

大陆俯冲过程中的流体

李曙光,侯振辉

(中国科学技术大学 地球和空间科学系,安徽 合肥 230026)

摘要:含水矿物稳定性的实验研究和超高压岩石的同位素地球化学研究表明,大陆地壳在俯冲过程中,随着变质程度的升高和部分含水矿物的相继分解,会有流体释放出来。当俯冲深度接近 50 km,俯冲陆壳岩石中大量低级变质含水矿物(如绿泥石、绿帘石、阳起石)会脱水并从俯冲陆壳逸出形成流体流。这一流体流可溶解带走俯冲陆壳内已从云母类矿物逸出的放射成因 Ar 及部分 U、Pb,并导致 $w(U)/w(Pb)$ 升高。这一阶段逸出的流体有可能交代、水化仰冲壳楔,为其发生部分熔融形成同碰撞花岗岩或加速山根下地壳的榴辉岩化创造条件。在俯冲深度为 50~100 km,变镁铁质岩石中的角闪石相继分解并释放出 H_2O 。由于变镁铁质岩石在陆壳中所占比例较少,因此,这一阶段释放的水不能形成大规模的流体流,因而不能使体系内的过剩 Ar 大量散失,但足以形成局部循环,加速变镁铁质岩石及其互层或邻近围岩的榴辉岩化变质反应。在俯冲深度 > 100 km 的超高压变质阶段,仅有少量的含水矿物分解,而多硅白云母仍保持稳定。这时俯冲陆壳内只可能有少量粒间水存在,从而导致俯冲陆壳与周围软流圈地幔不能发生充分的相互作用。

关键词:大陆俯冲;流体;超高压变质作用

中图分类号:P59 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2321(2001)03-0123-07

碰撞造山带陆壳岩石中柯石英及金刚石的发现证明,在碰撞造山过程中一侧陆壳可以俯冲到 100 km 以上的深度^[1~5]。俯冲陆壳随着温度、压力及变质温度的升高能否释放大量流体以及所产生的地质、地球化学效应是一个非常重要和有意思的科学问题,并引起广泛关注^[6~8]。对俯冲洋壳的深入研究,人们已了解海水蚀变的俯冲洋壳及其所携带的沉积物在俯冲过程中,随着变质程度的加深,可释放大量的水,并形成流体流(fluid flux)。该流体流进入并交代上覆楔形地幔,从而引发地幔部分熔融,形成岛弧型玄武-安山质岩浆作用^[9]。然而俯冲陆壳因其组成及俯冲环境与俯冲洋壳不同,在俯冲过程中流体析出的深度、析出量及地质地球化学效应一定会有其特殊性。人们主要关心以下几个问题:(1) 陆壳在俯冲过程中能否脱水产生流体流?它产生的深度及影响的范围如何?尤其是它能否像俯冲

洋壳那样在地幔深度产生流体流从而交代影响仰冲盘的楔形地幔?(2) 在深俯冲的超高压变质条件下,俯冲陆壳中是否有游离水流体存在?如果有,它的地球化学效应是什么,以及有多大影响范围?针对这些问题,人们主要从以下 3 个途径进行研究:(1) 实验岩石学及变质含水矿物的稳定性研究;(2) 超高压矿物流体包裹体研究;(3) 超高压变质岩的稳定同位素及放射性同位素地球化学研究。由于流体包裹体及稳定同位素研究已有郑永飞专文论述^[10],本文主要对实验岩石学及放射性同位素示踪领域的研究进展进行讨论和评述。

1 变质含水矿物稳定性的实验研究及俯冲陆壳析出流体的可能性

俯冲陆壳除了在较浅部(< (25 ± 15) km)可通过压实及去挥发份作用产生流体外,在较深部(> 25 km),只有通过含水矿物的脱水变质反应才能产生游离态水^[11]。因此,这方面工作试图通过高温、高压实验方法,研究各种含水变质矿物相(如云母类,闪石类,帘石类,绿泥石类)的 $T(\text{温})-p(\text{压})$ 稳定区

收稿日期:2001-05-25

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(G1999075503);国家自然科学基金项目(49873006);中国科学院知识创新重点资助项目(KZCXZ-107)

