

苏鲁榴辉岩钾长石+石英聚合体中重晶石矿物及其意义

曾令森 刘福来 梁凤华 陈方远

(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037. E-mail: lzeng@ccsd.org.cn)

摘要 在苏鲁超高压榴辉岩的绿辉石中, 发育具有柯石英(?)假象的自型或半自型钾长石+石英多晶聚合体。在钾长石和石英中, 发育半自型或浑圆状的重晶石。重晶石的大小普遍小于1 μm , 个别可达3~5 μm 。利用扫描电镜的能谱分析(EDS)对重晶石进行了矿物化学测试, 结果表明, 这些重晶石的 SO_3 变化范围较小为33.86%~41.12%, SrO和BaO的变化较大, 分别从0~34.65%和24.12%~63.55%; SrO与BaO呈近乎线性负相关关系, 说明它们是重晶石(BaSO_4)和天青石(SrSO_4)的固溶体; 它们的Sr/Ba摩尔比值高度变化, 从0~2.1。榴辉岩中以包裹体形式存在的重晶石不仅表明了大陆地壳物质深俯冲作用伴随着明显的氧化作用, 而且表明了有限的流体作用使它们在退变质作用过程中保存下来的主要因素。

关键词 榴辉岩 钾长石+石英聚合体 重晶石 超高压变质作用

尽管许多学者对超高压岩石的主要矿物、岩石地球化学特征、变质作用时限、构造变形特征进行了大量的研究, 取得了许多重要的认识^[1,2], 但对超高压榴辉岩的副矿物的研究相对薄弱。虽然锆石被普遍应用于确定超高压变质作用的时限, 但对于其在超高压变质过程中的行为, 认识有限。对于其他诸如硫化物、硫酸盐和磷酸盐等副矿物的研究更是不足, 严重地阻碍了人们对一些重要元素(P, S, Ba, Sr等)在陆壳或洋壳俯冲和折返过程中地球化学行为的认识。最近对苏鲁超高压榴辉岩中的磷灰石进行了一系列研究, 发现磷灰石在榴辉岩中具有高度的稳定性^[3]; 普遍含有大量的硫化物出溶体^[3-7]; 是控制榴辉岩的P, LREE, Sr和F含量的主控矿物^[8]。这些研究结果表明磷灰石最有可能是继承性的矿物相, 见证了与俯冲-碰撞-折返相关的变质作用, 发生了复杂的物理和化学反应。因此, 磷灰石的矿物化学及其变化特征为研究在超高压岩石在俯冲到折返过程中, 与磷酸盐相容元素的地球化学行为提供了重要的窗口。在本文中, 将报道榴辉岩中的硫酸盐矿物——重晶石, 对该矿物的深入研究有可能深化对超高压岩石的S、Ba和Sr元素地球化学行为认识, 对研究其它硫酸盐矿物行为提供借鉴。

重晶石(BaSO_4)及天青石(SrSO_4)是深海沉积岩和蒸发岩中常见的硫酸盐矿物, 都属于重晶石。在高级变质岩中, 重晶石不是常见的矿物, 在高压变质作用形成的榴辉岩脉中偶有报道^[9]。在大别-苏鲁超高压

变质带中也发现了与超高压矿物共生的重晶石和硬石膏等硫酸盐矿物^[10-12]。例如, 在CCSD主孔193 m处榴辉岩中, 在石榴石中发现了以细小包裹体形式产出的重晶石^[10], 个别重晶石含较高的Sr, $\text{SrO} > 20\%$ 。另外, 刘景波等人^[11,12]通过X光拉曼光谱测试, 在大别超高压片麻岩的锆石的核部也发现了重晶石和硬石膏(CaSO_4)包裹体。上述两种情况都被解释为超高压变质流体作用的结果。最近, 在CCSD主孔与石英脉共生的磷灰石聚合体中也发现了重晶石和磁铁矿, 认为是磷灰石在减压过程中出溶的产物^[13,14]。这些重晶石到底是超高压变质作用前就已存在的矿物相(继承性矿物), 还是在超高压变质作用中, 局部流体作用所形成的? 这还是一个没有定论的问题。对这个问题的探讨有助于以下几个问题的研究: 如果重晶石是继承性矿物, 那么对含锶重晶石(甚至是天青石)的Sr同位素组成的测试将有助于限定榴辉岩(或其他超高压岩石)原岩的初始Sr同位素组成和原岩的初始形成环境; 相反, 如果是超高压变质作用中流体作用的结果, 那么重晶石的出现应反映超高压变质条件下, 可能存在富Sr, Ba和S及高度氧化的流体。这些流的存在将强烈影响超高压岩石的亲S元素的活动性(如Os, Re, Cu, Pb等); Ba和Sr元素的地球化学行为及Rb-Sr同位素地球化学系统特征。对重晶石的Sr和S同位素的测试也将在确定超高压变质作用时流体的Sr和S同位素地球化学特征, 对限定超高压变质过程中流体的来源具有重要意义。

