47 Richaud C, Mengin-Lecreulx D, Pochet S, et al. Directed evolution of biosynthetic pathways. J Biol Chem, 1993, 268: 26827~26835
48 Matcham G W, Bowen A R S. Biocatalysis for chiral intermediates: meeting commercial and technical challenges. Chem Today, 1996, 14: 20~24
49 Crameri A, Cwirla S, Stemmer W P C. Construction and evolution of antibody-phage libraries by DNA shuffling. Nature Med, 1996, 2: 100~102
50 He Y Y, Stocklev P G, Gold L. *In vitro* evolution of the DNA binding site of *Escherichia coli* methionine repressor MetJ. J Mol Biol. 1996, 255: 55~66
51 Strausberg S L, Alexander P A, Gallagher D T, et al. Directed evolution of subtilisin with calcium-independent stability. Bio/Technology, 1995, 13: 669~673
52 Black M E, Newcomb T G, Wilson H M P, et al. Creation of drug specific HSV-1 thymidine kinase mutants for gene therapy. Proc Natl Acad Sci USA, 1996, 93: 3525~3528
53 Beaudry A A, Joyce G F. Directed evolution of an RNA enzyme. Science, 1992, 257: 635641~635644
54 Patten P A, Howard R J, Stemmer W P C. Application of DNA shuffling to pharmaceuticals and vaccines. Curr Opin Biotech, 1997, 8: 724~738

(1998-08-10收稿, 1998-12-08收修改稿)

大别山-苏鲁超高压变质带研究的最新进展

从柏林 王清晨
(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

摘要 对近5年来国内、外科学家在大别山-苏鲁超高压变质岩带的研究成果进行了剖析, 并针对具体科学问题进行了深入的讨论. 依据最新资料指出: ( ) 超高压榴辉岩具两类围岩, 一类为同样经历过超高压变质作用的榴辉岩相岩石, 另一类为未经历超高压变质的花岗片麻岩; ( ) 新发现的橄榄石中 $FeTiO_3$ 的出溶体为300~400 km深度上发生的现象, 但关键在于证明这种出溶是由于原先在地壳中的橄榄岩被俯冲到300~400 km深度发生的, 还是本来就在该深度的地幔橄榄岩的相转变; ( ) 超高压含水矿物相及组合的发现表明流体参与了超高压变质作用, 但氧、碳、氢同位素研究却表明, 表壳岩在俯冲到地幔深度时并无大规模流体活动, 对这一矛盾现象尚需深入研究; ( ) 对大别山-苏鲁超高压变质岩形成的大地构造背景尚存歧见, 表现在对诸如是否存在"蛇绿岩", 超高压变质作用发生的时代, 大别山下面是否有一古老的地幔楔等问题的争论; ( ) 对超高压变质岩的折返机制与过程仍无一致的认识.

基于上述讨论, 今后几年的研究重点将是: ( ) 超高压变质作用的热力学和动力学基础; ( ) 超高压变质作用与碰撞造山作用的关系及其动力学背景; ( ) 碰撞造山过程中地壳和地幔以及大陆岩石圈与软流圈之间的相互作用及其对大陆岩石圈命运的制约.

关键词 **超高压变质作用 大别山-苏鲁地区 评论 展望**

自80年代末在大别山-苏鲁地区发现含柯石英榴辉岩以来[1~6], 许多中、外科学家从各个方面致力研究该超高压变质带, 包括超高压变质岩的矿物学与岩石学、同位素年代学、微量元

素与同位素地球化学、变质作用的 *P-T-t* 轨迹、超高压变质岩形成的构造环境与折返机制, 以及其地球动力学背景等. 据不完全统计, 近 10 余年有关该超高压变质带的研究论文达 350 余篇, 并集中反映在一些专著中[7~9]. 除国际岩石圈计划第 ⑯6 任务组自 1994 年起每年都要召开超高压变质作用与碰撞造山作用的研讨会外, 自 1996 年起 AGU 的年会也专门设立超高压变质作用的特别研讨会. 广泛的国际合作和学术交流, 大大地促进了该研究领域的进展, 并使之成为国际固体地球科学最热门的研究对象之一. 作者曾对大别山-苏鲁超高压变质带的研究做过综述[10], Harley 等人[11] 和 Schreyer[12] 则对该研究领域的进展做了精辟的回顾和展望, 本文试图在前一篇综述的基础上, 针对具体问题对大别山-苏鲁超高压变质带研究中的最新进展进行概述和评论, 并对未来的研究作一展望.

1 “就地的”还是“外来的”?

自 Chopin[13] 和 Smith[14] 在西阿尔卑斯和挪威发现含柯石英包体的镁铝榴石石英岩和榴辉岩以来, 超高压变质作用与碰撞构造的研究已成为固体地球科学的热点之一. 什么是超高压变质作用? 一般将石英/柯石英相变曲线之上的高压变质相系部分定义为超高压变质作用[8]. 这个定义遵循 Miyashiro 的初衷[15], 主要强调了变质环境的低地温梯度(小于10 ℃/km), 而不是用压力和温度的绝对值来划分变质相系. 正如 Carswell[16] 指出的, 超高压变质岩必然归属于榴辉岩相, 但榴辉岩相岩石绝不都是超高压变质岩, 同时榴辉岩相也并不限定于基性成分的榴辉岩. 超高压变质作用的研究之所以受到国际固体地球科学界重视, 就是因为它揭示出大陆地壳物质可被俯冲至上地幔的深度, 而这在传统的板块构造理论中是没有认识到的. 近几年含柯石英榴辉岩的直接围岩(特别是明显起源于大陆地壳的岩石) 受到了更多的重视.

超高压变质岩与其围岩的关系究竟是“就地的”还是“外来的”争论至今还在进行中. Cong 等人[17] 对大别山潜山县双河地区进行了大比例尺的地质制图, 确认超高压变质岩构成岩板, 产在未发现超高压变质迹象的花岗片麻岩中, 而且两者的片理明显斜交. 超高压变质岩板的似层状外貌是由于榴辉岩、退变质榴辉岩、角闪岩、绿帘石二云母片岩、石榴石黑云母片麻岩、大理岩、硬玉石英岩等互层状产出. 岩石化学研究表明, 该超高压变质岩板的原岩是一套大陆火山-沉积岩系. 不仅在榴辉岩的石榴石中, 而且在硬玉石英岩的硬玉中都见有柯石英包体[18, 19]. 于是, Cong 等人[17] 得出结论: 就超高压变质岩板的范围来说, 尽管这些岩石的原岩包括有火成岩和沉积岩, 但它们都经受了超高压变质作用, 因此它们具有“就地的”关系; 而就超高压变质岩板与其四周的没有超高压变质作用迹象的花岗片麻岩的关系来说, 目前还只能说两者呈构造侵位关系, 即“外来的”关系. 然而, 对于同一个超高压变质岩产地的共同观察, 却会使人们得出大相径庭的结论. Liou 等人[19] 在与作者进行联合考察后, 提出超高压变质岩与围岩呈“就地的”关系. 他们列举的证据有: ( ) 包括大理岩、石英硬玉岩、片麻岩的变质沉积物与含柯石英榴辉岩有协调的接触关系; ( ) 硬玉石英岩的硬玉含柯石英包体; ( ) 含蓝晶石或硬玉的石英岩和片岩与含柯石英榴辉岩有同样的顺时针的 *P-T-t* 轨迹. 显然, 他们的证据涉及的只是超高压变质岩板内部榴辉岩与其他榴辉岩相的变质沉积岩的关系, 而不是榴辉岩相变质岩与围岩花岗片麻岩的关系. 此外, 他们一方面竭力怀疑 Xu 等人[20] 在大别山榴辉岩中发现金刚石的报道, 另一方面却大力宣传 Sobolev 等人在大别山榴辉岩的围岩片麻岩的锆石中发现微粒金刚石包体, 以佐证他们“就地的”观点. 然而, 据作者所知, 所谓含微粒金刚石包体的锆石是从流经花岗片麻岩出露区的河道流沙中淘选出来的, 但该河道上游还流经其他

岩石, 因此, 难以确定其母岩就是花岗片麻岩.

