

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

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

许志琴¹⁾ 陈 晶²⁾ 杨经绥¹⁾ 李旭平²⁾ 陈方远¹⁾

1) 中国地质科学院地质研究所大陆动力学研究室, 北京, 100037; 2) 北京大学, 100871

内容提要 在苏鲁超高压变质带南部东海地区的中国大陆超深钻预先孔 CCSD-PP1 中获得了石榴石橄榄岩样品, 在石榴子石内单斜辉石包裹体中首次发现钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体结构, 钛斜硅镁石和钛粒硅镁石呈出溶棒和出溶片晶产出。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 $>3.5\text{ GPa}$ 条件下 ($>850^{\circ}\text{C}$), 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。

关键词 石榴石橄榄岩 钛斜硅镁石 粒硅镁石 出溶结构 苏鲁超高压变质带

钛斜硅镁石 (Titanian clinohumite, Ti-Chu) 和粒硅镁石 (Titanochondrodite, Ti-Chn) 同属于含钛的硅镁石类矿物。钛斜硅镁石和钛粒硅镁石曾在 8 GPa 和 1300 K 的实验条件下合成 (Wirth et al., 2001)。在自然界中, 钛斜硅镁石被发现在含地幔包裹体的岩浆岩和变质超基性岩中, 首先记载自然产出的钛斜硅镁石-钛粒硅镁石共生矿物来自于美国 Buell 公园金伯利岩中的地幔包裹体 (Aoki et al., 1976) 及格陵兰 Isua 表壳岩中的变质纯橄岩 (Dymek et al., 1988)。大量钛斜硅镁石和钛粒硅镁石或它的后成合晶脱水产物——橄榄石+钛铁矿在哈萨克斯坦含微粒金刚石的 Kokchetav 超高压变质地体 (Efimov, 1964; Udovkina, 1985; Zhang et al., 1997) 和在中国大别—苏鲁超高压变质地体的石榴石橄榄岩 (Yang et al., 1993; Zhang et al., 1995; Green et al., 1997) 及含榴辉岩的大理岩 (Ogasawara et al., 1998) 中发现。

Dobrizhinatskaya 等 (1996) 在阿尔卑斯 Arami 橄榄岩地块的橄榄石中发现大量钛铁矿和铬铁矿出溶棒, 并推测这种岩石的形成深度大于 300 km, 形成压力达 15 GPa。单斜辉石中的金云母 (Zhu et al.,

2002a) 和钾长石出溶结构 (Zhu, 2003) 表明大陆地壳物质经历了 $>8\text{ GPa}$ 的超高压变质作用, 因此出溶结构的研究是获得俯冲带中物质深循环的重要手段。Harker 等 (1997)、金振民等 (1998) 和 Zhang 等 (1999) 等先后在大别苏鲁石榴石橄榄岩的橄榄石中发现针状钛铁矿、针状含钛铬磁铁矿和叶片状磁铁矿出溶体。Ye 等 (2000) 等在苏鲁仰口榴辉岩的石榴子石中发现透辉石、针状金红石和磷灰石包裹体。上述研究表明超高压变质带中一部分石榴石橄榄岩可能是经过深俯冲作用折返到地壳浅部的岩石, 对理解俯冲带中地幔物质的演化和循环具有重要意义, 是当前超高压变质带研究的焦点之一。在苏鲁超高压变质带南部东海地区的中国大陆超深钻预先孔 CCSD-PP1 中也获得了石榴石橄榄岩样品, 其中的单斜辉石包裹体具有钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体结构。本文首次报道该出溶结构并讨论其地质意义。

1 岩石学描述

大别—苏鲁超高压变质带中产有透镜状、大小不一的榴辉岩体和超基性岩体。超基性岩体中的一

注: 本文为中国大陆科学钻探工程的部分研究成果, 得到了科技部重大基础研究前期研究专项 (编号 2001CCB00900), 国土资源部科技专项 (编号 2002207), 国土资源部重点科技项目 (编号 20010101), 国土资源部中国地质调查局地调项目 (编号 I50C002004) 和中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室资助。

收稿日期: 2003-05-22; 改回日期: 2003-07-19; 责任编辑: 郝梓国。

作者简介: 许志琴, 1941 年生, 女, 留法博士, 研究员, 中国科学院院士。长期从事大地构造学与构造地质学研究。通讯地址: 100037, 北京百万庄 26 号, 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室; 电话: 010-68999663。

种重要的组分——石榴石橄榄岩在苏鲁南部的东海县芝麻坊、毛北及许沟等地均有发现。一些研究者对苏鲁超高压变质带的石榴石橄榄岩进行了温压计算,获得形成条件是 $700 \sim 900^{\circ}\text{C}$, $4.5 \sim 4.6 \text{ GPa}$ (Yang et al., 1993), 认为石榴石橄榄岩经过了超高压变质作用 (Yang et al., 1993; Zhang et al., 2000)。位于苏鲁超高压变质带南部的东海芝麻坊超基性岩体 (东海县城南东 9 km 处) 已通过 10 个浅孔 (深度从 20 m 至 200 m) 的揭示, 表明其为一个夹在片麻岩中的往南东缓倾的楔状体。已实施的中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP1 位于东海芝麻坊超基性岩体的中部, 井深 432 m, 岩心新鲜连续, 包含了 3 个岩性段 (自上而下): ① 黑云斜长片麻岩夹榴辉岩、角闪岩及黑云片岩 (0~137.82 m); ② 橄榄岩, 上下部位强烈蛇纹岩化和绿泥石化 (137.82 m~256.37 m); ③ 花岗片麻岩与黑云斜长片麻岩互