2007-05-08 收稿, 2007-08-17 接受

国家重点基础研究发展计划(批准号: 2003CB716504)和国家自然科学基金(批准号: 40673027)资助项目

在本文中, 我们报道在苏鲁超高压榴辉岩的绿辉石内部具有柯石英(?)假象的钾长石+石英聚合体中发现重晶石族矿物, 确定了它们的矿物化学特征, 讨论它们可能的成因及其意义.

1 样品及测试方法

所研究样品 JC-01 和 CCSD-03 采自于江苏东海毛北中国大陆科学钻探工程主孔附近的 2 个榴辉岩采坑中. 对每一个样品, 我们在平行、垂直和斜交拉伸线理方向准备了岩石薄片, 观察它们的矿物组成和结构变化. 这两个样品具有相似的矿物组成、结构和构造, 表现在: () 它们都为新鲜金红石榴辉岩, 矿物组成为石榴石、绿辉石、金红石、微量磷灰石和黄铁矿(FeS₂); 都具有明显的面理和拉伸线理; () 磷灰石中都有大量细小的硫化物出溶体, 主要成分为 FeS, 少数为 FeS₂; () 与绿辉石和金红石类似, 磷灰石平行于拉伸线理定向排列, 多数磷灰石的长轴和短轴比大于 4.0; () 黄铁矿主要沿造岩矿物的颗粒边界发育; () 电子探针测试结果表明这些绿辉石基本上不含 K, K₂O 的含量小于 0.01%. 在这两个样品中, 发现多个钾长石+石英多晶聚合体以包裹

体的形式赋存在绿辉石中, 这种聚合体总体上为自形或半自形, 在包裹体周围具有放射状裂纹(图 1 和 2(a)), 说明它们经历过超高压变质作用. 这种聚合体在结构上与在CCSD主孔榴辉岩 [15]、苏鲁地区其他榴辉岩 [16]及祁连山超高压变质带 [17]中发现的类似, 但总体成分有所不同, 有关它们的成因及意义将有另文具体阐述. 在样品JC-01的 2 颗钾长石+石英聚合体中, 发现 4 颗重晶石, 长轴方向的颗粒粒度在 1~5 μm 之间, 短轴方向小于 3 μm(图 1), 呈浑圆状或半自型. 在样品CCSD-03的 1 个长柱状自形钾长石+石英聚合体中, 石英呈排状主要分布于聚合体的边部, 钾长石主要位于核部部位(图 2(a)), 在钾长石和石英中都发现大量大小不一(大部分小于 3 μm)、浑圆状的重晶石(图 2(b), (d)). 利用扫描电镜的能谱分析功能(EDS)对这些重晶石进行了成分分析, 确定了它们的组成.

