

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

CCSD 超高压变质岩绿辉石中的石英出溶体 及其大陆动力学意义

梁金龙¹⁾, 孙晓明^{1,2)}, 徐莉¹⁾, 翟伟¹⁾, 汤倩¹⁾, 梁业恒¹⁾

1) 中山大学地球科学系, 广州, 510275

2) 中国科学院同位素年代学和地球化学实验室, 广州, 510640

内容提要:单斜辉石中发育石英出溶体是 UHP 变质作用的典型矿物学标志之一, 在世界上著名 UHP 变质体中屡有发现。本文利用激光 Raman 光谱和电子探针分析在中国大陆科学钻探先导孔(CCSD-PP1)榴辉岩岩心的绿辉石中发现了大量石英(棒)出溶现象。通过与 CCSD 主孔榴辉岩各种赋存形式的绿辉石成分对比, 发现含石英出溶体的绿辉石具有超硅特征, 这是出溶现象发生的决定性因素之一。结合高压实验岩石学资料, 提出在 UHP 变质的峰值期部分 Si 进入六次配位的 Si-O 八面体位置, 压力降低这部分 Si 析出, 形成石英出溶体的出溶机制。结合新的矿物学研究进展, 认为绿辉石中出溶石英所标志的压力应远大于前人提出的 2.5 GPa, 意味着苏鲁超高压变质带陆壳物质的俯冲深度要大于目前一般认为的 80~120 km 范围。

关键词:绿辉石; 石英出溶体; 榴辉岩; 大陆动力学; CCSD

当 Smith D. C. 1984 年在挪威西部加里东造山带首次报道单斜辉石中发现了柯石英时, 就曾顺便提到单斜辉石中发育密集、规则排列的针状石英出溶体。可能柯石英的发现意义过于重大, 当时人们对辉石中的石英出溶体并没太多在意。后来, 这一现象在世界上几个著名的超高压(UHP)变质体中普遍被发现: Gayk (1995)、Dobrzhinetskaya 等(2002)、Tsai 等(2000)、Zhu(2002)、Katayama(2000)、Zhang L F 等(2002, 2003)、Wang 等(1993)、Zhang 等(1995)、王清海等(2002)、王璐等(2003)分别报道过在德国巴伐利亚的 Münchberg 地体、阿尔卑斯山(瑞士)、北哈萨克斯坦 Kokchetav 地体、中国西天山和大别—苏鲁地体等 UHP 变质体中发现单斜辉石中的石英出溶体。除此而外, Smyth(1980)和 Bruno 等(2002)分别在南非金伯利岩的榴辉岩捕虏体中发现了绿辉石中的石英出溶现象。现在, 绿辉石中发育石英出溶体已经成为地质体曾经历 UHP 变质作用的典型矿物学标志之一(Zhang L F et al., 2002)。

然而, 由于相关高压实验岩石学研究的不足, 至今人们仍然不能充分阐明出溶之前硅质如何溶解于

单斜辉石之中? 具体的出溶机制是什么? 出溶究竟意味着多大的压力? 或者说相应的地质体曾经俯冲到地表以下多大的深度? 为此, 本文在系统收集前人有关研究成果的基础上, 结合 UHP 变质作用矿物学研究的最新进展, 以 CCSD 先导孔和主孔榴辉岩中的绿辉石为研究对象, 通过电子探针分析和拉曼光谱鉴定, 对绿辉石中的石英出溶现象进行了进一步研究, 对出溶机制和压力限定(即俯冲深度)提出了初步看法。

1 样品及分析方法

本研究样品榴辉岩按绿辉石特征分为三类: ① CCSD-PP1 中新鲜的绿帘石榴辉岩, 主要由石榴子石、绿辉石、绿帘石、金红石及少量黝帘石和石英组成, 其中绿辉石中包含密集平行排列的棒状石英出溶体, 出溶体较粗, 横断面直径 1~3 μm , 最大可达 5 μm , 长几十微米(图 1a、b); ② CCSD 主孔新鲜榴辉岩, 其中绿辉石含有柯石英包裹体但不含石英出溶体(图 1c); ③ CCSD 主孔的退变榴辉岩中的粒间绿辉石和包裹体绿辉石, 其中粒间绿辉石的周边都发育冠状的后成合晶边(图 1d)。

注: 本文为国家自然科学基金重大项目(编号 40399142)、中国科学院同位素年代学和地球化学实验室合作基金(编号 GIGIso-0504)和国家重大基础研究发展规划“973”项目(编号 2003C13716501)联合资助成果。

收稿日期: 2006-10-23; 改回日期: 2006-11-10; 责任编辑: 周健。

作者简介: 梁金龙, 男, 1967 年生, 博士研究生。主要从事矿床地球化学研究。Email: richardlj104@yahoo.com.cn。通讯作者: 孙晓明, Email: eessxm@mail.sysu.edu.cn。