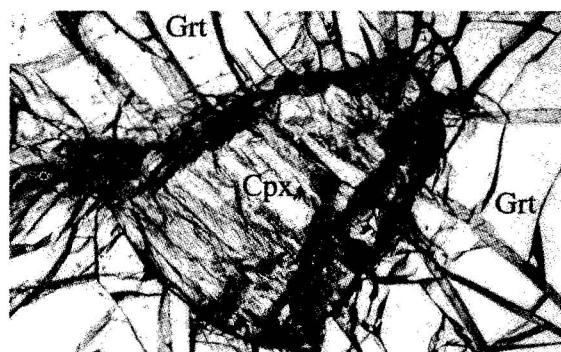


图 2 PP1-141 样品中石榴石橄榄岩石榴石内单斜辉石 (Cpx) 包裹体 (单偏光)

Fig. 2 Clinopyroxene inclusion in garnet from the garnet peridotite of sample PP1-141 (plane-polarized light)

层夹榴辉岩 (图 1)。CCSD-PP1 孔的橄榄岩单元厚 118.55 m, 主要由石榴石二辉橄榄岩、石榴石方辉橄榄岩和石榴石纯橄岩以及二辉橄榄岩、方辉橄榄岩和纯橄岩组成。石榴石二辉橄榄岩呈块状及斑状结构, 大部分发育面理及具 S-C 组构。样品来自深度 154.3 m 的 PP1-141 和 183 m 的 PP1-152 样品的石榴石二辉橄榄岩中, 该岩石含 3%~10% 镁铝榴石, 5%~10% 斜方辉石, 5% 单斜辉石, 1%~3% 金云母和 80%~90% 橄榄石。矿物化学成分见表 1。

石榴石橄榄岩 (PP1-152 和 PP1-141) 的石榴子石斑晶的大小一般为 1~5 mm, 最大者为 20 mm。在石榴子石中含有大量的固态包裹体, 呈圆形、椭圆形及不规则三角形等, 大小约 1.5 mm, 主要成分为单斜辉石和斜方辉石 (表 2)。

2 单斜辉石包裹体中钛粒硅镁石和钛斜硅镁石出熔体

PP1-141 样品的石榴子石巨斑内含有单斜辉石和斜方辉石的包裹体, 在不规则状单斜辉石包裹体 (图 3a, b) 中发现钛斜硅镁石和钛粒硅镁石的出溶体 (图 3c)。与 Yang 等 (1993) 报道的不同之处在于, 本文报道的含钛粒硅镁石和钛斜硅镁石不是以基质中矿物形式产出的, 而是在石榴石橄榄岩的单斜辉石包裹体中以出溶体的形式出现的, 钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体的产出类型有出溶棒及出溶片晶。大部分出溶棒呈细长针状, 长度 $50 \sim 80 \mu\text{m}$, 宽度 $0.2 \mu\text{m}$, 平行定向排列 (图 3c, d, e), 出溶片晶呈长菱形 (长 $15 \mu\text{m}$, 宽 $3 \mu\text{m}$) (图 3f)。出溶片晶和出溶棒延长方向均平行于包裹体单斜辉石的解理。单

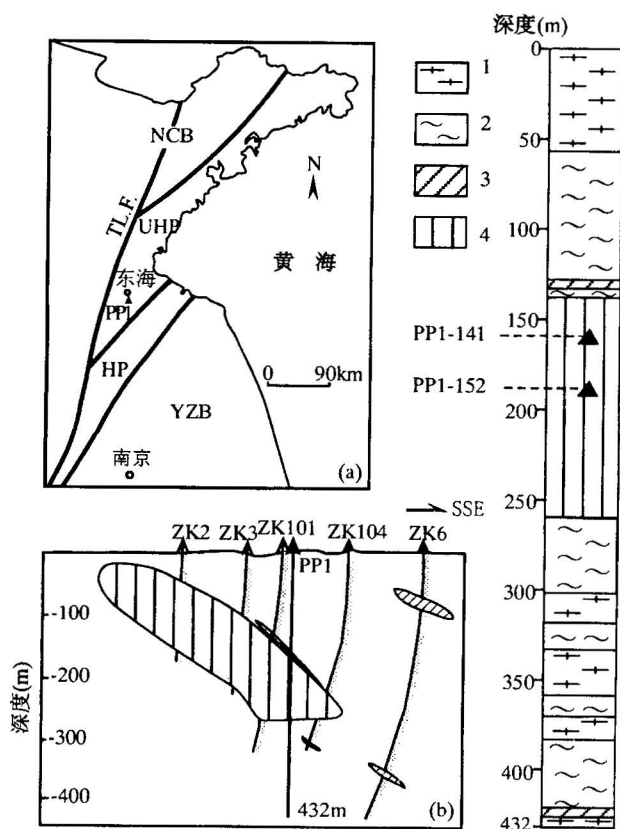


图 1 苏鲁超高压变质带的区域构造图 (a)、东海芝麻坊超基性岩体的剖面图 (b) 以及 CCSD-PP1 柱状图
Fig. 1 Tectonic sketch map of the Su-Lu UHP belt (a), section map of the Zhimafang ultramafic body (b), and vertical section of the CCSD-PP1 showing sample location