近几年, 非榴辉岩质的超高压变质岩的研究受到了研究者的更大的重视. 大别山-苏鲁超高压变质带的榴辉岩有三类直接接触的围岩, 即片麻岩或片岩、大理岩和超镁铁质岩. Wang 等人[21]在大别山与榴辉岩互层或含有榴辉岩布丁的大理岩中见有文石和柯石英假象, 由此估算得到该大理岩峰期变质的温度为 630~ 760 ℃以及压力不低于 2.7 GPa. 在苏鲁地区也有大量产在正片麻岩中并包有许多榴辉岩块的大理岩. 同样, Kato 等人[22]在这些大理岩中识别出现已成为方解石的文石假象, 他们根据大理岩中白云石+ 镁橄榄石+ 文石+ 石墨组合, 估算得到峰期变质的 *P-T* 条件是 610~ 660 ℃和 2.5~ 3.5 GPa (X_{CO_2}= 0.001). Ye Kai 等人[23]也在苏鲁地区含榴辉岩块的大理岩中识别出早期阶段的榴辉岩相组合, 即高 Al-P-F 榍石+ 纯黝帘石+ 含硬玉组分的透辉石. 高铝榍石在大别山-苏鲁地区含榴辉岩块的大理岩中很普遍, 而且其 $Ca(Al, Fe^{3+})FSiO_4$ 组分含量高[24, 25]. 研究表明, $Ca(Al, Fe^{3+})FSiO_4$ 组分增加可使榍石的稳定区扩大至榴辉岩相[26].

Ye Ki 等人[27]在苏鲁地区还发现了与榴辉岩一起呈透镜体或岩块产在花岗片麻岩中的变质钙硅酸盐岩, 它主要由钙铝榴石($Grs_{81\sim 92}Alm_{7\sim 16}Sps_{0.3\sim 2.1}Prp_{0.6\sim 1.3}$)、透辉石、黝帘石、斜黝帘石、榍石和金红石组成. 钙铝榴石+ 金红石组合表明其受过超高压变质作用. 热力学计算表明, 该类变质钙硅酸盐岩在 800 ℃下压力大于 2.5 GPa.

上面介绍的超高压变质岩(榴辉岩、大理岩、变质钙硅酸盐岩、硬玉石英岩等)均一起产在大面积出露的花岗片麻岩中, 因此, 确认超高压变质岩与围岩的关系, 即"就地的"还是"外来的", 关键还是在于研究花岗片麻岩是否经受过超高压变质作用.

1993~ 1995 年, 中国科学院地质研究所与日本京都大学地质学与矿物学系联合对青岛仰口超高压变质岩进行了详细的野外地质调查, 并测制了 1∶500 的地质图. 在该地除发现了榴辉岩中的粒间柯石英外[28], Hirajima 等人[29]和 Wallis 等人[30]还发现了超高压变质的变质花岗闪长岩. Liou 等人[19]将这种变质花岗闪长岩的发现看作为大面积出露的正片麻岩经受过超高压变质作用的证据. 而 Wallis 等人[30]只是指出, 超高压变质花岗闪长岩的存在暗示了浮力在超高压变质岩的折返中可能起了很重要的作用, 以及苏鲁地区其他产地的含柯石英榴辉岩原先也可能与低密度的花岗岩质岩石一起经受了超高压变质作用. 问题的关键在于该种变质花岗闪长岩与围岩正片麻岩在变质历史上有否区别? 研究表明[29, 30], 二者的确有重要差别. 超高压变质的花岗闪长岩含有金红石、辉石、冠状石榴石以及可能的柯石英假象, 而围岩正片麻岩中则没有. 超高压变质的花岗闪长岩经历了火成阶段、超高压变质阶段和退变质阶段的演化历程, 而围岩正片麻岩则仅有角闪岩相变质作用的记录. 因此, Wallis 等人[30]将变质花岗闪长岩放在超高压变质单位中, 命名为仰口单元, 而将围岩正片麻岩单独表示. 另外, 仰口单元包括了从超基性直至酸性的多种火成岩, 它们的密度差异很大, 而且同一类岩石十分破碎, 并受强烈的变形, 相互穿插, 被认为它们原是一个复合的火成岩体[30]. 因此, 仰口单元中的变质花岗闪长岩与围岩正片麻岩间的差别是明显的.

从另一角度讲, 如果说超高压变质作用的证据仍能在仰口单元中直径小于 20 m 的变质花岗闪长岩块中得以保存的话, 那么, 它们没有理由从面积为成百上千平方米的围岩正片麻岩中完全消失. 然而, 迄今还没有任何证据表明这些围岩正片麻岩经受过超高压变质作用.

2 大陆地壳究竟能被俯冲至多大深度?

尽管早在1982年Roecker[31]就宣称,根据帕米尔下面的地震波速度可识别出消减的大陆地壳可达100km深,但直至含柯石英的超高压变质岩在地球上许多地方被发现,Roecker勇敢的推测才被大多数研究者承认. 但是,仍有一些研究者认为,超荷载的物质或形变过程中的差异应力可增加有效的总压力,并将这种效应称为"构造超压"(Tectonic overpressure). 换句话说,他们认为天然岩石中柯石英的形成深度不一定要达到80~ 100 km. 实际上,实验研究早表明,这种"构造超压"效应取决于岩石的强度,而且估算其影响实际压力不会超过0.4[32]和0.1 GPa[33]. Mancktelow[34]再次计算表明,层状岩层中"构造超压"效应的最大幅度是0.8 GPa. 如果真是这样,形成柯石英的静岩压力也需2.0 GPa.

90年代初,在我国大别山超高压变质榴辉岩的石榴石中发现了金刚石包体[20,35],以及在哈萨克斯坦Kokchetav的石榴石-黑云母片麻岩和片岩的锆石及石榴石中发现了金刚石包体[36]. 1995年中-日地质学家联合测绘了青岛仰口超高压变质岩出露区的地质构造图,并在榴辉岩中发现了粒间柯石英[28]. 随后,Liou等人[37]对同一榴辉岩产地作了类似的报道, 似乎已没有理由再怀疑大陆地壳可被俯冲至上地幔深度的认识了. 现在的问题是,大陆地壳究竟能被俯冲至多大深度?

在大别山-苏鲁超高压变质带中有许多经受过超高压变质作用的超镁铁质岩体. 它们的原岩可以分为两类: ( ) 现已转变为榴辉岩的层状镁铁质岩体(主体是辉长岩,夹有石榴橄榄岩透镜体),如碧溪岭岩体[38,39]、胡家林岩体[40]、毛屋岩体[41,42]; ( ) 遭受到不同程度蛇纹岩化的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩(主体是蛇纹岩,包有榴辉岩和石榴石二辉橄榄岩透镜体),如迟家店岩体[43]和梭罗树岩体[27,44]. Chavagnac等人[38]提出,碧溪岭岩体是在超高压变质作用发生(210~ 220 Ma)前不久侵入的,而且具有非常高的初始冷却速率(≈40 ℃/Ma),相当于≈10mm/a的抬升速率. Zhang等人[45]根据该岩体的石榴二辉橄榄岩透镜体中Ti-斜硅镁石+ 透辉石+ 顽火辉石+ 石榴石+ 菱镁矿±橄榄石组合,估算得到平衡的*P-T*条件为700~800 ℃和4.7~ 6.7 GPa. Fan Q等人[41]在毛屋岩体的石榴方橄榄岩中发现了钛粒硅镁石(Ti-chondrodite)和Ti-斜硅镁石,以及根据极端贫Al的斜方辉石与石榴石共存,估算平衡压力可达4.5~ 5.0 GPa. Liou等人[42]给出了类似的估算结果((750±50) ℃, 3.5~ 50 GPa以及X_{CO_2}=0.001). 他们还指出,毛屋岩体中独居石是相当普遍的次要矿物,既作为其他矿物中的包体产出,又产在基质中. Hiramatsu等人[40]在胡家林岩体中发现,富Mg尖晶石已转变为石榴石,含铝单斜辉石转变为有石榴石出溶条纹的透辉石,并估算出其平衡的*P-T*条件为700 ℃和3.0 GPa. 对遭受到不同程度蛇纹岩化的尖晶石/石榴石二辉橄榄岩,估算的峰期*P-T*条件为(800±20) ℃和(5±1) GPa[43, 44]. 毫无疑问,这些镁铁质-超镁铁质岩源于上地幔或者本身就是大陆岩石圈地幔组成的岩石. 但是,这些岩体在经受超高压变质作用前曾侵入或侵位于大陆壳[38]. 特别是,超高压变质岩的氧同位素研究表明,大别山-苏鲁地区的超高压变质岩,在发生超高压变质作用之前,曾与大气水有过氧同位素交换[46~ 49], 这无疑表明大陆岩石圈至少可被俯冲到≈150 km深处.