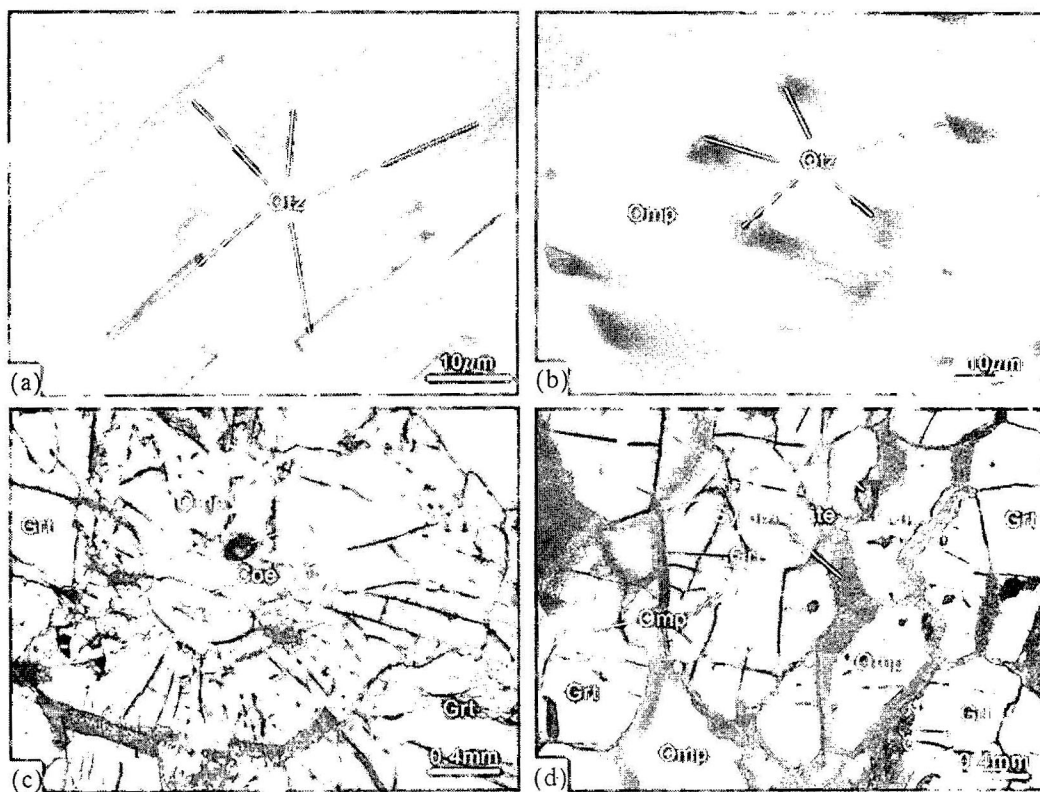


图 1 CCSD 榴辉岩中的绿辉石和石英出溶体

Fig. 1 Quartz exsolutions in omphacite of CCSD eclogite

(a)—含石英出溶棒的绿辉石; (b)—石英出溶棒与切片方向垂直; (c)—包含柯石英的新鲜绿辉石; (d)—绿辉石周边被后成合晶替代;

Omp—绿辉石; Grt—石榴子石; Rt—金红石; Coe—柯石英; Qtz—石英; Symplectite—后成合晶

(a)—Omphacite with quartz exsolution bars; (b)—quartz exsolution bars perpendicular to the section; (c)—fresh omphacite with coesite inclusion; (d)—retrograded omphacite with coronal symplectite; Omp—omphacite; Grt—garnet; Rt—rutile; Coe—coesite; Qtz—quartz

绿辉石中出溶体的物相鉴定采用中国科学院广州地球化学研究所的 RENISHAW Raman Microprobe 2000 型激光拉曼谱仪, 该仪器的测试范围: $50 \sim 9000 \text{ cm}^{-1}$, 分辨率: $1 \sim 2 \text{ cm}^{-1}$, 空间分辨率: $2 \mu\text{m}$ 。绿辉石的成分分析在广州地球化学研究所的 JXA-8100 电子探针仪上完成。加速电压 15 kV , 束流 $0.30 \times 10^{-8} \text{ nm}$, 束斑 $10 \mu\text{m}$, 标样: K 用钾长石, Na、Si、Al 用硬玉, Mg、Ca 用透辉石, Ti 用金红石(合成), Fe、Mn 用钙-锰辉石, Cr 用 Cr_2O_3 (合成)。

2 结果和讨论

由于切片方向不同, 绿辉石中的出溶体在薄片上表现为棒状或钉状(图 1a、b)。Raman 光谱测定的结果见图 2: 其中 465 cm^{-1} 为石英的 Raman 主峰, 207 cm^{-1} 、 265 cm^{-1} 、 355 cm^{-1} 、 1159 cm^{-1} 为石英的弱峰; 而 680 cm^{-1} 和 1120 cm^{-1} 则为主矿物绿辉石的 Raman 谱峰。因为出溶体较粗大, 而且直接出露于