扫描电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,

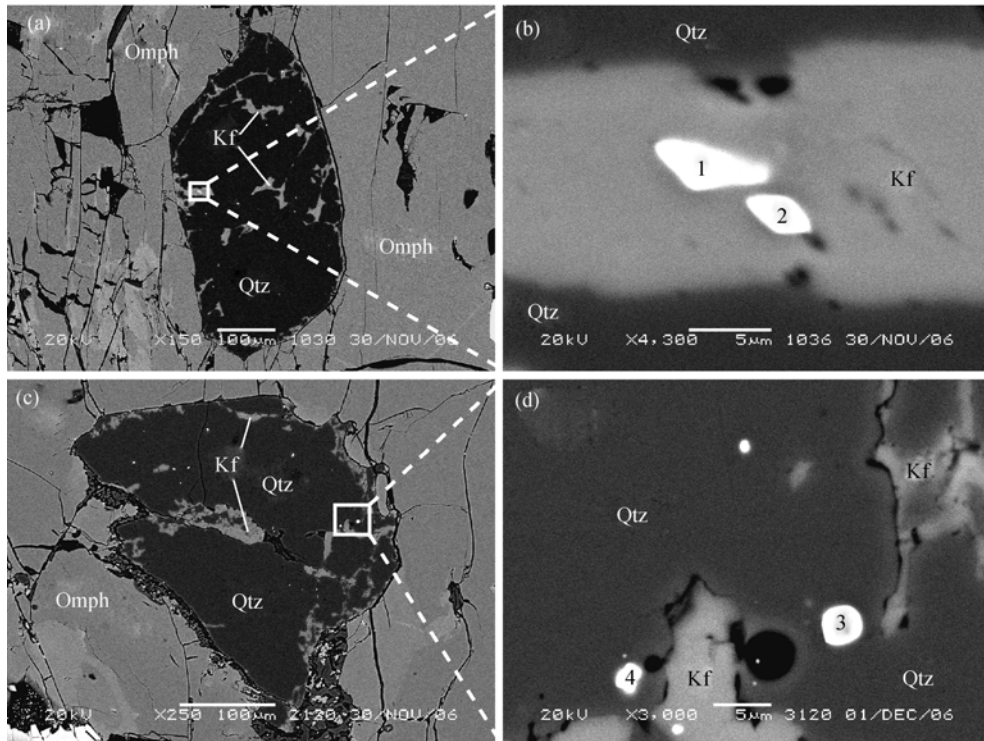


图 1 BSE 图像显示样品 JC-01 中钾长石+石英聚合体中锶重晶石的产出特征

(a) 绿辉石中具有柯石英假象的钾长石+石英聚合体; (b) 赋存于钾长石中的重晶石 1 和 2; (c) 绿辉石中具有柯石英假象的钾长石+石英聚合体; (d) 赋存于石英中的重晶石 3 和 4. 其中 Omph=绿辉石, Gt=石榴石, Qtz=石英, Kf=钾长石

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进行矿物化学成分分析, BSE图像可以很好地显示钾长石+石英聚合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左右, 分析区域空间分辨率为 4 μm左右, 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. S和Ba用重晶石标定, 而Sr用天青石标定. 在本研究中, 所测目标的基质为钾长石或石英, 这两种矿物的Sr, S和Ba的含量一般都小于 1000 μg/g, 对所分析目标的贡献远小于 1%, 可按陈方远等人^[18]提出的处理方法进行基质校正. 分析结果见表 1.

另外, 在中国地质科学院国家地质测试中心, 利用 XRF 和 ICP-MS 确定了 2 个样品的全岩地球化学组成, 测试结果表明所研究 2 个样品全岩的 Sr 和 Ba 的含量都很低, 其中 JC-01 的 Sr 和 Ba 的含量为 46.6 和 16.0 μg/g; 而 CCSD-03 的 Sr 和 Ba 的含量为 176.0 和 49.0 μg/g.

2 重晶石的化学组成

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, 发现这些重晶石成分高度均

一, 不存在成分分带现象. JC-01 中的重晶石的SO₃变化范围为 36.35%~41.12%, SrO从 0~34.65%, BaO从 24.12%~63.55%(表 1), 表明它们是重晶石和天青石的固溶体. 在样品CCSD-03 的一个钾长石+石英聚合体中, 发现大量的重晶石族矿物, 大部分粒度小于 3 μm(图2), 对其中 17 个较大的颗粒进行了成分测试, 结果见表 1. 其他颗粒太小, 测试误差太大, 在此不作讨论. 这些重晶石矿物的SO₃变化范围较小, 为 33.86%~36.84%, 但SrO和BaO的变化范围都很大, 分别为 0~13.86%和 48.94%~66.17%(表 1). 对重晶石寄主矿物钾长石和石英的测试结果表明, 所有分析的石英和钾长石没有可检测到Sr, Ba和S, 说明钾长石和石英对所分析重晶石没有贡献. 对所有重晶石的SrO和BaO含量进行投图, SrO和BaO之间呈很好的负线性相关(图 3), 反映了这些矿物是重晶石和天青石的固溶体. 另外, 按单个分子含 4 个氧原子计算, 它们的S/(Sr+Ba)的摩尔比大部分接近于 1.0, 也说明这些细小矿物为重晶石族矿物. 在这些重晶石中, SrO的含量高达 34.65%, 该重晶石含 65%天青石固溶体组分(表 1), 比杨红等人^[10]在CCSD主孔榴辉岩中发现的含Sr重晶石的SrO含量还高. 另外, 这些重晶石族矿物的Sr/Ba摩尔比值高度变化, 从 0~2.1(表 1).

