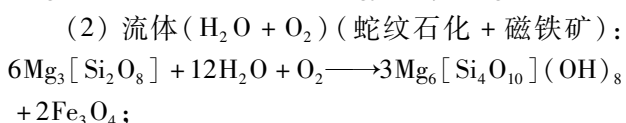
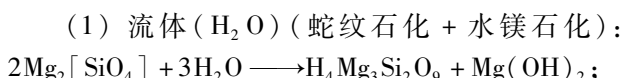
根据这个反应推测,产物中与钙铁石榴子石共生的可能还有镁铁尖晶石、第二世代顽火辉石 En2 (后来已变为绢石),以及高压含铁矿物和高压石英类矿物,但是在蛇纹石化和氧化过程中可能它们没有能保留下来或者我们还没有发现。

综合上述,白岗尖晶石—石榴子石反应体系属于 CMFACrS 系,反应可能发生在 1100 ~ 1300℃, 2.3 ~ 2.7 GPa 之间。考虑到 Ca-Cr 的作用,因此,考虑到钙质辉石 + 铬尖晶石 → 钙铁石榴子石反应是在贯入单斜辉石 Cpx3 之后,因此钙铁石榴子石生成压力可能超过贯入单斜辉石,计算的压力可能趋高,同时温度也增高,甚至象波希米亚 Uhrov 石榴子石橄榄岩那样接近 4GPa。

6.3 第5阶段橄榄石具超高压含水硅镁石形成温压估算

橄榄石假像中的针管状出溶物:图版 II-1、3 和 4 XG9-2 中橄榄石假像中的针管状出溶物不仅在白

岗发现,在西藏班公湖—怒江带好多蛇绿岩质蛇纹石化橄榄石中都有发现,其中以洞错最好(另文讨论)。在洞错橄榄岩的橄榄石中针状出溶物定向排列,有的完全分布在橄榄石颗粒内部,有的一半在蛇纹石化残留橄榄石颗粒内部,一半在橄榄石蛇纹石化的蛇纹石中。白岗的针管状出溶物虽然处在蛇纹石集合体中,但与其它像尖晶石 → 钙铁石榴子石具有超高压变质特征现象同时出现,而在其它没有超高压变质特征的蛇纹石化橄榄岩中没有发现这种针状矿物。虽然白岗只发现这一块标本,而且蛇纹石化强烈,但这些针状出溶物与图版 II-2 中由 Richard Wirth 等人(2001)在 8GPa, 1300K 合成实验中观察到的橄榄石水化成的针状钛斜硅镁石形态也是非常相似的。这些针状物非常微小,对白岗和洞错针状出溶物探针分析时,不得不把电子束约束到 1μm 以瞄准它们。笔者等看到,电子束打上以后,会爆炸出一个小泡,暗示水或其它挥发分物质在高能量(高温)电子束的打击下炸裂并逃逸了。橄榄石 → 流体蚀变视外来流体成分不同,有如下反应:



显然,白岗样品中有水镁石脉,没有磁铁矿、滑石、菱镁矿或 SiO_2 变种,因此,一方面说明原超高压橄榄石成分是高 Mg 变种;另一方面说明只发生了蛇纹石化,其蚀变过程中的流体应该主要是 H_2O 。

这种针管状出溶物在包壳 XG9-2 和包体 XG9-3 中都很发育。虽然因其颗粒微小,分析困难,但测得较大颗粒的数据(表 4 中 1、2、3、4)有如下特征:① 四个测点成分是比较稳定的;② 主要成分是 SiO_2 、 MgO ;③ SiO_2 、 MgO 两种成分有变化,但在有限范围内变化,分别是 31.67 ~ 35.67, 28.65 ~ 33.25, 平均值分别是 33.006 和 30.608;④ 总量不足,变化范围是 65.52 ~ 67.26, 平均值是 66.515。缺失部分被假定为 H_2O 或其它挥发分物质;⑤ 含这样大量的结构水矿物显然自然界并不存在,因此,原始矿物可能是含结构水的层状构造矿物。应当为在橄榄石蛇纹

石化时,原被容纳在橄榄石中的针状管状出溶物沿结构层裂解被大量导入层间吸附水,使其水量大增,但又被限定在一定范围内,而没有使矿物基本结构破坏,从而,其形状仍保持原样;⑥ 由 SiO_2 、 MgO 和 H_2O 组成的矿物只能是蛇纹石类和硅镁石族矿物。但是,这种针状出溶物和橄榄石及斜方辉石变成的蛇纹石成分明显不同,特别是总量、 FeO 及 SiO_2 比蛇纹石低,而 Na_2O 和 K_2O 比蛇纹石高(见表4)。结合上述特征来看,它们不是橄榄石变成的蛇纹石。⑦ 岩石中水镁石化和水镁石脉发育,可能是硅镁石族矿物分解,排出水镁石的结果。因此,笔者等采用了通常的把总量中不足部分作为水扣除,将 SiO_2 、 MgO 计算结果为硅镁石是合理的,推测这些针状出溶物原来是硅镁石族矿物也是合理的。硅镁石族的通式是:

$$n[\text{M}_2\text{SiO}_4] \cdot [\text{M}_{1-x}\text{Ti}_x(\text{F},\text{OH})_{2-2x}\text{O}_{2x}],$$

