科学通报 2012 年 第 57 卷 第 31 期：2972 ~ 2979
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

苏鲁超高压榴辉岩长英质多晶包裹体中盐类固体包裹体

曾令森①, 陈振宇②, 陈晶③

① 大陆构造与动力学国家重点实验室, 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;
② 中国地质科学院矿产与资源研究所, 北京 100037;
③ 北京大学物理学院, 北京 100871
E-mail: changting1970@yahoo.com

2012-03-13 收稿, 2012-05-31 接受
中国地壳探测项目(SinoProbe-2-6)和国家自然科学基金(41073024, 40872048)资助

摘要 在江苏东海超高压榴辉岩中, 绿辉石中发育罕见的钾长石+石英+榍石和钾长石+钠长石+石英+绿帘石等多晶包裹体. 这些包裹体和纯钾长石+石英多晶包裹体具有类似的结构. 在钾长石+钠长石+石英+绿帘石多晶包裹体发现方块状和浑圆状氯化钾-氯化钠(NaCl-KCl)固体包裹体. 在含钾长石多晶包裹体中发育盐类固态包裹体表明: 在超高压变质期间或在超高压榴辉岩快速折返早期, 存在富含 Cl 的钾质花岗质熔体, 钾质熔体与石英(或柯石英)和绿辉石反应形成钾长石+石英±钠长石±榍石±绿帘石组合. 含氯熔体的脱水干化作用导致氯化钠-氯化钾(NaCl-KCl)固体包裹体的形成. 同时表明, 发生深俯冲的大陆地壳物质可能发生过部分熔融, 形成含氯的钾质熔体, 促进保守元素(Ti, Hf 等)的迁移.

关键词
长英质多晶包裹体
盐类固体包裹体
榴辉岩
超高压变质作用
苏鲁超高压带

大量的研究已表明大陆地壳物质可深俯冲到大于 100 km 的深度[1,2]. 在大陆物质深俯冲中会发生有限的脱水作用[3]和明显的氧化作用[4,5]. 在大陆物质深俯冲过程中或快速折返的早期, 超高压岩石中的易熔组分可能发生部分熔融作用[6~15], 形成长英质熔体甚至超临界流体[16]. 实验研究表明, 在足够高的压力条件下, 变质岩石越过第二临界端点后, 富水流体和含水熔体会发生完全混溶作用, 成为均一相的超临界流体[17,18]. 这种流体, 与长英质熔体一样, 不仅可溶解大离子亲石元素(LILE)和稀土元素(REE), 还可溶解难溶于普通富水流体的保守元素——高场强元素(HFSE), 成为大规模迁移这些元素的良好介质. 长英质熔体或超临界流体的形成和迁移, 不仅影响着俯冲岩片本身的地球化学组成, 而且还影响俯冲板片上盘岩石的地球化学性质. 因此, 识别和确定深俯冲大陆物质是否发生过部分熔融, 是否形成过超临界流体, 是超高压变质带研究的前缘课题[16]. 对这些问题的探讨有助于深入理解大陆物质深俯冲及其所伴随的超高压变质作用的深远的物理和化学效应.

在超高压变质矿物石榴石和绿辉石中都发现了高盐度 NaCl-$CaCl_2$-H_2O 流体包裹体. 在大别-苏鲁造山带榴辉岩中, 流体包裹体的主要组成为 H_2O±CO_2, 在进变质、峰期变质和退变质各阶段均伴随有中-低盐度的 H_2O-CO_2 流体[19~23]. 在超高压变质条件下, 局部存在高盐度 NaCl-$CaCl_2$-H_2O 流体[19,21~23]. 流体包裹体的组成及其盐度的变化不仅与其来源有关, 而且矿物-流体再平衡有关[3,24]. 异常高盐度流体的存在可能反映了局部矿物-流体再平衡可能是制约超高压变质流体成分的主要因素[22]. 但在超高压榴辉岩中, 异常高盐度流体的来源还是尚待解决的重要问题. 最近的实验研究表明, 金红石在含氯流体中的溶解度比纯水流体高 2~4 倍, Ti 在含氯变质流体中的活动性比预期的高[25]. 因此, 探讨该问题不仅有助于理解超高压变质条件下, 矿物反应的动力学机制, 如磷灰石和金红石的地球化学行为和锆石的生长机

英文版见: Zeng L S, Chen Z Y, Chen J. Metamorphic solid salt (KCl-NaCl) in quartzo-feldspathic polyphase inclusions in the Sulu ultrahigh-pressure eclogite. Chin Sci Bull, 2012, 57, doi: 10.1007/s11434-012-5373-y

制等, 还有助于认识在超高压变质反应循环中, 深部流体的组成及其状态、流体/熔体的脱气或脱水过程及深部地壳岩石的构造物理学性质.