Dobrzhinetskaya等人[50]在超高压变质的Alpe arami地体的橄榄岩中,发现了橄榄石中有许多微米级的$FeTiO_3$棒,而且这类钛酸盐有4种结构: 钛铁矿和另外3种早先没有认知的结构,

其晶体结构均介于钛铁矿和钙钛矿结构之间. 据推测, 这些 $FeTiO_3$ 棒是富含 TiO_2(约0.7%)的橄榄石在 10~ 15 GPa 的压力下作为钙钛矿出溶生成的, 尔后大部分转变为钛铁矿. 理论上, 橄榄石在 10~ 15 GPa 压力下会转变成为密度更大的 wadsleyite 或 ringwoodite 结构. 因此, 他们把 Alpe Arami 橄榄岩的橄榄石具有独特的晶格和完善的定向看成是在 wadsleyite 或 ringwoodite 稳定时形成的. 尽管他们对橄榄石中 TiO_2 量的估算受到了大多数研究者的质疑, 但是橄榄石中 $FeTiO_3$ 出溶在我国苏鲁超高压地体的石榴二辉橄榄岩中也有报道[51]. Hacker 等人[51]对荣城迟家店石榴二辉橄榄岩的橄榄石中 $FeTiO_3$ 出溶物量进行了统计, 得出橄榄石的 TiO_2 含量为 329×10^{-6}. 虽然这一估算远低于 Dobrzhinetskaya 等人 (1996) 的结果, 但仍支持他们关于橄榄石中 $FeTiO_3$ 出溶发生在 10~ 15 GPa 的压力(相当于 300~ 400 km 深度)条件下的结论.

Ye Kai 等人[1)]在早期橄榄石中发现 2 种特殊的出溶现象, 一为细针状富 Cr 钛铁矿成分相, 它们的出溶方位(橄榄石的[010]方位)及产状与 Dobrzhinetskaya 等人[50]所报道的 $FeTiO_3$ 出溶物类似; 另一种出溶物为具立方晶系或假立方晶系矿物形态的磁铁矿或铬铁矿片晶. 金振民等人[52]也在大别山碧溪岭石榴橄榄岩的橄榄石中发现了含钛铬磁铁矿的针状出溶体. 到目前为止, 橄榄石中富铬钛铁矿成分相的晶体结构尚需进一步准确测定, 但磁铁矿或铬铁矿从橄榄石中出溶暗示这些橄榄石或其中的部分成分可能曾被转变为尖晶石相结构. 他们还发现束状单斜辉石常作为石榴子石的环边产出. 到目前为止, 这种结构仅见于超深的(大于300 km)地幔岩包体中[53~55], 并被认为是单斜辉石曾转化为石榴子石结构后又发生反向转变的结果, 而这种相转变只可能发生于地幔转换带或地幔更深处.

上述发现无疑属重大研究进展. 但是, 他们并没有提供证据表明, 橄榄石中 $FeTiO_3$ 的出溶是由于原先在地壳中的橄榄岩被俯冲到 300~ 400 km 深度发生的, 还是本来就在该深度的地幔橄榄岩的相转变. 如果是后一种情况, 它就失去了超高压变质作用的地球动力学意义了.

3 超高压变质作用中有流体吗?

按照经典的变质岩石学概念, 随着埋深加大, 即压力和温度增加, 变质相从有流体(主要是 H_2O, 其次是 CO_2)参与的绿片岩相和角闪岩相升级至基本无流体参与的麻粒岩相. 同样, 一般认为, 榴辉岩相是"干的"变质作用. 但是, 随着超高压变质岩研究的深入, 研究者对传统认识产生了质疑. 其实, 在研究玄武岩和金伯利岩中的地幔岩包体时就发现这些包体有时含原生的韭闪石和金云母. 后来, 高温、高压实验表明, 韭闪石和金云母的稳定范围可扩充至3 GPa或更高的压力[56].

超高压变质作用可能有流体参与的主要依据是: ( ) 柯石英包体不仅被发现于榴辉岩的石榴石、绿辉石、硬玉和蓝晶石中, 也在绿帘石、黝帘石和白云石中被发现[57~59]; ( ) 超高压变质的超镁铁质岩常常有与石榴石和辉石平衡共存的斜硅镁石和菱镁矿[39, 41, 42], 以及发现有镁十字石[5]; ( ) 发现了蓝晶石+ 滑石白片岩组合.

特别应指出的是, 与超高压变质作用有关的高温、高压相合成实验研究表明, 大多数合成相是含 H_2O 的矿物, 如在白片岩中发现的镁硬绿泥石 $MgAl_2SiO_5(OH)_2$ 和镁十字石 Mg_4Al_{18}

1) Ye Kai. Significance of clinopyroxene, rutile and apatite exsolutions in garnet of eclogite at Yangkou, Shangdong Peninsular, Eastern China. The symposium of the chinese central orogenic belt, 1997

$Si_8O_{46}(OH)_2$, 它们稳定的 *P-T* 域分别是 1.8~ 5.8 GPa (400~ 800 ℃) 和> 1.3 GPa (700~ 950 ℃), 以及在变泥质岩中发现的纤锰闪石 $MgAl_2[Si_2O_6](OH)_4$, 其在> 650 ℃下稳定的压力为 0.7~ 5.0 GPa[60]; 在超高压变质的镁铁质-超镁铁质岩中发现的斜硅镁石($Mg_9Si_4O_{18}H_2$) 和钛粒硅镁石($Mg_5Si_2O_{10}H_2$), 它们的稳定的 *P-T* 域是> 2.9 GPa 和> 730 ℃[61]; 在榴辉岩中常见的蓝闪石, 当温度> 700 ℃时, 其稳定压力为 1~ 3 GPa[61]. 还有一种含水超高压变质矿物即 Ti-Ellenbergerite, 至今在大别山-苏鲁超高压变质岩中还未发现, 而在西阿尔卑斯白片岩中发育, 其稳定的 *P-T* 域是 2.7~ 4.2 GPa 和 650~ 725 ℃[62]. Schreyer[12] 还报道了在过量的水流体参与下, 在超高压的条件下合成了含相当量水的相, 如 MgMgAl-绿纤石(< 700 ℃下压力> 3.7 GPa) 和黄玉-OH[$Al_2SiO_4(OH)_2$] (400~ 900 ℃, > 5.5 GPa). 这些事实无疑表明, 在超高压变质过程中的确有水的参与.

尽管研究者们已认识到超高压变质作用中不仅有水参与, 而且水的活度可能也不低, 但目前对超高压变质过程中水-岩反应和流体的作用的细节还是不清楚的. 对中国大别山和苏鲁地区超高压变质岩的氧、碳、氢同位素研究表明, 表壳岩在俯冲到地幔深度并经历超高压变质作用时, 并无大规模流体活动. 因此, 在这些岩石中保留了超高压变质作用之前与大气水进行氧同位素交换的信号, 而且在 m-级尺度上表现出氧同位素的不均一性[46~ 49, 63, 64]. 仰口榴辉岩中粒间柯石英的保存表明, 这些榴辉岩是在无流体参与的条件下快速折返的[37], 否则, 流体可促进熔融以及抹去超高压变质记录. 但另一方面, 大多数榴辉岩都程度不同地经历了角闪岩相退变质作用, 与榴辉岩相峰期矿物组合相比, 退变质矿物组合无疑表明了水的介入. 氢、氧同位素研究也表明, 超高压变质岩在折返至中地壳时发生了角闪岩相退变质, 并在水的介入下与围岩片麻岩发生了有限的氢、氧同位素交换[48, 64].

上述看似矛盾的事实或许是同一事物的 2 个不同侧面, 一方面, 在超高压变质环境中有水介入; 另一方面, 这些水的活动又被限制在很小的范围或特定的渠道. 看来, 在超高压变质过程中的水-岩反应与流体活动问题仍需进一步研究, 详细的大比例尺填图和密集性采样与细致的同位素分析将是解决问题的有效途径.