这儿, $\text{M} = \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Ni}, \text{Ti}$ ($0.25 < x < 0.5$), $n = 1, 2, 3, 4$ 。硅镁石族矿物的共同特征是其单位晶胞中都有一个水镁石层;不同硅镁石亚种的单位晶胞中的橄榄石层则不同:硅镁石是 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ 层与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 互层的层状硅酸盐:块硅镁石:一层 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ 夹一层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ($\text{Mg}[\text{SiO}_4] \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$);粒硅镁石:二层 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ 夹一层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ($2\text{Mg}[\text{SiO}_4] \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$);硅镁石:三层 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ 夹一层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ($3\text{Mg}[\text{SiO}_4] \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$);斜硅镁石:四层 $\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$ 夹一层 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ($4\text{Mg}[\text{SiO}_4] \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2$)。它们中无论哪一种的橄榄石层蛇纹石化时,都可能排出水镁石成分。超高压橄榄石中的硅镁石出溶体在橄榄石蛇纹石化时和蛇纹石这种含水矿物成分上是接近的,橄榄石不存在了,而硅镁石基本上可以和蛇纹石共存而保留下来。硅镁石类本来就是层状结构的含层间水的矿物,蛇纹石化时沿结构层贯入不同量的水体积膨胀一些,形态和方位改变一些也是不可避免的。但还是可以看出原在橄榄石中的方位是定向排列的,这正是出溶物的重要特征(图版 II-1、3、4)。

事实上, Yamamoto and Akimoto (1974, 1977) 在高温高压下合成了无 Ti 粒硅镁石和斜硅镁石。Müller and Wenk (1978) 说, 钛粒硅镁石和钛斜硅镁石 (001) 的堆垛无序是普遍的特征。White and Hyde (1982) 也观察到硅镁石族矿物平行 (001) 面晶格间距的无规律性。硅镁石和粒硅镁石部分呈块状粘连交生也是普遍出现的。Dymek et al. (1988) 也报道过蛇纹岩橄榄石中钛粒硅镁石和钛斜硅镁石

的交生页片。Jones et al. (1969) 指出, 非常细的一个以上的硅镁石族矿物的附生交生会导致非理想的化学计量系数。Richard et al. (2001) 在 8 GPa, 1300 K 和无 F 含 TiO_2 水流体实验中, 橄榄石是不稳定的, 早期在原始橄榄石中生长纳米级大小的钛斜硅镁石 ($\text{Ti} - \text{Cl}$) + Opx 混合物。更广泛的反应是橄榄石由钛斜硅镁石 ($\text{Ti} - \text{Cl}$) 和钛粒硅镁石 ($\text{Ti} - \text{Ch}$) 间层构成。就是说橄榄石水化成钛斜硅镁石 ($\text{Ti} - \text{Cl}$) 和钛粒硅镁石 ($\text{Ti} - \text{Ch}$) 反应是靠消耗橄榄石形成的。完全由 $\text{Ti} - \text{Cl} + \text{Ti} - \text{Ch}$ 页片构成的颗粒代表已被完全代替的橄榄石颗粒。一组页片的化学成分接近 $\text{Ti} - \text{Cl}$, 稍稍高 SiO_2 (36.4% ~ 37.9%), 低 TiO_2 (4.3% ~ 6.7%) 和 FeO 也稍高 (6.2% ~ 7.7%)。第二组更类似于 $\text{Ti} - \text{Ch}$ 化学成分, 稍低 SiO_2 (34.9% ~ 36.2%), 富 TiO_2 (6.1% ~ 8.1%), 低 FeO (6.1% ~ 6.8%)。

Richard et al. (2001) 指出他们实验的重要意义在于: ① Ti 和 H 的晶间和晶内迁移在类似地幔温度和实验室时间尺度容易观察到; ② 在这些条件下, 含水相成核容易出现; ③ 广泛生长的 $\text{Ti} - \text{Cl}$ 和 $\text{Ti} - \text{Ch}$ 完全代替橄榄石的页片表明它们比橄榄石稳定, 橄榄石向 $\text{Ti} - \text{Cl}$ 的转化在含水流体存在的俯冲带水再循环进深部地幔处是普遍的。在俯冲带之上地幔楔中压力大于 7 GPa (深度超过 200 km) 是合理的环境。实验是 8 GPa, 意味着深度可以 > 250 km。

由于橄榄石和斜方辉石已经蚀变, 无法从它们原始成分和岩石结构获得它们形成的温压条件, 我们就可用 Richard et al. (2001) 实验和其它关于硅镁石族矿物计算的温度压力值来限定。橄榄石假像中还有一种平行排列的未知棒状出溶物(图版 II-3、4)。这些证据证明它们是深部地幔超高压环境生成物。

许志琴等(2003)在东海超深钻预先孔 (CCSD-PP1) 中获得石榴子石橄榄岩。在石榴子石内单斜辉石包裹体中发现钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶条和出溶片晶。根据石榴子石中包裹体的成分计算包裹体的形成温压条件为, $t = 716 \sim 914^\circ\text{C}$, $P = 4.8 \sim 5.1 \text{ GPa}$ 。根据钛斜硅镁石出溶体的 $X_{\text{OH}} = 1$, $X_{\text{F}} = 0$, $X_{\text{Fe}} = 0.074 \sim 0.094$ (平均 0.082), $X_{\text{Ti}} = 0.41 \sim 0.74$ (平均 0.56), 估算钛斜硅镁石出溶结构形成在压力 > 3.5 GPa, > 850°C, 这种出溶结构记录了该岩石在早期折返过程中仍处在超高压变质环境中。

Yang (2003) 在江苏东海芝麻坊超高压石英长石片麻岩中,发现同榴辉岩块一起的石榴子石辉石岩里富含钛斜硅镁石。他用几种方法计算的温度压力是 4.2 GPa 左右,760℃ 左右。