1—副片麻岩; 2—花岗片麻岩; 3—榴辉岩; 4—超基性岩;

▲—石榴子石橄榄岩样品位置

1—Paragneiss; 2—granitic gneiss; 3—eclogite; 4—ultramafic rocks; ▲—sample locations of garnet-peridotite

表 1 石榴石橄榄岩主要矿物石榴石(Grt)、橄榄石(Ol)、斜方辉石(Opx)、单斜辉石(Cpx)的电子探针分析数据

Table 1 Representative compositions of garnet (Grt), olivine (Ol), orthopyroxene (Opx), clinopyroxene (Cpx) in garnet peridotite

样号	矿物代号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
141-12-16a	Cpx	54.80	0.01	1.43	1.30	2.49	0	15.95	21.63	2.03	0	99.64
141-12-16i	Cpx	54.60	0.03	1.02	1.16	2.23	0	16.30	22.49	1.49	0	99.32
141-12-16i	Cpx	54.60	0.03	1.02	1.16	2.23	0	16.30	22.49	1.49	0	99.32
141-12-16c	Cpx	55.39	0.05	1.49	1.29	2.55	0	16.07	21.80	2.09	0.01	100.74
141-12-16d	Grt	41.26	0	21.79	2.14	11.38	0	18.28	4.16	0.01	0	99.02
141-12-16e	Grt	41.78	0.04	22.12	2.37	11.21	0	18.53	4.80	0.02	0	100.87
141-12-16g	Grt	41.02	0.03	19.75	4.23	11.93	0	17.22	5.07	0.03	0.02	99.30
141-12-16j	Grt	41.52	0.03	22.12	2.11	10.87	0	18.93	4.86	0.04	0.02	100.50
141-12-16e	Grt	41.78	0.04	22.12	2.37	11.21	0	18.53	4.80	0.02	0	100.87
141-12-16g	Grt	41.02	0.03	19.75	4.23	11.93	0	17.22	5.07	0.03	0.02	99.30
141-12-16j	Grt	41.52	0.03	22.12	2.11	10.87	0	18.93	4.86	0.04	0.02	100.50
141-12-16l	Opx	58.29	0.03	0.18	0.03	5.27	0	36.38	0.08	0.02	0	100.28
141-12-16m	Opx	58.19	0	0.13	0.02	5.63	0	36.60	0.06	0.04	0	100.67
141-12-16n	Opx	58.21	0.01	0.18	0.07	5.52	0	36.51	0.06	0.01	0.03	100.60
141-12-16o	Opx	57.94	0.03	0.20	0.08	5.61	0	36.40	0.09	0.04	0	100.39
141-12-16p	Opx	58.42	0	0.26	0.10	5.45	0	36.51	0.05	0.02	0	100.81
141-12-16f	Ol	58.51	0	0.16	0.07	5.37	0	36.90	0.09	0	0	101.10
141-12-16h	Ol	41.17	0	0	0.01	8.33	0	51.54	0	0.02	0	101.07
141-12-16k	Ol	40.82	0.02	0	0	8.83	0	51.82	0	0	0.01	101.50
141-12-T8	Ol	41.97	0	0	0.03	7.01	0.11	51.41	0.40	0.03	0.02	100.98
141-12-16h	Ol	41.17	0	0	0.01	8.33	0	51.54	0	0.02	0	101.07
141-12-16k	Ol	40.82	0.02	0	0	8.83	0	51.82	0	0	0.01	101.50

表 2 石榴石中斜方辉石(Opx)和单斜辉石(Cpx)包裹体成分的电子探针分析数据

Table 2 Representative compositions of orthopyroxene (Opx), clinopyroxene (Cpx) inclusion in garnet

样号	矿物代号	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	Cr ₂ O ₃	FeO	NiO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
152-1-4	Cpx	54.81	0.073	1.28	16.32	1.53	2.36	0	21.55	1.86	0.084	99.86
152-1-1	Opx	58.38	0	0.15	37.40	0.102	4.77	0.09	0.078	0.07	0.01	101.04
141-t14	Cpx	54.71	0	1.60	15.72	1.27	2.54	0	21.33	2.04	0.03	99.36
141-t13	Cpx	55.26	0	1.75	15.81	1.42	2.71	0	21.18	2.21	0.01	100.4

斜辉石包裹体中还存在椭圆形钛斜硅镁石和钛粒硅镁石的小包裹体,长 20~100 μm ,宽 5~15 μm (图 3c)。

SEM 及电子探针分析(表 3)获得钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体中的化学成分,其中, SiO₂ 为 33.11%~36.99%, TiO₂ 为 4.82%~8.62%, FeO 为 6.35%~7.82%, MgO 为 46.32%~48.72%。根据矿物中金属阳离子 (Mg+Fe+Ti+Ni)/Si(Mg[#]) 比值可确定钛斜硅镁石和钛粒硅镁石,比值在 2.36~2.51 之间,为钛斜硅镁石,比值在 2.24~2.33 之间为钛粒硅镁石。计算表明,表 3 中 ST1、ST2、ST4、ST6、ST7、ST9 为钛粒硅镁石,ST3、ST5、ST10、ST11、ST12、ST15 为钛斜硅镁石。