在大别-苏鲁超高压榴辉岩中, 最近的研究发现石榴石和绿辉石都含有以钾长石、钠长石和石英组成为主的长英质多晶包裹体[5,26~28], 可能代表了苏鲁超高压岩石发生过部分熔融作用[27,28]. 为进一步限定这些熔体的性质, 我们开展了进一步的观测, 在这些多晶包裹体中, 除了先前报道的重晶石外, 还发现块状或浑圆状的氯化钾-氯化钠(KCl+NaCl)和不规则榍石包裹体. 在长英质多晶包裹体中存在固体盐类、重晶石和榍石包裹体表明: 参与熔体——石英或绿辉石反应的熔体为含水、含硫酸根和含氯熔体, 在超高压变质条件下已经成为超临界流体, 是导致 HFSE 迁移的重要介质.

1 样品描述

所研究样品 CCSD-02 采自位于江苏东海县毛北的中国大陆科学钻探工程主孔(地理坐标 118°40′27″E, 34°24′01″N)附近的榴辉岩采坑中. 对该样品, 在平行、垂直和斜交拉伸线理方向准备了岩石薄片, 观察其矿物组成和结构变化. 样品 CCSD-02 为金红石榴辉岩, 矿物组成为石榴石、绿辉石、金红石和微量磷灰石(图 1(a)), 具有明显的面理和拉伸线理. 该样品经历了微弱的退变质作用, 表现为沿石榴石和绿辉石颗粒边界或石榴石或绿辉石中的裂纹发育由角闪石和斜长石组成的后成合晶. 在金红石周围或在后成合晶中, 未发现榍石, 表明金红石未经历退变质作用. 磷灰石含大量细小的硫化物出溶体, 主要成分为 FeS, 少数为 FeS_2, 与其他苏鲁榴辉岩中的磷灰石相似[29,30]. 在该样品中, 除了在长英质多晶包裹体中发现绿帘石和榍石外, 无论是在主要造岩矿物, 还是在退变质后成合晶中, 都未发现这两种矿物. 在石榴石和绿辉石中, 发育多个含钾长石多晶包裹体, 这些包裹体总体上为自形或半自形(图 1(b)~(d)), 个别包裹体的端部发育放射状裂纹(图 1(b)和 2(c)). 其中在 1 颗包裹体中, 识别出大量<10 μm 微小的固体盐类矿物(图 2(d)和(e)); 在 3 颗包裹体(MS-2, MS-3 和 MS-4)中, 沿钾长石和石英的颗粒边界, 发育少量的他型榍石(图 2).

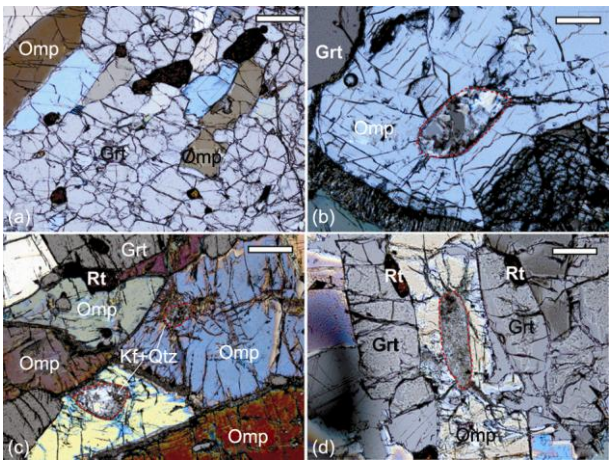

图 1 显微照片

(a) 榴辉岩的显微照片显示了该榴辉岩主要由石榴石、绿辉石和金红石组成, 金红石主要分布于石榴石和绿辉石的颗粒边界, 绿辉石具有明显的定向排列构造; (b) 绿辉石中的钾长石+钠长石+绿帘石+石英多晶包裹体, 包裹体外围放射状裂纹发育. (c) 绿辉石中两颗钾长石+石英多晶包裹体; (d) 绿辉石中长柱状、近自型的钾长石+石英+榍石+固体盐多晶包裹体. 比例尺为 200 μm. Omp, 绿辉石; Grt, 石榴石; Qtz, 石英; Kf, 钾长石; Rt, 金红石

2 测试方法

扫描电子显微镜的能谱分析所使用的仪器型号为日本电子 JEOL JSM-5610LV, 工作时的加速电压为 20 kV, 聚焦距离为 20 mm, X 光能谱仪为英国牛津公司 INCA 系统. 用 Co 纯金属优化能谱系统, 用背散射电子图像(BSE)进行矿物观察和 EDS 进行矿物化学初步成分分析, BSE 图像可以很好地显示含钾长石多晶包裹体及其内部矿物的表面和内部结构特征. 分析时所用的束斑大小为 40 nm±, 分析区域空间分辨率为 4 μm±, 但实际的分析范围要大于 5 μm, 因此对大部分粒度在 5 μm 左右的颗粒, 最后结果要进行基质校正.

电子探针分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室进行, 所用仪器型号 JXA-8100, 分析条件为加速电压 15 kV, 束流 10 nA, 1 μm 的斑束, 修正方法为 PRZ, 所使用的标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物. 单矿物矿物化学分析结果见表 1.

