

西准噶尔白碱滩二辉橄榄岩中两种辉石的出溶结构及其地质意义*

朱永峰¹ 徐新²

ZHU YongFeng¹ and XU Xin²

1. 北京大学地球与空间科学学院 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871

2. 新疆资源环境中心, 乌鲁木齐 830011

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

2. Xinjiang Resource and Environment Centre, Urumqi 830011, China

2007-01-09 收稿, 2007-03-19 改回.

Zhu YF and Xu X. 2007. Exsolution texture of two-pyroxenes in lherzolite from Baijiangtan ophiolitic mélangé, western Junggar, China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5):1075–1086

Abstract The ophiolitic mélangé in Karamay region (Baijiangtan region) consists of ultramafic lenses (mainly peridotite, pyroxenite), pillow-lava basalts and siliceous rocks. The lherzolite in Baijiangtan region consists of olivine, clinopyroxene, orthopyroxene, and spinel. Both olivine and orthopyroxene have been replaced by serpentine partly. Clinopyroxene, however, generally is fresh. Both clinopyroxene and orthopyroxene show exsolution texture. The exsolution rods generally are parallel each other no matter they are straight or curved. The clinopyroxene lamellae in orthopyroxene generally are thin (widths of $\sim 1\mu\text{m}$) but long ($> 150\mu\text{m}$). The orthopyroxene lamellae (or leafs) in clinopyroxene host are thin (widths of $1\sim 3\mu\text{m}$) and long ($> 300\mu\text{m}$). We use different thermobarometers estimating the *PT* conditions of the pyroxene exsolution. The calculated values only represent the *PT* conditions when the exsolution texture formed. At least three stages could be identified for the Baijiangtan lherzolite: the primary pyroxene coexists with spinel and olivine in the upper mantle (stage I, $> 94\text{km}$); With the emplacement of Ophiolite mélangé, the primary pyroxene decomposed and formed exsolution texture (stage II, $700\sim 1000^\circ\text{C}$, $78\sim 94\text{km}$). Orthopyroxene decomposed at depth of $< 94\text{km}$. Clinopyroxene decomposed at depth of $< 78\text{km}$. Afterwards, Ophiolite mélangé underwent another emplacement which caused the ductile deformation of pyroxene (probably occurring in the Lower Crust environment, stage III).

Key words Western Junggar, Ophiolitic mélangé, Lherzolite, Exsolution, Pyroxene

摘要 克拉玛依白碱滩尖晶石二辉橄榄岩主要由橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石组成, 橄榄石和斜方辉石均发生程度不等的蛇纹石化。单斜辉石一般很新鲜。单斜辉石和斜方辉石均发育出溶结构, 出溶条纹或者平直或者发生舒缓的弯曲变形(即便是在发生弯曲的情况下也是完全平行的)。透辉石-普通辉石出溶体一般呈针状(直径一般为 $1\mu\text{m}$, 长度 $> 150\mu\text{m}$), 顽火辉石出溶条纹直径一般为 $1\sim 3\mu\text{m}$ (长度 $> 300\mu\text{m}$)。斜方辉石主晶属于顽火辉石-易变辉石, 单斜辉石主晶为透辉石(成分很均一)。地质温度压力估算表明, 白碱滩二辉橄榄岩中辉石出溶结构发生的温度为 $700^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$ 、压力为 $2.0\sim 2.7\text{GPa}$, 它们代表辉石出溶结构形成的最低 *PT* 条件。白碱滩二辉橄榄岩至少经历了三个演化阶段: 原始辉石与尖晶石和橄榄石平衡共生(阶段 I, $> 94\text{km}$); 随着地幔上隆, 原始辉石结构不稳定, 分解并形成出溶结构(阶段 II, $700^\circ\text{C}\sim 1000^\circ\text{C}$), 斜方辉石开始分解的深度为 94km , 单斜辉石开始分解的深度为 78km ; 之后, 蛇绿岩经历的侵位事件导致辉石发生塑性变形(阶段 III)。蛇绿岩侵位之前, 地幔岩曾发生了 $> 50\text{km}$ 的隆升, 而且, 在隆升过程中地幔岩没有发生明显部分熔融(地幔岩因此没有经历明显的岩浆抽提过程)。

关键词 西准噶尔; 蛇绿混杂岩; 尖晶石二辉橄榄岩; 出溶结构; 辉石

中图法分类号 P588.125; P578.954

* 国家自然科学基金项目(编号 40572033)和中国科学院矿产资源重点实验室联合资助。

第一作者简介: 朱永峰, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 岩石学、矿床学、地球化学专业, E-mail: yfzhu@pku.edu.cn

1 引言

西准噶尔地区蛇绿岩分布广泛、保存比较完整,中外学者对唐巴勒、玛依勒、达拉布特、洪古勒楞等蛇绿岩带(图 1a)都进行过研究(朱宝清等, 1987; Kwon *et al.*, 1989; 肖序常等, 1991; 张驰, 黄莹, 1992; 黄建华等, 1995; 张立飞, 1997; 徐新, 1998; 何国琦等, 2005; 徐新等, 2006)。朱宝清等(1987)在该地区识别出三期蛇绿岩: 中奥陶统的唐巴勒-恰当苏蛇绿岩、中晚志留世的玛依勒山-萨雷诺海蛇绿岩和中泥盆统的达拉布特蛇绿岩。这些不同时代的蛇绿岩均受断裂控制, 并主要以两种形式产出: 蛇绿岩构造岩片和蛇绿混杂体, 并以后者为主。混杂岩的基质以片状蛇纹岩为主, 片状凝灰岩、片理化基性熔岩次之, 混杂的岩块基本上是蛇绿岩的组分, 夹杂蓝闪石片岩、灰岩和上覆的复理石碎屑岩。对唐巴勒蓝片岩中钠质角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年表明, 低温高压变质作用发生在 458~470Ma(张立飞, 1997)。

最近, 在克拉玛依以西的红浅区至克拉玛依以东的白碱滩、百口泉地区发现了一条规模较大、发育齐全的蛇绿混杂岩带(徐新等, 2006)。白碱滩地区蛇绿混杂岩中发育一套主要由深海硅泥质和火山灰凝灰质复理石沉积构成的深海建造, 含放射虫(何国琦未发表资料, 表明这套复理石建造产于远离陆缘的深海地区)。白碱滩蛇绿混杂岩中蚀变辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄分成 2 组: $414.4 \pm 8.6\text{Ma}$ 和 $332\text{Ma} \pm 14\text{Ma}$ (徐新等, 2006)。这两个年龄与唐巴勒蛇绿岩带中的蓝片岩变质年龄 458~470Ma($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 张立飞, 1997) 明显冲突, 唐巴勒蛇绿岩发生低温高压变质作用的时间远远早于白碱滩蛇绿混杂岩中蚀变辉长岩的锆石 SHRIMP 年龄。这个差别意味着白碱滩蛇绿混杂岩与唐巴勒蛇绿岩不是古亚洲洋在同一时期消减的残余。本文报道首次在该地区地幔岩中发现的辉石出溶结构, 并在此基础上讨论白碱滩蛇绿岩的侵位特征及其地质意义。

2 蛇绿岩带的地质特征

白碱滩蛇绿混杂岩带总体走向 NE 40° 左右, 长度超过 80km, 顶部与下石炭统太勒古拉组硅泥质及火山灰凝灰质复理石建造呈断裂接触, 自 NE 向 SW 可分为 3 段: 百口泉段、白碱滩段和红浅段, 其中以白碱滩段发育最全、宽度最大、组分最齐全。在白碱滩地区, 超镁铁混杂岩片长约 7km, 宽 0.5~2km。白碱滩蛇绿混杂岩中的岩石类型齐全, 超镁铁质岩石包括蛇纹岩、蛇纹石化纯橄岩、尖晶石二辉橄岩等。与蛇绿岩伴生的深海沉积增生杂岩主要由枕状玄武岩、放射虫硅质岩、硅质泥岩和火山凝灰岩等组成(徐新等, 2006)。白碱滩蛇绿岩的剖面图和平面图如图 1b 和 c 所示。图 1b 示意性地标出了橄橄榄岩团块在蛇绿岩带中的出露特征, 由于强烈的蛇纹石化、滑石化和碳酸盐化, 混杂岩带极其松软, 构

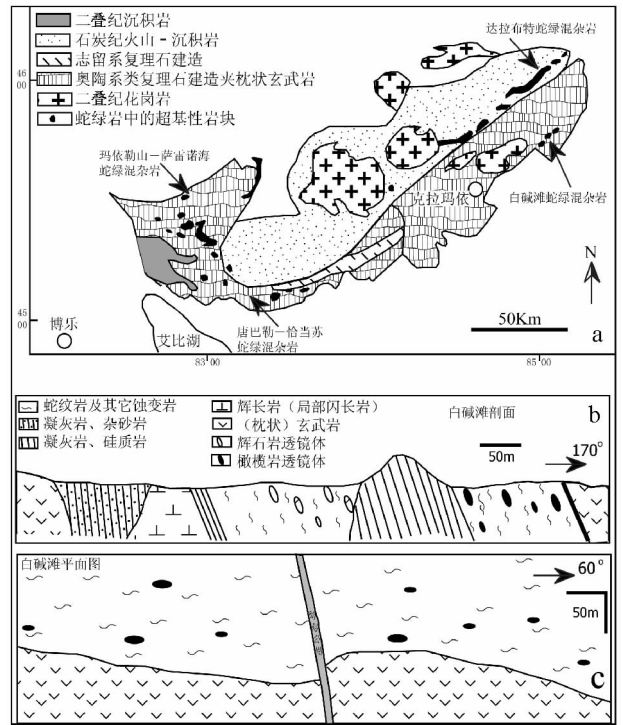


图 1 a-西准噶尔地区蛇绿岩分布图根据新疆地质矿产局, 1993, 修编; b-白碱滩蛇绿混杂岩的实测剖面; c-白碱滩蛇绿混杂岩的局部平面图, 显示蛇纹石化橄橄榄岩透镜体与蛇纹岩基质之间的关系