3 石榴石橄榄岩中包裹体温压计算

根据矿物化学成分特点和对不同温度压力计的适用范围以及已有的大别山石榴石橄榄岩地质温压计的使用研究,笔者选择 Harley(1984)石榴子石-斜

方辉石 Fe²⁺-Mg²⁺ 交换温度计, Nickel 等(1985)石榴子石-斜方辉石压力计和 Finnerty 等(1987)斜方辉石-Al 压力计, Krogh-Ravna(2000)单斜辉石-石榴子石 Fe²⁺-Mg 交换温度计来计算岩石形成的温压条件。计算结果如图 4 所示,当温度在 750~900℃,岩石的压力范围达到 4.2~5.5 GPa,甚至还要高些。这一温压范围与 Yang(1993)计算的温压范围是一致的。

根据 CCSD-PP1 石榴子石中 Opx-Cpx 包裹体的成分以不同方法计算包裹体的形成温压条件: $t_{\text{Krogh}}=790\sim792^\circ\text{C}$; $t_{\text{Harley}}=716\sim754^\circ\text{C}$; $t_{\text{EG}}=889\sim879^\circ\text{C}$; $t_{\text{Pow}}=865\sim855^\circ\text{C}$; $t_{\text{Opx-Cpx[BM]}}=914^\circ\text{C}$; $p_{\text{BKN}}=4.9\sim5.1\text{ GPa}$; $p_{\text{NG}}=4.9\text{ GPa}$; $p_{\text{MC}}=4.8\text{ GPa}$ 。推测包裹体形成温度约 850℃,压力约 4.9 GPa,与估算的岩石形成温度基本一致。

4 讨论

含 Ti 或含 F 的钛斜硅镁石产生在阿尔卑斯、

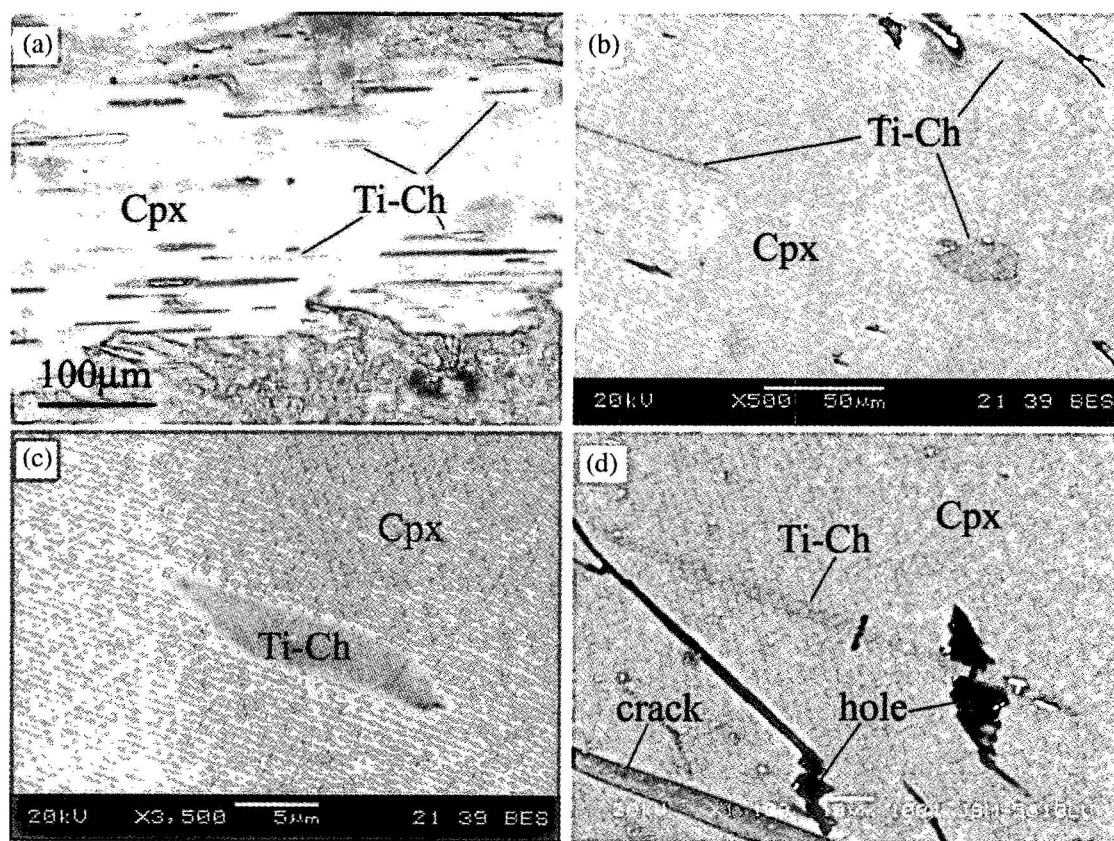


图 3 石榴石橄榄岩 (PP1-14) 中石榴子石内单斜辉石 (Cpx) 包裹体中钛粒硅镁石 (Ti-Ch) 出溶体

Fig. 3 Titanite clinohumite and titanochondrodite exsolution rods and flakes in clinopyroxene from sample PP1-14