薄片表面, 可以直接测定其成分。电子探针测定的结果表明出溶体的成分为 SiO_2 (表 1)。因此确定, 绿辉石中的出溶体为石英。鉴于前人一般将出溶机制归结为高压 ($> 2.5 \text{ GPa}$) 条件下绿辉石中产生对压力敏感的 Ca-Eskola 分子 ($\text{Ca}_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$), 压力降低时, Ca-Eskola 分子分解产生 Ca-Tschermak 分子 ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$) 和石英 (SiO_2), 本文将包含出溶体和不包含出溶体的、新鲜榴辉岩和退变质榴辉岩、粒间绿辉石和包裹体绿辉石都做了成分分析(表 1), 并按照 En ($\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$)、Wo ($\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$)、Fs ($\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$)、Jd ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$)、Ts ($\text{CaAl}_2\text{SiO}_6$)、Es ($\text{Ca}_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$) 6 个端员进行了端员组分百分含量计算(表 2)。计算结果表明, 在电子探针的分析误差范围内, 绿辉石中并没有发现前人研究者所称因 Ca-Eskola 分子分解产生的数量客观的 Ca-Tschermak 分子。

2.1 绿辉石的成分变化特征

为了阐明发育石英出溶体的绿辉石的成分特

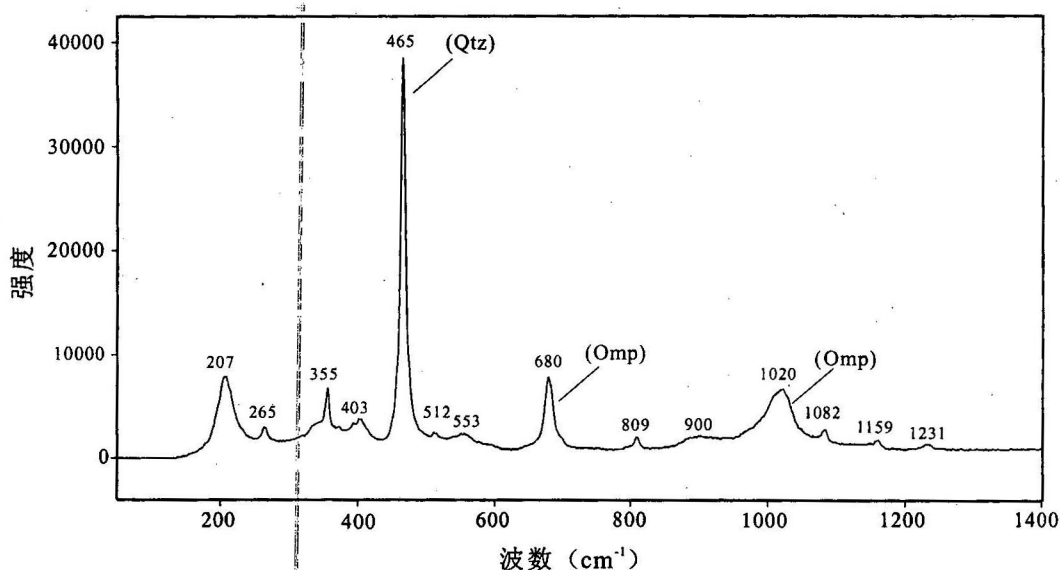


图2 CCSD 榴辉岩绿辉石中石英出溶体的激光拉曼谱图

Fig. 2 Laser Raman spectrum of quartz exsolutions in omphacite of CCSD eclogites

表1 绿辉石的电子探针成分(%)

Table 1 Representative microprobe analyses (%) of omphacite from CCSD and CCSD-PP1