Fig. 1 a-The distribution of ophiolite and the related rocks in western Junggar; b-The measured geological section of the Baijiangtan ophiolitic mélangé; c-the outcrop map of the ophiolitic mélangé in Baijiangtan region

成负地形(图 2a, c)。在蛇纹岩基质中分布着大小不等的橄橄榄岩、辉长岩和铁碧玉。

3 尖晶石二辉橄橄榄岩的岩石学特征

白碱滩二辉橄橄榄岩主要由橄橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和尖晶石组成, 橄橄榄石和斜方辉石均发生程度不等的蛇纹石化, 橄橄榄石在一些样品中作为残余矿物出现在蛇纹石中(图 2e)。斜方辉石发生了明显的蛇纹石化, 蛇纹石一般沿解理和裂理分布(图 2f)。单斜辉石中常见橄橄榄石包裹体(图 2f)。在比较新鲜的样品中见到橄橄榄石与单斜辉石和斜方辉石共生(图 2g, h)。在所有样品中, 单斜辉石很新鲜, 且均发育出溶结构, 出溶条纹或者平直(图 2g)或者发生舒缓的弯曲(塑性形变, 图 2h)。斜方辉石也发育出溶结构, 出溶叶片为单斜辉石(图 2i)。橄橄榄岩中的尖晶石呈褐色, 边部被磁铁矿交代(图 2j)。橄橄榄石属于镁橄橄榄石-贵橄橄榄石(图 3a), 成分比较均匀(见表 1), $\text{Mg}^{\#}$ 在 0.84~0.90 之间变化(图 3b)。尖晶石属于镁铝尖晶石(表 2), 其中的铬尖晶石

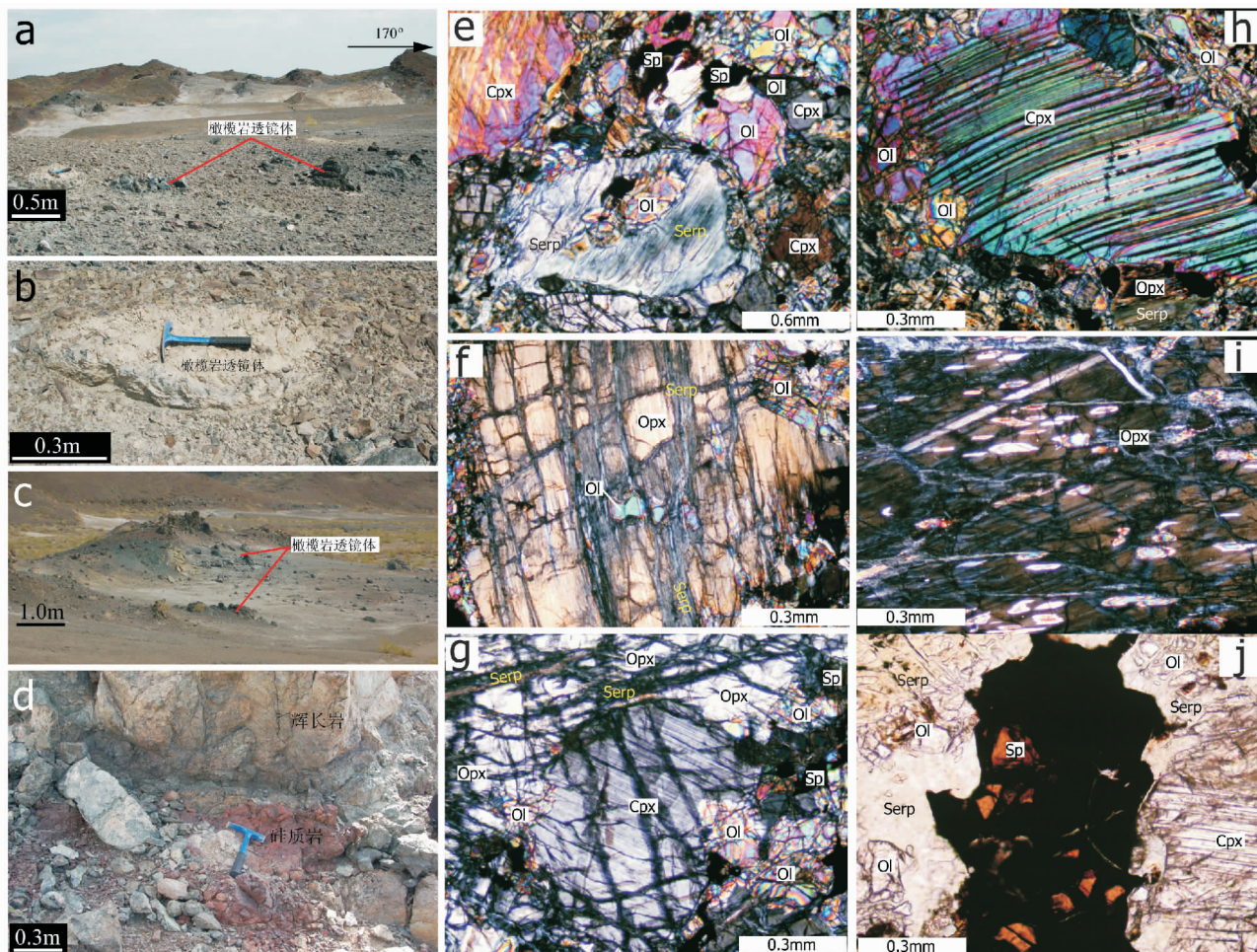


图2 a,b,c,d-白碱滩蛇绿混杂岩带的照片,显示主要由超基性岩块和蛇纹岩组成的负地形(a)、橄榄岩透镜体(b,c)以及硅质岩与辉长岩之间的接触关系(d);f,g,h,i,j-白碱滩二辉橄榄岩的显微照片:蛇纹石化的橄榄石与单斜辉石和尖晶石共生(e)、细粒橄榄石在蛇纹石化斜方辉石中呈包裹体(f)、具出溶结构的单斜辉石与斜方辉石、橄榄石和尖晶石共生(g)、单斜辉石中的出溶条纹发生弯曲(h)、斜方辉石中出溶单斜辉石叶片(i)、边部磁铁矿化的尖晶石(j);Cpx-单斜辉石;Opx-斜方辉石;Ol-橄榄石;Sp-尖晶石;Serp-蛇纹石

Fig.2 b,c,d-Photos show the characteristics of the ophiolitic mlangite in Baijiangtan region;f,g,h,i,j-Microphotos show the mineral assemblages and their textures of the spinel peridotite from ophiolitic mlangite in Baijiangtan region. Cpx-clinopyroxene, Opx-orthopyroxene, Ol-olivine, Sp-spinel, Serp-serpentine

组分在 10mol.% 左右变化,磁铁矿端元组分 < 1.0mol.% (图 3c,d)。

4 辉石出溶结构

白碱滩二辉橄榄岩中所有辉石均发育出溶结构。斜方辉石中出溶单斜辉石,单斜辉石中发育斜方辉石的出溶条纹(叶片)。斜方辉石中单斜辉石的出溶结构显示在图 4 中。绝大多数情况下,单斜辉石的出溶体呈针状晶体(出溶条纹),这些出溶棒完全平行,严格沿同一个方向分布(图 4a,b)。单斜辉石出溶体的直径一般为 $1\mu\text{m}$ (甚至小于 $1\mu\text{m}$,个

别单斜辉石出溶棒的直径大于 $1\mu\text{m}$,但不超过 $3\mu\text{m}$)。单斜辉石出溶体的长度一般超过 $150\mu\text{m}$ 。在个别情况下见到变形的单斜辉石出溶体,这些出溶体发生扭折弯曲,发生弯曲的部分所在的斜方辉石(主晶)被蛇纹石交代(图 4c)。针状单斜辉石出溶体尽管被折屈或者折断,但没有发生成分变化。说明斜方辉石的蛇纹石化发生在斜方辉石被扭折之后,而出溶结构发生在扭折之前。斜方辉石主晶以及其中单斜辉石出溶条纹的电子探针分析结果(表 3)表示在图 4d,h。由图 4h 可知,单斜辉石出溶条纹为透辉石-普通辉石,斜方辉石主晶属于顽火辉石-易变辉石。

表1 白碱滩尖晶石二辉橄榄岩中橄榄石的成分分析结果(wt%, O=4)

Table 1 Representative compositions of olivines in Baijiangtan spinel lherzolite (wt%, O=4)