(a) 单斜辉石包裹体中钛粒硅镁石的出溶棒, 单偏光; (b) 单斜辉石包裹体中钛粒硅镁石的出溶片晶和出溶棒, 背散射电子图像 (BSE); (c) 单斜辉石包裹体中钛粒硅镁石的出溶片晶, 背散射电子图像 (BSE); (d) 钛粒硅镁石的出溶棒, BSE
(a) — Titanite clinohumite exsolution rods in clinopyroxene, plane-polarized light; (b) — titanite clinohumite exsolution rods and flakes in clinopyroxene, BSE; (c) — titanite clinohumite flake in clinopyroxene, BSE; (d) — titanite clinohumite exsolution rod in clinopyroxene, BSE

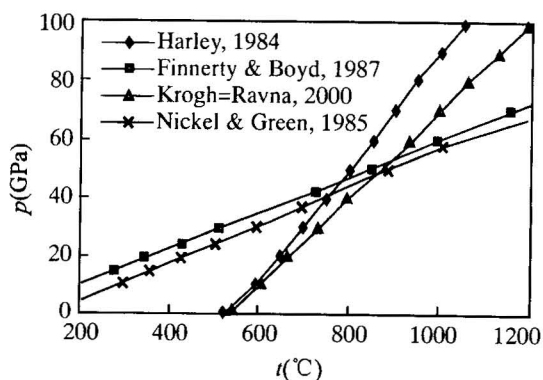


图 4 CCSD-PP1 孔中石榴石二辉橄榄岩温压计算结果

Fig. 4 The thermobarometer calculation for garnet peridotite from CCSD-PP1

Liguria 和大别苏鲁造山带中的绿泥石、尖晶石和石榴石橄榄岩中 (Trommsdorff et al., 1980; Scambelluri et al., 1995; Zhang et al., 1995)。含 TiO_2

或 F 的硅镁石类矿物系统可在较宽的压力范围内与顽火辉石共存, Weiss (1997) 提供了 8.0 GPa 范围内 TiO_2 、FeO 和 F 的含量对整个系统的影响的“含氟-羟基-钛斜硅镁石和合成含氟斜硅镁石的天然羟基-钛斜硅镁石的分解反应”的实验曲线 (图 5), F 的存在使钛斜硅镁石稳定在很高的温度, 这一反应在许多含水化合物中观察到; 当 F 被 OH 取代并且 F 含量为 0% 时, 钛斜硅镁石在低温高压的范围稳定, 位于图 5 的左面, 标志 $X_{\text{Ti}}=0.46$, $X_{\text{Fe}}=0.19$, $X_{\text{F}}=0$ 的曲线代表天然无氟-羟基-钛斜硅镁石的稳定上限。当 $X_{\text{Ti}}=0.19$, $X_{\text{Fe}}=0.03$, $X_{\text{F}}=0$ 及 $X_{\text{Ti}}=0$, $X_{\text{Fe}}=0$, $X_{\text{F}}=1$ 时, 天然无氟-羟基-钛斜硅镁石的稳定域位于图 5 的右面的高温低压域 ($>1000^\circ\text{C}$)。

因此, 根据以上的原则, 对东海芝麻坊石榴石橄榄岩中石榴子石内单斜辉石包裹体中钛斜硅镁石出溶体的 TiO_2 、FeO、F 和 OH 的含量进行分析: ① 对单斜辉石包裹体中钛斜硅镁石小包裹体及钛斜硅镁

表 3 单斜辉石包裹体中钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体成分(%)的电子探针分析数据

Table 3 Representative compositions(%) of titanian clinohumite and titanochondrodite in clinopyroxene inclusion

Sample	16T1	16T2	16T3	16T4	16T5	16T6	16T7	16T9	16T10	16T11	16T12	16T15
SiO ₂	36.92	36.77	33.88	35.91	34.78	35.28	36.99	36.65	34.25	33.54	35.19	33.11
TiO ₂	4.93	4.82	8.62	6.01	7.25	7.19	4.98	5.92	7.86	7.57	5.89	8.13
Al ₂ O ₃	0.00	0.00	0.01	0.04	0.04	0.02	0.04	0.04	0.01	0.00	0.00	0.02
Cr ₂ O ₃	0.07	0.15	0.22	0.12	0.11	0.14	0.16	0.01	0.12	0.16	0.18	0.11
FeO	7.08	7.58	7.61	6.35	6.61	6.81	7.32	6.54	7.42	7.82	7.74	7.06
MnO	0.07	0.05	0.10	0.00	0.11	0.13	0.02	0.02	0.06	0.09	0.10	0.12
MgO	48.72	48.64	47.33	47.80	47.52	46.78	48.41	48.26	47.12	46.91	48.40	46.32
CaO	0.13	0.32	0.31	0.90	0.66	0.62	0.48	0.38	0.30	0.24	0.33	0.31
Na ₂ O	0.02	0	0	0.03	0.06	0.01	0.02	0	0.01	0.02	0	0
K ₂ O	0	0.01	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0	0	0.01
NiO	0.28	0.29	0.22	0.18	0.28	0.22	0.22	0.29	0.30	0.24	0.19	0.27
总量	98.22	98.63	98.30	97.34	97.42	97.20	98.64	98.12	97.47	96.59	98.02	95.46
Si	4.15	4.13	3.85	4.07	3.96	4.02	4.14	4.11	3.91	3.88	3.99	3.86
Al	0	0	0	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0	0
Ti	0.42	0.41	0.74	0.51	0.62	0.62	0.42	0.50	0.68	0.66	0.50	0.71
Fe	0.67	0.71	0.72	0.60	0.63	0.65	0.69	0.61	0.71	0.76	0.73	0.69
Cr	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.02	0.02	0.01
Mn	0.01	0.01	0.01	0	0.01	0.01	0	0	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	8.15	8.14	8.01	8.08	8.06	7.95	8.08	8.08	8.02	8.09	8.19	8.06
Ca	0.02	0.04	0.04	0.11	0.08	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.04	0.04
Na	0	0	0	0.01	0.01	0	0	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.03
Cations	13.44	13.47	13.41	13.42	13.42	13.36	13.43	13.39	13.41	13.46	13.50	13.42
Mg [#]	2.23	2.25	2.46	2.26	2.36	2.29	2.23	2.24	2.41	2.45	2.37	2.46