3 数据与结果

3.1 包裹体特征

(ⅰ) MS-1: 钾长石+钠长石+石英+绿帘石多晶包裹体. 该包裹体呈半自形, 与绿辉石之间的边界清晰, 由石英、钠长石、钾长石和绿帘石组成. 在包

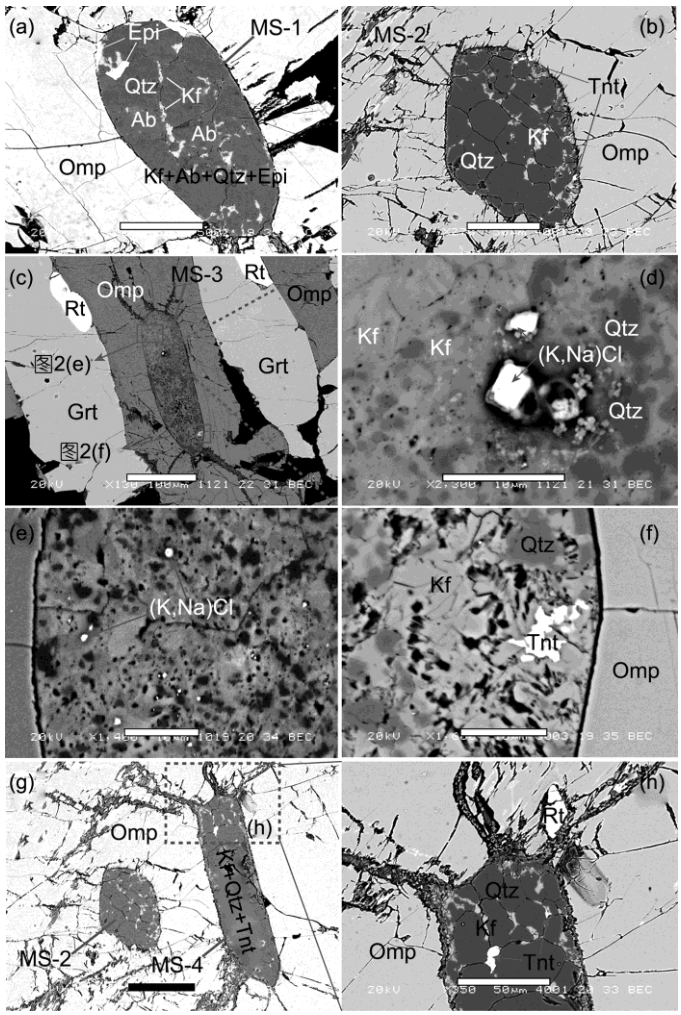

图 2 BSE 图像显示样品 CCSD-02 中含钾长石多晶包裹体产出特征及其矿物组合

(a) MS-1: 绿辉石中钾长石+钠长石+绿帘石+石英多晶包裹体, 其中钾长石主要沿钠长石、石英和绿帘石的颗粒边界分部. 比例尺=100 μm; (b) MS-2: 具柯石英假象的钾长石+石英+榍石多晶包裹体, 钾长石呈他型, 沿石英颗粒边界分布, 该包裹体的右上部和右下部, 白色块状矿物为榍石. 比例尺=100 μm; (c) MS-3: 赋存于绿辉石中的钾长石+石英+榍石+固体盐多晶包裹体. 在该包裹体中, 石英和钾长石呈马赛克式, 镶嵌分布, 右下角含白色榍石. 比例尺=200 μm; (d) 图(c)的局部放大 BSE 图像, 显示了包裹体 MS-3 中固体盐类矿物的产出特征. 比例尺=20 μm; (e) 图(c)的局部放大 BSE 图像, 显示了包裹体 MS-3 中大量浑圆状微米级固体盐类矿物的产出特征. 比例尺=20 μm; (f) 图(c)的局部放大 BSE 图像, 显示了包裹体MS-3中榍石的产出特征. 比例尺=20 μm; (g) 同一颗绿辉石中含两颗含钾长石多晶包裹体MS-2和MS-4. 比例尺=200 μm; (h) 包裹体 MS-4 的局部放大 BSE 图像, 显示石英、钾长石和榍石的共生结构. 比例尺=100 μm. Omp, 绿辉石; Grt, 石榴石; Qtz, 石英; Kf, 钾长石; Ab, 钠长石; Rt, 金红石; Tnt, 榍石; Epi, 绿帘石

裹体内部, 石英占多数, 钠长石分布在包裹体的中间区域, 在背散射图像上, 灰度较石英稍亮一些. 绿帘石分布在包裹体的左上角和右上角, 与石英和钾长石共生; 钾长石不规则地沿石英之间、石英和钠长石或石英与绿帘石之间的颗粒边界分布(图 2(a)). 在该包裹体中, 85%为石英和钠长石, 10%为钾长石, 6%为绿帘石. 与其他含钾长石多晶包裹体相似, 该包裹体也发育楔入构造(图 2(a)), 表明在捕获时呈流体状态.