序号	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	117
SiO ₂	40.59	39.79	40.73	40.17	39.72	40.38	40.19	40.44	40.39	40.40	40.10	39.31	39.63	40.00	39.82
TiO ₂	0.01	0.03	0.05	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
MgO	48.36	48.33	49.36	48.26	48.69	49.12	48.73	49.08	49.54	48.41	48.66	48.60	48.65	48.30	48.74
CaO	0.03	0.04	0.03	0.01	0.02	0.02	0.00	0.02	0.04	0.02	0.00	0.04	0.01	0.02	0.02
MnO	0.10	0.16	0.14	0.14	0.14	0.15	0.17	0.13	0.17	0.19	0.13	0.22	0.20	0.19	0.18
FeO	10.04	10.16	10.47	10.07	10.13	9.75	9.71	9.75	9.79	10.07	9.89	10.13	9.98	10.01	10.18
NiO	0.38	0.44	0.39	0.40	0.37	0.36	0.41	0.40	0.33	0.39	0.37	0.33	0.40	0.38	0.43
K ₂ O	0	0	0	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.02
总量	99.52	98.94	101.17	99.09	99.09	99.78	99.23	99.84	100.28	99.49	99.16	98.66	98.88	98.92	99.40
Si	1.002	0.990	0.991	0.997	0.987	0.994	0.995	0.995	0.990	0.998	0.994	0.983	0.987	0.995	0.987
Ti	0	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	1.779	1.793	1.791	1.785	1.804	1.801	1.798	1.799	1.809	1.783	1.797	1.811	1.806	1.790	1.801
Ca	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0	0.001	0.001	0.001	0	0.001	0	0.001	0.001
Mn	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003	0.004	0.004	0.003	0.005	0.004	0.004	0.004
Fe	0.207	0.212	0.213	0.209	0.211	0.201	0.201	0.201	0.201	0.208	0.205	0.212	0.208	0.208	0.211
Ni	0.008	0.009	0.008	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.007	0.008	0.007	0.007	0.008	0.008	0.009
K	0	0	0	0	0.001	0	0.001	0.001	0	0	0.001	0.001	0	0.001	0.001
Mg [#]	0.90	0.89	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90
Fo (mol%)	89.56	89.45	89.37	89.52	89.55	89.98	89.95	89.97	90.02	89.55	89.76	89.53	89.68	89.58	89.51
Fa (mol%)	10.44	10.55	10.63	10.48	10.45	10.02	10.05	10.03	9.98	10.45	10.24	10.47	10.32	10.42	10.49

表2 白碱滩尖晶石二辉橄榄岩中尖晶石的成分分析结果(wt%, O=32)

Table 2 Representative compositions of spinel in Baijiangtan spinel lherzolite (wt%, O=32)

序号	93	94	95	96	97	98	99	100	100a	101	117	118	119	120
SiO ₂	0.05	0.06	0.04	0.05	0.02	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	1.96	0	0	0
TiO ₂	0.08	0.04	0.05	0.08	0.09	0.06	0.07	0.06	0.07	0.04	0.05	0	0	0
Al ₂ O ₃	57.70	58.01	57.73	57.54	58.27	57.98	57.82	56.85	57.26	61.03	2.70	59.36	58.10	57.61
Cr ₂ O ₃	11.41	11.05	10.62	11.61	10.64	11.10	11.12	12.60	11.05	7.74	6.62	8.31	10.42	10.43
Fe ₂ O ₃ *	0	0	0.67	0	0.23	0.11	0.00	0.10	0.16	0	57.13	0.72	0.00	0.03
MgO	18.87	19.33	19.60	19.45	19.29	19.35	19.16	19.13	18.89	19.05	2.43	19.31	19.16	19.05
MnO	0.07	0.05	0.07	0.07	0.08	0.00	0.05	0.13	0.13	0.07	0.67	0.02	0.00	0.02
FeO	11.64	11.13	10.63	10.96	11.33	11.31	11.20	11.43	11.53	12.14	26.50	11.47	11.42	11.42
NiO	0.38	0.43	0.41	0.40	0.47	0.41	0.41	0.41	0.35	0.40	0.20	0.16	0.13	0.14
总量	100.21	100.12	99.82	100.17	100.41	100.35	99.85	100.77	99.51	100.51	98.27	99.34	99.24	98.71
Si	0.011	0.013	0.009	0.011	0.004	0.006	0.007	0.010	0.010	0.008	0.582	0	0	0
Ti	0.013	0.007	0.008	0.013	0.014	0.010	0.011	0.010	0.010	0.006	0.012	0	0	0
Al	14.131	14.171	14.131	14.067	14.202	14.147	14.171	13.896	14.122	14.741	0.944	14.525	14.294	14.263
Cr	1.874	1.812	1.744	1.904	1.740	1.817	1.828	2.067	1.829	1.254	1.555	1.364	1.720	1.733
Fe ³⁺ *	0	0	0.104	0.000	0.035	0.017	0	0.016	0.025	0	12.763	0.112	0	0.004
Mg	5.844	5.974	6.068	6.012	5.947	5.971	5.939	5.912	5.892	5.820	1.077	5.974	5.961	5.966
Mn	0.013	0.008	0.013	0.013	0.014	0	0.009	0.023	0.024	0.012	0.169	0.003	0	0.004
Fe ²⁺	2.023	1.930	1.847	1.901	1.959	1.958	1.948	1.982	2.017	2.081	6.580	1.991	1.994	2.007
Ni	0.063	0.072	0.069	0.068	0.078	0.069	0.068	0.068	0.060	0.066	0.048	0.027	0.022	0.023
Cr [#]	11.71	11.33	10.99	11.92	10.92	11.38	11.43	12.95	11.47	7.84	62.22	8.59	10.74	10.83
Sp (mol%)	88.29	88.67	88.43	88.08	88.89	88.52	88.57	86.97	88.39	92.16	6.19	90.77	89.26	89.14
Chr (mol%)	11.71	11.33	10.91	11.92	10.89	11.37	11.43	12.94	11.45	7.84	10.19	8.52	10.74	10.83
Mt (mol%)	0	0	0.65	0	0.22	0.11	0	0.10	0.16	0	83.63	0.70	0	0.03

* 依据电价平衡原理计算得到 Fe³⁺。

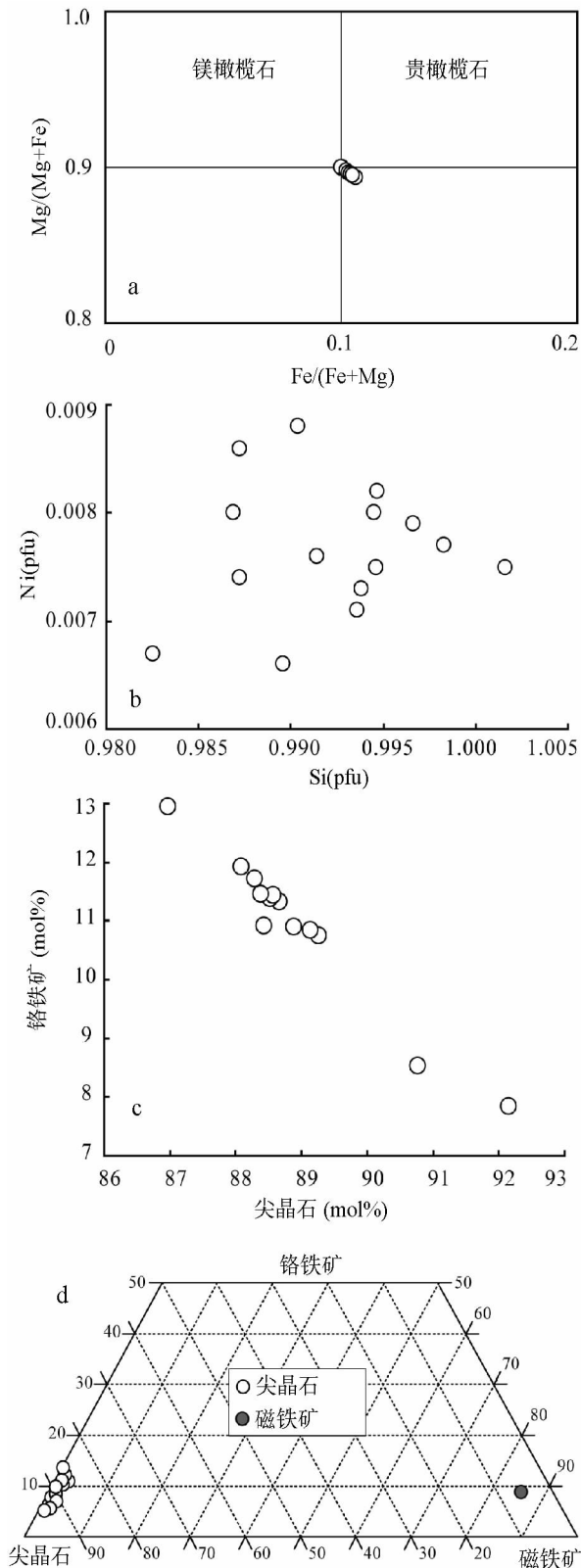


图3 白碱滩二辉橄榄岩中橄榄石(a,b)和尖晶石(c,d)的成分变化图

Fig. 3 The compositions of olivine (a,b) and spinel (c, d) in Baijiangtan lherzolite

单斜辉石中出溶斜方辉石的结构如图5所示。斜方辉石(顽火辉石)的出溶体一般呈针状和叶片状,这些出溶体完全平行,严格沿同一个方向分布(即便在发生弯曲的情况下也完全平行,图5a, b)。顽火辉石出溶体的直径一般为 $1 \sim 3 \mu m$ (个别情况下 $> 3 \mu m$ 或者 $< 1 \mu m$),出溶棒长度超过 $300 \mu m$ 。部分顽火辉石出溶棒局部被蛇纹石交代,形成竹节状。有的出溶体甚至完全被蛇纹石交代(图5b)。主晶和其中出溶体的电子探针分析结果(表4)表示在图5d-h,出溶体为顽火辉石,主晶为透辉石(成分变化很小,图5h)。