表 1 包裹在钾长石+石英聚合体中重晶石的矿物化学组成

样品	测试点	氧化物(%)				摩尔数(按每个分子含 4 个氧原子计算)				S/(Sr+Ba)	Sr/Ba
		SO ₃	SrO	BaO	总量	S	Sr	Ba	Sr+Ba		
CCSD-03	N1-1	35.89	5.68	58.39	99.96	1.00	0.12	0.85	0.97	1.03	0.14
	N1-2	35.01	5.63	59.25	99.89	1.00	0.12	0.88	1.01	0.99	0.14
	N1-3	36.84	13.89	48.94	99.67	1.00	0.29	0.69	0.99	1.02	0.42
	N1-4	35.77	8.10	56.00	99.87	1.00	0.18	0.82	0.99	1.01	0.21
	N1-5	34.74	1.19	63.76	99.69	1.00	0.03	0.96	0.98	1.02	0.03
	N1-6	34.19		65.57	99.76	1.00		1.00	1.00	1.00	0.00
	N1-7	34.55		65.25	99.80	1.00		0.99	0.99	1.01	0.00
	N1-8	35.65		64.24	99.89	1.00		0.94	0.94	1.06	0.00
	N1-9	33.86		66.17	100.03	1.00		1.02	1.02	0.98	0.00
	N1-10	36.05	4.48	59.57	100.10	1.00	0.10	0.86	0.96	1.04	0.11
	N1-11	35.76	7.09	57.23	100.08	1.00	0.15	0.84	0.99	1.01	0.18
	N1-12	35.55	4.44	59.80	99.78	1.00	0.10	0.88	0.97	1.03	0.11
	N1-13	34.96	3.82	60.93	99.70	1.00	0.08	0.91	0.99	1.01	0.09
	N1-14	35.09	3.25	61.34	99.68	1.00	0.07	0.91	0.98	1.02	0.08
	N1-15	34.12	0.87	64.57	99.56	1.00	0.02	0.99	1.01	0.99	0.02
	N1-16	34.64		65.11	99.75	1.00	0.00	0.98	0.98	1.02	0.00
	N1-17	35.86	9.39	54.20	99.46	1.00	0.20	0.79	0.99	1.01	0.26
JC-01	N-1	37.70	17.81	44.42	99.93	1.00	0.36	0.62	0.98	1.02	0.59
	N-2	39.05	20.51	40.22	99.78	1.00	0.41	0.54	0.94	1.06	0.75
	N-3	41.12	34.65	24.12	99.89	1.00	0.65	0.31	0.96	1.04	2.13
	N-4	36.35		63.55	99.90	1.00		0.91	0.91	1.10	0.00

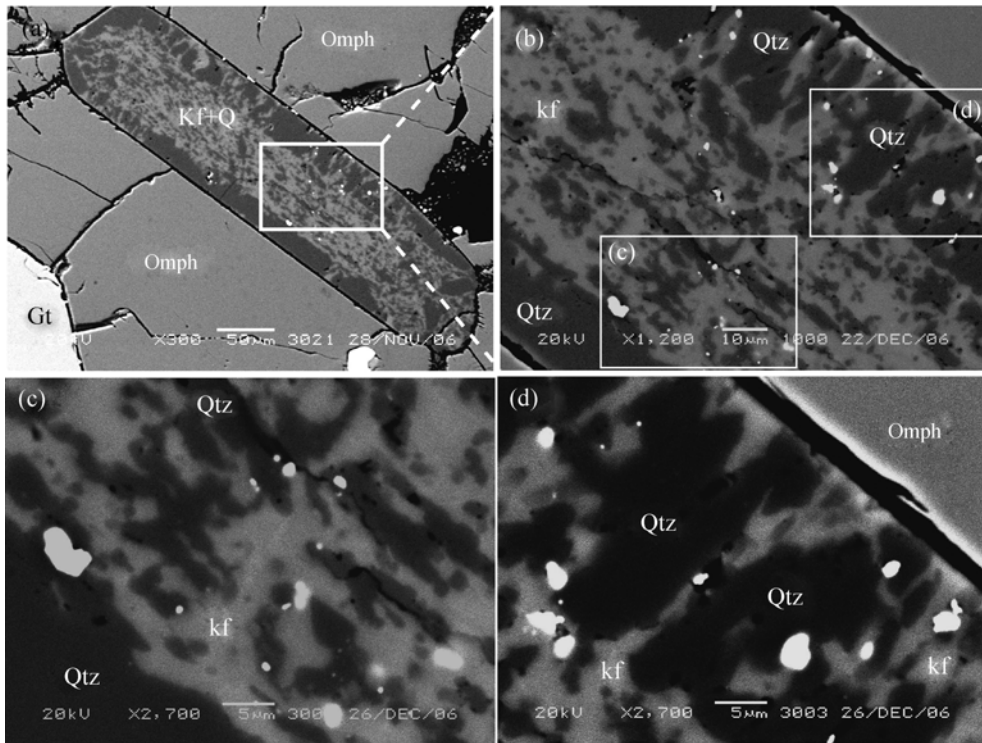


图 2 BSE 图像显示样品 CCSD-03 中钾长石+石英聚合体中重晶石矿物的产出特征

(a) 绿辉石中具有柯石英(?)假象的钾长石+石英聚合体; (b) 赋存于钾长石和石英中的重晶石. 其中 Omph=绿辉石, Gt=石榴石, Qtz=石英, Kf=钾长石. (c)和(d)为图(b)的局部放大