作者简介:李曙光(1941—),男,教授,博士生导师,主要从事同位素年代学及地球化学和造山带化学地球动力学研究。

间,建立它们的 p - T 相图,从而帮助我们推测俯冲陆壳在到达何等深度或 T - p 条件下,哪些含水矿物变得不稳定而脱水,从而使俯冲陆壳有析出流体的可能性。Ernst (2000) 对这一领域工作有很好的评述^[11]。

除了碳酸盐岩以外,含水的俯冲陆壳岩石主要有 3 种岩石组合类型:(1) 变玄武岩 + 变辉长岩;(2) 蛇纹石化超镁铁岩;(3) 长英质岩石。它包括变质硬砂岩 + 变泥质岩 + 片麻岩及变质花岗岩。它们在俯冲过程中脱水情况是不一样的。

(1) 对于变玄武岩及变辉长岩来说,它的含水矿物主要是绿泥石、绿帘石及角闪石。在温度低于 600~650 °C、压力 < 1.2~1.5 GPa 时,绿泥石和绿帘石与阳起石可共生存在(图 1)。当温度 > 650 °C、

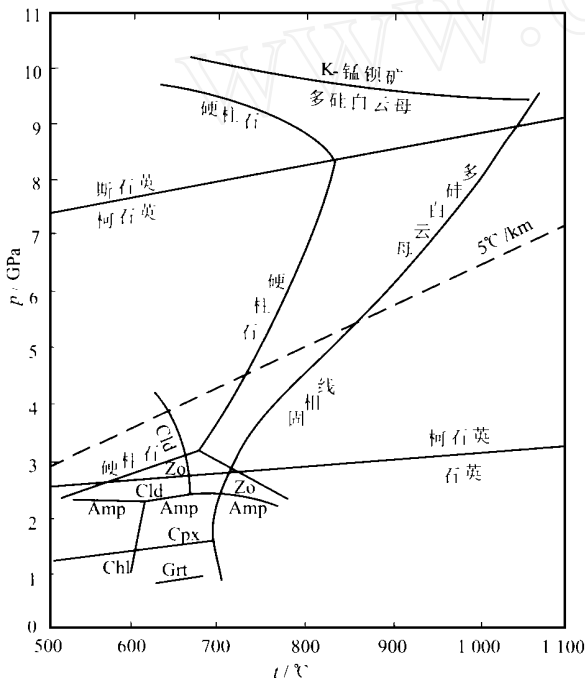


图 1 玄武岩- H_2O 体系含水矿物稳定区 p - T 相图
(据文献[11],[12])

Fig. 1 Stability p - T fields of H_2O -bearing minerals in the basalt- H_2O system

俯冲带的地热梯度为 5 °C/km (据文献[12])

Amp-角闪石; Chl-绿泥石; Cld-硬绿泥石;

Cpx-单斜辉石; Grt-石榴石; Zo-黝帘石

压力升高时,绿泥石、绿帘石及阳起石类闪石就会消失,角闪石主要以蓝闪石和韭闪石形式存在,而且随着压力升高,其数量急剧减少。在到达超高压条件下($t = 750 \sim 900$ °C, $p > 2.7$ GPa),所有的 Ca-Na 闪石都要分解。因此,变玄武岩及变辉长岩在俯冲过程中随着温度、压力的升高伴随有显著的脱水过程

并释放出相当数量的水。然而应当指出的是,如果变玄武岩含有较多的 K,则在压力升高以后会出现多硅白云母这一含水矿物,而且它的温度、压力稳定区高达 900~1 000 °C 和 9 GPa。因此在高压及超高压条件下,多硅白云母的出现可以吸收一部分水。图 1 又显示,角闪石大约在 2.2 GPa 时消失,这相当于角闪榴辉岩向绿帘石榴辉岩转变阶段,因此,变玄武岩和变辉长岩主要在此以前有较多的水析出。此后只有绿帘石、黝帘石及蓝闪石等少量含水矿物在超高压条件下分解,因而只能有很少量游离态水产生。超高压矿物中流体包裹体的研究已证明超高压阶段游离态水的存在^[14,15]。由于俯冲洋壳基本上是由变玄武岩和变辉长岩组成,因此,当它俯冲到 70~80 km 时($p = 2.2 \sim 2.4$ GPa),将会有大量的闪石矿物脱水并产生流体流。如果脱水反应速度较慢,这一过程还可持续到更深的深度。