白岗 XG9-2 尖晶石二辉橄榄岩和 XG9-3 尖晶石石榴子石二辉橄榄岩的橄榄石假像内部和粒缘都有这种针状出溶物,不过,前者的硅镁石比后者粗些,而且它们的 TiO₂ 都不高,在 0.000% ~ 0.035% 内。虽然不能确定白岗存在哪一种硅镁石,或是否两种硅镁石都存在,但白岗这些橄榄石—硅镁石族矿物应该属于超高压产物。根据与上述实验和观察计算的数据对比,白岗硅镁石族矿物可能形成在 $t = >850^{\circ}\text{C}$, $P \approx 4.2\text{ GPa}$ (深度 $> \approx 130\text{ km}$) 的环境。

6.4 橄榄石蛇纹石化—斜方辉石绢石化阶段的温压估算

相当于绿片岩相,温压条件分别在 300℃ 左右,和 0.2 ~ 0.5 GPa。

7 白岗尖晶石—石榴子石相二辉橄榄岩包块地质意义的讨论

众所周知,斜长石二辉橄榄岩代表几乎未亏损的地幔岩,因而是地幔橄榄岩的重要成分。由于洋壳比陆壳薄得多,洋壳下的地幔橄榄岩在较小的压力下,较之陆下地幔橄榄岩更易部分熔融。在不同部分熔融程度下,斜长石—单斜辉石—斜方辉石等矿物依次发生熔融,相应地残留下亏损程度越来越大的二辉橄榄岩—方辉橄榄岩—纯橄岩。由于蛇绿岩是大洋扩张脊的产物,因此,可以有斜长二辉橄榄岩产出,显然又比亏损橄榄岩少见。它的出现与否就能说明地幔成分及其部分熔融程度和岩浆演化。陆下地幔则与洋下地幔大不一样,由于陆壳比洋壳厚得多,陆下地幔较难熔融;而且,由于压力增大,同样的斜长二辉橄榄岩,则可随压力增大,依次出现斜长石→尖晶石→石榴子石相变,相应地为斜长石二辉橄榄岩→尖晶石二辉橄榄岩→石榴子石二辉橄榄岩。在地幔橄榄岩中,石榴子石二辉橄榄岩的形成条件是压力 $> 3\text{ GPa}$, 深度 $\geq 75\text{ km}$, 因此它可出现在高压变质带。白岗蛇绿混杂岩中的尖晶石—石榴二辉橄榄岩中的尖晶石→石榴子石的相界反应与高压变质带有关。因此推测在喜马拉雅造山期由于属于冈瓦纳大陆的印度板块向欧亚板块的逆冲,欧亚板块相对于印度板块深俯冲作用导致这一可能是产于相对低压下洋壳的、相对亏损的尖晶石二辉橄榄岩,在造山作用中被卷入俯冲板片,从而

使原洋壳地幔尖晶石二辉橄榄岩发生了重新由浅部进入深部,由相对低压转入相对高压的由尖晶石相转变为石榴子石相的作用过程,其后被两个板块再次夹挤而后重新上升,发生构造混杂所致。

总结上述温度压力数据并把它们投入图 2 中,我们可以看到:

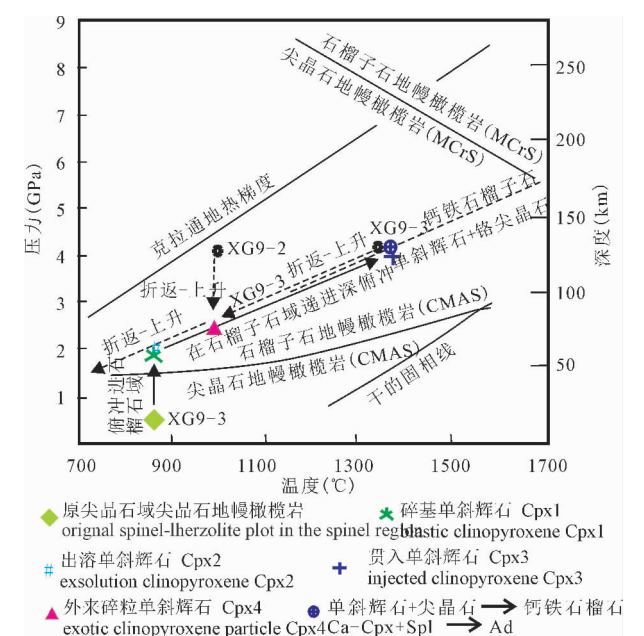


图 2 西藏白朗白岗蛇绿混杂岩中二辉橄榄岩岩块核部 (XG9-3) 和过渡部位 (XG9-2) 样品温度、压力在相图中的投图 (据 Stephan, 2004)

Fig. 2 Pressure and temperature plots in Phases transition diagram for Baigang samples (XG9-2 and XG9-3) from the mantle and core zone, respectively, of the lherzolite block in the Baigang ophiolitic mélangé, Bailang County, Xizang (Tibet). (By Stephan, 2004)

图中给出无 Cr CMAS (CaO - MgO - Al₂O₃ - SiO₂) 体系和无 Al MCrs (MgO - Cr₂O₃ - SiO₂) 体系中尖晶石—石榴子石相变边界, 40mW/m² 克拉通地热梯度线, 干固相线 (据 Millholland and Presnall, 1998) Solid lines in the diagram are: phase boundaries between spinel and garnet in Cr-free CaO - MgO - Al₂O₃ - SiO₂ system and Al-free MgO - Cr₂O₃ - SiO₂ system, respectively, of Craton (40mW/m²), Dry solidus phase line according Miholland and Presnall, 1998. Lines with arrow show the evolution of temperature and pressure for the samples in Baigang ophiolitic mélangé