取样地点	CCSD (370m)				CCSD-PP1		CCSD(193m)			CCSD (307m)			CCSD-PP1
岩性描述	新鲜榴辉岩 (无出溶物,含柯石英包裹体)				新鲜榴辉岩 (含出溶物)		退变质榴辉岩 (无出溶物)						新鲜榴辉岩 出溶物
样品编号	03558				QLT41	QLT33	04303			04306			QLT33
测点位置	c	m	r(2)	i(3)	(4)	(4)	i(2)	m(3)	r(3)	i(6)	m	r(2)	
Na ₂ O	7.63	7.86	7.72	7.80	7.91	7.40	8.28	8.44	8.34	11.29	11.19	11.24	0.02
K ₂ O	0.01	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
MgO	7.42	7.40	7.47	7.48	7.27	7.99	6.76	6.78	6.72	3.70	3.76	3.59	0.00
SiO ₂	55.38	54.98	54.68	55.10	54.91	54.52	55.85	55.97	55.76	56.67	56.90	56.97	100.11
CaO	12.01	11.92	11.87	11.76	11.25	12.14	10.81	10.89	10.89	6.39	6.64	6.28	0.06
Al ₂ O ₃	10.18	10.25	10.28	10.18	8.93	8.06	11.53	11.51	11.58	16.38	16.06	16.19	0.03
TiO ₂	0.06	0.09	0.08	0.09	0.04	0.03	0.07	0.06	0.07	0.08	0.09	0.10	0.03
FeO	7.22	7.07	6.84	7.18	9.79	9.47	6.64	6.61	6.44	6.07	6.05	6.18	0.28
MnO	0.03	0.00	0.03	0.04	0.01	0.03	0.01	0.06	0.04	0.05	0.00	0.04	0.00
Cr ₂ O ₃	0.06	0.06	0.02	0.03	0.01	0.01	0.04	0.01	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00
Total	99.99	99.63	99.02	99.67	100.12	99.65	100.01	100.33	99.86	100.63	100.68	100.66	100.54
以6个氧原子为基础计算的阳离子数													
Na	0.5336	0.5520	0.5450	0.5477	0.5596	0.5269	0.5750	0.5847	0.5798	0.7687	0.7613	0.7652	0.0019
K	0.0002	0.0000	0.0010	0.0007	0.0000	0.0003	0.0011	0.0005	0.0006	0.0000	0.0000	0.0008	0.0000
Mg	0.3992	0.3997	0.4053	0.4038	0.3955	0.4372	0.3609	0.3610	0.3593	0.1939	0.1967	0.1881	0.0000
Si	1.9980	1.9917	1.9910	1.9948	2.0034	2.0022	2.0007	1.9997	1.9995	1.9900	1.997	1.9993	3.9840
Ca	0.4644	0.4628	0.4629	0.4563	0.4398	0.4776	0.4150	0.4168	0.4185	0.2404	0.2498	0.2363	0.0027
Al(IV)	0.0020	0.0083	0.0090	0.0052	0.0000	0.0000	0.0000	0.0003	0.0005	0.0100	0.0030	0.0007	0.0013
Al(VI)	0.4308	0.4294	0.4324	0.4291	0.3876	0.3509	0.4874	0.4847	0.4890	0.6680	0.6613	0.6690	0.0000
Ti	0.0015	0.0025	0.0024	0.0024	0.0012	0.0008	0.0020	0.0015	0.0018	0.0021	0.0023	0.0027	0.0008
Fe ³⁺	0.1487	0.1837	0.1737	0.1761	0.2444	0.2528	0.1234	0.1447	0.1302	0.1575	0.1458	0.1354	0.0000
Fe ²⁺	0.0692	0.0304	0.0346	0.0413	0.0543	0.0381	0.0755	0.0528	0.0629	0.0207	0.0317	0.0461	0.0092
Mn	0.0010	0.0000	0.0011	0.0012	0.0003	0.0009	0.0003	0.0019	0.0011	0.0013	0.0000	0.0011	0.0000
Cr	0.0017	0.0016	0.0006	0.0008	0.0002	0.0004	0.0011	0.0002	0.0007	0.0004	0.0000	0.0011	0.0000
Total	4.0502	4.0622	4.0588	4.0596	4.0832	4.0861	4.0416	4.0488	4.0439	4.0532	4.0492	4.0457	3.9999

注:测点位置一栏中:i—包裹体;c—绿辉石核部;m—幔部;r—边部;括号内的数字为测点总数。

表 2 绿辉石的端员组分(%)

Table 2 The end-number contents (%) of Omphacite

取样地点	CCSD(370m)				CCSD-PP1		CCSD(193m)			CCSD(307m)		
岩性描述	新鲜榴辉岩(无出溶物)				新鲜榴辉岩(含出溶物)		退变质榴辉岩(无出溶物)					
样品编号	03558				QLT41	QLT33	04303			04306		
测点位置*	c	m	r(2)	i(3)	(4)	(4)	i(2)	m(3)	r(3)	i(6)	m	r(2)
En	16.95	16.61	16.98	16.88	15.66	17.24	15.61	15.44	15.51	8.34	8.51	8.19
Wo	25.29	25.00	24.96	24.82	24.17	25.85	22.99	23.10	23.16	14.23	14.93	14.32
Fs	12.16	11.69	11.47	11.95	15.55	15.07	11.31	11.10	10.95	10.07	10.09	10.39
Jd	45.61	46.18	45.98	46.11	44.62	41.83	50.09	50.36	50.39	66.61	66.32	67.10
Ts	0.00	0.53	0.61	0.24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.74	0.14	0.00
Es	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注: En— $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$; Wo— $\text{Ca}_2\text{Si}_2\text{O}_6$; Fs— $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$; Jd— $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$; Ts— $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6$; Es— $\text{Ca}_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$; 其他同表1。

征,选取有代表性的 Na、Ca、Mg、Al、Si 等元素和端员组分 Jd(硬玉)在不同产状的绿辉石(包含一不包含石英出溶体的绿辉石、新鲜—退变质绿辉石)做了对比分析,结果如图3、4所示。图3a 表明,绿辉石中 Na-Ca 呈反相关关系,新鲜榴辉岩中 Na 含量低,退变质榴辉岩中 Na 含量高, Ca 则反之。含石英出溶体的绿辉石具有高 Ca 低 Na 的特点。同时表明,退变质作用使绿辉石吸收 Na 而排出 Ca;图3b 表明,绿辉石中 Mg-Al 亦呈反相关关系,新鲜榴辉岩高 Mg 低 Al,退变质榴辉岩反之,含石英出溶体的绿辉石具有最高的 Mg、最低的 Al。同时可以看出,退变质过程绿辉石吸收 Al 而排出 Mg;图3c 表明,单位分子中的 Na 原子数与绿辉石中的端元组分硬玉(Jd)含量之间几乎是1:1的关系,表明所有 Na 都参与到硬玉成分中,并且退变质导致绿辉石中的硬玉成分增加。图3a、c 显示包含柯石英或石英出溶体的新鲜绿辉石 Na(即 Jd)的含量很低,这表明绿辉石中 Jd 的含量与形成压力无关。Tsai 等(2000)研究认为 Na 的含量自绿辉石边部到核部呈增加趋势,与本结果