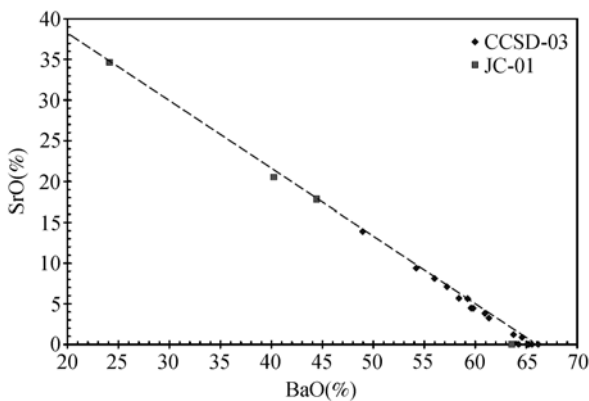


图 3 所测重晶石矿物的 SrO 和 BaO 关系图

3 重晶石的成因及其意义

重晶石族矿物(重晶石、天青石)是深海沉积物中常见的一种矿物,其成因可以为热液作用、化学沉积作用及生物成因.在海洋化学研究中,重晶石是恢复古海洋Sr同位素组成、Ba和S的化学循环过程的重要指示性矿物 [19,20].在固体地球科学领域,重晶石族矿

物常与热液矿床相伴生 [21],是指示热液来源的重要矿物.虽然,重晶石族矿物在超高压岩石中报道很少,但天青石和菱锶矿是赋载锶的最重要的矿物,而天青石和重晶石之间可以形成理想的固溶体系列 [22],研究这些矿物在榴辉岩等超高压岩石中的存在形式和可能的过程对研究Sr、Ba及S在板块构造作用中的地球化学循环具有重要意义.

在高级变质岩中,有关重晶石族矿物的研究很少,对其在变质作用中的行为及意义的认识缺乏.在阿尔卑斯山造山带的高压榴辉岩脉中曾报道过重晶石,认为是在进变质作用中,榴辉岩的原岩脱水,近源流体作用的产物 [9].和榴辉岩脉中的重晶石不同的是,所有在大别-苏鲁超高压带发现的重晶石矿物都是以包裹体的形式赋存于其他矿物之中,如杨红等人 [10]发现的重晶石赋存在石榴石中;刘景波等人 [11,12]在锆石中发现细小的重晶石;本报道的重晶石赋存于钾长石+石英多晶聚合体的钾长石或石英中.产状和矿物组合都与榴辉岩脉中的不同,因此它们的成

因应有别于那些发育在榴辉岩脉中的重晶石。

所研究2个样品全岩的Sr和Ba的含量都很低,其中JC-01的Sr和Ba的含量为46.6和16.0 $\mu\text{g/g}$;而CCSD-03的Sr和Ba的含量为176.0和49.0 $\mu\text{g/g}$,和N-MORB及E-MORB的浓度相当。但已有研究表明这些榴辉岩的原岩为大陆基性岩浆岩^[23-25],原岩的Sr和Ba浓度应与大陆玄武岩的相当, $\text{Sr} > 200 \mu\text{g/g}$ 和 $> 100 \mu\text{g/g}$ 。造成这些榴辉岩Sr和Ba都亏损的原因可能是俯冲作用伴随的脱水作用。Ba和Sr是亲流体元素,在俯冲进变质过程中,脱水作用可以带走大量的Ba和Sr,造成最终超高压榴辉岩的全岩Sr和Ba含量降低。但这并不能排除在这些榴辉岩中形成局部富集Ba和Sr的流体,形成由Sr和Ba组成的独立矿物相。

如果重晶石是在超高压条件下局部富含Ba和硫酸根流体作用的产物^[10-12],那么在超高压变质条件下,应存在高度氧化的流体。到目前为止,超高压流体包裹体的研究所揭示的超高压流体为高盐度流体^[26,27],没有发现富Ba和硫酸根的流体。但是,在盐度和压力增加条件下,依据Blount^[28]的实验结果,Ba和硫酸根在流体中的溶解度增高,当Ba和 $(\text{SO}_4)^{4-}$ 达到饱和时,可形成独立的Ba硫酸盐矿物相。