(1) 尖晶石域原尖晶石二辉橄榄岩的温度压力已无从获得, 由于从尖晶石相转变为石榴子石相对压力敏感, 相对对温度不很敏感, 推测它的温度可能与下面的俯冲期第一阶段重结晶碎基辉石阶段温度接近, 压力较低, 处于尖晶石域内。

(2) 除尖晶石域原尖晶石二辉橄榄岩外, 所有

数据点均投入地幔石榴子石域,但有各自的分布规律。这说明,XG9-3 尖晶石—石榴二辉橄榄岩岩块、包裹该岩块的 XG9-2 尖晶石二辉橄榄岩包壳及外来挤入的单斜辉石所代表的岩石都卷入了俯冲作用,处在俯冲带内,均为混杂岩块。

(3) XG9-3 尖晶石—石榴二辉橄榄岩岩块的碎基辉石一出溶辉石—贯入辉石和尖晶石—石榴子石反应完全在一条正斜率直线上,它们分别达到约 $70\text{km} - 75\text{km} - 125\text{km} - \geq 130\text{km}$,指示它们沿俯冲带在地幔石榴子石域的递进变质,随着深度加深,温度压力同步增长。但是,贯入辉石是所有单斜辉石中计算的温度压力最高的,它在 $P - T$ 图中折向至更高的温度压力区,压力达 3.655 GPa ,深度达 125km ,趋向具出溶硅镁石的橄榄石。以深度表示压力时,这条直线的斜率可大致代表俯冲带倾角 $\geq \angle 30^\circ$ 。

(4) 辉石—石榴子石温压线夹在无 Cr 尖晶石—石榴子石转变线与无 Al 尖晶石—石榴子石转变线之间,更靠近前者并与前者近似平行,向着增温增压方向演化。这与白岗铬尖晶石—含钙铬石榴子石分子的钙铁石榴子石 CMFCrS 系相符,其温压单变线应处于比无 Cr 的 CMAS 系尖晶石—石榴子石转变线更高压一侧,但温度比无 Al 尖晶石—石榴子石转变线低得多。

(5) 除尖晶石域原尖晶石二辉橄榄岩外,所有数据点均投入在无 Cr 尖晶石—石榴子石转变线与克拉通地温梯度线之间,更靠近干固相线,说明这些岩石均没有被熔融,处于变质作用状态。其中最靠近干固相线的 XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩处于无水“干”状态中。

(6) 在后来的蛇纹石化前,具出溶硅镁石—橄榄石的 XG9-2 尖晶石二辉橄榄岩处于相对冷的、含水的“湿”状态中,暗示可能是洋壳型地幔橄榄岩,带着含水洋壳俯冲在 XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩之下,两者都处于俯冲带之上的楔形区。由于前者包裹并屏蔽了作为岩块的后者,铬尖晶石—钙铁石榴子石转变被中止、“冻结”。

(7) 当 XG9-2 洋壳型地幔橄榄岩俯冲至 $\geq 130\text{km}$ 深处时,水进入橄榄石形成硅镁石。同时使被它包裹的 XG9-3 的橄榄石中也发育硅镁石,但 XG9-3 中的硅镁石比 XG9-2 的小些、少些,说明洋壳型地幔橄榄岩的水也部分进入了 XG9-3,硅镁石的形成作用也波及到 XG9-3 “干”的尖晶石石榴子石二辉橄榄岩。

(8) 我们看到碎基辉石一出溶辉石—贯入辉石—钙铁石榴子石连线正好通过了外来碎粒辉石,这一方面说明它们可能都是相关的一套超镁铁质岩的岩块,这和它挤入蛇纹石化橄榄岩的关系也是一致的。因此,尽管它是单个辉石,使用 Nimis 的单个单斜辉石温压计是准确的。另一方面,这种线性一致关系还说明,尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩的折返基本上是按“原路返回”的。

(9) 从 XG9-2 蛇纹岩化尖晶石二辉橄榄岩包裹 XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩和外来单斜辉石同时挤入进这两种岩石中,以及在 $P - T$ 图上,XG9-2 具硅镁石出溶物橄榄石和外来单斜辉石温度相近,只是压力更高,它们的连线平行 P 轴来看,这些指示 XG9-2 蛇纹岩化尖晶石二辉橄榄岩从下向上折返时穿过了并带着 XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩和外来单斜辉石,一同返回至浅处,蛇纹石化后,再进一步被掘蚀至地面。

(10) 笔者等推测,特提斯洋关闭,洋壳俯冲向深部,导致超高压变质作用发生;而以印度陆块为代表的冈瓦纳大陆与欧亚大陆碰撞挤压时,由于两边夹挤,将俯冲带之上的楔形区挤出,是导致上述这些岩块折返上升的动力。但是,XG9-2 蛇纹岩化尖晶石二辉橄榄岩代表一个洋壳地幔橄榄岩似乎没有问题,那么,XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩是否也是一个老洋壳的地幔橄榄岩?若是,则应该存在一个更老的蛇绿岩。若不是,那么,它是陆下地幔吗?还有那些外来的单斜辉石来自何处?它们的原岩是什么?原岩的性质和成因意义又是什么?这些,限于样品有限和复杂的野外产出情况没有完全查清而没有根本解决。虽然困难,但这些都要求我们要收集更多的样品,尤其是那些包体,要更细致地去研究这些岩石和地质体的产出,查清它们的相互关系。一个关于钙质辉石与铬(铁)尖晶石反应生成钙铁石榴子石的实验研究也是非常必要的。

8 结论

笔者等研究了西藏白朗白岗蛇绿混杂岩中尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩岩块核部(XG9-3)和过渡部位(XG9-2)的矿物学成分和其中存在的相界反应,并利用地质温压计计算了其所代表的温压条件。结果显示:

(1) 核部 XG9-3 尖晶石—石榴二辉橄榄岩岩块的四种单斜辉石和尖晶石—石榴子石反应所代表的温压条件在相图中投点在一条正斜率直线上,分

别达到约 70km – 75km – 125km – ≥ 130 km, 指示它们沿俯冲带在地幔石榴子石域的递进变质。其中, 贯入辉石是所有单斜辉石中计算的温度压力最高的, 压力达 3.655 GPa, 深度达 125km。以深度表示压力时, 这条直线的斜率可大致代表俯冲带倾角 $\geq 30^\circ$ 。

(2) 过渡部位(XG9-2)和核部(XG9-3)中均发育硅镁石, 但 XG9-3 中的硅镁石比 XG9-2 的小些、少些; 且 XG9-3 中可见铬尖晶石—钙铁石榴子石转变被中止、“冻结”。说明在后来的蛇纹石化前, 具出溶硅镁石—橄榄石的 XG9-2 尖晶石二辉橄榄岩处于相对冷的、含水的“湿”状态中, 暗示可能是洋壳型地幔橄榄岩, 带着含水洋壳俯冲在 XG9-3 尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩之下, 两者都处于俯冲带之上的楔形区。由于前者包裹并屏蔽了作为岩块的后者, 虽然部分水进入了 XG9-3, 但是并没有影响相界反应的保存。

(3) 笔者等推测, 特提斯洋关闭, 洋壳俯冲向深部, 导致超高压变质作用发生; 而以印度陆块为代表的冈瓦纳大陆与欧亚大陆碰撞挤压时, 由于两边夹挤, 将俯冲带之上的楔形区挤出, 是导致上述这些岩块折返上升的动力。但是核部(XG9-3)尖晶石—石榴子石二辉橄榄岩是否也是一个老洋壳的地幔橄榄岩还需要进一步的研究。

参 考 文 献 / References

陈鸣, 谢先德. 2000. 天然高压矿物研究的新进展及其在地幔矿物学中的意义. 高校地质学报, 6(2): 121 ~ 125.

刘小汉, 据宜太, 韦利杰, 李广伟. 2009. 再论雅鲁藏布江缝合带构造模型. 中国科学(D), 39(4): 448 ~ 463.

潘裕生. 1980. 在西藏白朗发现蛇绿混杂岩. 地震地质, 1980(1): 48 ~ 83.

王希斌, 肖序常, 肖序常. 1987. 雅鲁藏布江蛇绿岩. 北京: 测绘出版社, 1987. 1 ~ 118.

许志琴, 陈晶, 杨经绥, 李旭平, 陈方远. 2003. 苏鲁超高压变质带石榴子橄榄岩中含钡硅镁石出溶体的发现及其意义. 地质学报, 77(4): 549 ~ 555.

杨经绥, 白文吉, 青松, 戎合. 2008. 西藏罗布莎蛇绿岩铬铁矿中的超高压矿物和新矿物(综述). 地球学报, 29(3): 263 ~ 274.

Akaogi M, Akimoto S. 1977. Pyroxene – garnet solid – solution equilibria in the systems $Mg_4Si_4O_{12}$ – $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$ and $Fe_4Si_4O_{12}$ – $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$ at high pressures and temperatures. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 15: 90 ~ 106.

Canil D, O'Neill H St C. 1996. Distribution of ferric iron in some upper – mantle assemblages. Journal of Petrology, 37(3): 609 ~ 635.

Dymek R F, Boak J L, Brothers S C. 1988. Titanian chondroditite and titanian clinohumite-bearing metadunitite from the 3800 Ma Isua supracrustal belt, West Greenland: Chemistry, petrology, and origin. American Mineralogist, 73(5 ~ 6): 547 ~ 558.

Green D H, Ringwood A E. 1967. The stability fields of aluminous pyroxene peridotite and garnet peridotite and their relevance in upper mantle structure. Earth Planetary Sci. Lett., (3): 151 ~ 160.

Hébert H, Huot F, Wang Chengshan, Liu Zhifei. 2003. Yarlung Zangbo ophiolites (Southern Tibet) revisited: geodynamic implications from the mineral record. In: Dilek Y and Robinson P T eds. Ophiolites in Earth History. Geological Society, London, Special Publications, 218: 165 ~ 190.

Jones N W, Ribbe P H, Gibbs G V. 1969. Crystal chemistry of the humite minerals. American Mineralogist, 54: 391 ~ 411.

Kalt A, Altherr R. 1996. Metamorphic evolution of garnet – spinel peridotites from the Variscan Schwarzwald (Germany). International Journal of Earth Sciences, 85(2): 211 ~ 224.

Köhler T P, Brey G P. 1990. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 2375 ~ 2388.

MacGregor I D. 1970. The effect of CaO , Cr_2O_3 , Fe_2O_3 and Al_2O_3 on the stability of spinel and garnet peridotites. Phys. Earth Planet. Inter., (3): 372 ~ 377.

Medaris Jr L G, Wang H F, Misař Z, Jelfnek E. 1990. Thermobarometry, diffusion modeling and cooling rates of crustal garnet peridotites: Two examples from the Moldanubian zone of the Bohemian Massif. 189 ~ 202.

Milholland C S, Presnall D C. 1998. Liquidus phase relations in the CaO – MgO – Al_2O_3 – SiO_2 system at 3.0 GPa; the aluminous pyroxene thermal divide and high-pressure fractionation of picritic and komatiitic magmas. J. Petrol., 39(1): 3 ~ 27.

Möller W F, Wenk H R. 1978. Mixed-layer characteristics in real humite structures. Acta Crystallographica, A34: 607 ~ 609.