(ⅱ) MS-2: 钾长石+石英+榍石多晶包裹体. 在苏鲁-大别超高压榴辉岩中, 由钾长石+石英组成的多晶包裹体最常见[26~28,31], 既赋存于石榴石中, 也赋存于绿辉石中. 在该样品中, 个别此类包裹体还含细小的他型榍石(图 2(b)). 该包裹体具柯石英假象, 钾长石呈他型, 沿石英颗粒边界分布, 在该包裹体的右上部和右下部, 包含少量的榍石. 该包裹体有~90%石英, 9%钾长石和~1%榍石组成.

(ⅲ) MS-3: 钾长石+石英+榍石+固体盐多晶包

表 1　含钾长石多晶长英质多晶包裹体的矿物化学组成及氧化物(%) [a)]

包裹体	MS-1				MS-2			MS-3		
矿物	Kf	Ab	Epi	Qtz	Kf	Qtz	Tnt	Kf	Qtz	Tnt
分析次数	6	5	5	6	6	6	3	6	6	2
SiO_2	64.79	68.53	38.30	99.33	65.36	99.40	31.22	65.64	98.76	31.24
TiO_2	0.01	0.03	0.16		0.04	0.01	32.90	0.01		32.96
Al_2O_3	18.06	19.60	28.79		18.19		3.55	18.59	0.03	3.50
FeO	0.01	0.06	4.76	0.06	0.07	0.06	2.47	0.08	0.11	2.52
MnO	0.01	0.01	0.07		0.03			0.05		
MgO			0.20			0.03				
CaO	0.03	0.17	22.09	0.02	0.03	0.01	28.06	0.05	0.03	28.04
Na_2O	0.12	11.55	0.01	0.05	0.10		0.10	0.19		0.12
K_2O	16.30	0.03		0.01	16.23		0.09	15.43	0.03	0.11
总量	99.33	99.98	94.38	99.46	100.05	99.51	98.39	100.04	98.96	98.49

a) 空白处为低于检测限; 表中数据为多次测试的平均值; Qtz, 石英; Kf, 钾长石; Ab, 钠长石; Tnt, 榍石; Epi, 绿帘石

裹体. 该包裹体也发育在绿辉石中, 由钾长石(~49%)、石英(~49%)和少量榍石组成. 石英和钾长石的比例近乎相等, 在某种程度上, 石英和钾长石之间的结构关系类似于常见的角闪石+斜长石的后成合晶结构, 钾长石和石英呈弥漫型镶嵌分布. 在包裹体的外围(图 1(d)), 发育几条规模较大的裂纹, 内部充填矿物为角闪石、斜长石和石英, 没有发现钾长石或其他含钾矿物, 为典型的角闪岩相退变质作用的矿物组合. 在该包裹体中, 发育许多大小不一的块状或浑圆状、微米级氯化钾-氯化钠(KCl-NaCl)固体盐(图 2(d)和(e)). 在包裹体的右下方, 靠近颗粒边界的部位(图 2(c)和(f)), 有一大约 10 μm 的榍石($CaTiSiO_5$). 这些包裹体无一例外地发育在钾长石、石英或钠长石的颗粒边界处(图 2(d)~(f)). 在利用 SEM 观察和测试过程中, 通过调节 BSE 图像的灰度和对比度, 发现这些氯化钠-氯化钾(NaCl-KCl)固体包裹体存在成分分带现象. 这种固体包裹体的中心主要由 KCl 组成, 边缘由 NaCl 组成(图 2(d)).

(ⅳ) MS-4: 钾长石+石英+榍石多晶包裹体. 包裹体 MS-4 和 MS-2 发育在同一颗绿辉石中(图 2(g)和(h)). 该包裹体为长柱状, 总体矿物组成和结构与 MS-2 相似. 榍石的粒度较大(15~20 μm), 位于包裹体内部, 沿石英颗粒边界与钾长石共生. 在该包裹体的附近, 与后成合晶相接触的金红石没有退变形成榍石(图 2(f)).

3.2　矿物化学成分

我们对上述含固体盐类包裹体进行了 X 光成分扫描成图(图 3), 在该图中, 颜色越亮, 相应元素浓度越高, 为更好地显示各元素的浓度差异, 比例尺进行了相应的调整. 分析结果表明这些包裹体主要由 K, Na 和 Cl 组成(图 3), 同时也显示了上述的 K 和 Na 的成分分带现象(图 3(e)和(f)).

为确定包裹体组成矿物及其寄主矿物的化学组成, 对其中的 3 颗包裹体, 进行了电子探针分析, 分析结果列在表 1 中. 在分析过程中, 我们选择足够大的钠长石、钾长石和石英区域, 进行电子探针分析,