5 辉石出溶结构问题讨论

对辉石的研究历来都是岩石学研究的重要目标之一,因为辉石是变质岩、岩浆岩以及地幔岩重要的组成矿物。通过对辉石的仔细研究可以获得相关岩石的重要信息。例如,对火山岩中辉石斑晶的研究发现,辉石斑晶内部可以保留循环到地球深部的地壳物质残余(Zhu and Ogasawara, 2004)。有关出溶结构的研究一直是地球动力学研究的热点问题之一(e.g., Isaacs and Peacor, 1982; Sautter *et al.*, 1991; Green *et al.*, 1997; Bozhilov *et al.*, 1999; Brenker *et al.*, 2002; Zhu, 2003; Zhang *et al.*, 2005; Chen and Xu, 2005; 许志琴等, 2003; 刘良等, 2005; 朱永峰和 Massonne, 2005)。不仅地球岩石样品中广泛存在辉石的出溶结构,而且在月岩样品(Malcolm *et al.*, 1970)和陨石样品(Green *et al.*, 1971)中均发现了辉石出溶结构。通过对一些矿物出溶结构的分析,可能获得所有地质体演化历史的重要信息。例如,继哈萨克斯坦 Kokchetav 含金刚石大理岩中发现辉石的金云母+石英(柯石英)出溶结构(Zhu and Ogasawara, 2002a)和钾长石出溶结构(Zhu, 2003)以来,在苏鲁芝麻坊石榴石橄榄岩的单斜辉石中也找到了定向排列的富钾叶片状出溶体相(与金云母的成分相当,赵文霞等, 2004)。这种富含钾出溶体单斜辉石的来源深度可能超过240km。在透辉石($CaMgSi_2O_6$)中出溶理想高压斜顽辉石($Mg_2Si_2O_6$)需要非常高的压力。Bozhilov *et al.* (1999)在阿尔卑斯 Arami 橄榄岩中发现了类似的出溶结构,表明该岩石的来源深度大于250km。最近在大别山碧溪岭石榴橄榄岩的单斜辉石中发现了上述出溶结构,模拟计算得出结论表明,碧溪岭石榴橄榄岩的来源深度达到300km(刘祥文等, 2006)。

两种辉石的出溶结构是地幔岩中常见的现象(e.g., Bonatti *et al.*, 1971; Kirby and Etheridge, 1981; Nabelek *et al.*, 1987)。例如,大椅山幔源透辉石岩包体中发现一种具有斜方辉石出溶叶片的透辉石碎斑,研究认为该地幔岩在进入玄武质熔浆之前曾经有过上升的历史(罗照华等, 2001)。在 $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ 相图中(图6a),白碱滩辉石显示出“纯净”辉石端元组分的特征。由于地幔隆升,地幔岩所处的物理化学条件(主要是温度和压力)发生了巨大变化,导致结构均一的原始辉石不稳定,分解形成含有单斜辉石出溶棒的

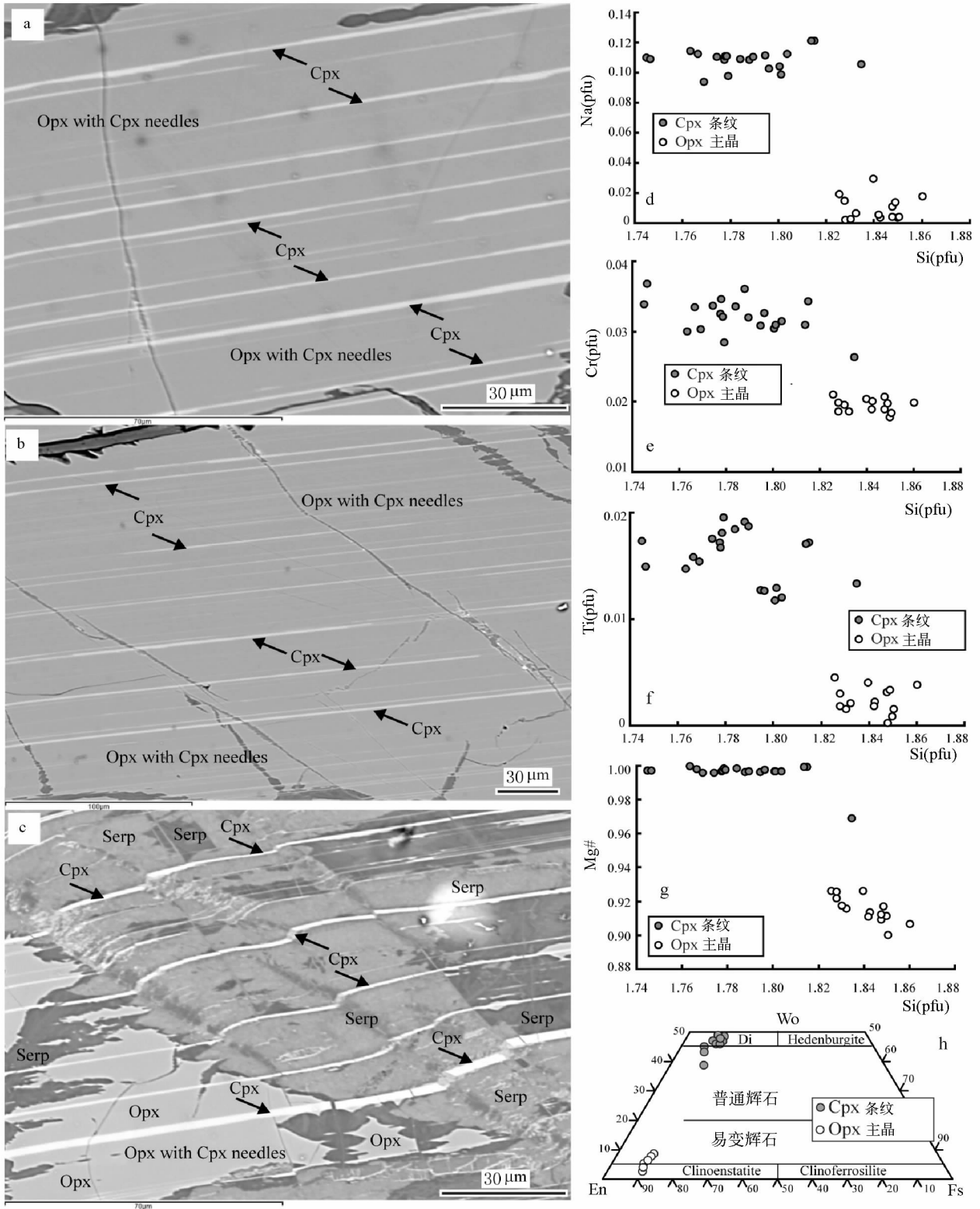


图4 a,b,c-顽火辉石-易变辉石(Opx)中出溶透辉石-普通辉石(Cpx出溶易变辉石),出溶易变辉石严格平行分布,在Opx蛇纹石化过程中,Cpx出溶易变辉石的成分保持不变;d,e,f,g,h-Opx主晶和Cpx出溶条纹的化学成分变化图解

Fig. 4 a,b,c-Exsolution lamellae of clinopyroxene in orthopyroxene. Note: the exsolution lamellae generally parallel to each other and show regular needle-like shape. Clinopyroxene lamellae have been bended in the serpentinized orthopyroxene zone (c). d,e,f,g,h-The compositional variations of clinopyroxene lamellae and the orthopyroxene host.

表3 单斜辉石以及其中出溶的斜方辉石出溶条纹的成分分析结果(wt%, O=6)

Table 3 Representative compositions of clinopyroxene and their exsolution lamellae (orthopyroxene, O=6)