(2) 对蛇纹石化的超镁铁岩来说,图 2 显示,在角闪岩相变质条件下($t = 550 \sim 620$ °C, $p = 0.5 \sim 1.0$ GPa),叶蛇纹石会分解成橄榄石 + 滑石,并释放出大量的水,这类岩石的脱水过程对俯冲大洋板块有较重要的意义。因为大洋岩石圈顶部可能有大

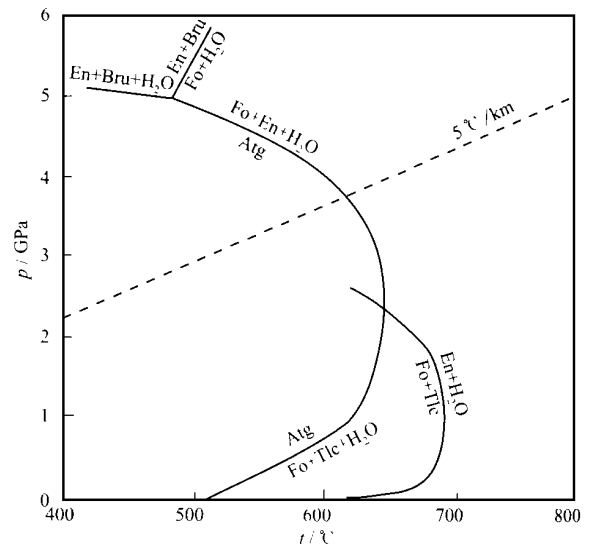


图 2 MgO - SiO_2 - H_2O 体系叶蛇纹石稳定区相图
(据文献[11,13])

Fig. 2 Stability p - T fields of antigorite in the MgO - SiO_2 - H_2O system

俯冲带的地热梯度为 5 °C/km

Atg-叶蛇纹石; Bruc-水镁石; En-顽火辉石; Fo-镁橄榄石; Tlc-滑石
量水化(蛇纹石化)的超镁铁岩。但对俯冲陆壳来说,蛇纹石化橄榄岩含量很少,它们的脱水量仅对自身及其围岩的榴辉岩化过程产生影响。

(3) 在长英质岩石中,含水矿物主要是绿泥石及黑云母和白云母,实验工作表明,除绿泥石在 550~600 °C 以上要脱水并消失外(图 1),白云母 + 黑云母组合可以在很高的温度下保持稳定^[16~21]。例如,在俯冲带地热梯度条件下,多硅白云母至少可在 3.5~4.0 GPa 时仍保持稳定^[19]。由于黑云母和白云母是陆壳长英质岩石中最重要的含水矿物,而长英质岩石在俯冲陆壳中又占有最大体积,因此,Ernst (2000) 认为陆壳岩石在俯冲到 100 km 以上的超高压条件下,将不可能有显著的水卷入超高压变质作用。由于缺少游离态水,长英质岩石仍可在经历超高压变质时保持长石 + 石英 + 云母组合的亚稳状态而不能形成超高压矿物组合。然而应当指出的是,由于绿泥石的脱水,长英质陆壳岩石仍可能在俯冲到 50 km ($p = 1.5$ GPa) 以前释放出较多水。此外,在俯冲陆壳中仍可能有相当数量的各种变质的古老基性、中基性火山岩。它们的脱水过程可否在俯冲陆壳内形成流体流及其影响范围尚有待通过其它途径进行研究。

2 陆壳深俯冲过程中流体活动的放射性同位素示踪

流体的存在可提高元素的活动性并加快同位素的平衡,流体流的活动则可使被溶解元素快速带出,因而可导致放射性同位素母体/子体的分异。因此,超高压岩石的放射性同位素及母体/子体比值可以用来示踪流体活动。目前已对过剩 Ar 及 U-Pb 同位素进行了研究并对陆壳深俯冲过程中的流体活动给出了重要的制约。

(1) 自从 Li 等 (1994) 发现超高压榴辉岩中的多硅白云母含有大量过剩 Ar 以来^[22],人们对其过剩 Ar 的来源及成因进行了大量的研究^[23~29]。最新的 Ar-Ar 激光分析研究成果表明,多硅白云母的 Ar 是从原岩自身继承来的,而非外来流体带入的^[26,27]。Li 等 (1999) 对大别 - 苏鲁超高压变质带各种岩石中云母的表面年龄的统计表明,榴辉岩中的多硅白云母含过剩 Ar 最多,同样经历过高压变质的花岗片麻岩中的云母基本不含过剩 Ar,而与榴辉岩互层的片麻岩中的云母含少量过剩 Ar,介于二者之间(图 3)^[30]。对于这种现象的一个可能的解释就是,长英质花岗片麻岩原岩(花岗岩)中的主要含 K 矿物为钾长石、黑云母和白云母,它们的 Ar 封