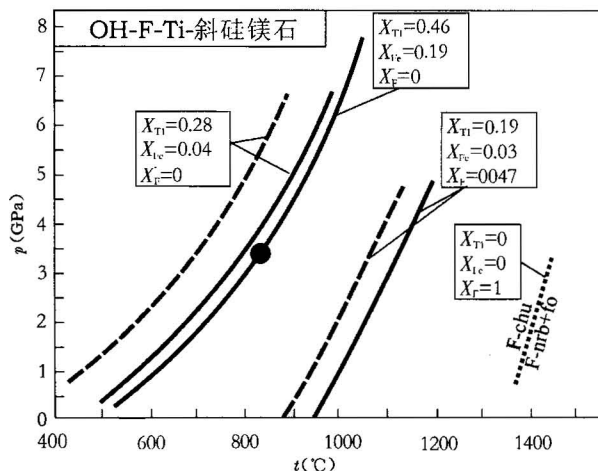
注: $Mg^{\#} = (Mg + Fe + Ti + Ni) / Si$ 。

图 5 含氟羟基-钛斜硅镁石和合成含氟斜硅镁石的天然羟基-钛斜硅镁石的分解反应实验曲线(据 Weiss, 1997)

Fig. 5 Experimental curves of the breakdown reactions of natural hydroxyl-titanian clinohumite, of fluorine-hydroxyl-titanian clinohumate, and of synthetic fluorine clinohumite (after Weiss, 1977)

在图的双变量场中,共存反应物和生成物包络在破折线和实线中。标志 $X_{Ti}=0.46$, $X_{Fe}=0.19$, $X_F=0$ 的曲线代表天然无氟羟基-钛斜硅镁石的稳定上限。●代表出溶的温度及压力

The divariant fields in which reactants and products coexist are enveloped by dashed and solid lines.

The curve label $X_{Ti}=0.46$, $X_{Fe}=0.19$, $X_F=0$ refers to the upper stability limit of natural fluorine-free hydroxyl-titanian clinohumite.

● showing temperature and pressure of exsolution

石出溶片晶的 F 含量进行波谱定性分析,结构图均显示无 F(图 6);② 根据矿物化学分析,运用 Jones 等(1969)方法计算钛斜硅镁石的 OH 含量,结果表明钛斜硅镁石的 OH 含量从 0.52 到 1.18(平均 0.878);③ 钛斜硅镁石中 X_{OH} , X_{Fe} 和 X_{Ti} 的计算根据 Engi 等(1980)提出的公式 $X_{OH} = OH / (OH + F)$, $X_{Fe} = Fe / (Fe + Mg)$, $X_{Ti} = Ti / (Ti + M)$ ($Ti + M = 1$), 计算结果表明, $X_{OH} = OH / (OH + F) = 1$, $X_F = 0$, X_{Fe}

$= 0.074 \sim 0.094$ (平均 0.082), $X_{Ti} = 0.41 \sim 0.74$ (平均 0.56)。根据 $X_{OH} = 0$, $X_{Fe} = 0.074 \sim 0.094$, 平均 0.082; $X_{Ti} = 0.41 \sim 0.74$, 平均 0.56 的背景参数, 钛斜硅镁石包裹体和出溶体的稳定域大致相当于自然钛斜硅镁石、含氟钛斜硅镁石和合成含氟钛斜硅镁石的分解反应的实验曲线(Weiss, 1997)中左侧的低温高压域位置,其中 X_{Ti} 的数据稍为偏高。石榴石橄榄岩及其包裹体的变质温度相当(约 850°C),