序号	1	2	3	4	5	6	8	9	10	11	12	14	15	16	16	18	19
产状	条纹																主晶
SiO ₂	53.11	53.57	53.80	54.17	53.92	52.97	53.69	53.54	53.45	54.19	53.89	52.92	52.85	52.43	52.43	53.40	50.36
TiO ₂	0.11	0.10	0.07	0.08	0.08	0.11	0.11	0.09	0.10	0.11	0.07	0.08	0.10	0.11	0.11	0.10	0.44
Al ₂ O ₃	6.92	6.58	6.55	6.15	6.02	5.91	6.67	6.42	6.11	5.46	5.78	6.85	6.70	6.59	6.59	6.29	7.63
Cr ₂ O ₃	0.60	0.59	0.57	0.53	0.64	0.60	0.60	0.59	0.56	0.54	0.59	0.62	0.65	0.57	0.57	0.62	1.02
Fe ₂ O ₃	0.47	0.33	0.33	0.00	0.36	1.19	0.19	0.66	0.63	0.56	0.33	0.44	1.03	1.83	1.83	0.73	2.17
MgO	31.67	31.89	32.00	31.92	31.99	31.90	30.06	31.00	31.79	32.32	32.16	31.54	31.60	30.63	30.63	31.56	14.56
CaO	0.43	0.44	0.41	0.52	0.47	0.43	2.52	1.48	0.60	0.47	0.46	0.54	0.57	1.76	1.76	0.82	21.32
MnO	0.10	0.10	0.13	0.10	0.18	0.14	0.18	0.13	0.15	0.16	0.10	0.11	0.11	0.15	0.15	0.17	0.10
FeO	6.14	6.46	6.44	6.60	6.44	5.64	6.19	6.25	6.01	6.27	6.23	6.07	5.74	5.14	5.14	6.02	0.50
NiO	0.11	0.05	0.10	0.11	0.09	0.14	0.05	0.10	0.10	0.10	0.09	0.10	0.15	0.07	0.07	0.13	0.11
Na ₂ O	0.03	0.01	0.02	0.01	0.03	0.01	0.21	0.09	0.05	0.02	0.02	0.02	0.03	0.11	0.11	0.06	1.41
K ₂ O	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.01	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.02	0.03
总量	99.75	100.16	100.45	100.23	100.25	99.05	100.49	100.36	99.58	100.23	99.75	99.33	99.55	99.41	99.41	99.93	99.65
Si	1.843	1.852	1.854	1.870	1.863	1.852	1.858	1.854	1.859	1.873	1.869	1.844	1.839	1.834	1.834	1.853	1.831
Ti	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.012
Al	0.283	0.268	0.266	0.250	0.245	0.244	0.272	0.262	0.250	0.222	0.236	0.281	0.275	0.272	0.272	0.257	0.327
Cr	0.017	0.016	0.015	0.015	0.018	0.017	0.017	0.016	0.016	0.015	0.016	0.017	0.018	0.016	0.016	0.017	0.029
Fe ³⁺	0.012	0.009	0.009	0	0.009	0.031	0.005	0.017	0.017	0.015	0.009	0.012	0.027	0.048	0.048	0.019	0.059
Mg	1.638	1.643	1.644	1.642	1.648	1.663	1.551	1.600	1.647	1.664	1.663	1.638	1.639	1.597	1.597	1.632	0.789
Ca	0.002	0.016	0.015	0.019	0.018	0.016	0.094	0.055	0.023	0.017	0.017	0.020	0.021	0.066	0.066	0.031	0.831
Mn	0.003	0.003	0.004	0.003	0.005	0.004	0.005	0.004	0.004	0.005	0.003	0.003	0.003	0.004	0.004	0.005	0.003
Fe ²⁺	0.178	0.187	0.186	0.191	0.186	0.165	0.179	0.181	0.175	0.181	0.181	0.177	0.167	0.150	0.150	0.175	0.015
Ni	0.003	0.001	0.003	0.003	0.003	0.004	0.001	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004	0.002	0.002	0.004	0.003
Na	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.014	0.006	0.003	0.002	0.001	0.002	0.002	0.007	0.007	0.004	0.099
K	0.002	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002
总数	3.986	4.000	4.000	3.997	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000
序号	20	21	22	23	24	26	27	28	29	30	31	32	33-1	34	35	36	37
	主晶																条纹
SiO ₂	50.15	50.26	51.01	50.94	50.50	50.57	50.68	50.63	50.65	50.64	51.36	51.47	52.22	51.76	51.00	53.55	53.22
TiO ₂	0.44	0.43	0.42	0.47	0.51	0.44	0.47	0.45	0.45	0.47	0.60	0.51	0.05	0.09	0.09	0.09	0.07
Al ₂ O ₃	7.72	7.82	7.67	7.66	7.83	7.67	7.65	7.64	7.58	7.69	7.24	6.31	6.27	6.75	6.56	6.35	6.72
Cr ₂ O ₃	0.96	1.00	1.00	1.04	1.08	1.06	1.00	1.00	0.99	1.05	0.97	0.91	0.63	0.60	0.66	0.54	0.65
Fe ₂ O ₃	2.88	2.90	2.43	2.23	2.46	2.67	2.06	2.97	2.08	2.40	1.33	1.80	2.54	2.77	4.54	0.59	1.13
MgO	14.36	14.58	14.32	14.15	14.27	14.19	14.38	14.32	14.55	14.29	14.35	14.64	31.95	31.95	31.99	31.95	31.92
CaO	21.58	21.42	21.79	21.91	22.02	21.87	21.56	22.13	21.44	21.75	22.40	22.45	0.47	0.52	0.54	0.42	0.46
MnO	0.08	0.10	0.11	0.07	0.11	0.08	0.07	0.13	0.09	0.10	0.09	0.06	0.13	0.11	0.17	0.12	0.14
FeO	0.06	0	0.20	0.53	0.22	0	0.58	0	0.53	0.33	0.98	0.76	4.42	3.95	2.90	6.15	5.84
NiO	0.07	0.08	0.08	0.10	0.06	0.05	0.10	0.07	0.10	0.07	0.06	0.08	0.14	0.13	0.15	0.13	0.12
Na ₂ O	1.47	1.47	1.60	1.55	1.45	1.57	1.49	1.49	1.45	1.52	1.40	1.33	0.04	0.01	0.02	0.03	0.01
K ₂ O	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.02	0.04	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03
总量	99.81	100.11	100.67	100.70	100.53	100.21	100.09	100.87	99.95	100.34	100.79	100.36	98.90	98.69	98.63	99.95	100.31
Si	1.822	1.819	1.836	1.835	1.822	1.829	1.835	1.823	1.835	1.830	1.848	1.861	1.829	1.815	1.794	1.855	1.839
Ti	0.012	0.012	0.011	0.013	0.014	0.012	0.013	0.012	0.012	0.013	0.016	0.014	0.001	0.002	0.002	0.002	0.002
Al	0.331	0.334	0.325	0.325	0.333	0.327	0.327	0.324	0.324	0.327	0.307	0.269	0.259	0.279	0.272	0.259	0.274
Cr	0.028	0.029	0.028	0.030	0.031	0.030	0.029	0.028	0.028	0.030	0.028	0.026	0.018	0.017	0.018	0.015	0.018
Fe ³⁺	0.079	0.079	0.066	0.061	0.067	0.073	0.056	0.081	0.057	0.065	0.036	0.049	0.067	0.073	0.120	0.016	0.029
Mg	0.778	0.787	0.768	0.760	0.767	0.765	0.776	0.769	0.786	0.770	0.770	0.789	1.668	1.670	1.677	1.650	1.644
Ca	0.840	0.831	0.840	0.846	0.852	0.848	0.836	0.853	0.832	0.842	0.864	0.870	0.018	0.020	0.020	0.015	0.017
Mn	0.002	0.003	0.003	0.002	0.003	0.003	0.002	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.003	0.005	0.004	0.004
Fe ²⁺	0.002	0	0.006	0.016	0.007	0	0.018	0	0.016	0.010	0.029	0.023	0.130	0.116	0.085	0.178	0.169
Ni	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.001	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003
Na	0.104	0.103	0.112	0.109	0.101	0.110	0.105	0.104	0.102	0.106	0.098	0.093	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001
K	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001
总数	4.000	4.001	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.002	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000

* 依据电价平衡原理计算得到 Fe³⁺, 条纹为斜方辉石出溶条纹, 主晶为单斜辉石主晶。

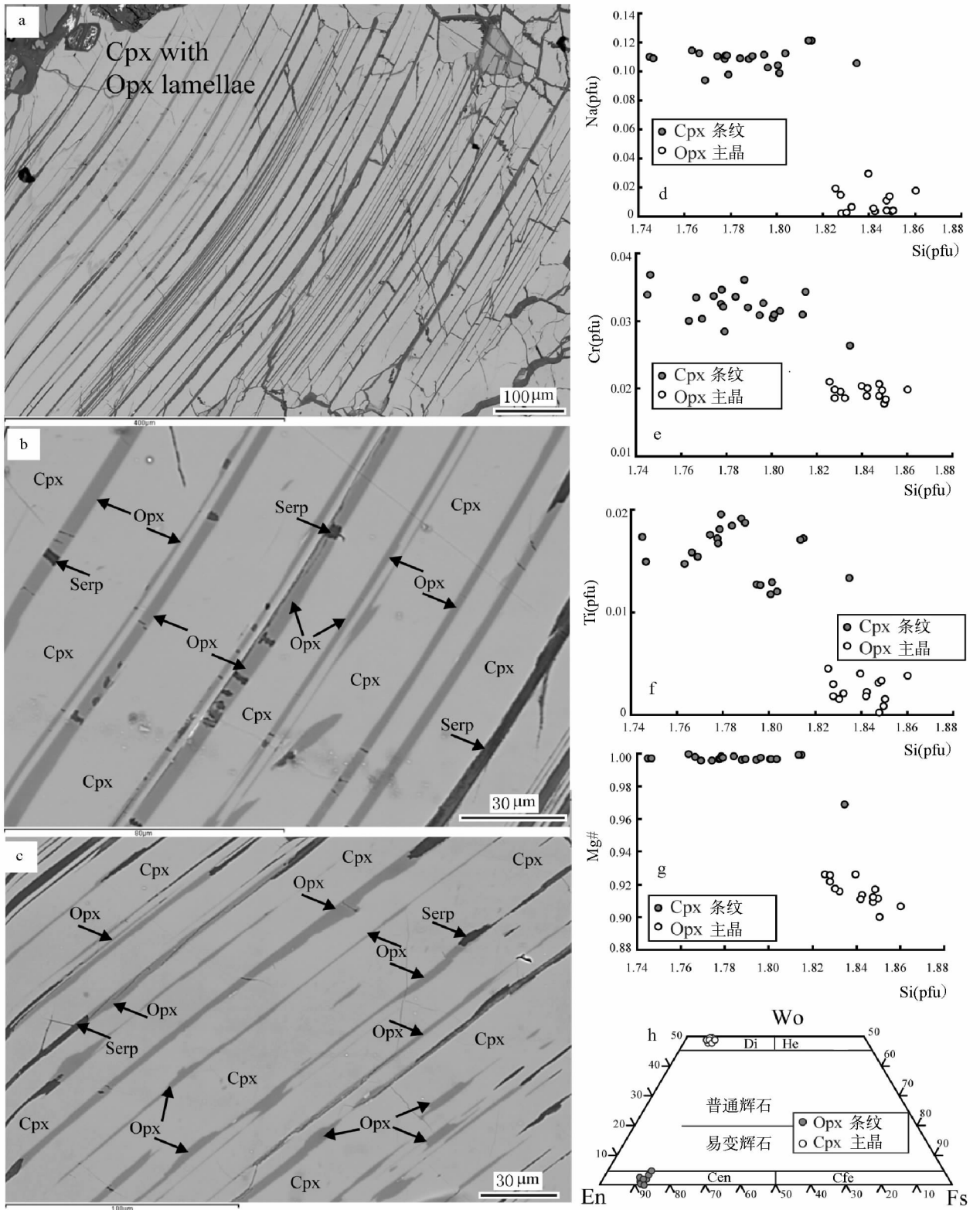


图5 a,b,c-单斜辉石(Cpx)出溶斜方辉石条纹(或叶片,Opx),出溶条纹严格平行,Opx出溶条纹局部或者整体被蛇纹石交代;d,e,f,h-透辉石主晶和顽火辉石出溶条纹的成分变化;图h中Di-透辉石;He-钙铁辉石,Cen-斜顽辉石,Cfe-斜铁辉石
Fig. 5 a,b,c-Exsolution lamellae of orthopyroxene in clinopyroxene. Note: the exsolution lamellae generally parallel to each other. Orthopyroxene lamellae have been replaced by serpentine locally or entirely. d,e,f,h-The compositional variations of orthopyroxene lamellae and the clinopyroxene host.