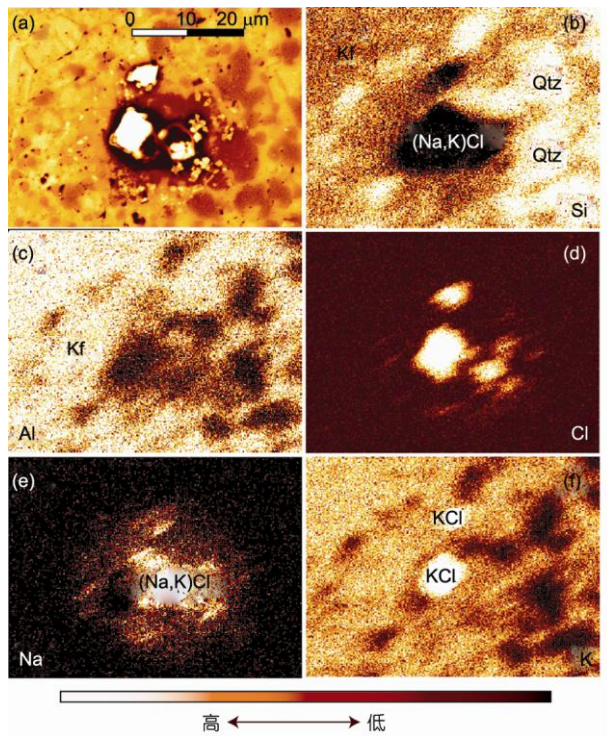

图 3　固体盐包裹体的 X 光成分面扫描图

Qtz, 石英; Kf, 钾长石

以避免不同相之间的干扰. 分析结果表明: (1) 钠长石的成分较均一, 含 68.5% SiO_2, 19.6% Al_2O_3 和 11.6% Na_2O, CaO 和 K_2O 的含量低, 分别小于 0.17% 和 0.03%(表 1); (2) 在所有的含钾长石包裹体中, 钾长石的成分非常均一, 在测试误差范围内, 与纯钾长石 $KAlSi_3O_8$ 化学计量接近, 含 64.8%~65.6% SiO_2, 18.1%~18.6% Al_2O_3 和 15.4%~16.3% K_2O. 这些钾长石含微量的 Na_2O, FeO 和 TiO_2(表 1); (3) 石英基本上为纯石英; 和(4) 在不同的包裹体中, 榍石的成分基本上一致, 没有明显的差异(表 1), 含~31.2% SiO_2, 32.9%~33.0% TiO_2 和 28.0% CaO, Al_2O_3 和 FeO 含量较高, 分别为 3.5%~3.6%和~2.5% (表 1). 同时, 不管绿辉石是否含钠长石+石英+钾长石或钾长石+石英包裹体, 绿辉石基本上不含 K_2O, Na_2O 含量也没有明显的变化.

4 讨论

岩相学观察结果揭示: (1) 这些包裹体完全包裹在晶体光学性质连续的绿辉石中; (2) 每一颗包裹体与寄主之间边界截然; (3) 所研究样品仅有微弱的退变质作用; 和(4) 退变质流体的渗透作用仅限于基质矿物(绿辉石或石榴石)的颗粒边界或裂纹中. 另外, 包裹体的总体化学成分与绿辉石或石榴石分解产物的成分明显不同. 这些现象表明, 上述长英质包裹体不可能是石榴石或绿辉石退变质作用的产物.

大量的研究已揭示了在来自地球深部岩石中, 主要造岩矿物可包含硅酸盐熔体包裹体或超临界流体包裹体[32~38]. 这些包裹体为揭示深部地质作用的性质, 深部流体或熔体的地球化学性质和行为及其构造物理学效应提供了关键的机会. 在尖晶石二辉橄榄岩中, Bureau 和 Keppler[32]报道了硅酸盐熔体包裹体和流体包裹体的共生的现象, 表明了在地幔深度存在富水和硅酸盐的超临界流体. 在压力降低的情况下, 这些超临界流体发生熔体和流体的分离, 分别形成硅酸盐熔体包裹体和流体包裹体. 金伯利岩和超高压变质钙硅酸盐携带的金刚石也含富硅熔体包裹体(SiO_2 高达 67%和 K_2O 高达 12%)[33,34]. 在 Kokchetav 含金刚石超高压变质岩中, 金刚石和单斜辉石都含富水包裹体[35]. 这些结果表明, 在超高压条件下, 富钾、富钠和富硅的熔体或超临界流体是金刚石生长的良好介质[36~38].

在富水流体存在的情况下, 钾长石在压力大于 2.5 GPa 的条件下是非稳定相[12,39,40], 转变为钾质钡铝沸石. 同时, 在苏鲁榴辉岩的峰期变质条件下 (P>3.3 GPa 和 T=750~850 ℃), 可能存在含水高达 10%的花岗质熔体[11,12]. 曾令森等人[31]在苏鲁榴辉岩的含钾长石多晶包裹体中, 识别出残留的钾质钡铝沸石, 表明至少部分含钾长石长英质多晶包裹体经历了钾质钡铝沸石→钾长石的相变, 形成于超高压变质条件下, 与岩石学实验和理论模拟计算结果一致[11,12,41]. 除了柯石英→石英和钾质钡铝沸石→钾长石的相变导致包裹体体积增加之外, 在超高压岩石折返过程中, 这些含水花岗质熔体包裹体将经历不同程度的脱水作用, 导致熔体体积的增加. 随含水量的降低, 如要维持液体状态, 熔体的体积必需相对增加, 进一步促进寄主矿物的脆性变形. 该过程可能是多数长英质包裹体的周缘普遍发育放射状裂纹和锲入构造的因素之一.