闭稳定性很低 (< 350 °C),因此,在陆壳俯冲初期,这

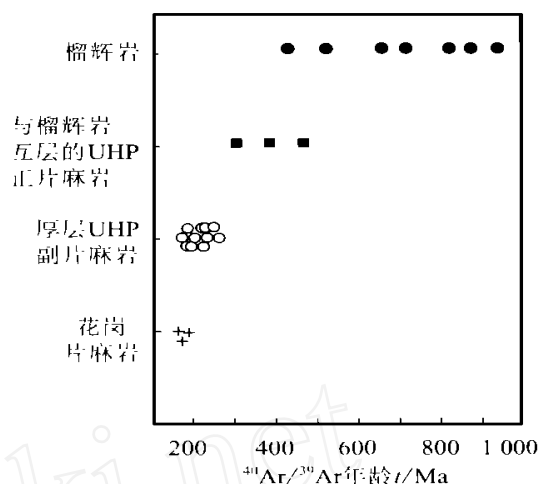


图3 大别-苏鲁造山带超高压变质岩中云母的 $N(^{40}\text{Ar})/N(^{39}\text{Ar})$ 表面年龄(横坐标)与其岩性和产状(纵坐标)的关系 (据文献[30])

Fig. 3 Diagram showing the correlation between the $N(^{40}\text{Ar})/N(^{39}\text{Ar})$ apparent ages of micas from UHP metamorphic rocks and their protoliths as well as their occurrences

些含 K 矿物中积累的放射成因 Ar 就释放出来了。花岗片麻岩中的云母不含过剩 Ar 的事实说明,这些释放出来的放射成因 Ar 并没有保存在体系内,而是伴随俯冲陆壳逸出的流体而散失了。因此在高压及超高压条件下,花岗片麻岩中⁴⁰Ar 分压很低,从而使此时形成的多硅白云母不含过剩 Ar。它说明长英质陆壳岩石在俯冲初期(榴辉岩相变质以前)也有大量流体逸出。然而榴辉岩的原岩是基性斜长角闪岩类,其主要含 K 矿物为角闪石,Ar 封闭温度接近 500 °C,因此它积累的放射成因 Ar 要到变质温度高于 500~600 °C 时才会完全释放出来。这时俯冲陆壳已经历榴辉岩相变质。多硅白云母过剩 Ar 的继承成因说明,此时角闪石释放出的放射成因 Ar 并没有大量散失到岩石体系以外,因而榴辉岩体系内仍保持较高的⁴⁰Ar 分压,从而使这时形成的多硅白云母含较多过剩 Ar。在榴辉岩相变质时,体系内放射成因 Ar 没有大量丢失,说明这一阶段尽管角闪石会释放出水,但并未形成大规模的流体流,这时游离态水流体的活动范围还是有限的。

(2) 前人研究已经发现俯冲洋壳析出流体可使俯冲洋壳的 U-Pb 体系发生分异。实验研究表明,俯冲板块在脱水过程中, Pb 比 U 有更大的活动性。从而使脱水后的俯冲洋壳有较低的 Pb 含量和较高的 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 值^[31]。因此,观测超高压岩石的

