

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

中央碰撞造山带中两期超高压变质作用： 来自含柯石英锆石的定年证据

杨经绥 刘福来 吴才来 万渝生 张建新 史仁灯 陈松永

中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室, 北京, 100037

内容提要 沿中央造山带存在一条巨大的超高压变质带, 其西起阿尔金—祁连, 往东经秦岭, 延至大别—苏鲁, 全长超过 4000 km。柴北缘片麻岩中含柯石英锆石的 SIMS 离子探针原位微区 U-Pb 定年获得超高压变质年龄 452 ± 13.8 Ma, 锆石的退变质年龄 419 ± 6.7 Ma。SHRIMP U-Pb 定年获得秦岭含金刚石片麻岩中锆石的下交点年龄 502 ± 45 Ma, 上交点年龄 1545 ± 100 Ma, 认为前者代表超高压变质年龄, 后者为原岩岩浆锆石年龄; 获得榴辉岩锆石的上交点年龄 1381 ± 82 Ma 和下交点 493 ± 170 Ma, 认为上交点代表榴辉岩原岩年龄, 下交点代表超高压变质年龄; 获得江苏东海县青龙山榴辉岩含柯石英等超高压矿物锆石的年龄为 441 ± 9 Ma, 449 ± 9 Ma, 和 442 ± 9 Ma, 平均 444 ± 9 Ma, 核部含斜长石+磷灰石锆石年龄为 761 ± 13 Ma, 认为前者代表超高压变质年龄, 后者代表榴辉岩原岩结晶年龄。认为中国中部沿中央造山带中存在两期超高压变质作用, 第一期为加里东期, 第二期为印支期, 两期超高压变质事件在时空分布方面是不同的, 加里东期超高压变质事件由西部阿尔金—柴北缘延至东部大别—苏鲁, 印支期超高压变质事件没有在大别以西发现。认为中央造山带应是一个多期活动的造山带, 较早形成罗德尼亚大陆的格林威尔造山运动可能留下了 10 亿年左右的构造岩浆事件记录, 如中央造山带中大量 10 亿年左右的花岗岩及基性超基性岩类; 罗德尼亚大陆之后第一次裂解作用可能发生在 8 亿年左右; 其后早古生代加里东期的洋盆裂开, 蛇绿岩和超高压变质岩石的大量出现是一次十分强烈的板块构造事件, 从东到西, 沿中央造山带均有分布; 加里东期造山事件之后印支期沿该造山带又有一次大的板块裂解和俯冲碰撞作用, 表现在勉略蛇绿岩洋壳及大别—苏鲁印支期超高压变质带的存在。中央造山带保留和记录了多期裂解、会聚事件, 通过对其解剖, 不仅可以认识中国大地构造格局和演化, 并由此理解全球的大陆漂移、一系列大裂解和大会聚等重大地质事件。

关键词 中央碰撞造山带 柴北缘 大别苏鲁 秦岭 超高压变质作用

在中国大陆华北板块和华南板块之间存在一条中央碰撞造山带, 西起昆仑、阿尔金和祁连山, 东至大别和苏鲁地区, 全长超过 4000 km。在漫长的地质演化历史中, 该碰撞造山带经历了北中国板块和南中国板块、以及一些微陆块之间的多期次裂解、会聚及碰撞造山。这条横贯中国东西的中央碰撞造山带, 成为分隔中国南北大地构造的重要界限。

20 世纪 80 年代以来, 中央碰撞造山带以发现代表大陆深俯冲作用的大别苏鲁超高压变质带而闻名于世。对于大别—苏鲁超高压变质带, 一个较为普遍接受的观点是该超高压变质带代表印支期中国北方板块与扬子板块之间的一次俯冲碰撞作用 (Li et

al., 1989, 1993, 2000; Ames et al., 1993, 1996; Hacker et al., 1998; Cong et al., 1994; Cong, 1996; Jahn, 1998, 1999)。近些年, 作者在中国西部柴北缘发现早古生代榴辉岩和超高压矿物柯石英、以及秦岭发现超高压矿物金刚石的基础上, 认为沿中央造山带存在一条巨大的超高压变质带, 其西起阿尔金—祁连, 往东经秦岭, 延至大别—苏鲁, 全长超过 4000 km, 并认为该带中存在加里东期和印支期两期超高压变质作用 (图 1) (杨经绥等, 2000, 2001, 2002a; Yang Jingsui et al., 2002), 但两期超高压变质作用的空间展布、形成机理及其大地构造意义等许多关键性问题的研究却刚刚起步。