表4 斜方辉石以及其中出溶的单斜辉石出溶条纹(叶片)的成分(wt%, O=6)

Table 4 Representative compositions of orthopyroxene and their exsolution lamellae (or leaves) of clinopyroxene (O=6)

序号	主晶																	条纹				
	53-2	54H	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	68a	69	70			
SiO ₂	52.88	52.78	52.83	52.57	52.21	52.35	52.37	52.61	53.01	53.04	52.88	53.20	53.00	53.40	48.02	48.09	50.00	49.82	49.96			
TiO ₂	0.12	0.08	0.13	0.07	0.17	0.06	0.12	0.15	0.03	0.14	0.08	0.07	0.06	0.01	0.63	0.55	0.43	0.48	0.47			
Al ₂ O ₃	6.41	6.69	6.23	6.56	6.87	6.58	6.69	6.70	6.19	6.11	6.28	6.60	6.64	6.36	8.35	8.35	7.97	7.80	8.13			
Cr ₂ O ₃	0.75	0.68	0.71	0.68	0.76	0.70	0.72	0.74	0.64	0.71	0.73	0.69	0.67	0.69	1.18	1.28	1.07	1.08	1.08			
Fe ₂ O ₃	0.93	1.70	1.23	2.09	2.08	1.82	2.17	1.70	1.13	0.65	1.36	1.12	0.31	1.12	5.26	5.24	3.62	3.53	3.73			
MgO	30.47	31.68	30.63	32.15	29.77	31.83	30.60	29.24	31.88	29.66	31.97	31.66	31.56	32.23	13.81	14.07	15.11	15.40	14.27			
CaO	2.19	0.75	2.16	0.43	3.05	0.43	2.13	3.67	0.56	3.10	0.44	1.02	0.46	0.41	22.22	21.84	20.94	20.60	21.99			
MnO	0.11	0.20	0.09	0.13	0.13	0.13	0.15	0.09	0.09	0.14	0.10	0.16	0.12	0.12	0.08	0.07	0.10	0.10	0.10			
FeO	5.33	5.02	4.85	4.74	4.12	4.98	4.25	4.07	5.44	5.30	5.31	5.37	6.13	5.41	0	0	0	0	0			
NiO	0.05	0.11	0.06	0.07	0.08	0.09	0.09	0.07	0.11	0.07	0.12	0.06	0.08	0.11	0.06	0.07	0.05	0.09	0.08			
Na ₂ O	0.16	0.09	0.20	0.03	0.28	0.04	0.21	0.43	0.05	0.26	0.05	0.08	0.06	0.06	1.56	1.54	1.49	1.40	1.60			
K ₂ O	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01			
total	99.39	99.78	99.12	99.51	99.51	99.01	99.49	99.48	99.12	99.19	99.33	100.02	99.08	99.91	101.16	101.11	100.78	100.29	101.41			
Si	1.848	1.833	1.849	1.828	1.826	1.831	1.828	1.840	1.850	1.860	1.843	1.842	1.851	1.848	1.745	1.747	1.801	1.801	1.795			
Ti	0.003	0.002	0.003	0.002	0.005	0.002	0.003	0.004	0.001	0.004	0.002	0.002	0.002	0	0.017	0.015	0.012	0.013	0.013			
Al	0.264	0.274	0.257	0.269	0.283	0.271	0.275	0.276	0.255	0.252	0.258	0.269	0.273	0.260	0.358	0.357	0.338	0.332	0.344			
Cr	0.021	0.019	0.020	0.019	0.021	0.020	0.020	0.020	0.018	0.020	0.020	0.019	0.018	0.019	0.034	0.037	0.030	0.031	0.031			
Fe ³⁺	0.024	0.045	0.033	0.055	0.055	0.048	0.057	0.045	0.030	0.017	0.036	0.029	0.008	0.029	0.144	0.143	0.098	0.096	0.101			
Mg	1.587	1.640	1.598	1.667	1.551	1.659	1.592	1.524	1.658	1.551	1.660	1.634	1.643	1.662	0.748	0.762	0.811	0.830	0.764			
Ca	0.082	0.028	0.081	0.016	0.114	0.016	0.080	0.138	0.021	0.116	0.017	0.038	0.017	0.015	0.865	0.850	0.808	0.798	0.846			
Mn	0.003	0.006	0.003	0.004	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	0.004	0.003	0.005	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003			
Fe ²⁺	0.156	0.146	0.142	0.138	0.121	0.146	0.124	0.119	0.159	0.156	0.155	0.155	0.179	0.157	0	0	0	0	0			
Ni	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.003	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002	0.001	0.003	0.002			
Na	0.011	0.006	0.014	0.002	0.019	0.002	0.014	0.029	0.004	0.018	0.004	0.005	0.004	0.004	0.110	0.109	0.104	0.098	0.111			
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.001	0	0.001			
总数	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.025	4.024	4.006	4.006	4.011			
Mg [#]	0.909	0.915	0.917	0.922	0.926	0.917	0.925	0.926	0.911	0.907	0.913	0.911	0.900	0.912	0.997	0.997	0.996	0.996	0.996			
序号	条纹																					
	71	72	73	74	76	77	78	81	82	83	84	85	86	88	90	92						
SiO ₂	49.94	49.58	50.45	50.71	51.04	49.01	49.20	48.54	48.38	49.54	49.30	49.00	49.10	49.31	49.32	48.83						
TiO ₂	0.44	0.46	0.64	0.63	0.49	0.63	0.61	0.54	0.57	0.57	0.67	0.64	0.67	0.70	0.68	0.71						
Al ₂ O ₃	8.10	8.04	8.36	8.36	7.02	8.32	8.40	7.99	7.98	8.08	8.51	8.55	8.45	8.49	8.48	7.80						
Cr ₂ O ₃	1.10	1.14	1.20	1.09	0.92	1.13	1.21	1.05	1.16	1.07	1.12	1.17	1.16	1.25	1.12	0.99						
Fe ₂ O ₃	3.39	3.48	2.48	2.72	3.29	3.97	4.01	5.10	4.71	4.77	3.68	3.83	3.34	3.07	3.13	4.05						
MgO	14.32	14.83	13.88	13.95	14.58	13.99	14.28	14.16	13.88	17.62	14.09	13.89	13.94	13.88	13.86	14.30						
CaO	21.57	21.09	21.88	22.10	21.35	21.92	21.46	21.85	21.98	18.06	21.96	21.94	21.91	21.97	21.96	22.07						
MnO	0.08	0.07	0.02	0.02	0.24	0.08	0.08	0.01	0.06	0.14	0.04	0.10	0.04	0.10	0.08	0.06						
FeO	0	0	0	0	0.59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
NiO	0.05	0.08	0.06	0.07	0.04	0	0	0.05	0.05	0.10	0.08	0.08	0.06	0.05	0.04	0.08						
Na ₂ O	1.60	1.46	1.73	1.74	1.51	1.54	1.58	1.62	1.59	1.35	1.58	1.57	1.54	1.54	1.56	1.38						
K ₂ O	0	0.01	0	0	0.08	0.01	0	0	0.02	0.01	0.01	0	0	0.01	0.02							
总量	100.59	100.23	100.71	101.40	101.17	100.61	100.84	100.90	100.38	101.32	101.05	100.78	100.23	100.36	100.25	100.28						
Si	1.804	1.796	1.815	1.814	1.835	1.778	1.778	1.764	1.767	1.769	1.779	1.774	1.784	1.788	1.790	1.779						
Ti	0.012	0.013	0.017	0.017	0.013	0.017	0.017	0.015	0.016	0.015	0.018	0.018	0.018	0.019	0.019	0.020						
Al	0.345	0.344	0.355	0.353	0.297	0.356	0.358	0.342	0.344	0.340	0.362	0.365	0.362	0.363	0.363	0.335						
Cr	0.031	0.033	0.034	0.031	0.026	0.033	0.035	0.030	0.033	0.030	0.032	0.034	0.034	0.036	0.032	0.028						
Fe ³⁺	0.092	0.095	0.067	0.073	0.089	0.108	0.109	0.139	0.130	0.128	0.100	0.104	0.091	0.084	0.086	0.111						
Mg	0.771	0.801	0.745	0.743	0.781	0.757	0.770	0.767	0.756	0.938	0.758	0.750	0.755	0.750	0.776							
Ca	0.835	0.819	0.844	0.847	0.822	0.852	0.831	0.851	0.860	0.691	0.849	0.851	0.853	0.854	0.862							
Mn	0.003	0.002	0.001	0.001	0.007	0.003	0.003	0	0.002	0.004	0.001	0.003	0.001	0.003	0.002							
Fe ²⁺	0	0	0	0	0.018	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0							
Ni	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0	0	0.001	0.001	0.003	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001							
Na	0.112	0.103	0.121	0.121	0.105	0.108	0.111	0.114	0.112	0.094	0.111	0.110	0.109	0.108	0.110							
K	0	0	0	0	0.004	0	0	0	0.001	0.001	0	0	0	0	0.001							
总数	4.006	4.007	4.000	4.001	4.000	4.011	4.010	4.023	4.021	4.013	4.012	4.012	4.009	4.006	4.007							
Mg [#]	0.997	0.997	0.999	0.999	0.969	0.997	0.997	0.999	0.998	0.996	0.998	0.996	0.998	0.996	0.997							