在苏鲁超高压榴辉岩中, 流体包裹体的研究已揭示了在超高压条件下, 含盐流体包裹体的成分主要为 NaCl-$CaCl_2$-HO_2[19,21~23], 明显不同于长英质包裹体中固体盐(NaCl+KCl)的成分, 预示着不同的成因机制. 在硅酸盐熔体中, H_2O 和 CO_2 的溶解度有限[42], 当压力低于体系的第二临界端点时, 流体与熔体不混溶. 在熔体与石英或其他矿物相的递进反应过程中, 溶解在不混溶流体的 NaCl 和 KCl 的含量增加, 在脱水干燥作用下, 结晶形成氯化钠-氯化钾(NaCl-KCl)固体包裹体. 在富硅熔体中, Cl 主要以碱性元素(K 和 Na)和氯离子形成络合物的形式存在. 同时, 与富硅熔体平衡的水溶液富集氯元素, 但氯元素在水溶液和富硅熔体之间的配分行为取决于熔体的成分和熔体含氯的浓度[43]. 在高硅熔体的脱气过程中, Cl 将集中在热液中, 熔体的 Cl 含量降低[43]. 在较低压的岩石中, 食盐(NaCl)和钾盐(KCl)形成固溶体系列[44]. 在个别高压(>100 MPa)麻粒岩中, 也发现了食盐和钾盐固体包裹体[45,46]. 这些固体盐类包裹体是在麻粒岩相条件下, 短暂的水化作用形成的富水流体, 随后发生脱水干化作用, 形成富集 Cl 的富水流体和富 Cl 的角闪石和黑云母, 进一步的脱水干化作用形成固体盐类包裹体[45]. 在苏鲁榴辉岩中, 固体盐类矿物和钾长石、钠长石和石英等长英质矿物共生的现象表明, 这些含钾长石多晶包裹体可能经历了类似的过程, 即被石榴石或绿辉石捕获的含水花岗质熔体或超临界流体, 在折返过程中, 由于压力的

降低, 发生结晶和干化作用, 形成长英质多晶包裹体±盐类固体包裹体±重晶石组合.

江苏东海榴辉岩的高压-超高压矿物含有含水、含钛和含磷矿物等组成的多相包裹体, 可能代表着超高压变质期间或折返早期伴随着超临界流体的作用[16,47]. 在苏鲁榴辉岩中, Liu 等人[48]报道了含 Cl 的角闪石, 认为是在榴辉岩向角闪岩相转变过程中, 多硅白云母和名义上无水矿物发生脱水作用, 形成富 Cl 流体. 沈昆等人[22]在超高压榴辉岩的石榴石核部发现成群分布的盐水包裹体, 这种包裹体具有很高的密度, 是在石英榴辉岩相的温压条件下捕获的(820℃, 2.4 GPa). 这些研究表明, 在苏鲁超高压榴辉岩中, 在变质作用的不同阶段, 都存在富 Cl 的流体, 影响着许多矿物地球化学行为.

在已报道的长英质多晶包裹体中, 一些包裹体含重晶石[5,16]和个别含锆石[27], 本文报道的长英质多晶包裹体 MS-1 含绿帘石, 其成因有两种可能: (1) 长英质熔体与寄主绿辉石反应的结果; 或(2) 从熔体中结晶形成. 在 MS-1 包裹体中, 绿帘石主要含 Fe, 基本上不含 Mg (表 1). 而该样品的绿辉石的 MgO 含量为~9.0%, FeO 含量为 4.6%~4.7%[27], 如果绿帘石代表熔体与绿辉石反应的结果, 所形成的绿帘石应含大量的 MgO, 这与观测结果矛盾. 同时, 在该样品中, 无论在石榴石和绿辉石, 还是在后成合晶中, 都没有发现绿帘石. 因此, 可以排除第一种可能性. 上述讨论表明, 长英质熔体本身是含水熔体, 而且含一定量的 Fe 和 Ca. 综合上述特征, 这些特殊的多晶包裹体可能代表着超高压条件下富含挥发分的富硅熔体.

在样品 CCSD-02 中, 金红石没有经历转变为榍石的退变质作用, 同时, 在退变质合成和晶和细脉中未发现榍石, 可以排除长英质包裹体中的榍石是退变质流体作用的结果. 最近的金红石在流体中的溶解行为实验揭示了: 与普通纯水流体相比, 金红石在含 Cl 流体中的溶解度要增加 2~4 倍[25]及在超临界 $NaAlSi_3O_8$-H_2O 流体相当高, 高达~5000 μL/L[49]. 在含氯长英质熔体或超临界流体存在的情况下, 榴辉岩中的金红石溶解作用显著增强, Ti 及其他具有相似地球化学行为的元素释放到熔体或流体中, 在随后的脱水结晶和干化作用中, 形成与长英质矿物伴生的榍石. 因此, 含 Cl、含水长英质熔体的存在不仅导致流体中活动元素, 如大离子亲石元素(LILE), 而且是促进流体中不活动元素, 如高场强元素(HFSE)迁移的重要机制, 导致可观的地球化学效应[50]. 同时深俯冲大陆岩片的部分熔融作用有效地改变了岩石的物理性质, 是促进深俯冲岩石快速折返的重要因素之一.