对苏鲁榴辉岩的副矿物(磷灰石、硫化物)的观测结果揭示了在退变质过程中,不太可能存在富含硫酸根、Sr和Ba的流体。苏鲁榴辉岩普遍具有含大量硫化物出溶体的磷灰石,出溶体的成分主要为 FeS ,硫以 S^{2-} 的形式存在^[3,18],这与重晶石中硫以6价氧化态的形式存在相悖;榴辉岩中或多或少地含有黄铜矿或黄铁矿,表明在退变质过程中,流体中的硫也主要以还原态存在;磷灰石在苏鲁榴辉岩中极其稳定,在超高压条件下,除了作结构调整之外,并不分解^[29-32],即使局部存在含硫酸根的流体,由于硫酸根在磷灰石中是相容的,可以替代磷酸根,进入到磷灰石结果中^[32],这种流体不太可能富硫酸根;除非这些流体是外来的。另外,苏鲁榴辉岩的磷灰石都含有一定量的Sr, SrO的含量在0.25%左右^[8], Sr在磷灰石中也是相容元素^[33-35],由于Sr在磷灰石和流体之间的配分系数 $\gg 1.0$ ^[33,35],和磷灰石共存的流体的Sr含量应比较低,不足以达到饱和。因此,在退变质过程中,流体作用不太可能形成重晶石。

在本研究样品中,重晶石孤立地包裹在钾长石或石英内部,大部分重晶石呈浑圆状;而钾长石和石英一起构成具有放射状裂纹的多晶聚合物,是经历

过超高压变质作用的矿物组合^[15]。不管含不含这种聚合物,绿辉石的 K_2O 含量都很低,小于0.01%,说明钾长石+石英聚合物不可能是绿辉石与石英(或柯石英)反应的结果。另外,我们最近对超高压榴辉岩的钾长石+石英聚合体的研究表明,这些聚合体的成分可以从纯钾长石到纯石英之间变化,是富钾流体(或熔体)与柯石英反应的结果。因此,我们认为钾长石或石英中的重晶石可能是形成在柯石英之前,是进变质过程中流体作用的产物。

岩相学、氧同位素及流体包裹体研究都表明,在大别-苏鲁超高压榴辉岩在进变质及退变质作用过程中,仅存在有限丰度的流体^[1,26,27]。苏鲁榴辉岩缺乏流体的原因之一可能是俯冲的大陆地壳本身相对缺乏流体^[1]。俯冲过程中虽然存在脱水作用,即在还没达到超高压条件之前,原岩中的部分水可能由于矿物分解而发生丢失。但是这些水可能依然保留在俯冲板片内部,只是在不同温压条件下得以稳定的矿物之间进行再分配,因此具有内部缓冲性质。对大别-苏鲁超高压榴辉岩的碳同位素研究表明^[36],在大陆地壳深俯冲过程中存在氧化作用,将地表混染的有机碳氧化成 CO_2 和碳酸盐。大别-苏鲁榴辉岩和石榴辉石岩的石榴石具有显著的Ce负异常,也表明大陆地壳深俯冲过程中氧化组分的存在^[37]。另外,岛弧火山岩及其所携带的幔源包体的研究^[38-41]都发现,来自于俯冲板片的流体是很好的氧化剂,以水的形式^[40]或以富含三价铁的流体形式^[41]存在。这些研究指示,苏鲁超高压榴辉岩在进变质致峰期超高压条件过程中存在显著的氧化作用,有利于重晶石的形成。

上述观测结果表明,榴辉岩中以包裹体形式存在的重晶石可能是陆壳物质深俯冲过程中氧化作用的产物,是在大陆地壳深俯冲过程中存在氧化作用^[38]的另一证据。对颗粒较大的重晶石进行原位Sr同位素测试,将直接限定这些高度氧化流体的Sr同位素特征,为探讨苏鲁大陆地壳物质在三叠纪陆陆碰撞时可能经历的地质过程提供关键数据。

Blount^[28]进行了重晶石在不同温度、压力和盐度不同液体中溶解度的实验研究,发现尽管重晶石在流体中的溶解度很低,但重晶石在高盐度流体中的溶解度随深度的增加而增加。因此,伴随着俯冲作用,俯冲岩石的脱水作用有可能导致含Sr重晶石的部分溶解作用,优先带走Sr,促使重晶石的Sr/Ba比发生变化,

这种过程与重晶石在海水中的行为类似. 本研究报道的重晶石族矿物具有高度变化的 Sr/Ba 比值, 有可能反映了相似的过程. 因此, 超高压榴辉岩中以包裹体形式存在的重晶石族矿物的 Sr/Ba 比值, 可能和深海沉积物中重晶石的 Sr/Ba 比一样^[42], 是重晶石保存程度的标志. 重晶石以包裹体形式存在于苏鲁榴辉岩中, 这也表明了有限的流体作用是使它们保存下来的主要因素.