注: 本文为国土资源部“十五”重点科技项目 (编号 20010201), 中国大陆科学钻探科学研究项目 (编号 2001CCB00900) 和国家自然科学基金重大项目国际合作项目 (编号 49732070) 的部分成果。

收稿日期: 2003-07-23; 改回日期: 2003-09-13; 责任编辑: 郝粹国。

作者简介: 杨经绥, 1950 年, 男, 留加博士, 研究员, 中国地质学会岩石专业委员会主任委员。主要从事青藏高原和造山带的蛇绿岩、火山岩和超高压变质岩研究, 侧重于岩石-构造学 (Petrotectonics) 的研究。通讯地址: 100037, 中国地质科学院地质研究所大陆动力学实验室; 电话: 010-68999698; Email: yangjsui@ccsd.org.cn。

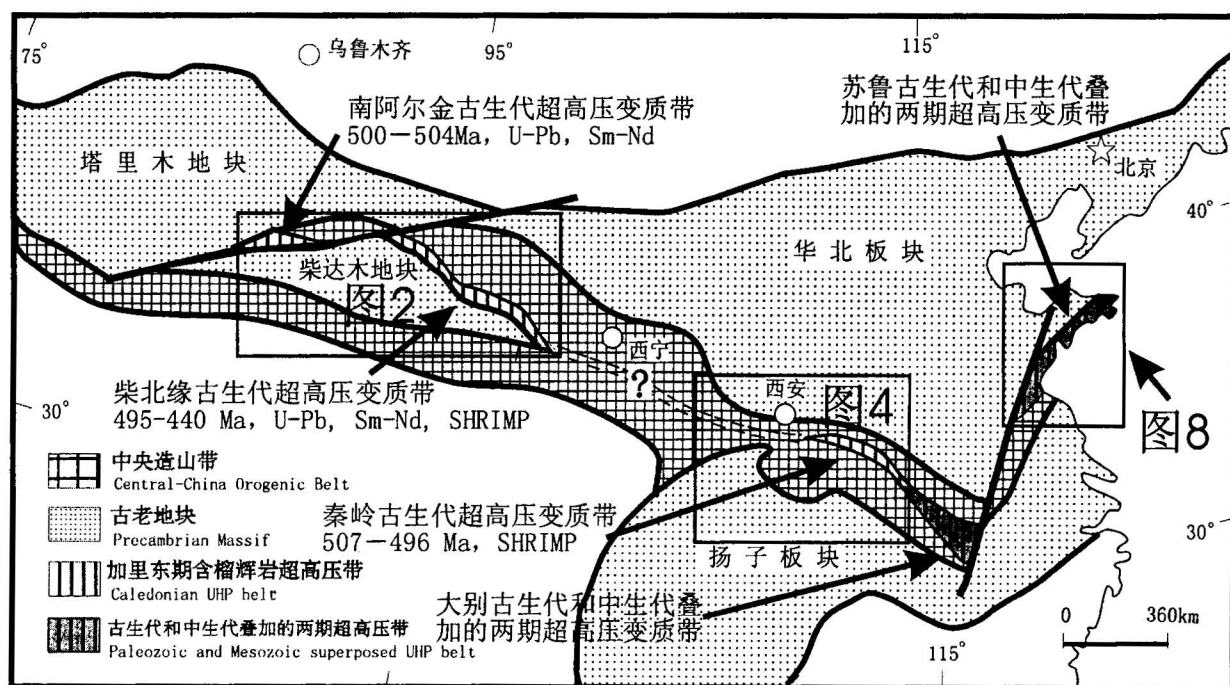


图 1 中国中部巨型超高压变质带及两期超高压变质带的分布简图(据杨经绥等, 2000 修改)

Fig. 1 Distribution of UHP terranes across the central orogenic belt of China, and two ages of UHPM events recognized in this belt(modified after Yang et al., 2000)

本文报道我们新近获得的柴北缘片麻岩和苏鲁榴辉岩中含柯石英锆石微区定年, 秦岭含金刚石片麻岩和榴辉岩的锆石定年, 进一步证明沿中央造山带存在早古生代和印支期两期超高压变质事件。