4 超高压变质作用发生的构造背景

对大别山-苏鲁超高压变质岩形成的大地构造背景, 存在着不同的认识, 其中有代表性的如下:

Ernst 等人[65] 提出, 大别山地体是位于中朝克拉通与扬子克拉通之间的微陆块, 在大陆碰撞之前很久(晚前寒武纪) 就已被俯冲到地幔深度, 并经受了超高压变质作用, 在随后扬子克拉通的 A 型俯冲(晚古生代) 及陆-陆碰撞(二叠纪至三叠纪) 过程中逐渐折返出露代表. Wang 等人[66] 则进一步把大别山划分为北大别地体和南大别地体.

Maruyama 等人[67] 大致同意大别山为独立的微陆块的看法, 但对其俯冲时间持异议, 认为是三叠纪时俯冲并经受超高压变质的[67], 这一认识得到 Hacker 等人[68] 和李曙光等人[69] 的赞同.

徐树桐等人[70, 71] 把大别山划分为 5 个构造单元, 由北向南为: 弧前复理石推复体(包括卢镇关群和佛子岭群)、变质蛇绿混杂岩带、榴辉岩相超高压变质带、扬子俯冲基底(大别群) 和扬子俯冲盖层(宿松群). 在他们的构造格局中没有独立的大别微陆块, 而与佛子岭复理石有成

因联系的火山弧被埋藏在大别山北侧的中生代盆地之下.

Okay 等人[72]另辟新说, 认为佛子岭复理石是扬子大陆被动边缘的石炭纪沉积物. 在早三叠世时, 扬子大陆向北面的中朝大陆之下俯冲, 深俯冲部分形成了超高压变质岩, 浅俯冲部分则形成麻粒岩. 晚三叠世大别山的隆起形成了今天的构造格局, 即浅变质的佛子岭复理石在北, 榴辉岩带在南, 中间出露的北大别为扬子基底.

上述不同的划分方案可以归纳为两大类. 一类为三陆块碰撞模式, 即华北陆块-大别微陆块-扬子陆块碰撞模式; 另一类为两陆块碰撞模式, 即华北陆块-扬子陆块碰撞模式. 加之对相互碰撞时代认识的有别, 这些不同的方案自然引发了对陆块间碰撞缝合带位置所在的歧见. 在上述方案中, 这一缝合带分别被置于大别微陆块之北[67]或之南[65, 68], 佛子岭复理石之北[72]或之南[69, 70].

本文作者[73~76]则曾把大别山划分为 4 个岩石构造单元, 即北淮阳弧后复理石带、北大别弧杂岩带、南大别碰撞杂岩带和宿松变质杂岩带, 而超高压变质岩是南大别碰撞杂岩带的组成部分. 按照这个模式, 南大别碰撞杂岩带就是华北陆块-扬子陆块碰撞缝合带. 董树文等人[77]基于地球物理资料得出类似的认识.

之所以对超高压变质岩形成的构造背景有不同认识, 主要是因为对以下的基本科学问题的认识存在着很大分歧.

(1) 是“蛇绿岩”还是“大陆岩石圈地幔残片”? 在大别山北部有 130 多个大小不等的超镁铁质-镁铁质岩体. 这些岩体被徐树桐等人[70, 71]认为是代表了蛇绿混杂岩.

事实上, 在造山带中分布的超镁铁质-镁铁质岩体并不都是蛇绿岩. 尽管几乎所有的橄榄岩岩体都是受不同程度部分熔融的地幔岩, 但蛇绿岩和非蛇绿岩仍有重大差别. 蛇绿岩的变质橄榄岩, 除在结构和组构上明显区别于超镁铁质堆晶岩外, 在地球化学上有明显差别.

虽然对大别山众多超镁铁质-镁铁质岩体的地球化学研究还很少, 但已有的研究表明它们大致分为两类, 但都不具备蛇绿岩套组成成员的特征. 一类以北大别山饶拔寨橄榄岩体为代表. 张旗等人[78]对饶拔寨岩体的地球化学研究表明, 其方辉橄榄岩和辉长岩为 LREE 富集型, 不同于大洋地幔, 而其$^{87}Sr/^{86}Sr$为 0.706 8~ 0.710 4, ε_{Nd}在+ 1.2~ – 7.1 间, 表明不是来自亏损的地幔源区, 而可能是一个消减带之上的大陆岩石圈地幔残片. 苏鲁地区的一些橄榄岩岩体, 也同样代表了“消减带之上的地幔”[44]或“残留的地幔”[59]. Jahn 等人[79]认为山东省日照地区的超镁铁质岩是由于构造过程侵入地壳的大陆岩石圈地幔俘虏体.

另一类为祝家铺、任家湾、中关等无明显变质变形的辉石岩-辉长岩. 李曙光等人[80, 81]对祝家铺岩体的研究表明, 其稀土元素分布为 LREE 富集型, 不具备大洋拉斑玄武岩特征. 它们的原始岩浆的高 Ti/Zr 和 Ti/Y 比值说明其高场强元素(Nb, Zr, Ti)的亏损特征与陆壳混染无关, 而反映其原始岩浆应源于一个受俯冲板块析出的流体交代过的上地幔. 结合其生成年龄判断, 这些岩体是陆壳俯冲过程中形成的同碰撞侵入体. 应该指出, 尽管“蛇绿混杂岩”在大别山是不存在的, 但绝不能据此推断大别山造山带没有古洋壳的残片. Li 等人[82]指出, 大别山北翼苏家河混杂岩中冷榴辉岩的全岩 Sm-Nd 等时线年龄为(422 ±67) Ma, $\varepsilon_{Nd}(t) > +5.1$, 而研究区已分析的绝大多数榴辉岩的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为负值(可达– 20). 这些冷榴辉岩极可能是被消减的古洋壳的残片.

(2) 超高压变质作用究竟发生在什么时代? 尽管许多研究者采用多种同位素定年技术

确定大别山-苏鲁超高压变质作用发生在三叠纪[38, 79, 82~88], 但是对是否有多期超高压变质作用的问题仍在争论. 例如, 对超高压变质的碧溪岭层状镁铁质岩体, Chavagnac 等人[38] 做了详细的 Sm-Nd 和 Rb-Sr 同位素定年及地球化学研究, 测得该岩体超高压变质年龄为 210~ 220Ma, $\varepsilon_{Nd}(t)$ 为 - 1.8~ - 0.1, 并据此提出该岩体在侵位后不久就受到超高压变质的认识. 而对同一个岩体, 曹荣龙等人[89] 采用锆石定年得出晚太古代超高压变质时代. 刘若新等人[90] 对碧溪岭岩体也进行了锆石定年, 得到了年龄跨度从晚元古代至早中生代的几组锆石年龄(但没有太古代年龄的纪录). 我们同意 Li 等人[82] 的意见, 这主要来自两方面原因, 一是超高压变质岩中锆石来源及成因的多样性, 二是锆石 U-Pb 体系在变质过程中的复杂行为.

另外, 张泽明等人[45] 报道了英山含柯石英假象榴辉岩的全岩-石榴石 Sm-Nd 等时线年龄为(481 ±25) Ma、单颗锆石 U-Pb 年龄为(485 ±22) 和(487 ±14) Ma 以及太湖石马和罗山熊店榴辉岩的单颗锆石 U-Pb 年龄为 420~ 480 Ma. 由此他们认为大别山地区存在古生代高压超高压变质带, 而中生代的年龄可能记录了对榴辉岩的改造事件. 简平等人[91] 报道了苏家河冷榴辉岩的 Sm-Nd 等时线年龄为(544 ±14) Ma, 而 Li 等人[82] 的重新计算为(422 ±67) Ma. 这些冷榴辉岩被认为是洋壳俯冲形成的. 若如此, 则表明古生代时还发生过一次高压-超高压变质作用.

尽管目前资料尚不足认识这一古生代高压-超高压变质作用的性质与构造背景, 但它从理论上是完全可能发生的. 最近 Maruyama 等人[92] 的研究表明, 750~ 540 Ma 期间为地球演化的过渡时期, 地球损失了大量的内部热, 板块厚度随之增加. 从那以后, 冷板块得以存留, 作为板块驱动力的岩板下拽力增大, 为低密度的大陆壳深俯冲并经受超高压变质作用作好了准备.

(3) "就地的"还是"外来的"? 这个问题在前面已讨论过. 这里再从另一角度说明, 比较超高压变质岩与围岩正片麻岩的冷却史同样可对讨论这一问题提供重要依据.