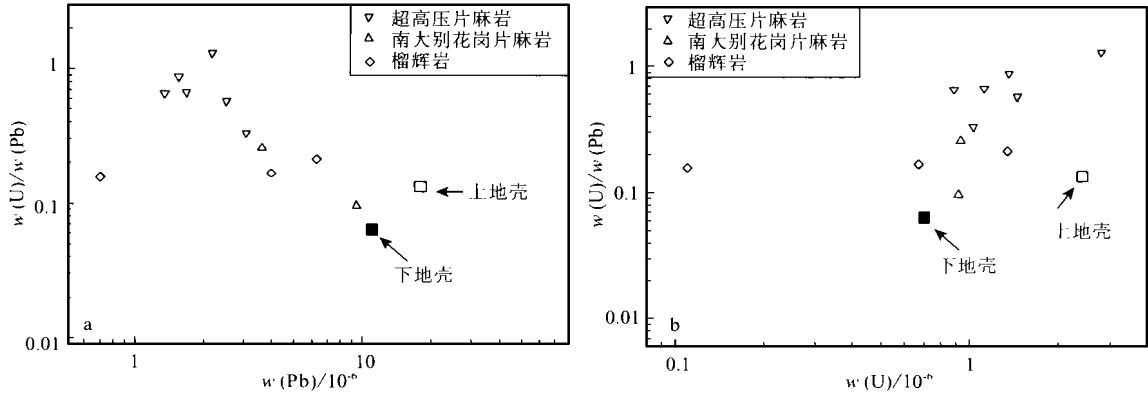


图4 大别山超高压岩石及片麻岩的 $w(U)/w(Pb)-w(Pb)$ 和 $w(U)/w(Pb)-w(U)$ 图
(据李曙光等, 2001)

Fig. 4 $w(U)/w(Pb)-w(Pb)$ and $w(U)/w(Pb)-w(U)$

diagrams of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks and their country gneisses from the Dabie Mountains

$w(U)/w(Pb)$ 值变化可以帮助我们判断俯冲陆壳是否发生过大量的脱水及流体逸出过程。最近我们对大别山双河超高压岩石的 U 、 Pb 含量及 $w(U)/w(Pb)$ 比值用同位素稀释法进行了精确分析^[32]。双河超高压变质岩为榴辉岩与大理岩、变泥质岩互层, 它们保持了良好的火山沉积岩系的层状结构及地球化学特征^[33,34]。氧同位素研究表明, 它们在俯冲前也曾与天水进行过同位素交换^[35]。因此双河超高压变质岩的原岩应是接近地表的上地壳岩石。测定结果表明, 大别山超高压变质岩的 Pb 含量普遍低于上、下地壳的平均组成; 绝大多数样品的 U 含量低于上地壳平均组成, 但高于下地壳平均组成, 因此样品的 $w(U)/w(Pb)$ 比值均高于上地壳平均值(图4)^[32]。这表明双河超高压变质岩遭受了 U 、 Pb 的丢失, 其中 Pb 的丢失量远高于 U 的丢失量。这完全符合俯冲板块析出流体所形成的 U 、 Pb 分异特征。这一事实说明, 双河超高压变质岩在俯冲过程中经历了一次脱水和流体逸出过程。结合 Ar 同位素制约, 这一流体流逸出过程可能发生在榴辉岩相变质以前。

3 超高压变质反应完成程度对流体的制约

水在辉长岩变质为榴辉岩过程中的作用早已受到许多研究者的注意^[36,37]。Ahrens 和 Shubert (1975) 认为粒间流体的存在是在 $t < 600 \sim 800$ °C、在板块俯冲的时间范围内完成辉长岩向榴辉岩转变

的必要条件, 而在缺水的环境中, 辉长岩的矿物组合及结构可在榴辉岩变质条件下残留下来^[35]。事实上, 在超高压变质条件下 ($t = 700$ °C, $p > 2.7$ GPa), 流体对完成榴辉岩化变质反应同样是重要的。例如, 在我国青岛仰口超高压变质岩露头区就可观察到在辉长岩中心部位因缺少流体而保留下斜长石、角闪石、辉石等矿物组合及火成岩结构, 而仅在岩体边部的强烈变形地带(因而流体易于活动)辉长岩才变为榴辉岩, 而且有粒间柯石英形成^[38,39]。在西阿尔卑斯的 Dora Maira 超高压变质带甚至可见到经历过超高压变质的花岗岩中有残留的黑云母存在^[40]。这些事实说明, 即使在超高压变质条件下, 如果缺少流体, 其变质反应速率仍然是很慢的, 以致岩石在陆壳俯冲所允许的时间范围内仍未能完成其变质反应。通常辉长岩和花岗岩侵入体因缺乏角闪石类含水矿物, 在岩体内部可形成缺乏流体的环境, 但在岩体边部, 因构造变形强, 可使来自围岩的流体渗入, 从而加快榴辉岩化反应。但是对于变玄武岩来说, 它们因含有大量角闪石, 在高压及超高压变质时不缺乏流体, 因此很少出现高压变质反应不完全的情况。双河超高压变质岩的岩石学研究表明, 那些与榴辉岩互层的长英质变泥质岩均可形成高压矿物组合, 而不含榴辉岩的花岗片麻岩仍基本保持角闪岩相^[39]。这说明变玄武岩释放出来的流体不仅以粒间流体形式存在, 还可在与它互层的岩石中形成局部流体循环, 但并未影响到花岗片麻岩的内部。