致谢 感谢郑永飞院士、中国科学技术大学高晓英和陈伊翔博士仔细审阅本文初稿.

参考文献

1 Ye K, Cong B, Ye D. The possible subduction of continental material to depths greater than 200 km. Nature, 2000, 407: 734–736
2 Chopin C. Ultrahigh-pressure metamorphism: Tracing continental crust into the mantle. Earth Planet Sci Lett, 2003, 212: 1–14
3 Zheng Y F. Fluid regime in continental subduction zones: Petrological insights from ultrahigh-pressure metamorphic rocks. J Geol Soc London, 2009, 166: 763–782
4 Zheng Y F, Gong B, Li Y, et al. Carbon concentrations and isotopic ratios of eclogites from the Dabie and Sulu terranes in China. Chem Geol, 2000, 168: 291–305
5 曾令森, 刘福来, 梁凤华, 等. 苏鲁榴辉岩钾长石+石英聚合体中重晶石族矿物及其意义. 科学通报, 2007, 52: 2312–2318
6 Huang W L, Wyllie P J. Phase relationships of S-type granite with H_2O to 35 kbar: Muscovite granite from Harney Peak, South Dakota. J Geophys Res, 1981, 86: 10515–10529
7 Nichols G T, Wyllie P J, Stern C R. Subduction zone melting of pelagic sediments constrained by melting experiments. Nature, 1994, 371: 785–788
8 Patiño Douce A E, McCarthy T C. Melting of crustal rocks during continental collision and subduction. In: Hacker B R, Liou J G, eds. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Dordrecht: Kluwer Academic Pub, 1998. 27–55
9 Schmidt M W. Experiment constraints on recycling of potassium from subducted oceanic crust. Science, 1996, 272: 1927–1930
10 Holloway J R, Domanik K J. Experimental synthesis and phase relations of phengitic muscovite from 6.5 to 11 GPa in a calcareous metapelite from the Dabie Mountains, China. Lithos, 2000, 52: 51–77