近年来研究者们已对潜山双河地区超高压变质岩及其花岗片麻岩围岩进行了精细的同位素年代学研究. 超高压变质片麻岩的峰期变质年龄用锆石 U-Pb 法测定为(238.4 ±1.3) Ma[93], 而与其互层的榴辉岩的 Sm-Nd 矿物等时线年龄为(226.2 ±2.9) Ma, 退变质榴辉岩的 Sm-Nd 矿物(角闪石-榍石) 等时线年龄为(197.2 ±44) Ma, 以及角闪石-全岩 Rb-Sr 等时线年龄为(167 ±5) Ma[82]. 超高压片麻岩的多硅白云母-全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 185~ 170 Ma, 以及黑云母-全岩等时线 Rb-Sr 年龄为 181~ 169 Ma[82]. 这些数据表明, 双河超高压变质岩经历了两期快速冷却过程, 一次在 200 Ma 之前, 一次在 180 Ma 之后.

对超高压变质岩围岩的花岗片麻岩年代学研究表明, 其 Sm-Nd 矿物等时线年龄为(213.3 ±4.6) Ma, 而黑云母-全岩 Rb-Sr 等时线年龄为 173~ 171 Ma[82], 角闪石的 Ar-Ar 年龄为 193~ 180 Ma[94]. 因此, 花岗片麻岩只发生过一次快速冷却过程, 在 190~ 170 Ma 间.

上述研究表明, 超高压变质岩与其花岗片麻岩围岩在 200 Ma 以前有完全不同的冷却历史, 只是在 180 Ma 之后才有了共同的快速冷却历史. 这一对比无疑指示了超高压岩块、岩板与其周围的花岗片麻岩间在 190 Ma 之前属"外来的"关系.

(4) 在大别山下面有一个古老的地幔楔吗? 近几年的研究表明, 在大别山下面可能有一个古老的地幔楔. 主要依据如下: ( ) Chen 等人[95] 指出, 大别山北部的白垩纪基性的侵入岩和脉岩显示与消减作用有关的地球化学性质. 并由此推论在北大别山之下有一个老的(三叠纪)、受消减作用影响的地幔楔, 在造山后引张的背景下地幔楔的上涌造成了这套具岛弧地

球化学属性的白垩纪岩浆岩; ( ) Cong 等人[96]发现, 合肥盆地古新世发育的非碱性拉斑玄武岩带有明显的来源于消减带之上地幔楔的地球化学特征, 它们适度富集轻稀土元素, 强烈亏损 Th, Nb, Ta 等高场强元素, 但富集 Ba, 较高的$^{87}Sr/^{86}Sr$ 初始值(0.705 83~ 0.706 78) 和 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 负值(– 5.5~ – 9.0) 显示源区富集 EMII 组分. 该事实说明在大别山以北有一个老的地幔楔, 并进而表明, 曾有洋壳向华北陆块下俯冲; ( ) 前面提到, Li 等人[80, 81]对大别山祝家铺、任家湾、中关等超镁铁质-镁铁质岩的微量元素和 Sr, Nd 同位素地球化学研究表明, 它们具有同碰撞侵入体性质. 而这些同碰撞镁铁-超镁铁岩仅分布在北大别, 这无疑指示了在扬子陆块与中朝陆块的碰撞过程中, 北大别位于俯冲陆块的上盘.

5 超高压变质岩的折返过程与机制

关于超高压变质岩的折返过程具重要的地球动力学意义, 迄今已有数种假说发表, 仅对大别山-苏鲁超高压变质岩而言, 就已达四类之多. 但若从大别山-苏鲁超高压岩带的地质结构和超高压变质岩的 *P-T* 轨迹判断, 这些假说均不完善.

Ernst 等人[63]曾将浮力作为大别山超高压变质岩折返的主要机制. 研究表明, 大别山超高压变质岩的原岩 60% 以上均为表壳岩[75], 它们的整体密度小于地幔岩, 因此, 浮力无疑是造成超高压岩石折返的重要机制. 不过, Ernst 等人并未详细说明, 为什么同样是低密度的表壳岩会克服浮力而被俯冲到地幔深度? 它们为什么能在地幔深度停留漫长的时间(从晚前寒武纪至古生代) 而直到三叠纪才开始折返? 换言之, 浮力为什么很长时间不起作用, 而后来又是怎样开始起作用的?

Maruyama 等人[67]曾提出挤出楔模式, 认为超高压变质岩板呈楔状被从深部斜向挤出, 并强调楔状体的顶部应发育正断层, 底部发育逆冲断层. 这一模式或许可以解释阿尔卑斯超高压变质岩的折返过程, 那里的确发现超高压岩板逆冲到低压变质岩之上. 但在大别山和苏鲁地区, 至今尚无发现此种产状, 恰恰相反, 研究表明, 无论是在大别山还是在苏鲁地区, 区域上的超高压变质岩带总是位于变质压力更低的冷榴辉岩带之下[72]. 另一方面, 露头尺度上的超高压变质岩总是呈大大小小的岩板或岩块被非超高压片麻岩环绕, 呈"外来的"接触关系, 这种产状不仅不支持挤出楔模式, 反而表明在大别山并不存在 Maruyama 等人[67]提出的巨型超高压变质岩挤出楔.

俯冲岩石圈的断离与拆沉(slab breakoff) 模式是一解释超高压变质岩折返的重要动力学过程, 不少已发表的模式中都强调了这一机制, 但对断离点的深度与断离的方式看法不一[72, 75, 97]. 这一动力学过程的要点为: 在大陆碰撞过程中, 俯冲的大洋岩石圈板块在深处被拉断, 与大陆岩石圈板块脱离, 断口处形成很窄的裂谷, 并有软流圈物质上涌, 致使深部低密度物质向上折返, 并伴生岩浆活动[97]. 由于俯冲岩石圈的断离与拆沉模式不仅可以解释超高压变质岩的折返, 还可以解释陆-陆碰撞过程中及其后的岩浆活动, 因此借助这一动力学机制的假说均有较强的竞争力. 今后的研究问题在于, 这一动力学机制如何与超高压变质岩的折返过程相耦合.

多阶段折返过程是另一有竞争力的假说. 此类假说是建筑在岩石学和年代学研究基础之上的. 作者[8, 75]曾依据对大别山超高压岩石的 *P-T-t* 轨迹研究提出了 3 阶段折返模式, 认为 240~ 220 Ma 阶段为快速折返阶段, 以角流和浮力为主要折返机制; 220~ 180 Ma 为中速折返阶段, 以侧向挤压和垂向挤出为折返机制; 而 180 Ma 以后为慢速折返阶段, 以热隆起和岩石圈张

裂为主要折返机制. Liou 等人[98]则据对榴辉岩中所含锆石的年代学研究提出两阶段折返模式, 认为 230~ 220 Ma 间为快速折返阶段, 220 Ma 以后为慢速折返阶段. 此类模式的长处在于它们得到岩石学和年代学研究资料的支持, 短处在与动力学机制挂钩时带有猜想成分. 对于这种阶段性的动力学背景尚待研究, 究竟是一种动力学机制为主导? 还是几种不同的动力学机制交替作用?

关于超高压变质岩的折返出露地表的过程, 有 2 种极端方式(图 1) , 一种为从顶部卸载方式, 可通过拉张减薄[99], 或剥蚀揭顶[100]; 另一种为底辟形式, 或由于浮力[63], 或由于挤压[67]. 作者认为, 任何一种极端方式都难以奏效. 考虑到超高压变质岩形成在 100 km 或更深处, 将至少 100 km 厚的岩石圈单纯地侧向拉张减薄 1 km 至厚则需要造山带原始宽度 100 倍的空间, 这显然与今天大别山的结构不符. Yin 等人[100]曾设想大别山超高压变质岩顶部 100 km 厚的覆盖物全部被剥蚀并堆积在松潘地区. 然而, 这一设想遇到 2 个难点, 其一为缺乏古水流资料的支持; 其二为他们所指的松潘地区沉积岩为三叠系, 而大别山的超高压变质岩在 180 Ma 时仍在经受着角闪岩相变质作用, 而且, 大别山两侧盆地中, 直至上侏罗统尚未发现被剥蚀堆积的超高压变质岩. 另一方面, 今天见到的超高压变质岩被构造侵位于角闪岩相变质岩石中, 这表明, 单纯的底辟并未能使超高压变质岩直接从地幔深处折返出露地表. 看来, 只有结合这 2 种方式的模式才有生命力.