4 结论

上述研究工作表明,俯冲陆壳尽管主要由长英质岩石组成,它在俯冲深度到达 50 km 以前,由于绿泥石、绿帘石、阳起石等矿物的脱水,可以有大量的流体析出。这些析出的流体可以带走陆壳中云母释放出来的放射成因 Ar,并导致俯冲陆壳岩石的 U、Pb 丢失和 $w(\text{U})/w(\text{Pb})$ 升高。这一阶段析出的流体由于深度较浅,不能对仰冲盘的岩石圈地幔楔产生显著影响,但可以水化,交代仰冲壳楔,为它们以后发生部分熔融形成同碰撞花岗岩,或加速山根下地壳的榴辉岩化创造条件。在俯冲陆壳俯冲到 50~100 km 之间时,俯冲陆壳中的变玄武岩及变辉长岩的含 Na 角闪石会逐步分解,释放出游离态水,然而,这一阶段由于变玄武岩和变辉长岩在陆壳中所占比例较低,因而释放的水量尚不足以形成大规模流体流。它可以在变玄武岩和变辉长岩内部,以及与它们互层或近距离围岩中形成局部的流体循环,以加速促进这些岩石的榴辉岩化过程,但不能使该体系内角闪石释放的放射成因 Ar 大量逃逸。在陆壳俯冲到 100 km 以上深度并发生超高压变质时,仅有少量的残留含 Na 角闪石被分解。超高压矿物中高盐度流体包裹体的存在^[14,15]证明这一阶段俯冲陆壳中仍有少量粒间流体存在,但这些流体的活动范围很小。因此,它不能导致俯冲陆壳与周围的软流圈发生充分的化学相互作用,但足以保证超高压变质反应得以完成。

参考文献:

- [1] SMITH D C. Coesite in clinopyroxene in the Caledonides and its implications for geodynamics[J]. *Nature*, 1984, 310: 641-644.
- [2] CHOPIN C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps: a first record and some consequences[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1984, 86: 107-118.
- [3] WANG X, LIOU J G, MAO H J. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China[J]. *Geology*, 1989, 17: 1085-1088.
- [4] SOBOLEV N V, SHATSKY V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks[J]. *Nature*, 1990, 343: 742-746.
- [5] XU S, OKAYA A L, JI S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting[J]. *Science*, 1992, 256: 80-82.
- [6] 李曙光. 大陆俯冲化学地球动力学[J]. *地学前缘*, 1998, 5 (4): 211-234.
- [7] 李曙光, 聂永红, HART S R, 等. 俯冲陆壳与上地幔的相互作用——Dabie 山同碰撞镁铁-超镁铁岩的 Sr、Nd 同位素地球化学[J]. *中国科学(D 辑)*, 1998, 28(1): 18-22.
- [8] LIOU J G, ZHANG R Y, ERNST W G. Occurrences of hydrous and carbonate phases in ultrahigh-pressure rocks from east-central China: implications for the role of volatiles deep in cold subduction zones[J]. *The Island Arc*, 1995, 4: 362-375.
- [9] TATSUMI Y, EGGINS S M. Subduction zone magmatism[J]. *Cambridge Blackwell*, 1995, 211.
- [10] 郑永飞, 徐宝龙, 周根陶. 矿物稳定同位素地球化学研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(2): 299-320.
- [11] ERNST W G. H₂O and ultrahigh-pressure subsolidus phase relations for mafic and ultramafic systems[A]. ERNST W G, LIOU J G. Ultra-high pressure metamorphism and geodynamics in collision-type orogenic belts[M]. [s.l.]: Bellwether Publishing Ltd, 2000. 121-129.
- [12] SCHMIDT M W, POLI S. The stability of lawsonite and zoisite at high pressure: experiments in CASH to 92 kbar and implications for the presence of hydrous phases in subducted lithosphere[J]. *Earth Plan Sci Lett*, 1994, 124: 105-118.
- [13] WUNDER B, SCHREYER W. Antigorite: high-pressure stability in the system MgO-SiO₂-H₂O (MSH)[J]. *Lithos*, 1997, 41: 213-227.
- [14] XIAO Y L, HOEFS J, van den KERKHOF A M, et al. Fluid history of UHP metamorphism in Dabie Shan, China: a fluid inclusion and oxygen isotope study on the coesite-bearing eclogite from Bixiling[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 139: 1-16.
- [15] XIAO Y L, HOEFS J, VAN DEN KERKHOF A M, et al. Geochemical constraints of the eclogite and granulite facies metamorphism as recognized in the Raobazhai complex from North Dabie Shan, China[J]. *J Metamorphic Geol*, 2001, 19: 3-19.
- [16] GARDIEN V, THOMPSON A B, FRUJIC D, et al. Experimental melting of biotite + plagioclase + quartz ± muscovite assemblages and implications for crustal melting[J]. *Jour Geophys Res*, 1995, 100: 15581-15591.
- [17] LEBRETON N, THOMPSON A B. Fluid-absent (dehydration) melting of biotite in the early stages of crustal anatexis[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 99: 226-237.
- [18] LUTH R W. Experimental studies of the system phlogopite-diopside from 3.5 to 17 GPa[J]. *Amer Mineral*, 1997, 82: 1198-1209.
- [19] SKJERLIE K P, JOHNSTON A D. Vapor-absent melting from 10 to 20 kbar of crustal rocks that contain multiple hydrous phases: implications for anatexis in the deep to very deep continental crust and active continental margins[J]. *Jour Petrol*, 1996, 37: 661-691.
- [20] MASSONE H J, SZPURKA Z. Thermodynamic properties of white micas on the basis of high-pressure experiments in the sys-