Nimis P, Taylor W R. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites Part I Calibration and testing of Cr-in-Cpx barometer and an enstatite in-Cpx thermometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 139(5): 541 ~ 554.

O'Hara M J, Richardson S W, Wilson G. 1971. Garnet – peridotite stability and occurrence in crust and mantle. J. Geophys. Res., 76(1): 48 ~ 68.

O'Neill H St.-C. 1981. The transition between spinel lherzolites and garnet lherzolites, and its use as a geobarometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 77(2): 185 ~ 194.

Obata M, Morten L. 1987. Transformation of Spinel Lherzolite to Garnet Lherzolite in Ultramafic Lenses of the Austridic Crystalline Complex, Northern Italy. J. Petrology, 28(3): 599 ~ 623.

Pearce J A, Deng Wan Ming. 1988. The ophiolites of the Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud (1985) and Lhasa to Kathmandu (1986). In: Chang C. et al. Eds. The Geological Evolution of Tibet. The Royal Society, London, 327(1594): 215 ~ 238.

Richard W, Larissa F D. 2001. Harry W G II. Electron microscope study of the reaction olivine + H_2O + TiO_2 → titanian clinohumite + Titanian chondroditite synthesized at 8GPa, 1300K. American Mineralogist, 86(5 ~ 6): 601 ~ 610.

Ringwood A E. 1967. The pyroxene – garnet transformation in the earth's mantle. Earth and Planetary Science Letters, 2(3): 255 ~ 263.

Shah W F, Matěj M. 2005. Metamorphic PT Conditions Estimated for Eclogite and Garnet Peridotite from Spa? ice and Uhrov Localities, Bohemian Massif. GeoLines, (19): 37.

Stephan K. 2004. The influence of Cr on the garnet – spinel transition in the Earth's mantle: experiments in the system MgO – Cr_2O_3 –

SiO₂ and thermodynamic modeling. *Lithos*, 77(1~4): 639~646.

Wang Ran, Xia Bin, Zhou Guoqing, Zhang Yuquan, Yang Zhiqing, Li Wenqian, Wei Dongliang, Zhong Lifeng, Xu Lifeng. 2006. SHRIMP zircon U Pb dating for gabbro from the Tiding ophiolite in Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 51:1776~1779.

White T J, Hyde B G. 1982. Electron microscope study of the humite minerals: I. Mg-rich specimens. *Physics and Chemistry of Minerals*, 8(2): 55~63.

Yamamoto K, Akimoto S I. 1977. The system MgO - SiO₂ - H₂O at high

pressures and temperature stability field for hydroxyl - chondrodite, hydroxylclinochumite and 10Å-phase. *American Journal of Science*, 277: 288~312.

Yang J J. 2003. Titanian clinohumite garnet pyroxene rock from the Su-Lu UHP metamorphic terrane, China: chemical evolution and tectonic implications. *Lithos*, 70: 359~379.

Zhang Q, Wang Y, Liu D Y, Jian P, Qian Q, Zhou G Q, Robinson P T. 2008. A brief review of ophiolites in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32: 308~324.

A Study on Mineralogical Phase Confines Reaction from Spinel to Garnet in Baigang lherzolite of the Yarlung Zangbo Suture Zone, and Its Geological Implication

XIA Bin^{1,3)}, ZHOU Guoqing²⁾, LI Jianfeng¹⁾, CHEN Genwen¹⁾,
LIU Weiliang³⁾, WANG Ran⁴⁾, DONG Binghua¹⁾

- 1) Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese academy of Scicences, Guangzhou, 510640;
- 2) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing ;
- 3) School of Marine Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, 510006;
- 4) China Nuclear Power Design Company. Ltd (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518031

Abstract: In Baigang ophiolitic mélange of the Yarlung Zangbo Suture Zone exposes an unusual spinel – garnet lherzolite block, which is surrounded by soft crust of serpentinized lherzolite. In this block, there are four kinds of clino-pyroxene. They are earliest recrystallized matrix clino-pyroxene, exsolution clino-pyroxene, inserting clino-pyroxene, and exotic clastic clino-pyroxene. It can also be seen the metamorphic reaction that is calcarous pyroxene + spinel → andradite. We also find there are some needle-like humite exsolution in olivine in both core and crustal lherzolites. Geo-thermobarometers are applied to these lherzolites, which give a result of higher than 900℃ temperature and more than 1.8GPa pressure, and also implies that the spinel – garnet lherzolite block have experienced a letter N-like tectonic route composed of ascending, subdction and re – ascending three stages.

Key word:ophiolitic mélange block; phase reaction from spinel to garnet; humite exsolution in olivine; deep subduction and exhumation; Baigang village, Xizang(Tibet) ; Yarlung Zangbo Suture Zone