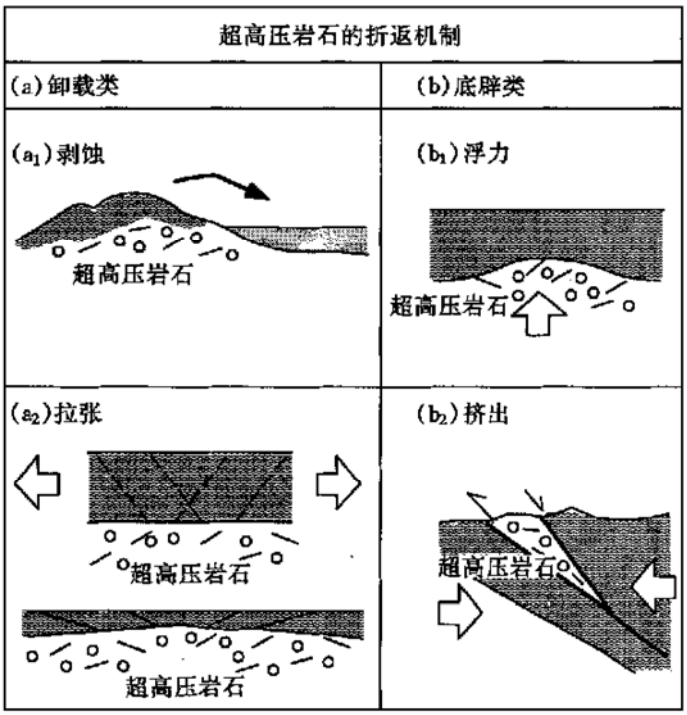

图 1 超高压变质岩的折返出露地表过程方式

尽管研究尚在进行, 但据目前已发表的资料判断, 作者仍认为 3 阶段折返模式具有强大的生命力[8, 75], 但需要补充和修正的是“角流”机制[101]在第 1 阶段起作用, 浮力从第 2 阶段开始起作用, 此时发生了俯冲岩石圈的断离与拆沉, 区域性地壳拉张减薄在第 3 阶段起作用. 3 个阶段的年代划分也应随新的年代学数据的积累而做相应的修正.

6 结语: 对未来研究的展望

国际上对超高压变质作用的研究方兴未艾. 尤其是超高压变质岩在地下约 90km 或更深处形成后, 又快速折返至地壳浅处, 这一地覆天翻的地质过程向传统的地球动力学观提出了挑战, 并在一系列地球科学研究领域带来了重大突破. 尽管对大别山-苏鲁超高压变质岩带的研究起步稍晚, 但由于它在出露规模、保存程度、岩性多样化等方面均属世界之最, 而且还发现了最高的 ε_{Nd}值[102]. 目前已经成为国际性研究基地, 诸多国家的科学家对其开展了多学科的详细研究, 取得了一系列重要成果.

当然, 科学进步是无止境的, 展望未来, 超高压变质作用的研究将围绕 3 个焦点进行, 即深入研究超高压变质过程、继续探讨超高压变质岩的折返过程及剖析发育超高压变质岩的碰撞

造山带的地球动力学. 该项研究的关键科学问题是: ( ) 超高压变质作用的热力学和动力学基础; ( ) 超高压变质作用与碰撞造山作用的关系及其动力学背景; ( ) 碰撞造山过程中地壳和地幔以及大陆岩石圈与软流圈之间的相互作用及其对大陆岩石圈命运的制约.

具体内容如下: ( ) 开展大别山苏鲁超高压变质岩带的岩石大地构造学研究, 查明主要的岩石构造单位形成时代和环境, 特别要对超高压变质岩及其围岩的原岩性质、大地构造归属、古构造环境进行分析、判别; ( ) 深入研究超高压变质作用过程, 认知超高压变质作用过程的细节, 包括化学元素在超高压变质过程中的迁移与再分配, 主要造岩矿物在超高压变质过程中成分和结构两方面的转变, 流体的行为和作用, 组分(X)与环境(P, T)间的相应关系等. 结合现有的实验岩石学资料, 有重点地开展高压、超高压下矿物反应和相变实验研究; ( ) 查明同造山和造山后的岩浆岩分布、岩石学和地球化学特征及其对超高压变质作用的响应. 对可能来源于地幔的镁铁质超镁铁质岩(榴辉岩、辉长岩、橄榄岩等), 与大陆岩石圈俯冲作用有关的岩浆岩, 以及碰撞造山后的碱性花岗岩体和基性岩脉群, 开展微量元素和多元体系同位素地球化学研究, 以探究地壳和地幔以及大陆岩石圈与软流圈之间的相互作用; ( ) 改造和发展同位素定年技术, 提高定年精度, 重视提取具有不同同位. 素体系封闭温度的多种矿物和矿物环带结构中的年代学信息, 更精确地确定超高压变质岩及其围岩的 P-T-t 演化途径; ( ) 开展变质过程中流体的地球化学研究, 以确定流体作用的温度和压力、流体的化学成分、流体的来源, 从而探讨其在碰撞造山过程中的地球动力学意义; ( ) 结合构造地质学和地球物理学研究超高压变质岩的形成-折返过程及其动力学机制. 其中, 超高压变质过程中的流体活动和超高压变质岩的折返过程与机制将成为两大热点.

未来的工作应侧重对典型地域开展详细的大比例尺野外地质填图, 系统采集样品, 对超高压变质岩及其非超高压围岩进行精确的年代学研究和密集性 P-T 研究, 同时还需开展对整体超高压变质岩带的地球物理学调查和构造几何学及运动学调查. 预期这些研究将会在今后几年中取得新的突破性成果.

致谢 本工作为国家自然科学基金(批准号: 49794042)和中国科学院(KZ951-A1-401-05)资助项目.

参 考 文 献

1 Xu Z. Etude Tectoniqtie et Microtectonique de la Chine Paleozoique et Triasique des Qintings (Chine). Montpellier: Thesis de Doctorate Univ Sci Tech Languedoc, 1987

2 Yang J, Smith D C. Evidence for former sanidine-coesite at Lanshantou, east China, and the recognition of the Chinese Su-Lu coesite eclogite province (abstract). Oxford: Third International Eclogite Conference Blackwell Science, 1989. 26

3 Okay A I XU, Sengbr A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. Eur Jour Mineral, 1989, 1: 595~ 598

4 Wang X, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains in central China. Geology, 1989, 17: 1085~ 1088

5 Enami M, Zang Q. Magnesian staurolite in garnet-curundum rocks and eclogite from tile Donghai District, Jiangsu Province, East China. Amer Mineral, 1988, 73: 48~ 56

6 Enami M, Zang Q. Quartz pseudomorph after coesite in eclogite from Shandong Province, east China. Amer Minera, 1990, 75: 381~ 386

7 Coleman R G, Wang X. Ultrahigh-Pressure Metamorphism. Combridge: Cambridge University Press, 1995 528

8 Cong Bolin. Ultrahigh-pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science Pres, London: Kluwer Academic Publishers, 1996. 224