- tems $K_2O-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ and $K_2O-FeO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O$ [J]. *Lithos*, 1997, 41: 229-250.
- [21] VIEL ZEUF D, HOLLOWAY J R. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. Consequences for crustal differentiation[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1988, 98: 257-276.
- [22] LI S G, WANG S S, CHEN Y Z, et al. Excess argon in phengite from eclogite: evidence from dating of eclogite minerals by Sm-Nd, Rb-Sr and $^{40}Ar/^{39}Ar$ methods[J]. *Chemical Geology*, 1994, 112: 343-350.
- [23] ARNAUD N O, KELLEY S P. Evidence for excess Ar during high pressure metamorphism in the Dora Maira (Western Alps, Italy), using a ultraviolet laser ablation microprobe $^{40}Ar/^{39}Ar$ technique[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1995, 121: 1-11.
- [24] SCAILLET S. Excess ^{40}Ar transport scale and mechanism in high-pressure phengites: case study from an eclogitized metabasite of the Dora Maira nappe, Western Alps[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1996, 60: 1075-1090.
- [25] REDDY S M, KELLEY S P, WHEELER J, et al. A $^{40}Ar/^{39}Ar$ laser probe study of micas from the Sesia Zone, Italian Alps: implications for metamorphic and deformation histories [J]. *J Metamorph Geol*, 1996, 14: 493-508.
- [26] BOUNDY T M, HALL C M, LI G. Fine-scale isotopic heterogeneities and fluids in the deep crust: a $^{40}Ar/^{39}Ar$ laser ablation and TEM study of muscovites from a granulite-eclogite transition zone[J]. *Earth Plan Sci Lett*, 1997, 148: 223-242.
- [27] RUFFET G, GRUAU G, G, FÉRAUD M. Rb-Sr and $^{40}Ar/^{39}Ar$ laser probe dating of high-pressure phengites from the Sesia Zone (Western Alps): underscoring of excess argon and new age constraints on the high-pressure metamorphism[J]. *Chem Geol*, 1997, 141: 1-18.
- [28] SCAILLET S. K-Ar ($^{40}Ar/^{39}Ar$) geochronology of ultrahigh pressure rocks[A]. HACKER B R, LIOU J G. *When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh Pressure Rocks*[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998. 161-201.
- [29] GIORGIS D, COSCA M, LI, S G. Distribution and significance of extraneous argon in UHP eclogite (Sulu terrain, China): insight from in situ $^{40}Ar/^{39}Ar$ UV-laser ablation analysis [J]. *Earth Plan Sci Lett*, 2000, 181: 605-615.
- [30] LI S G, JAGOUTZ E, LO C H, et al. Sm/Nd, Rb/Sr, and $^{40}Ar/^{39}Ar$ isotopic systematics of the ultrahigh pressure metamorphic rocks in the Dabie-Sulu belt, Central China: a retrospective view[J]. *International Geol Review*, 1999, 41 (12): 1114-1124.
- [31] KOGISO T, TATSUMI Y, NAKONO S. Trace element transport during dehydration processes in the subducted oceanic crust: 1. Experiments and implications for the origin of ocean island basalts[J]. *Earth Plan Sci Lett*, 1997, 148: 193-205.
- [32] 李曙光, 黄方, 周红英, 等. 大别山双河超高压变质岩及北部片麻岩的 U-Pb 同位素组成——对超高压岩石折返机制的制约[J]. *中国科学(D辑)*, 2001(待刊).
- [33] LI S G, JOGOUT E, CHEN Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, Central China [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 2000, 64(6): 1077-1093.
- [34] CONG B, ZHAI M, CARSWELL D A, et al. Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, Central China[J]. *Eur J Mineral*, 1995, 7: 119-138.
- [35] ZHENG Y F, FU B, LI Y, et al. Oxygen and hydrogen isotope geochemistry of ultrahigh-pressure eclogites from the Dabie Mountains and the Sulu terrane [J]. *Earth Plan Sci Lett*, 1998, 155: 113-129.
- [36] AHRENS T J, SCHUBERT G. Gabbro-eclogite reaction rate and its geophysical significance[J]. *Review of Geophysics and Space Physics*, 1975, 13: 383-440.
- [37] AUSTRHEIM H R, GRIFFIN W L. Shear deformation and eclogite formation within granulite-facies anorthosites of the Bergen Arcs, western Norway[J]. *Chemical Geol*, 1985, 50: 267-281.
- [38] ZHANG R Y, LIOU J G. Partial transformation of gabbro to coesite-bearing eclogite from Yangkou, the Sulu terrane, Eastern China[J]. *J Metamorphic Geol*, 1997, 15: 183-202.
- [39] YE K, HIRAJIMA T, ISHIWATARI A. Significance of interstitial coesite in eclogite from Yangkou, Qingdao City, Eastern Shandong[J]. *Chinese Sci Bull*, 1996, 41 (5): 1047-1050 (in Chinese).
- [40] TILTON G R, AMES L, SCHERTL H P, et al. Reconnaissance isotopic investigations on rocks of an undeformed granulite contact with in the coesite-bearing unit of the Dora Maira Massif [J]. *Lithos*, 1997, 41: 25-36.