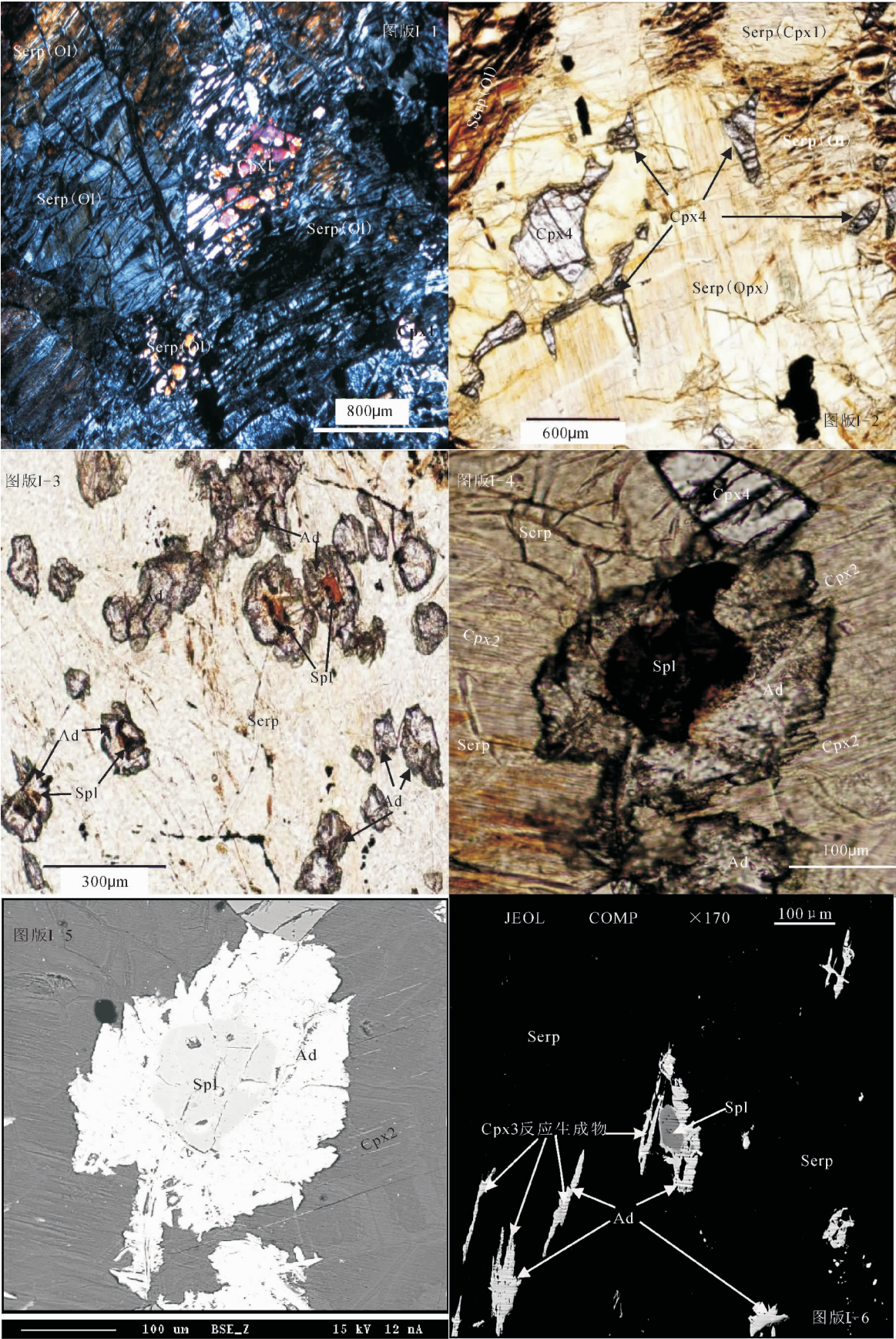
图 版 说 明 / Explanation of Plates

图 版 I / Plate I

- 1. XG9-3 中橄榄石假象与残留单斜辉石呈平衡变晶结构 (正交偏光 5×10)。
- 2. XG9-3 中辉石和铬铁矿碎粒固体冷侵入在蛇纹石化橄榄石和绢石化辉石中(单偏光 10×4)。
- 3. XG9-3 中对角线方向上四粒尖晶石 (棕色) 外有钙铁石榴石 (Ad, 以下同) 反应边;尖晶石 – 石榴石长轴方向与四颗粒排列的对角线方向垂直,暗示了曾被剪切碎裂(单偏光 10×10)。
- 4. XG9-3 中尖晶石 (Spl,表 1 中 3) 被钙铁石榴石 (Ad,表 1 中 4) 六边形反应边包围,尖晶石上为碎粒单斜辉石 (Cpx 4) (单偏光,20×10)。
- 5. 为图版 I -4 同一视域背散射电子显微照片。其中清晰可见钙铁石榴石和尖晶石的反应关系,外侧为斜方辉石,其中平直的出溶单斜辉石页片 (Cpx2) 清晰可见。
- 6. XG9-3:中心深灰色为铬尖晶石 (Spl,表 1 中 1、2 *),白色为它与单斜辉石反应生成的石榴石 (Ad,表 1 中 13 *)。注意:它的左侧和右下角有若干近平行的白色条状石榴石 (表 1 中 1、4 *),都代表原斜方辉石中的贯入单斜辉石条 (背散射电子显微照片)。
- 1. Granoblastic texture composed of pseudo-olivine and residual clino-pyroxene in XG9-3. Cross-polarized light, magnification 5×10.

- 2. Pyronxene and chromite broken grains break in the serpentinized olivine and bastitized pyroxene grains in XG9-3. Plane-polarized light, magnification 4×10.
- 3. In XG-3, four brown spinel grains surrounded by andradite rims arrange along the diagonal. The long axes of the spinel and garnet grains are perpendicular to the diagonal, which imply the grains have experienced shear brokenness. Plane-polarized light, 10×10.
- 4. Spinel grain is surrounded by hexagonal andradite rim. A broken clino-pyroxene grain aligns on the top the spinel grain. Plane-polarized light, 20×10.
- 5. BSE micrograph for the same area of Plate I -4. The reaction relationship between the andradite and spinel grains is decided. The andradite reaction rim is surrounded by ortho-pyroxene grains, in which some straight and bright lamellar clino-pyroxene exsolutions can be seen.
- 6. The spinel grain of dark gray color is surrounded by white andradite rim, which is judged to be the reaction product of clino-pyroxene and spinel. On the left and in the low right corner, there are several white lath-like garnet grains, which are considered to be the alteration products of injected clino-pyroxene grains.