有所不同。超高压试验(Ye et al., 2000)表明 Na、P、Ti 在石榴子石中的含量与压力成正相关关系,看来这一结论并不适合绿辉石。图4是各种绿辉石单位分子中 Si 原子数的比较,一个明显的特征是,含有石英出溶体的绿辉石单位分子中 Si 的原子数高于其他绿辉石,并且大于2.0。这说明,即使石英出溶之后,主晶仍具有超硅的特征,充分印证了 Smith(1984)提出的出溶前有超硅单斜辉石存在的假设。除一个颗粒外,绿辉石内部一般是核部单位分子 Si 原子数高于边部。考虑到做为包裹体形式存在的绿辉石在折返过程中受到主晶的保护不容易发生出溶现象,拟将包裹体绿辉石的成分做出溶前的参照成分。表1可见,包裹体绿辉石中 Si 的含量并不高,甚至在有的颗粒中是最低的。与此有关的一个有趣现象是 CCSD 主孔榴辉岩中没有发现镜下可见的绿辉石石英出溶现象,而在 CCSD-PP1 中这种现象却很常见。从区域地质环境而言,矿物所处的外部温、压条件是一致的。这说明,绿辉石中石英的出溶机制中除了大多数学者普遍认可的压力因素(Tsai et al.,

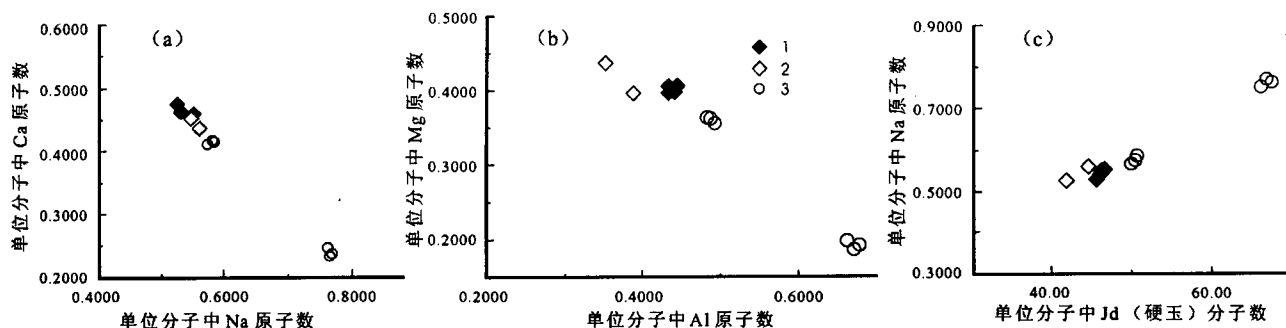


图 3 CCSD 榴辉岩单位分子绿辉石中 Na-Ca (a)、Al-Mg (b)、Jd-Na (c) 的含量及变化

Fig. 3 Anion per formula unit (apfu) of Na-Ca (a), Al-Mg (b), Jd-Na (c) in omphacite from CCSD eclogites

1—不含出溶体的新鲜榴辉岩;2—含出溶体的新鲜榴辉岩;3—不含出溶体的退变质榴辉岩

1—Fresh omphacite with coesite inclusion but without quartz exsolution; 2—fresh omphacite with quartz exsolution; 3—retrograded omphacite

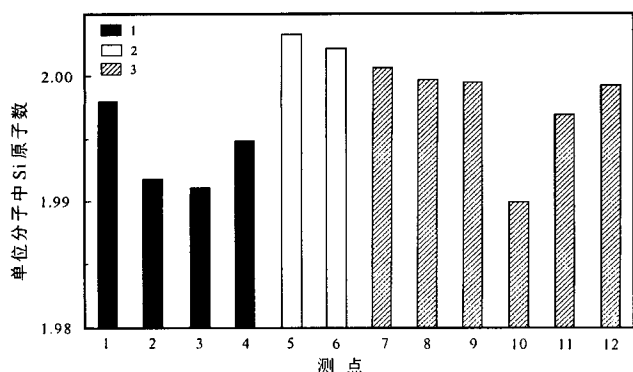


图4 CCSD 榴辉岩单位分子绿辉石中 Si 原子的含量及变化

Fig. 4 Anion per formula unit (apfu) of Si in omphacite

1—不含出溶体的新鲜榴辉岩; 2—含出溶体的新鲜榴辉岩;
3—不含出溶体的退变质榴辉岩

1—Fresh omphacite with coesite inclusion but without quartz exsolution; 2—fresh omphacite with quartz exsolution;
3—retrograded omphacite