* 依据电价平衡原理计算得到 Fe³⁺, 主晶为斜方辉石主晶, 条纹为单斜辉石出溶条纹

斜方辉石和含有斜方辉石出溶棒(叶片)的单斜辉石。可以通过相关地质温度计来估算出溶结构形成的 PT 条件。许多学者对于地幔岩石的温压计进行过可靠性和精度的评估(Carswell and Gibb, 1987; Brey and Kohler, 1990; 徐义刚, 1993)。目前常用的二辉石温度计包括 TBM85 (Bertrand and Mercier, 1985)、TBK90 (Brey and Kohler, 1990) 和 NT00 (Nimis and Taylor, 2000)。TBM85 是在简单实验体系基础上据顽火辉石(En)的转移反应 $En_{Opx} - En_{Cpx}$ 进行推导, 并采用 $(1 - Ca)/(1 - Na)$ 的校正方法来计算辉石中两种端员组分的含量。TBK90 是根据新的实验数据并采用与 TBM85 相似的校正方法推导出的二辉石温度计, 与天然体系的实验结果能较好吻合(徐义刚, 1993)。TBK90 适用于辉石岩和二辉橄榄岩样品, 对于后期变化不敏感, 而且, 辉石中 Fe^{3+} 的校正对温度的计算结果影响很小(例如: 1000°C 时进行校正所产生的温度变化与该温度计的误差基本相同)。

我们分别用这三种温度压力计估算白碱滩二辉橄榄岩中两种共生辉石的平衡温度和压力。结果显示: TBM85 温度计得出的结果比 TBK90 温度计的结果高 200°C 以上。由于出溶结构是一种固相相变, 不可能在 $> 1100^{\circ}C$ 的高温条件下发生, 我们因此认为, TBM85 温度计得出的结果在这里不具实际地质意义。TBK90 则适合估算白碱滩辉石出溶结构发生的温度。计算表明, 白碱滩辉石出溶结构形成的温度在很大范围内变化(768°C ~ 1020°C)。依据 NT00 单斜辉石温度计, 透辉石出溶棒和顽火辉石主晶形成的压力为 1.98 ~ 2.68 GPa (609°C ~ 936°C), 透辉石-普通辉石主晶和顽火辉石-易变辉石出溶棒的形成压力为 1.92 ~ 2.22 GPa (680°C ~ 833°C, 图 6b)。这个温度变化区间与基于 Lindsley (1983) 相图的温度(图 6c)基本一致。尽管如此, 这些 PT 计算结果仅仅具有相对高低的地质含意, 但依据它们可以判断, 斜方辉石分解形成出溶结构的压力相对比较高 (< 2.68 GPa), 温度也相对较高 ($< 936^{\circ}C$)。这可能意味着, 原始斜方辉石在地幔上升过程中更易发生结构调整(在 ≈ 94 km 的深度就开始分解), 单斜辉石在地幔岩上升到 ≈ 78 km 深度后才开始分解并形成出溶结构。

白碱滩辉石的出溶结构既记录了深部地幔的变质分异事件, 也记录了地幔岩的隆升侵位事件。由于单斜辉石和斜方辉石均发生了出溶结构的转变, 这两个矿物主晶的成分已不能反映它们在地幔源区的化学组成, 也因此不能通过计算获得其源区的 PT 条件。尽管如此, 它们依然能反映地幔岩侵位到地幔浅部的 PT 条件。因此, 所获得的数据表明, 白碱滩蛇绿岩侵位时的温度比较高 ($> 609^{\circ}C$), 这与辉石发生塑性变形(见图 2h)的岩石学观察吻合。白碱滩二辉橄榄岩中的辉石普遍发生了塑性变形。不仅如此, 单斜辉石中的斜方辉石出溶条纹也发生了塑性变形(图 5a)。辉石的塑性变形显然发生在出溶结构形成之后。因此, 依据出溶结构矿物对获得的温度和压力可以限定辉石发生塑性变形的 PT 上限。

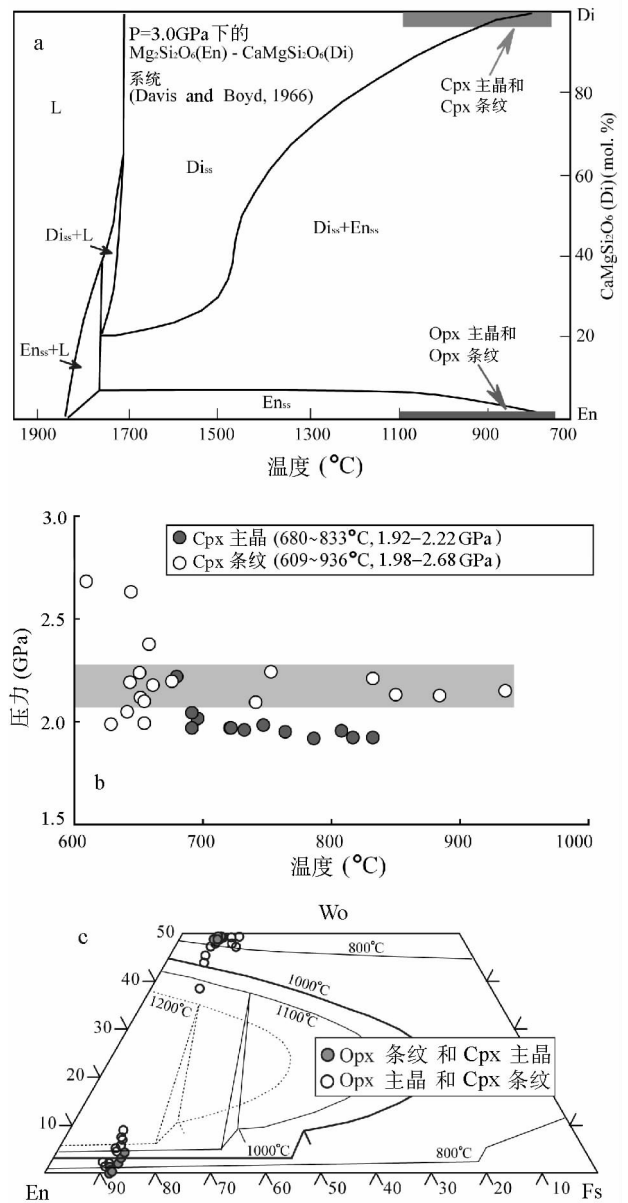


图 6 a-白碱滩辉石在 $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$ 相图中的投影, b-白碱滩二辉橄榄岩中单斜辉石的 PT 图解, c-辉石的 Wo - En - Fs 图解, 显示 Opx 与 Cpx 共生的温度曲线, 底图依据 Lindsley (1983)

Fig. 6 a-Clinopyroxene and orthopyroxene in the phase-diagram of $Mg_2Si_2O_6$ - $CaMgSi_2O_6$; b-The calculated temperature-pressure variations for clinopyroxene lamellae and host in Baijiangtan spinel lherzolite; c-The Wo - En - Fs plot for pyroxene showing the equilibrium temperature between orthopyroxene and clinopyroxene based on Lindsley (1983).

基于以上分析可以看出, 白碱滩二辉橄榄岩至少经历了三个演化阶段(图 7)。在上地幔源区, 原始辉石具有均匀的

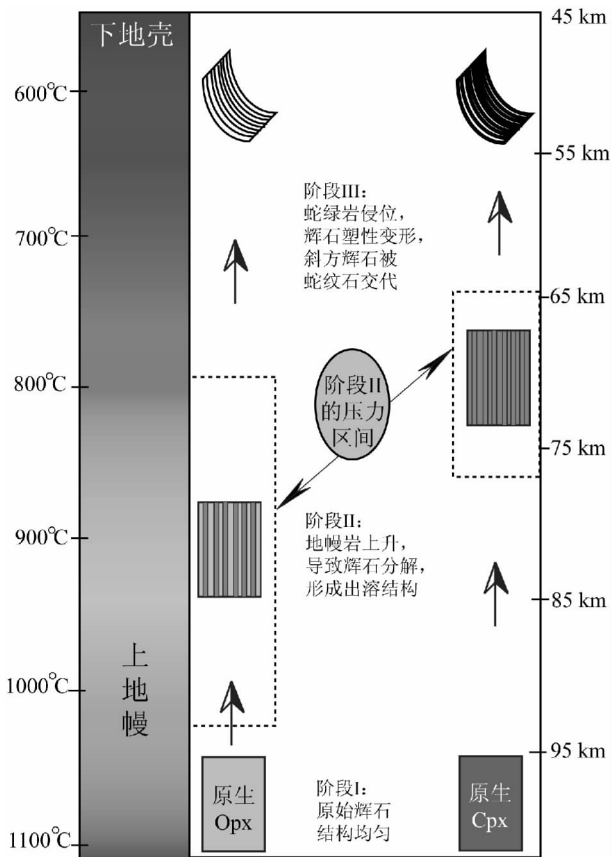


图7 白碱滩二辉橄榄岩中辉石结构的变化与地幔上升和蛇绿岩侵位的示意图

Fig. 7 The relationship between the pyroxene texture and the emplacement of the ophiolite mélangé in Baijiangtan region.