致谢 在成文过程中, 笔者与张泽明、沈昆研究员和陈晶教授的讨论, 得到了许多的建议和启发, 两位审稿专家及特邀编辑提出了诸多建设性建议, 郑永飞教授在百忙之中给予指导, 开阔了笔者的思路, 极大地提高了论文的质量, 对此一并致谢.

参 考 文 献

- 1 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[DOI]
- 2 Xu Z Q, Zeng L S, Zhang Z M, et al. Polyphase subduction and exhumation of the Sulu high-pressure-ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic terrane. In: Hacker B R, McClelland W C, Liou J G, eds. *Ultrahigh-pressure metamorphism: Deep continental subduction*. *Geol Soc Am Spec Paper*, 2006, 403: 93—113
- 3 Zeng L S, Chen J, Liang F H, et al. Widespread occurrences of apatites with high density sulfide mineral solid exsolutions in the Sulu eclogites. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18)(Suppl 1): A733[DOI]
- 4 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(2): 433—438
- 5 陈晶, 曾令森, 陈方远, 等. 江苏青龙山磷灰石中出溶体的初步研究. *岩石学报*, 2006, 22(7): 1921—1926
- 6 朱永峰, Massonne H J. 磷灰石中磁黄铁矿出溶结构的发现. *岩石学报*, 2005, 21: 405—410
- 7 Chen J, Zeng L S, Chen F Y, et al. Exsolved phases in apatites from the Qinglongshan eclogite, Jiangsu Province: A preliminary study. *Geochim Cosmochim Acta*, 2006, 70(18)(Suppl 1): A20
- 8 陈振宇, 曾令森, 梁凤华, 等. CCSD 主孔榴辉岩中磷灰石的矿物化学特征及对榴辉岩中 F, Cl, Sr 等元素地球化学行为的研究. *地质学报*, 2006, 80(12): 1842—1850
- 9 Scambelluri M, Phillipot P. Deep fluids in subduction zones. *Lithos*, 2001, 55: 213—227[DOI]
- 10 杨红, 张立飞, 刘福来. 中国大陆科学钻探主孔榴辉岩中重晶石的发现及其意义. *地质学报*, 2006, 80(12): 1892—1897
- 11 刘景波, 叶凯, 丛柏林, 等. 大别山超高压变质片麻岩锆石中重晶石和硬石膏包裹体及其意义. *岩石学报*, 2000, 16(4): 482—484
- 12 Liu J, Ye K, Maruyama S, et al. Mineral inclusions in zircon from