11 Hermann J, Green D H. Experimental constraints on high pressure melting in subducted crust. Earth Planet Sci Lett, 2001, 188: 149–168
12 Hermann J. Experimental constraints on phase relations in dubducted continental crust. Contrib Mineral Petrol, 2002, 143: 219–235
13 Schmidt M W, Vielzeuf D, Auzanneau E. Melting and dissolution of subducting crust at high pressures: The key role of white mica. Earth Planet Sci Lett, 2004, 228: 65–84
14 Auzanneau E, Vielzeuf D, Schmidt M W. Experimental evidence of decompression melting during exhumation of subducted continental crust. Contrib Mineral Petrol, 2006, 152: 125–148
15 Hermann J, Spandler C J. Sediment melts at sub-arc depths: An experimental study. J Petrol, 2008, 49: 717–740
16 Zheng Y F, Xia Q X, Chen R X, et al. Partial melting, fluid supercriticality and element mobility in ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Earth-Sci Rev, 2011, 107: 342–374
17 Kessel R, Schmidt M W, Ulmer P, et al. Trace element signature of subduction-zone fluids, melts and supercritical liquids at 120–180 km depth. Nature, 2005, 437: 724–727
18 Hermann J, Spandler C, Hack A, et al. Aqueous fluids and hydrous melts in high-pressure and ultra-high pressure rocks: Implications for element transfer in subduction zones. Lithos, 2006, 92: 399–417
19 Xiao Y L, Hoefs J, van den Kerkhof A M, et al. Fluid evolution during HP and UHP metamorphism in Dabie Shan, China: Constraints from mineral chemistry, fluid inclusions and stable isotopes. J Petrol, 2002, 43: 1505–1527
20 Fu B, Touret J L R, Zheng Y F. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan, China. J Metamorph Geol, 2001, 19: 529–545
21 Shen K, Zhang Z M, van den Kerkhof A M, et al. Unusual high-density and saline aqueous inclusions in ultra-high pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane, in eastern China. Chin Sci Bull, 2003, 48: 2018–2023
22 沈昆, 张泽明, 黄太岭, 等. 中国大陆科学钻探(CCSD)主孔超高压变质岩副矿物锆石中的流体包裹体研究. 岩石学报, 2006, 22: 1975–1984
23 Zhang Z M, Shen K, Sun W D, et al. Fluids in deeply subducted continental crust: Petrology, mineral chemistry and fluid inclusion of UHP metamorphic veins from the Sulu orogen, eastern China. Geochim Cosmochim Acta, 2008, 72: 3200–3228
24 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth-Sci Rev, 2003, 62: 105–161
25 Rapp J F, Klemme S, Butler I B, et al. Extremely high solubility of rutile in chloride and fluoride-bearing metamorphic fluids: An experimental investigation. Geology, 2010, 38: 323–326
26 Yang J, Godard G, Smith D C. K-feldpar-bearing coesites pseudomorphs in an eclogite from Lanshantou (Eastern China). Eur J Mineral, 1998, 10: 969–985
27 曾令森, 梁凤华, Paul Asimow, 等. 深俯冲陆壳岩石部分熔融与苏鲁超高压榴辉岩中长英质多晶包裹体的形成. 科学通报, 2009, 54: 1826–1840
28 Gao X Y, Zheng Y F, Chen Y X. Dehydration melting of ultrahigh-pressure eclogite in the Dabie orogen: Evidence from multiphase solid inclusions in garnet. J Metamorph Geol, 2012, 30: 193–212
29 梁凤华, 曾令森, 陈晶, 等. 胶东荣成榴辉岩中含铜磁黄铁矿出溶结构的磷灰石的发现及其意义. 岩石学报, 2006, 22: 433–438
30 陈晶, 曾令森, 陈方远, 等. 江苏青龙山磷灰石中的出溶体的初步研究. 岩石学报, 2006, 22: 1921–1926
31 曾令森, 陈晶, 陈振宇, 等. 苏鲁超高压榴辉岩中钾长石的超高压相. 岩石学报, 2009, 25: 2141–2148
32 Bureau H, Keppler H. Complete miscibility between silicate melts and hydrous fluids in the upper mantle: Experimental evidence and geochemical implications. Earth Planet Sci Lett, 1999, 165: 187–196
33 Navon O, Hutcheon I D, Rossman G R, et al. Mantle-derived fluids in diamond micro-inclusions. Nature, 1988, 335: 784–789
34 Korsakov A V, Hermann J. Silicate and carbonate melt inclusions associated with diamonds in deeply subducted carbonate rocks. Earth Planet Sci Lett, 2006, 241: 104–118
35 Ogasawara Y. Microdiamonds in ultrahigh-pressure metamorphic rocks. Elements, 2005, 1: 91–96
36 Hwang S L, Shen P, Chu H T, et al. Genesis of microdiamonds from melt and associated multiphase inclusions in garnet of ultrahigh-pressure gneiss from Erzgebirge, Germany. Earth Planet Sci Lett, 2001, 188: 9–15
37 Stökhert B, Duyster J, Trepman C, et al. Microdiamond daughter crystals precipitated from supercritical COH+ silicate fluids induced in garnet, Erzgebirge, Germany. Geology, 2001, 29: 391–394
38 Palyanov Y N, Shatsky V S, Sobolev N V, et al. high-pressure geoscience special feature: The role of mantle ultrapotassic fluids in diamond formation. Proc Natl Acad Sci USA, 2007, 104: 9122–9127
39 Thompson P, Parsons I, Graham C M, et al. The breakdown of potassium feldspar at high water pressure. Contrib Mineral Petrol, 1998, 130: 176–186

40 Hwang S L, Shenm P, Chu H T, et al. Kokchetavite: A new potassium-feldspar polymorph from the Kokchetav ultrahigh-pressure terrane. Contrib Mineral Petrol, 2004, 148: 380–389
41 Yang J J, Powell R. Calculated Phase Relations in the System Na_2O-CaO-K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O with Applications to UHP Eclogites and Whiteschists. J Petrol, 2006, 47: 2047–2071
42 Frost B R, Frost C D. CO_2, melts and granulite metamorphism. Nature, 1987, 327: 503–506
43 Metrich N, Rutherford M J. Experimental study of chlorine behavior in hydrous silicic melts. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56: 607–616
44 Thompson Jr J B, Waldbaum D R. Analysis of the two-phase region halitesylvite in the system NaCl-KCl. Geochim Cosmochim Acta, 1969, 33: 671–690
45 Markl G, Bucher K. Composition of fluids in the lower crust inferred from metamorphic salt in lower crustal rocks. Nature, 1998, 391: 781–783
46 Trommsdorf V, Skippen G, Ulmer P. Halite and sylvite as solid inclusions in high-grade metamorphic rocks. Contrib Mineral Petrol, 1985, 89: 24–29
47 Ferrando S, Frezzotti M L, Dallai L, et al. Multiphase solid inclusions in UHP rocks (Su-Lu, China): Remnants of supercritical silicate-rich aqueous fluids released during continental subduction. Chem Geol, 2005, 223: 68–81
48 Liu J B, Liu W Y, Ye K, et al. Chlorine-rich amphibole in Yangkou eclogite, Sul ultrahigh-pressure metamorphic terrane, China. Eur J Mineral, 2009, 21: 1265–1285
49 Hayden L A, Manning C E. Rutile solubility in supercritical $NaAlSi_3O_8$-H_2O fluids. Chem Geol, 2011, 284: 74–81
50 Zhao Z F, Zheng Y F, Chen R X, et al. Element mobility in mafic and felsic ultrahigh-pressure metamorphic rocks during continental collision. Geochim Cosmochim Acta, 2007, 71: 5244–5266