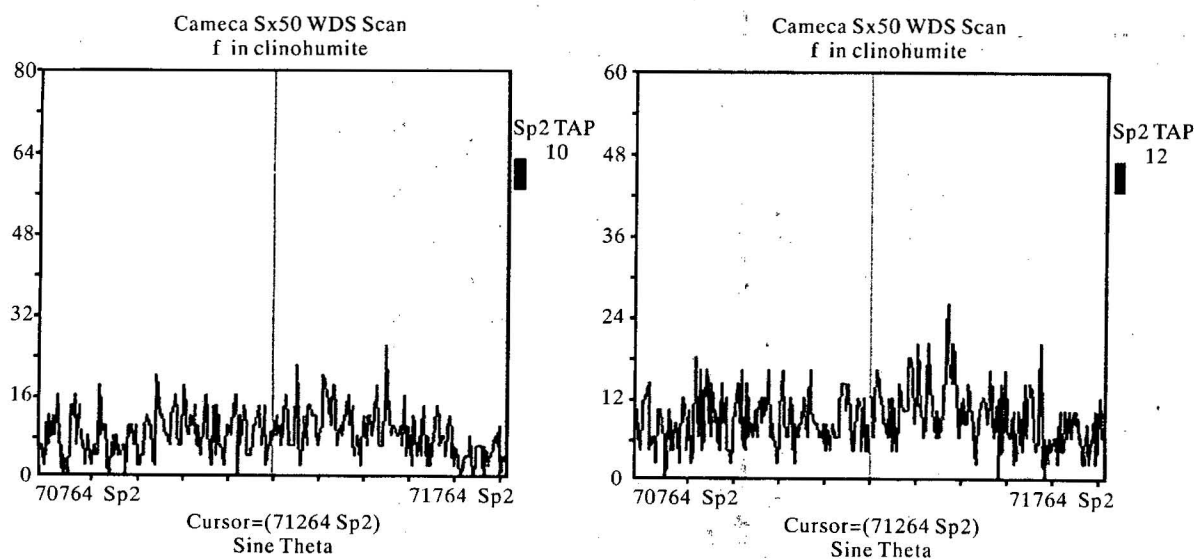


图 6 钛斜硅镁石(a)和钛粒硅镁石(b)的 F 含量的波谱定性分析

Fig. 6 The WDS qualitative analysis for fluorine in Titanian clinohumite (a) and titanochondrodite (b)

以此温度估算钛斜硅镁石包裹体和出溶体的稳定域压力在 3.5 GPa 左右。推测一种可能是石榴石橄榄岩及其包裹体在 4.0~5.0 GPa, 850℃ 形成后, 在降压 (3.5 GPa) 过程中形成钛斜硅镁石包裹体和出溶体; 另一种可能是石榴石橄榄岩及其包裹体形成后温度增高, 钛斜硅镁石包裹体和出溶体的形成压力将超过 3.5 GPa。无论哪种情况, 钛斜硅镁石包裹体和出溶体均形成在超高压的条件下, 记录了该岩石在折返过程中仍处在超高压变质域中。

5 结论

在中国大陆科学钻探工程预先导孔 CCSD-PP1 的石榴石橄榄岩的单斜辉石包裹体中发现钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶体结构, 估计这种钛斜硅镁石和钛粒硅镁石在单斜辉石中的出溶记录的最低压力为 3.5 GPa。由于出溶结构发育在苏鲁超高压地体的折返过程中, 出溶结构发育时的平衡温度 (850℃) 相对正常地幔岩的温度较低, 表明该岩石可能从正常地幔楔的环境被携带到俯冲带中, 与俯冲带中的岩石处于平衡状态, 并在其后的折返过程中被带到地壳浅部。尽管大陆地壳物质在俯冲带中可以循环到 200 km 以下的深度 (Ye et al., 2000; Zhu et al., 2002a, b; Zhu, 2003), 但岩石圈地幔物质的循环鲜有报道。本文报道的单斜辉石中钛斜硅镁石和钛粒硅镁石出溶结构为大陆岩石圈地幔在俯冲带中的循环提供了证据。但由于目前对芝麻坊石榴石橄榄岩

的成因尚有争议, 需要从多方面来寻求正确答案。

致谢: 感谢美国加利福尼亚大学 L. Dobrizhinskaya 博士及美国斯坦福大学 R. Y. Zhang 博士的协作和帮助。

参 考 文 献

金振民, 金淑燕, 高山等. 1998. 大别山超高压岩石形成深度局限于 100~150km 吗? 科学通报, 43: 767~771.

References

- Aoki K I, Fujino K, Akaogi M. 1976. Titanian chondrodite and titanian clinohumite derived from the upper mantle in the Buell Park Kimberlite, Arizona, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 56: 243~253.
- Dymek R F, Boak J L, Brothers S C. 1988. Titanian chondrodite- and titanian clinohumite-bearing metadunite from the 3800 Ma Isua supracrustal belt, West Greenland: Chemistry, petrology, and origin. *Am. Mineral.*, 73: 547~558.
- Dobrizhinskaya F, Green H W, Wang S. 1996. Alpe Arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilometers. *Science*, 271, 1841~1846.
- Efimov I A. 1964. Peculiarities of origin and occurrence of eclogitic rock in northern and southern Kazakhstan. In: F A Letnikov ed. *Physico-chemical condition of metamorphism and metasomatism*. Nauka Press, Novosibirsk, 77 ~ 79. (in Russian).
- Engi M, Lindsley D H. 1980. Stability of Titanian Clinohumite: Experiments and Thermodynamic analysis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 72: 415~424.
- Finnerty A A, Boyd F R. 1987. Thermobarometry for garnet-peridotite xenoliths: a basis from upper mantle stratigraphy. In: Nixon P H ed. *Mantle Xenoliths*. J. Wiley and Sons, New York, 381~402.