夏斌等:雅鲁藏布江缝合带白朗县白岗尖晶石—石榴子石相二辉橄榄岩的相界反应及其意义 图版 I



夏斌等:雅鲁藏布江缝合带白朗县白岗尖晶石—石榴子石相二辉橄榄岩的相界反应及其意义 图版 II

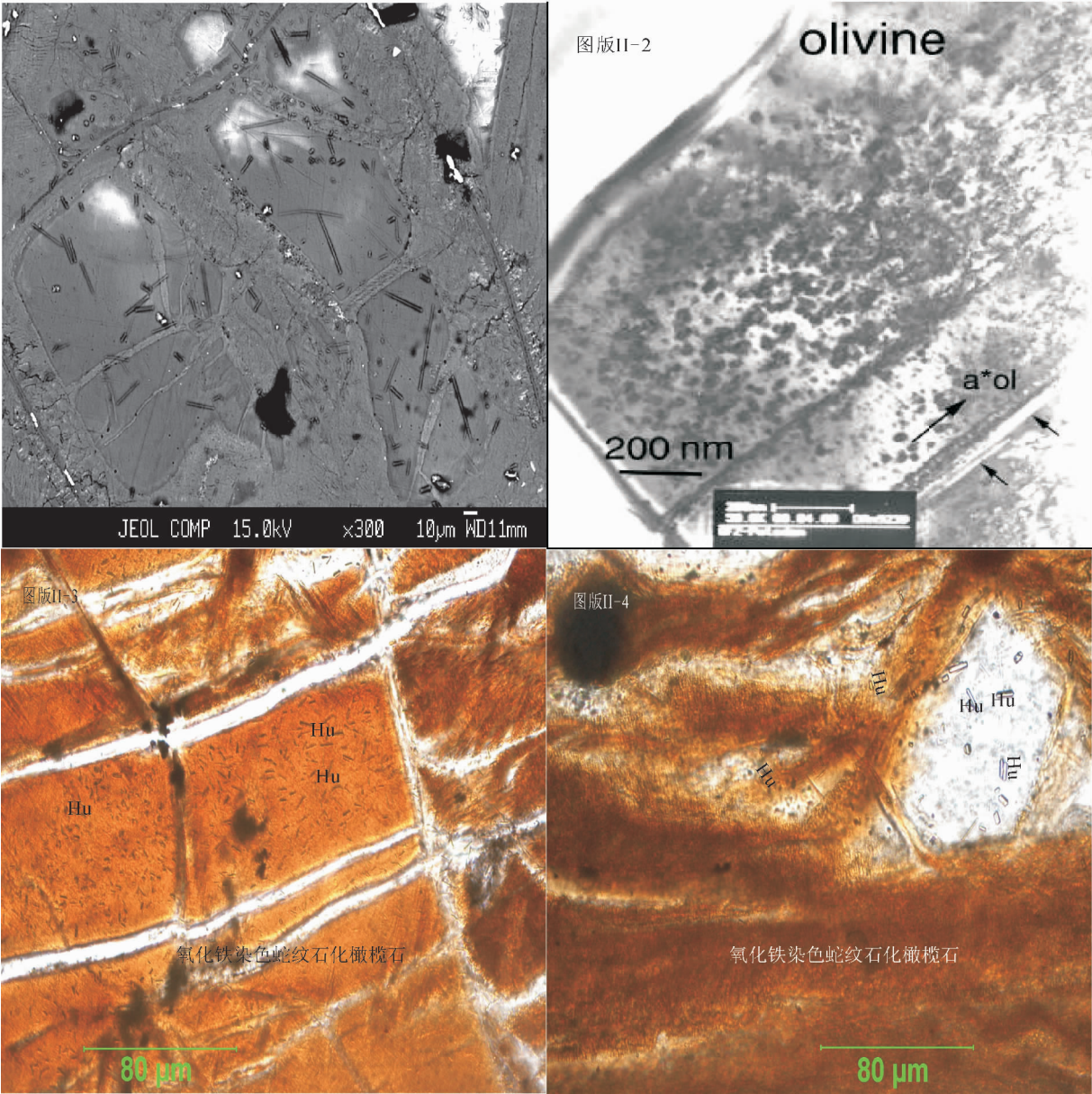


图 版 说 明 / Explanation of Plates

图 版 II / Plate II

1. XG9-2 中橄榄石假象中的针状出溶物(硅镁石)。
2. “补片状”(Patchy) 橄榄石中细的钛斜硅镁石(箭头所指白色页片),亮视域透射电镜照片(Bright field TEM micrograph),据 Richard et al., (2001)。
3. XG9-2 氧化铁染蛇纹石化橄榄石中的针状出溶物(硅镁石)呈三向排列(单偏光 50 × 10)。
4. XG9-2 尖晶石二辉橄榄岩:氧化铁染蛇纹石化橄榄石中的针管状硅镁石出溶体呈三向排列(单偏光 50 × 10)。
1. Needle-like humite exsolutions in the pseudo-olivine grains in sample

- XG9-2.
2. Patchy olivine grains contain thin clinohumite lamellas, which are pointed out by white arrows. Bright field TEM micrograph, by Richard et al., (2001).
 3. Needle-like exsolutional humite grains aligns along three differential directions in the serpentinized pseudo-olivine grains that were coloured to orange, in XG9-3. Plane-polarized light, 20 × 10.
 4. Similar observation to Plate II-3, Needle-like humite grains distributes along three directions in XG9-3. Serpentinized iherzolite, plane-polarized light, 50 × 10.