2000)外,矿物本身的组成特点也是决定性因素之一,而这是以往为人们所忽视的。

2.2 绿辉石中石英的出溶机制

Eskola (1921)首次报道了一种 M2 位占一半空位的单斜辉石,随后这种辉石被命名为 Ca-Eskola 辉石 (Khanukhova et al., 1976); Mao (1971) 通过高温高压 (1100~1700 °C, 40 kbar) 实验发现结合过量 SiO₂ 的单斜辉石在高压条件下稳定并对压力变化敏感; Smith 等 (1980) 首次提出石英的出溶缘于非化学计量的超硅的单斜辉石存在。Katayama 等 (2000), Tsai 等 (2000) 将石英的出溶归结为绿辉石中含有 M2 位有空位、高压状态稳定、低压状态易分解的 Ca-Eskola 分子: $2\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6 \rightarrow \text{CaAl}_2\text{SiO}_6 + 3\text{SiO}_2$, 这代表了目前关于绿辉石中石英出溶机制的普遍观点。然而,这一观点并不能圆满地解释地质事实: ① 据本文计算 (表 2), 所有绿辉石 (包括含有石英出溶体和不含出溶体的) 中 Ca-Tschermak 分子的含量在电子探针的分析误差范围内是可以忽略不计的, 也就是说即使在含有石英出溶体的绿辉石内也未发现因 Ca-Eskola 分子分解而产生的 Ca-Tschermak 分子; ② Ca-Eskola 分子和 Ca-Tschermak 分子都是来自于理论推测, 目前尚未在自然界发现这两种辉石端员的对应矿物; ③ 石英出溶体的发现并不限于绿辉石当中, 在石榴子石中也有发现 (Mposkos et al., 2001; 杨家喜等, 2003), 另外金红石 (含有高达 2500×10^{-6} 的 Si, 本作者未发表

的数据) 和多硅白云母中都含有非机械包裹的数量可观的“过量的”Si。这也不是上述出溶机制能够解释的; ④ 上述出溶机制不能对出溶发生的 t 、 p 条件给出明确的限定。因此, 要想对绿辉石中的石英出溶机制和相应的 t 、 p 条件作出明确的说明, 相关的高温高压实验工作需进一步开展, 同时, 另外两个高压实验的结果值得关注: Angel 等 (1988) 在 1600 °C, 100~150 GPa 的条件下合成了一种辉石端员: $\text{Na}(\text{Mg}_{0.5}\text{Si}_{0.5})\text{Si}_2\text{O}_6$ 。由于 6 次配位的 M1 位半数被 Si 占据, 这种富 Na 的辉石端员以每 6 个 O 原子拥有 2.5 个 Si 原子, 具有真正意义上超硅的性质 (相比较而言, Ca-Eskola 分子: $\text{Ca}_{0.5}\square_{0.5}\text{AlSi}_2\text{O}_6$ 并不具有真正意义上的超硅性质)。当压力降低, 在地质环境中这些“过量的”Si 必然以 SiO₂ 的形式析出, 成为出溶体。Luo 等 (2004) 利用冲击波和金刚石压腔, 以 α -石英和柯石英为实验对象, 当分别加载至 54~57 GPa 和 30 GPa 时得到了一种密度接近斯石英, Si 配位数介于 4 至 6 的 SiO₂ 新相。这两个超高压试验都表明: 在上地幔以下深度, 随着深度增加导致的压力增加, 由 Si-O 四面体向 Si-O 八面体转变是硅酸盐矿物主要的结构转变形式。同时这些实验也为我们进一步理解 UHP 变质地体中普遍出现的超硅性质的矿物 (绿辉石、镁铝榴石、金红石、多硅白云母等) 以及经常性的石英出溶现象提供了有益的启示: 当陆壳物质俯冲到一定深度, 在 UHP 条件下一部分 Si 在硅酸盐中形成六次配位的 Si-O 八面体 (或斯石英结构), 当板块折返, 压力降低时这部分 Si 以石英形式析出成为出溶体 (或者转化为柯石英或石英)。由上面的叙述可以看出, 这样的出溶机制更能从一般意义上理解和解释 UHP 变质矿物的超硅性质以及石英的出溶现象。事实上, Angel 等 (1988) 和 Tsai 等 (2000) 对这一点都有所提及。

2.3 绿辉石中石英出溶的 t 、 p 条件

基于 Gasparik (1985) 对 $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统 (25~30 kbar, ≥ 1000 °C) 的实验研究, 认为含有 Ca-Eskola 分子的单斜辉石在 25~30 kbar 下可稳定存在。由于这一压力值与石英-柯石英相变条件相当, 人们普遍认为这代表石英出溶的 t 、 p 条件。然而, 在此前后相关的高压岩石学实验得出的结论却不尽相同: Mao (1971) 指出, 硬玉—Ca-Tschermak 单斜辉石在 40 kbar, 1100~1700 °C 可以含有 7.5% 过剩的 SiO₂。类似的实验结果还有 25~35 kbar, 1200~1450 °C (Khanukhova et al., 1976; Wood et al., 1978, 以透辉石—Ca-Tschermak 为实验对象); 35~