9 Hacker B, Liou J G. When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistryof Ultrahigh-Pressure Rocks. London: Kluwer Academic Publishers, 1998. 336
10 Cong, B L, Wang Q C. Review of researches on ultrahigh-pressure metamorphic rocks in China. Chinese Science Bulletin, 1994, 39: 2068~ 2075
11 Harley S L, Carswell D A. Ultradeep crustal metamorphism: a prospective view. J Geophys Res, 1995, 100: 8367~ 8380
12 Schreyer W. Ultradeep metamorphic rocks: the retrospective viewpoint. J Geophys Res, 1995, 100: 8353~ 8366
13 Chopin C. Coesite and pure pyrope in high grade pelitic blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. Contrib Mineral Petrol, 1984, 86: 107~ 118
14 Smith D C. Coesite in clinopyroxine in the Caledonides and its implication for geodynamics. Nature, 1984, 310: 641~ 644
15 Miyashiro A. Evolution of metamorphic belts. J Petrol, 1961, 2: 277~ 311
16 Carswell D A. Eclogite Facies Rocks. New York: Blackie, 1990. 396
17 Cong B L, Zhai M, Carswell D A, et al. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabieshan, central China. European J Mineralogy, 1995, 7: 119~ 138
18 Su Wen, Xu Shutong, Jiang Laili, et al. Coesite from quartz-jadeitite in the Dabie Mountains, eastern China. Mineral Mag, 1996, 60: 659~ 62
19 Liou J G, Zhnag R Y, Bor-ming Jahn. Petrology, geochemistry and isotope data on a ultrahigh-pressure jadeite quartzite from Shuanhe, Dabie Mountains, east-central China. Lithos, 1997, 41: 59~ 78
20 Xu S, Okay A I, JI S, et al. Diamond from. metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. Science, 1992, 256: 80~ 82
21 Wang X, Liou J G. Ultrahigh-pressure metamorphism of carbonate rocks in the Dabie Mountains, central China. Journal of Metamorphic Geology, 1993, 11: 575~ 588
22 Kato T, Enami M, Zhai M. Ultra-high-pressure (UHP) marble and eclogite in the Su-Lu UHP terrane, eastern China. J Metamorphic Geol, 1997, 15: 169~ 182
23 Ye Kai, Hirajima T. High-pressure marble at Yangguantun, Rongcheng County, Shandong Province, eastern China. Mineralogy and Petrology, 1996, 57: 151~ 165
24 Ye Kai, Ye Danian. Significance of phosphorous (P)- and magnesium (Mg)-bearing high-Al titanite in high-pressure marble from Yangguantun, Rongcheng County, Shandong Province. Chinese Science Bulletin, 1996, 14: 1 194~ 1 197
25 Carswell D A, Wilson R N, Zhai M. Ultra-high pressure aluminous titanites in carbonate-bearing eclogites at Shughhe in Dabieshan, central China. Mineral Mag, 1996, 60: 461~ 471
26 Enami M, Suzuki K, Liou J G, et al. Al-Fe^{3+} and F-OH substitutions in titanite and constraints on their *P-T* dependence. Eur J Mineral, 1993, 5: 219~ 231
27 Ye Kai, Cong B, Ye D. Ultrahigh-presuure P-bearing titanite in eclogite at Houshuichegoum Shandong Province, eastern China. Scientia Geologica Sinica, 1997, 6(1): 7~ 19
28 Ye Kai, Hirajima T, Ishiwatari A, et al. The discovery of intergranular coesite in eclogite of Yangke, Qingdao and its significance. Chinese Science Bulletin, 1996, 41: 1407~ 1408
29 Hirajima T, Wallis S R, Zhai M, et al. Eclogitized metagranitoid from the Su-Lu ultrahigh pressure(UHP) province, eastern China. Proc of the Japan Academy, 1993, 68: 249~ 254
30 Wallis S R, Ishiwatari A, Hirajima T, et al. Occurence and field relationships of ultrahigh-pressure metagranitoid and coesite eclogite in the Su-Lu terrane, eastern China. Jour of the Geol Soc London, 1997, 154: 45~ 54
31 Roecker S W. Velocity structure of the Pamir-Hindu Kush region: possible evidence of subducted crust. J Geophys Res, 1982, 87: 945~ 959
32 Birch P. Physics of the crust, in Crust of the Earth-A Symposium, edited by A. Poldervaart. Spec Pap Geol Soc Am, 1955, 67: 101~ 117
33 Brace W F, ErnstW G, Kallberg R W. An experimental study of tectonic overpressure in Franciscan rocks. Geol Soc Am Bull, 1970,

81: 1325~ 1338

34 Mancktelow N. On metamorphic "pressure" during deformation. Schweiz Mineral Petrogr Mitt, 1993, 73: 340~ 341

35 Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. Eur J Mineral, 1993, 5: 659~ 673

36 Sobolev N V, Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks; a new environment for diamond formation. Nature, 1990, 343: 742~ 746

37 Liou J G, Zhang R Y. Occurences of intergranular coesite in ultrahigh-P rocks from the Sulu region, eastern China: implications for lack of fluid during exhumation. Amer Mineralogist, 1996, 81: 1217~ 1221

38 Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd agess, geochemical characteristics and tectonic implications. Chemical Geology, 1996, 133: 29~ 51

39 Zhang R Y, Liou J G, Cong B L. Talc-, magnesite- and Ti-clinohumite-bearing ultrahigh-pressure meta-mafic and ultramafic complex in the Dabie Mountains, China. Jour Petrol, 1995, 36: 1011~ 1037

40 Hiramatsu N, Hirajima T. Petrology of the Hujialin garnet clinopyroxenite in the Su-Lu ultrahigh-pressure province, eastern China. The Island Arc, 1995, 4: 310~ 323

41 Fan Q, Liu R, Ma B, et al. The protolith and ultrahigh-pressure metamorphism of Maowu mafic-ultramafic rock block in Dabieshan Mountains. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12: 29~ 46

42 Liou J G, Zhang R Y. Petrogenesis of an ultrahigh-pressure garnet-bearing ultramafic body from Maowu, Dabie Mountains, east-central China. The Island Arc, 1998, 7: 115~ 134

43 Hiramatsu N, Banno S, Hirajima T, et al. Ultrahigh-pressure garnet lherzolite from Chijiadian, Rongcheng County, in the Su-Lu region of eastern China. The Island Arc, 1995, 4: 324~ 333

44 Yang J, Godard G, Kienast J R, et al. Ultrahigh-pressure (60 kbar) magnesite-bearing garnet peridotites from northeastern Jiangsu, China. J Geol, 1993, 101: 541~ 554

45 Zhang Z, You Z, Han Y, et al. Petrology, metamorphic process and genesis of the Dabie-Sulu eclogite belt, east-cenral China. Acta Geologica Sinica, 1995, 69: 306~ 325

46 Yui T F, Rumble D, Lo C H. Unusually low ^{18}O ultrahigh-pressure metamorphic rocks from Su-Lu terrane, China. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59: 2859~ 2864

47 Zhang R Y, Rumble III D, Liou J G, et al. Low $\delta^{18}O$, ultrahigh-P garnet-bearing mafic and ultramafic rocks from Dabie Shan, China. Chemical Geology, 1998, 150: 61~ 170

48 Zheng Y F. Oxygen and carbon isotope anomalies in the ultrahigh pressure metamorphic rpcks of the Dabie-Sulu terranes: implications for geodynamics. Episode, 1997, 20: 104~ 108

49 Zheng Y F, Fu B, Cong B L, et al. Extreme ^{18}O depletion in eclogite from the Su-Lu terrane in east China. Eur J Mineral, 1996, 8: 317~ 323

50 Dobrzhineskaya L, Green H W, Wang S. Alpe Arami: a peridotite massif from depths more than 300 km. Science, 1996, 272: 1841~ 1845

51 Hacker B R, Sharp T, Zhang R Y, et al. Determining the origin of ultrahigh-pressure lherzolites. Science, 1997, 278: 702~ 704

52 Jin Z, Jin S, Gao S, et al. Is the depth where UHP rocks formed in the Dabie Mountains limited to 100~ 150 km? Chinese Science Bulletin, 1998, 43: 767~ 771

53 Sauter V, Haggerty S E, Field S. Ultra-deep (> 300 km) ultramafic xenolith: new petrologic evidence from the transition zone. Science, 1991, 252: 827~ 830

54 Haggerty S E, Sauter V. Ultra-deep (> 300 km) ultramafic upper mantle xenoliths. Science, 1990, 248: 993~ 996

55 Haggerty S E. Deep upper mantle and transition zone xenoliths in the Jagersfontein kimberlite, Kaapvaal Craton. EOS, Trans. Am Geophys Union, 1994, 77: 761

56 Liou J G, Zhang R Y, Ernst, W G. Occurences of hydrous and carbonate phases in ultrahigh-P rocks from east-central China - Implications for the role of volatiles deep in cold subduction zones. The Island Arc, 1995, 4: 362~ 375

57 Schmidt M W. Experimental constraints on recycling of potassium from subducted oceanic crust. Science, 1996, 272: 1227~ 1230

58 Zhang R Y, Liou J G. Significance of coesite inclusions in dolomite from eclogite in the southern Dabie Mountains, central China. Am Mineral, 1996, 81: 181~ 186

59 Zhang R Y, Liou J G, Cong B. Petrogenesis of garnet-bearing ultramafic rocks and associated eclogites in the Su-Lu ultrahigh-P metamorphic terrane, eastern China. Jour Meta Geol, 1994, 12: 169~ 186

60 Schreyer W. Experimental studies on metamorphism of crustal rocks under mantle pressure. Mineral Mag, 1988, 52: 1~ 26

61 Holland T J B. Preliminary phase relations involving glaucophane and application to high pressure petrology: New heat capacity and thermodynamic data. Contrib Mineral Perol, 1988, 99: 134~ 142