FLUID DURING CONTINENTAL SUBDUCTION

LI Shu-guang, HOU Zhen-hui

(Department of Earth and Space Science, University of Science and
Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Experimental studies of stability of hydrous mineral and isotopic geochemical studies of ultra-high pressure rocks show that the hydrous minerals in subducted continental crust will progressively dehydrate along with increase of pressure and temperature, which results in a separate aqueous fluid. When the subduction depth is near 50km, the voluminous lower grade metamorphic hydrous minerals (e.g. chlorite, epidote, actinolite) undergo dehydration forming an aqueous fluid flux. The dissolved radiogenic Ar from micas and U, Pb in the subducted continental crust are more readily transported by this fluid flux, which may result in the elevation of U/Pb ratio of the rocks at the subducted continental crust. This aqueous fluid rising through the subduction channel as well as diffusing into the overlaying crustal wedge can induce partial melting of the crust wedge to produce syncollisional granites, or eclogitization of lower continental crust in the thickened mountain root. The amphiboles in meta-mafic rocks dehydrate at the depth between 50~100 km. Because of the lower proportion of meta-mafic rocks in subducted continental crust, the devolatilization of meta-mafic rocks at this depth can not generate a large scale aqueous fluid flux, thus the excess Ar in the system can not be significantly lost. However, the aqueous fluid released from the meta-mafic rocks may move in local cycle, so that it can markedly enhance the reaction rates of eclogite-facies metamorphism in the meta-mafic rocks and metapelite interbedded with them, or adjacent wall rocks. Only minor H₂O-bearing minerals dehydrate, but phengite keeps stable during ultrahigh pressure metamorphic stage (subduction depth > 100km). Thus only a little pore fluid could exit between minerals during this stage, which impedes the interreaction between the subducted continental crust and mantle.

Key words: continental subduction; fluid; ultrahigh-pressure metamorphism