70kbar, 1200 C (Zharikov et al., 1984, 以透辉石—Ca-Eskola 辉石为实验对象); 更加令人感兴趣的是, Angel 等 (1988) 在 1600 C, 100~150GPa 的条件下合成同时包含 Si-O 四面体和八面体的 Na-Mg 辉石以及 Arlt 等 (1998) 在 92 kbar, 1000 C 条件下合成的 MnSi_2O_5 , 考虑到离子半径的相似性, Ca、Mg 可能对 Mn 形成替代, 结果导致一种超硅新相的产生, 对超硅单斜辉石的形成机制有启示意义。因此, 从高压实验岩石学的资料看, 25~30kbar, ≥ 1000 C 的石英出溶条件只是阶段性的认识。事实上, 随着近年来 UHP 变质领域内矿物学研究的进展, 关于对 UHP 变质峰期温压条件的认识已经超出当初石英—柯石英、石墨—金刚石相变标志的温压条件: Ye 等 (2000) 在苏鲁 UHP 地体榴辉岩的石榴子石中发现单斜辉石、金红石和磷灰石出溶体, 由实验数据推断出溶压力大于 7GPa (相应的俯冲深度大于 200km); Zhu (2002) 在北哈萨克斯坦 Kokchetav 地体单斜辉石中发现金云母和柯石英出溶体, 推测出溶压力大于 8 GPa; Zhang R Y 等 (2002) 在大别—苏鲁 UHP 地体的石榴子石中发现斜顽火辉石出溶体, 推测相当于 6.7 GPa 的压力; 刘良等 (2005) 由阿尔金山石榴子石中出溶单斜辉石推算出峰期变质压力大于 7 GPa; Katayama 等 (2006) 在哈萨克斯坦 Kokchetav 地体发现的单斜辉石中石英出溶体, 而其母岩榴辉岩中含有变质成因的微粒金刚石。由此观之, 相当于石英—柯石英相变压力的 25~30kbar 可能仅仅代表石英从绿辉石中出溶的压力下限。由此可知, 如果将石英的出溶机制归结为低压条件下 Si-O 八面体向四面体的结构转变造成, 那么它所代表的压力就远远大于目前所能估算到的压力条件。问题的最终解决有赖于高压实验岩石学的进一步工作。

3 主要结论

(1) 绿辉石中发育石英棒 (针) 出溶体是 UHP 变质作用典型的矿物学标志之一, 除压力外, 绿辉石的组分特征 (超硅) 也是石英能否出溶的决定性因素之一。

(2) 低压条件下 Si-O 八面体向四面体转变导致石英出溶的观点对于 UHP 变质矿物普遍超硅现象的理解和石英出溶具有更加普遍的意义。

(3) 2.5 GPa 的压力估算对于单斜辉石的石英出溶现象而言, 可能仅仅能代表其压力下限, 其实际代表的压力条件可能远大于此。

(4) 有关绿辉石中石英出溶机制的合理认识以

及出溶温压条件的精确限定对我们把握陆壳物质的俯冲深度有决定性意义, 同时对我们深入理解地球深部物质的组成和结构提供直接的证据。

致谢: 沈昆老师提供了 CCSD 先导孔的样品, 中国科学院广州地球化学研究所拉曼光谱室的王英老师帮助完成了激光拉曼光谱分析, 电子探针室的陈林丽工程师帮助完成了成分分析, 谨表谢意。同时感谢 CCSD 基地的蔡慈研究员、陈世忠博士、邹永兴研究员及孙立文工程师在采取 CCSD 岩心及野外调查过程中给予的支持与帮助。

参 考 文 献

- 刘良, 陈丹玲, 张安达, 等. 2005. 阿尔金超高压 (>7GPa) 片麻状 (含) 钾长石榴辉岩——石榴子石出溶单斜辉石的证据. 中国科学 (D 辑), 35: 105~114.
- 王璐, 金振民, 何谋春. 2003. 榴辉岩中石英出溶体的拉曼光谱学研究及其构造意义. 地球科学——中国地质大学学报, 28: 143~150.
- 王清海, 徐文良, 王冬艳, 等. 2002. 徐淮地区镁铁质岩石捕虏体单斜辉石中石榴子石和石英的出溶. 高校地质学报, 8: 407~415.
- 杨家喜, 刘良. 2003. 超硅石榴石的耦合类质同象置换及辉石、金红石、磷灰石和石英的出溶. 科学通报, 48: 2374~2379.
- Angel R J, Gasparik T, Ross N L, et al. 1988. A silica-rich sodium pyroxene phase with six-coordinated silicon. *Nature*, 335: 156~158.
- Bruno M, Compagnoni R, Hirajima T, et al. 2002. Jadeite with the Ca-Eskola molecule from an ultra-high pressure metagranodiorite, Dora-Maria Massif, Western Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 142: 515~519.
- Dobrzynetska L F, Schweinehage R, Massonne H J, et al. 2002. Silica precipitates in omphacite from eclogite at Alpe Arami, Switzerland: evidence of deep subduction. *Journal of Metamorphic Geology*, 20: 481~492.
- Gasparik T. 1985. Experimental study of subsolidus phase relations and mixing properties of pyroxene and plagioclase in the system $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 89: 346~357.
- Katayama I, Parkinson C D, Okamoto K, et al. 2000. Supersilicic clinopyroxene and silica exsolution in UHPM eclogite and pelitic gneiss from the Kokchetav massif, Kazakhstan. *American Mineralogist*, 85: 1368~1374.
- Katayama I, Nakashima S, Yurimoto H. 2006. Water content in natural eclogite and implication for water transport into the deep upper mantle. *Lithos*, 86: 245~259.
- Liu L, Chen D L, Zhang A D, et al. 2005. Ultrahigh pressure (>7GPa) gneissic k-feldspar (-bearing) garnet clinopyroxenite in the Altyn Tagh, NW China: Evidence from clinopyroxene exsolution in garnet. *Science in China (Series D)*, 35: 105~114 (in Chinese).
- Luo S N, Tschauner O, Asimow P D, et al. 2004. A new dense silica polymorph: A possible link between tetrahedrally and octahedrally coordinated silica. *American Mineralogist*, 89: 455~461.
- Mposkos E D, Kostopoulos D K. 2001. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: a new ultrahigh-pressure metamorphic province