结构,并与尖晶石和橄榄石平衡共生(阶段 I, >94km)。随着地幔岩被抬升,二辉橄榄岩被搬运到地幔浅部,由于压力和温度的巨大变化,导致原始辉石结构不稳定,分解并形成出溶结构(阶段 II),斜方辉石出溶单斜辉石(<94km),单斜辉石出溶斜方辉石(<78km)。辉石的出溶结构形成之后,地幔岩又经历了一次上升过程(蛇绿岩侵位),导致辉石发生塑性变形(阶段 III)。分析图 7 可以看出,蛇绿岩侵位之前,地幔岩石曾经发生了 >50km 的隆升。

地幔岩石中最容易发生熔融的矿物除了金云母外,就是辉石。白碱滩二辉橄榄岩中辉石保存完好的岩石学事实表明,白碱滩蛇绿混杂岩带中的地幔岩石没有发生明显的部分熔融(该地幔岩因此没有经历明显的岩浆抽提过程)。这说明地幔岩在上升过程中所处的温度比较低或者没有遇到足以促使部分熔融作用发生的流体。这也是本文广泛观察到辉石出溶结构的重要原因。

6 结论

克拉玛依白碱滩二辉橄榄岩中单斜辉石和斜方辉石均发育出溶结构,出溶条纹或者平直或者发生塑性变形。透辉石主晶中的出溶体为顽火辉石,斜方辉石主晶(顽火辉石-易变辉石)中的出溶条纹为透辉石-普通辉石。辉石出溶结构发生的温度为 700°C ~ 1000°C,压力为 2.0 ~ 2.7 GPa,它们代表着地幔岩上升到地幔浅部的温度下限。岩相学分析表明,白碱滩二辉橄榄岩至少经历了三个演化阶段:原始辉石与尖晶石和橄榄石平衡共生(阶段 I, >94km);随着地幔岩的上升,原始辉石结构不稳定,分解并形成出溶结构(阶段 II)。斜方辉石在 94km 深度开始分解,单斜辉石在 78km 深度才开始分解,形成出溶结构。之后,地幔岩又一次被抬升,在此过程中辉石发生塑性变形(阶段 III),这个抬升事件可能对应着蛇绿岩的侵位过程。

致谢 实验室工作得到舒桂明老师(北京大学)和毛騫博士(中国科学院矿产资源重点实验室)的协助,罗照华教授和匿名评审专家提出了重要修改意见,特此感谢。

References

- Bertrand P and Mercier JC. 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system. *Earth Planet Sci Lett*, 76: 109 – 1221
- Bozhilov KN, Green II HW and Dobrzhinetskaya LF. 1999. Clinoenstatite in Alpe Arami peridotite: additional evidence of very high pressure. *Science*, 284: 128 – 132
- Brenker FE, Stachel T and Harris JW. 2002. Exhumation of lower mantle inclusions in diamond: ATEM investigation of retrograde phase transitions, reactions and exsolution. *Earth and Planetary Science Letters* 198: 1 – 9
- Brey GP and Kohler TP. 1990. Geothermobarometry in four phase lherzolite: New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 31: 1353 – 378
- Bonatti E, Honnorez J and Ferrara G. 1971. Peridotite-gabbro-basalt complex from the Equatorial mid-Atlantic ridge. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 268: 385 – 402
- Carswell DA and Gibb TL. 1987. Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages. *Contrib Mineral Petrol*, 95: 499 – 511
- Chen J and Xu ZQ. 2005. Pargasite and ilmenite exsolution texture in clinopyroxenes from the Hujialing garnet-pyroxenite, Sulu UHP terrane, Central China: A geodynamic implication. *Eru. J. Mineral.*, 17: 895 – 903
- Green II HW, Radcliffe SV and Heuer AH. 1971. Allende Meteorite: A High-Voltage Electron Petrographic Study. *Science* 172: 936 – 939
- Green II HW, Dobrzhinetskaya L and Bozhilov K. 1997. Determining the origin of ultrahigh- pressure lherzolite. *Science* 278: 702 – 707
- Huang JH, Lu XH and Zhu XN. 1995. Advance in research of the ophiolites in Hongguleleng of North Junggar, Xinjiang. *Xinjiang Geology*, 13(1): 20 – 30 (in Chinese with English Abstract)
- Isaacs AM and Peacor DR. 1982. Orthopyroxene Exsolution in Augite: A Two-Step, Diffusion- Transformation Process. *Science*, 218: 152 – 153

- Kirby SH and Etheridge MA. 1981. Exsolution of Ca-clinopyroxene from orthopyroxene aided by deformation. *Physics and Chemistry of Minerals*, 7: 105 - 109
- Kwon ST, Tilton CR, Coleman, *et al.* 1989. Isotopic investigations on the tectonic of the west Junggar region, Xinjiang, China. *Tectonics*, 8: 719 - 727
- Lindsley DH. 1983. Pyroxene thermometry. *Am Mineral* 68: 477 - 493
- Luo ZH, Su SG and Liu C. 2001. Pyroxene exsolution in diopside pyroxenite in Dayishan basalt and its geological significance. *Geoscience* 15: 184 - 188 (in Chinese with English abstract)
- Nabelek PI, Lindsley DH and Bohlen SR. 1987. Experimental examination of two-pyroxene graphical thermometers using natural pyroxenes with application to metaigneous pyroxenes from the Adirondack Mountains, New York. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 97: 66 - 71
- Malcolm R, Bence AE, Dwornik EJ, Joan R Clark and Papike JJ. 1990. Lunar Clinopyroxenes; Chemical Composition, Structural State, and Texture. *Science*, 167: 628 - 630
- Nimis P and Taylor WR. 2000. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Part I. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-cpx thermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 139: 541 - 554
- Sautter V, Haggerty SE and Field S. 1991. Ultradeep (> 300 Kilometers) Ultramafic Xenoliths; Petrological Evidence from the Transition Zone. *Science*, 252: 827 - 830
- Xu Xin, He GQ, Li HQ *et al.* 2006. Basic characteristics of the Karamay ophiolitic m lange, Xinjiang, and its zircon SHRIMP dating. *Geology in China*, 33: 470 - 475 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang LF, Song SG and Ai YL. 2005. Relict coesite exsolution in omphacite from western Tianshan eclogites, China. *Am. Min.*, 89: 180 - 186
- Zhu YF. 2003. Comments on "Crystal-melt equilibria involving potassium-bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids; an analytical review" by Perchuk LL, Safonov OG, Yapaskurt VO and Barton JM Jr. [*Lithos* 60 (2002) 89 - 111]; K-feldspar in metamorphic clinopyroxene, from exsolution to potassium replacement. *Lithos*, 68: 115 - 119
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2002. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831 - 836
- Zhu YF and Ogasawara Y. 2004. Clinopyroxene phenocrysts (with green salite cores) in trachybasalts; implications for two magma chambers under the Kokchetav UHP massif, North Kazakhstan. *Journal of Asian Earth Sciences* 22: 517 - 527
- Zhu YF and Massonne HJ. 2005. Discovery of pyrrhotite exsolution in apatite. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 405 - 410 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF and Song B. 2006. Petrology and SHRIMP chronology of mylonitized Tianger granite, Xinjiang; also about the dating on zircon hydrothermal zircon rims in granite. *Acta Petrologica Sinica*, 22: 135 - 144 (in Chinese with English Abstract)
- Zhu YF and Xu X. 2006. The discovery of Early Ordovician ophiolite m lange in Taerbahatai Mts., Xinjiang, NW China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(12): 2833 - 2842 (in Chinese with English Abstract)
- Zhang C and Huang X. 1992. The ages and tectonic setting of ophiolites in west Junggar, Xinjiang. *Geological Review*, 6: 509 - 542 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 何国琦, 成守德, 徐新等. 2005. 中国新疆及邻区大地构造图 1: 1500000. 北京: 地质出版社
- 黄建华, 吕喜朝, 朱星南. 1995. 北疆准噶尔洪古勒蛇绿岩研究新进展. *新疆地质*, 13(1): 20 - 30
- 罗照华, 苏尚国, 刘翠. 2001. 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*, 15: 184 - 188
- 刘良, 陈丹玲, 张安达, 孙勇, 王焰, 杨家喜, 罗金海. 2005. 阿尔金超高压 (>7GPa) 片麻状 (含) 钾长石榴辉石岩-石榴子石出溶单斜辉石的证据. *中国科学 D 辑*, 48: 1000 - 1005
- 刘祥文, 金振民, Green II HW. 2006. 碧溪岭普通辉石中特殊的易变辉石出溶体: - 来自 300km 深度的石榴橄榄岩. 2006 年全国岩石学与地球动力学研讨会 (论文摘要), 南京, 294 - 296
- 肖序常, 汤耀庆, 冯益民等. 1991. 新疆北部及其邻区大地构造. 北京, 地质出版社, 25 - 55
- 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 1993. 新疆维吾尔自治区区域地质志. 北京, 地质出版社, 1 - 782.
- 徐新. 1998. 概论新疆开合构造. *新疆地质*, 16(1): 1 - 12
- 徐新, 何国琦, 李华芹等. 2006. 克拉玛依蛇绿混杂岩带的基本特征和锆石 SHRIMP 年龄信息. *中国地质*, 33: 470 - 475
- 徐义刚. 1993. 适应于幔源包体的地质温度计. *岩石学报*, 9(3): 167 - 1801
- 许志琴, 陈晶, 杨经绥等. 2003. 苏鲁超高压变质带石榴石橄榄岩中含钛硅镁石出溶体的发现及其意义. *地质学报*, 77: 549 - 555
- 张驰, 黄萱. 1992. 新疆西准噶尔蛇绿岩形成时代和环境探讨. *地质论评*, 6: 509 - 524
- 赵文霞, 胡育贤, 夏锋等. 2004. 单斜辉石中富钾出溶体: 对芝麻坊橄榄岩来源深度的限定. *科学通报*, 49: 711 - 715
- 张立飞. 1997. 新疆西准噶尔唐巴勒蓝片岩⁴⁰Ar/³⁹Ar 年龄及其地质意义. *科学通报*, 42: 2178 - 2181
- 朱宝清, 王来生, 王连晓. 1987. 西准噶尔西南地区古生代蛇绿岩. *中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊*, No. 17: 3 - 64
- 朱永峰, Massonne HJ. 2005. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现. *岩石学报*, 21: 405 - 410
- 朱永峰, 徐新. 2006. 新疆塔尔巴哈台山发现早奥陶世蛇绿混杂岩. *岩石学报*, 22: 2833 - 2842
- 朱永峰, 宋彪. 2006. 新疆天格尔 (冰达板) 糜棱岩化花岗岩的岩石学及其 SHRIMP 年代学研究: 兼论花岗岩中热液锆石边的定年. *岩石学报*, 22: 135 - 144