62 Yamamoto K, Akimoto S I. The system MgO-SiO_2-H_2O at high pressures and emperature-stability field for hydroxyl-chondrodite, hydroxyl-clinohumite and 10 _ phase. Am J Sci, 1977, 277: 288~ 312

63 Baker J, Matthews A, Mattey D, et al. Fluid-rock interaction during ultra-high pressure metamorphism, Dabieshan, China. Geochim Cosmochim, Acta, 1997, 61: 1685~ 1696

64 Wang Q, Rumble D. Oxygen and carbon isotope composition from the UHP Shuanghe marbles, Dabie Mountains, China. Science in China, Series D, 1999, 42: 88~ 96

65 Ernst W G, Liou J G, HackerB R. Petrotectonic significance of high- and ultrahigh-pressure metamorphic belts: inferences for subduction-zone histories. International Geology Review, 1994, 36: 213~ 237

66 Wang X, Liou J G, Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the dabie Mountains, Central China: petrology and *P-T* path. Geology, 1992, 100: 231~ 250

67 Maruyama S, Liou J G, Zhang R. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure and high-pressure metamorphic belts from central China. The Island Arc, 1994, 3: 112~ 121

68 Hacker B R, Wang Q. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology of ultrahigh-pressure metamorphism in central China. Tectonics, 1995, 14: 994~ 1006

69 Li S, Jagoutz E, Zhang Z, et al. Structure of high-pressure metamorphic belt in the Dabie Mountains and its tectonic implications. Chinese Science Bulletin, 1996, 40: 138~ 140

70 Xu S, Jiang L, Liu Y, et al. Tectonic framewrok and evolution of the Dabie Mountains in Anhui, eastern China. Acta Geologica Sinica, 1992, 66(1): 1~ 14

71 Xu S, Liu Y, Jiang L, et al. Tectonic Framewrok and Evolution of the Dabie Mountains. Beijing: Science Press, 1994. 175

72 Okay A I, Sengor A M C, Satn M. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrane: the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China。Tectonics, 1993, 12: 1320~ 1334

73 Cong B, Wang Q, Zhai M, et al. UHP metamorphic rocks in the Dabie-Su-Lu region, China: their formation and exhumation. Island Arc, 1994, 3: 135~ 150

74 Wang Q, Liu X, Maruyama S, et al. Top Boundary of the Dabie UHPM rocks, Central China. J SE Asia Geol, 1995, 11: 295~ 300

75 Wang Q, Cong B. Tectonic implication of UHP rocks from the Dabie Mountains. Science in China, Series D, 1996, 39: 311~ 318

76 Zhai M, Cong B, Zhao Z, et al. Petrological-tectomc units in the coesite-bearing metamorphic terrane of the Dabie Mountains, central China and their geotectomc implications. J SE Asian Earth Sci, 1995, 11: 1~ 13

77 Dong Shuwen, Sun Xianru, Zhang Yong, et al. The basic tectonics of Dabishan collisional orogen. Chinese Science Bulleting, 1993, 38: 542~ 545

78 Zhang Q, Mao B, Liu R, et al. A relic slice of continental lithospheric mantle, Science in China, Series B, 1995, 25(8): 867~ 873

79 Jahn B M, Cornichet J, Cong B. Crustal Evalution of The Qinling-Dabie orogen: Isotopic and Geochemical Constraints From Coesite-bearing Eclogites of The Su-Lu and Dabie Terranes, China. Chinese Science Bulletin, 1995, 40: 116~ 119

80 Li S, Nie Y, Zheng S, et al. Interaction between subducted continental crust and upper mantle: I. major and trace elements of the syn-collision mafic-ultramafic rocks. Science in China, Series D, 1997, 27: 466~ 493

81 Li S, Nie Y, Hart S R. Interaction between subducted continental crust and upper mantle: II. Sr and Nd isotopic geochemistry of the syn-collision mafic-ultramafic rocks. Science in China, Series D, 1998, 28: 18~ 22

82 Li S, Jagoutz E, Xiao Y, et al. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: I. Sm-Nd

isotope system. Science in China, Series D, 1996, 39(6): 597~608

83 Li S, Xiao Y. Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtse blocks and formation of coesite-bearing eclogites, timing and processes. Chemical Geology, 1993, 109(1-4): 89~111

84 Li S, Chen Y, Cong B, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. Chemical Geology, 1993, 109: 70~89

85 Li S, Liou D, Chen Y, et al. The Sm-Nd isotopic age of coesite-bearing eclogite from the southern Dabie Mountains. Chinese Science Bnlletin, 1992, 37(19), 1638~1641

86 Ames L, Tilton G R, Zhou G. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze Cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. Geology, 1993, 21: 239~342

87 Cong B, Zhang R, Li S, et al. Preliminary study of isotope chronology of eclogites in northern Jiangsu and eastern Shandong Provinces, China. In: Exploration of Canoes and Rocks in Janpan, China and Antarctica: Commemorative papers for Professor Yukio Matsumoto. Yamakuchi: Yamakuchi University Press, 1992. 411~417

88 Eide E A, McWilliams M O, Liou J G. $^{40}Ar/^{39}Ar$ geochronology and exhumation of high-pressure to ultrahigh-pressure metamorphic rocks in east-central China. Geology, 1994, 22: 601~604

89 Cao R, Zhu S. An Archean UHP belt: Coesite-bearing eclogite province in the Dabie Mountains. Acta Geologica Sinica, 1995, 69(3): 232~242

90 Liu R, Fan Q, Li H, et al., Protolith and geochronology of the Bixiling garnet peridotite-eclogite from Dabie Mountains. Acta Geologica Sinica, 1995, 1(3): 243~256

91 Jian P, Ye B, Li Z, et al. Geochronology, *P-T-t* path, and their tectonic implication of the eclogite from the Dabie Mountains. In: Chen H, ed. Collection of Isotope Geochemistry. Hangzhou: Press of Zhejiang University, 1994. 205~213

92 Maruyama S, Liou J G. Initiation of ultrahigh-pressure metamorphism and its significance on the Proterozoic-Phanerozoic boundary. The Island Arc, 1988, 8: 6~35

93 Li S, Li H, Chen Y, et al. Chronology of ultrahigh-pressure metamorphism in the Dabie Mountains and Su-Lu terrane: ㊀ U-Pb isotope system of Zircon. Science in China, Series D, 1997, 27(3): 200~206

94 Chen J, Xie Z, Liu S, et al. Cooling age of Dabie orogen, China, determined by $^{40}Ar-^{39}Ar$ and fission track techniques. Sci In China, Ser B, 1995, 38(6): 749~757

95 Chen C H, Lo C H, Teng L S, et al. Preliminary geochemical result of the basic pluton and basic-intermediate dike from Northern Dabieshan area, China. Taipei: Extended Abstracts of the Conference on Geology Across the Taiwan Strait, 1995. 4~7

96 Cong Bolin, Wang Qingchen, Zhang Haizheng, et al. Petrogenesis of Cenozoic volcanic rocks in Hefei basin, China. Acta Petrologica Sinica, 1996, 12: 370~381

97 Davies J H, von Blanckenburg, F. Slab breakoff; a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. Earth & Planet Sci Let, 1995, 129: 85~102

98 Liou J G, Zhang R Y, Eide E A, et al. Metamorphism and tectonics of high-P and ultrahigh-P belts in the Dabie-Su-Lu region, eastern central China. In: Harrison T M, Yin A, eds. The Tectonics of Asia. Ruby Volume VIII. NJ: Orentice-Hall, Englewood Clifs, 1996. 303~334

99 Platt J P. Exhumation of high-pressure rocks: a review of concepts and processes. Terra Nova, 1993, 5: 119~133

100 Yin A, Nie S. An indentation model for the North and South China collision and the development of the Tan-Lu and Honam fault system, eastern Asia. Tectonics, 1993, 12: 801~803

101 Cloos M. Flow melanges: numerical modelling and geologic constraints on their origin in the Franciscan subduction complex. Geol Soc Am Bull, 1982, 93: 330~345

102 Jahn B M, Cornichet J, Cong B. Ultrahigh-ε_{Nd} eclogites from an ultrahigh-pressure metamorphic terrane of China. Chemical Geology, 1996, 127: 61~79

(1998-08-27 收稿, 1998-11-26 收修改稿)