- established. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 497~506.
- Smith D C. 1984. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics. *Nature*, 310: 641~644.
- Smyth J R. 1980. Cation vacancies and the crystal chemistry of breakdown reactions in kimberlitic omphacites. *American Mineralogist*, 65: 1185~1191.
- Tsai C H, Liou J G. 2000. Eclogite-facies relics and inferred ultrahigh-pressure metamorphism in the North Dabie complex, central-eastern China. *American Mineralogist*, 85: 1~8.
- Wang L, Jin Z M, He M C. 2003. Raman spectrum study on quartz exsolution in omphacite from eclogite and its tectonic significances. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 28: 143~150 (in Chinese with English abstract).
- Wang Q C, Ishiwatari A, Zhao Z Y, et al. 1993. Coesite-bearing granulite retrograded from eclogite in Weihai, eastern China. *European Journal of Mineralogy*, 4: 141~152.
- Wang Q H, Xu W L, Wang D Y, et al. 2002. Garnet and quartz exsolutions in clinopyroxenes of mafic rock xenoliths from Xuzhou—Northern Anhui Province. *Geological Journal of China Universities*, 8: 407~415 (in Chinese with English abstract).
- Wood B J, Henderson C M B. 1978. Compositions and unit-cell parameters of synthetic non-stoichiometric tschermakitic clinopyroxenes. *American Mineralogist*, 63: 66~72.
- Yang J X, Liu L. 2003. Coupled substitution and exsolutions of clinopyroxene, rutile, apatite and quartz in the supersilicic garnet. *Chinese Science Bulletin*, 48: 2374~2379 (in Chinese).
- Ye K, Cong B L, Ye D N. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200km. *Nature*, 407: 734~736.
- Zhang L F, Ellis D J, Jiang W B. 2002. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China: Part I. Evidence from inclusions of coesite pseudomorphs in garnet and from quartz exsolution lamellae in omphacite in eclogites. *American Mineralogist*, 87: 853~860.
- Zhang L F, Ellis D J, Williams S, Jiang W B. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism in western Tianshan, China—Reply. *American Mineralogist*, 88: 1157~1160.
- Zhang R Y, Shau Y H, Liou J G, et al. 2002. Discovery of clinoenstatite in garnet pyroxenites from the Dabie-Sulu ultrahigh-pressure terrane, east-central China. *American Mineralogist*, 87: 867~874.
- Zhu Y F. 2002. Phlogopite and coesite exsolution from super-silicic clinopyroxene. *International Geology Review*, 44: 831~836.

Quartz Exsolutions in Omphacites of Ultrahigh Pressure Metamorphic Rocks from CCSD and Its Significance of Geodynamics

LIANG Jinlong¹⁾, SUN Xiaoming^{1,2)}, XU Li¹⁾, ZHAI Wei¹⁾, TANG Qian¹⁾, LIANG Yeheng¹⁾

1) Department of Earth Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2) Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640

Abstract

Quartz bar (or needle) exsolutions from clinopyroxenes are considered as one of the diagnostic indicators in the ultrahigh-pressure metamorphism, and were frequently identified from several UHP metamorphic belts in the world. Exsolutions in omphacites in eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling Project main hole (CCSD-MH) and Pre-pilot 1 (CCSD-PP1) were studied by using laser Raman and electron microprobe analysis, and numerous parallel quartz bars (or needles) were found. For comparison, omphacites in CCSD eclogites without any quartz exsolution were also analysed. The results indicate that the omphacites with quartz exsolution is supersilicic. Ultrahigh-pressure experiments shown that part of silica can form octahedral coordination structure, if pressure is high enough. It's proposed that decline of pressure will facilitate quartz exsolution. The peak pressure of UHP metamorphism indicated by quartz exsolutions in the CCSD omphacites is much higher than 2.5 GPa, which was estimated by the previous researchers based on facies transformation of quartz-coesite and graphite-diamond, suggests that subduction depth of the Su-Lu UHP metamorphic belts may be greater than commonly recognized 80~120 km.

Key words: omphacite; quartz; exsolutions; eclogite; geodynamics; CCSD