- Green H W, Dobrzinetskaya L, Riggs E M, Jin Z M. 1997. Alpe Arami: a peridotite massif from the Mantle Transition Zone? *Tectonophysics*, 279: 1~21.
- Harker B, Sharp T, Zhang R, et al. 1997. Determining the origin of ultrahigh-pressure lherzolites. *Science*, 258: 702~704.
- Harley S L. 1984. An experimental study of the partitioning of Fe and Mg between garnet and orthopyroxene. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86: 359~373.
- Krogh E J. 1988. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg-geothermometer—a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99: 44~48.
- Nickel K G, Green D H. 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. *Earth and Planetary Science Letters*, 73: 158~170.
- Ogasawara Y, Zhang R Y, Liou J G. 1998. Petrogenesis of dolomitic marbles from Rongcheng in the Sulu UHP metamorphic terrane, eastern China. *Island Arc*, 7: 82~97.
- Scambelluri M, Muentener O, Hermann J, Piccardo G B, Trommsdorff V. 1995. Subduction of water into the mantle: History of an alpine peridotite. *Geology*, 23: 459~462.
- Trommsdorff V, Evans B W. 1980. Titanium hydroxyl clinohumite: Formation and breakdown in antigorite rocks (Malenco, Italy). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72: 229~242.
- Weiss M. 1997. Clinohumites: A field and experimental study. Ph.D. dissertation 12202, Swiss federal Institute of Technology (ETH), Zurich. 168.
- Wirth R, Dobrzinetskaya L F, Green H W. 2001. Electron microscope study of the reaction olivine plus $H_2O + TiO_2$ titanian clinohumite plus titanian chondrodite synthesized at 8 GPa, 1300 K. *American Mineral.*, 86: 601~610.
- Udovkina N G. 1985. Eclogites of the USSR, Moscow: Nauka Press, 286 (in Russian).
- Yang J J. 1993. Ultrahigh-pressure (60 Kbar) magnesite-bearing garnet peridotites from Northeastern Jiangsu, China. *Journal of Geology*, 101: 541~554.
- Ye K, Cong B L, Ye D L. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. *Nature*, 407: 734~736.
- Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. 1995. Talc-, magnesite- and Ti-clinohumite-bearing ultrahigh-pressure meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China. *J. Petrol.*, 36: 1011~1037.
- Zhang R Y, Liou J G, Ernst W G, Coleman R G, Shatsky V S. 1997. Metamorphic evolution of diamond-bearing and associated rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *J. Metamorphic Geol.*, 15: 479~496.
- Zhang R Y, Shu J F, Mao H K, Liou J G. 1999. Magnetite lamellae in olivine and clinohumite from Dabie UHP ultramafic rocks, central China. *Am. Mineral.*, 84: 564~569.
- Zhang R Y, Liou J G, Yang J S, Yui T F. 2000. Petrochemical constraints for dual origin of garnet peridotites from the Dabie-Sulu UHP terrane, eastern-central China. *J. Metamorphic Geol.*, 18: 149~166.
- Zhang Z, Xu Z, Xu H. 2000. Petrology of ultrahigh-pressure eclogite from the ZK703 drillhole in the Donghai, eastern China. *Lithos*, 52: 35~50.
- Zhu Y F. 2003. Comments on "Crystal-melt equilibria involving potassium-bearing clinopyroxene as indicator of mantle-derived ultrahigh-potassic liquids: an analytical review" by L L perchuk, O G Safonov, V O Yapaskurt, J M Barton Jr *Lithos* 60 (2002) 89~111: K-feldspar in metamorphic clinopyroxene, from exsolution to potassium replacement. *Lithos*, 68: 115~119.
- Zhu Y F, Ogasawara Y. 2002a. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831~836.
- Zhu Y F, Ogasawara Y. 2002b. Carbon recycled into the deep Earth: evidenced by dolomite dissociation in subduction-zone rocks. *Geology*, 30: 947~950.

Discovery of Titanoclinohumite and Titanochondrodite Exsolution in Clinopyroxene Included in Garnet Peridotite and Their Significance

XU Zhiqin¹⁾, CHEN Jing²⁾, YANG Jingsui¹⁾, LI Xuping²⁾, CHEN Fangyuan¹⁾

1) Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037

2) Beijing University, Beijing, 100871

Abstract

Garnet peridotite samples studied here were collected from the CCSD-PP1, located in the Donghai district, southeastern Sulu UHP terrane. Titanoclinohumite and Titanochondrodite exsolution texture is found in clinopyroxene inclusions in the garnet from these samples. These exsolution phases occur as flakes or rods in clinopyroxene. Thermobarometer calculation yielded $t = 716 \sim 914^\circ\text{C}$ and $p = 4.8 \sim 5.1 \text{ GPa}$, which are interpreted as the equilibrium temperature and pressure during exsolution. No fluorine is detected in titanoclinohumite ($X_{\text{OH}} = 1, X_{\text{F}} = 0, X_{\text{Fe}} = 0.074 \sim 0.094$ with an average of 0.082 and $X_{\text{Ti}} = 0.41 \sim 0.74$ with an average of 0.56). The composition of this mineral phase suggested its forming pressure $> 3.5 \text{ GPa}$ ($> 850^\circ\text{C}$) and therefore implies that titanoclinohumite exsolution happened in UHP conditions during the exhumation of garnet peridotites.

Key words: garnet peridotite; titanoclinohumite; titanochondrodite; exsolution; Sulu UHP terrane