- gneisses in the ultrahigh-pressure zone of the Dabie Mountains, China. *J Geol*, 2001, 109: 523—536[DOI]
- 13 汤倩, 孙晓明, 徐莉, 等. 中国大陆科学钻探(CCSD)榴辉岩磷灰石脉中铁的氧化物、重晶石和独居石出溶物的发现及其意义. *岩石学报*, 22(7): 1915—1920
- 14 Sun X M, Tang Q, Sun W D, et al. Monazite, iron oxide and barite exsolutions in apatite aggregates from CCSD drillhole eclogites and their geological implications. *Geochim Cosmochim Acta*, 2007, 71: 2896—2905[DOI]
- 15 Liang F H, Zeng L S, Xu Z Q. Inclusion of K-feldspar-quartz aggregate in omphacite from eclogites from the Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) main borehole: A potassic melt inclusion that experienced UHP metamorphism? *Eos Trans AGU*, 2006, 87(47), Fall Meet Suppl, Abstract V31A-0556
- 16 Yang J J, Godard G, Smith D C. K-feldspar-bearing coesites pseudomorphs in an eclogite from Lanshantou (Eastern China). *Eu J Mineral*, 1998, 10: 969—985
- 17 Song S G, Yang J S, Xu Z Q, et al. Metamorphic evolution of the coesite-bearing ultrahigh-pressure terrane in the North Qaidam, Northern Tibet, NW China. *J Metamorph Geol*, 2003, 21: 631—644[DOI]
- 18 陈方远, 曾令森, 梁凤华. 定量确定中国大陆科学钻探工程主孔榴辉岩磷灰石中出溶体的组成: 扫描电镜能谱分析(EDS)的应用. *地质学报*, 2006, 80(12): 1930—1934
- 19 Paytan A, Kastner M, Martin E E, et al. Marine barite as a monitor of seawater strontium isotope composition. *Nature*, 1993, 366: 445—449[DOI]
- 20 Paytan A, Kastner M, Chavez F P. Glacial to Interglacial fluctuations in productivity in the equatorial Pacific as indicated by marine barite. *Science*, 1996, 274: 1355—1357[DOI]
- 21 Deer W A, Howie R A, Zussman J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. Hong Kong: Longman Scientific & Technical, 1992
- 22 Miyake M, Minato I, Morikawa H, et al. Crystal structure and sulphate force constants of barite, celestite, and Anglesite. *Am Mineral*, 1978, 63: 506—510
- 23 张泽明, 许志琴, 刘福来, 等. 中国大陆科学钻探工程主孔(100~2050 m)榴辉岩岩石化学研究. *岩石学报*, 2004, 20(1): 27—42
- 24 刘永胜, 张泽明, Lee Cin-Ty, 等. CCSD 主孔高 Ti 榴辉岩非耦合的高 Ti、低 Nb(Zr)特征: 对玄武岩质岩浆中磁铁矿分离结晶作用的指示. *岩石学报*, 2005, 21(2): 339—346
- 25 曾令森, 张泽明, 刘福来, 等. V/Sc 在 CCSD 主孔榴辉岩中的系统关系: 一种可透视变质作用并指示基性岩浆作用的地球化学工具. *岩石学报*, 2006, 22(7): 2051—2059
- 26 Fu B, Touret J L R, Zheng Y F. Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxene from the Dabie-Sulu terranes, eastern China. *J Metamorph Geol*, 2003, 21(6): 561—578[DOI]
- 27 沈昆, 张泽明, 孙晓明, 等. 超高压变质流体的组成与演化: 中国大陆科学钻探工程主孔岩心的流体包裹体研究. *岩石学报*, 2005, 21(2): 489—504

- 28 Blount C W. Barite solubilities and thermodynamic quantities to 300 and 1400 bars. *Am Mineral*, 1977, 62: 942—957
- 29 Comodi P, Liu Y, Zanazzi P F, et al. Structural and vibrational behaviour of fluorapatite with pressure. Part I: *In situ* single-crystal X-ray diffraction investigation. *Phys Chem Mineral*, 2001, 28: 219—224[DOI]
- 30 Comodi P, Liu Y, Frezzotti M L. Structure and vibrational behaviour of fluorapatite with pressure. Part II: *In situ* micro-Raman spectroscopic investigation. *Phys Chem Mineral*, 2001, 28: 225—231[DOI]
- 31 Brunet F, Allan D R, Redfern S A T, et al. Compressibility and thermal expansivity of synthetic apatites, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{X}$ with X = OH, F and Cl. *Eu J Mineral*, 1999, 11: 1023—1035
- 32 刘羽, 彭明生. 磷灰石结构替换的研究进展. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 413—415
- 33 Ayers J C, Watson E B. Apatite/fluid partitioning of rare-earth elements and strontium: Experimental results at 1.0 GPa and 1000 °C and application to models of fluid-rock interaction. *Chem Geol*, 1993, 113: 299—314[DOI]
- 34 Krenn E, Finger F. Metamorphic formation of Sr-apatite and Sr-bearing monazite in a high-pressure rock from the Bohemian Massif. *Am Mineral*, 2004, 89: 1323—1329
- 35 Watson E B, Green T H. Apatite/liquid partition coefficients for the rare earth elements and strontium. *Earth Planet Sci Lett*, 1981, 56: 405—421[DOI]
- 36 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[DOI]
- 37 罗彦, 高山, 袁洪林, 等. 大别-苏鲁榴辉岩和石榴辉石岩中矿物 Ce 异常: 对氧化环境下形成沉积物深俯冲作用的示踪. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(1): 14—23
- 38 Ballhaus C. Oxidation states of the lithospheric and asthenospheric upper mantle. *Contrib Mineral Petrol*, 1993, 114: 331—348[DOI]
- 39 Arculus R J. Oxidation status of the mantle: past and present. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 1985, 13: 75—95[DOI]
- 40 Stolper E M, Newman S. The role of water in the petrogenesis of Mariana trough magmas. *Earth Planet Sci Lett*, 1994, 121: 293—325[DOI]
- 41 Parkinson I J, Arculus R J. The redox state of subduction zones: insights from arc-peridotites. *Chem Geol*, 1999, 160: 409—424[DOI]
- 42 Van Beek P L, Reyss J L, Bonte P, et al. Sr/Ba in barite: A proxy of barite preservation in marine sediments? *Mar Geol*, 2003, 199: 205—220[DOI]