1 中央碰撞造山带中两期超高压变质事件的提出

自许志琴在大别山岳西菖蒲榴辉岩中首先发现典型超高压变质矿物柯石英(Xu Zhiqin, 1987)并在 1988 北京怀柔召开的国际构造会议上予以报道以来, 大别苏鲁超高压变质岩成了全球研究超高压变质作用的热点, 并取得了很大进展。除了在不同地点、不同类型岩石中发现超高压典型矿物柯石英外, 并在该带的不同地点又相继发现了金刚石等典型超高压矿物(Xu Shutong et al., 1992; 陆永增, 1998; 杨经绥等, 1999)。此外, 在榴辉岩和石榴石橄榄岩等岩石中找到一些特殊的矿物出溶结构, 认为大陆地壳可能俯冲到 200 km 以下地幔深处(Zhang Ruyuan et al., 1999; Yang Jianjun et al., 2000; Ye Kai et al., 2000)。研究表明, 大别—苏鲁造山带超高压变质岩分布广泛、类型多样、变质和变形过程复杂。目前正在苏鲁南部东海超高压变质带上实施的中国第

一口大陆科学钻井, 其目的就是通过钻探 5000 m 获取连续岩心, 研究超高压岩石的形成和折返历史。多数地质学家认为大别—苏鲁为同一条超高压变质带, 被郯庐断裂所断开, 并左旋位移约 500 km(Okay et al., 1989; Yang Jianjun, 1991; Wang et al., 1992)。大别高压—超高压变质带的峰期变质作用认为发生在 240~220 Ma 之间, 属印支期扬子板块与华北板块陆-陆俯冲碰撞的产物(Li et al., 1989, 1993, 2000; Chavagnac et al., 1996)。

近年来, 杨经绥及其科研集体在中央碰撞造山带西段柴北缘地区新识别出一条长 350 km 的超高压榴辉岩带(大柴旦鱼卡—锡铁山—都兰), 在榴辉岩的片麻岩围岩锆石中发现典型超高压矿物柯石英, 并在榴辉岩中发现柯石英假象及指示超高压变质作用的微细矿物出溶结构, 说明该带经历了超高压变质作用, 并且发生了陆壳岩石的深俯冲作用(杨经绥等, 1998, 2000, 2001, 2002; 张建新等, 2001; 宋述光等, 2001)。U-Pb、Sm-Nd、Ar-Ar 等多种方法的同位素年代学测试表明超高压变质作用发生在早古生代 500~440 Ma, 折返起始时间为 470~460 Ma, 约在 400 Ma 结束(张建新等, 2000; Yang Jingsui et al., 2002; 许志琴等, 2003)。此外, 发现阿尔金西南

段榴辉岩的产出、变质变形及成分特征均可以与柴北缘出露的榴辉岩对比(Yang Jingsui et al., 2001; Zhang Jianxin et al., 2002)。并在阿尔金榴辉岩中发现柯石英假像和超高压条件下的出熔结构,说明阿尔金榴辉岩同样经历了超高压变质作用(张建新等, 2002)。最近,在阿尔金发现超高压变质石榴橄榄岩(刘良等, 2002),进一步证实了超高压变质作用的存在。阿尔金榴辉岩的变质峰期年龄约为 500 Ma(张建新等, 1999)。根据阿尔金断裂两侧的榴辉岩在地质背景、野外产状、围岩特征、岩石及矿物组合、形成的 pt 条件、地球化学及原岩特征的可对比性,并且具有近一致的榴辉岩形成年龄(500 Ma 左右),我们认为阿尔金榴辉岩和祁连南缘榴辉岩可能同为加里东期深俯冲及陆陆碰撞造山作用的产物,构成同一条榴辉岩超高压变质带,后来被亚洲大陆最大的一条走滑断裂——阿尔金断裂所切割,并左行平移了 400 km(许志琴等, 1999; Yang Jingsui et al., 2001)。

在对比大别苏鲁超高压变质岩石以及秦岭榴辉岩的基础上,杨经绥等(2000)推断沿中央碰撞造山带可能存在一条横贯东西(>4000 km)巨大的早古生代超高压变质带,认为在加里东期造山事件之后,沿中央造山带又发生一次印支期的板块俯冲碰撞作用,形成了大别苏鲁地区的超高压变质岩石;并于 2002 年在大别往西的东秦岭北带榴辉岩及其围岩片麻岩的锆石中,通过激光拉曼的研究,发现十多粒变质金刚石和大量石墨包裹体,并通过榴辉岩和片麻岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年,初步确定秦岭超高压变质作用时代为早古生代(约 500 Ma)(杨经绥等, 2002)。该发现证明秦岭北带榴辉岩及其围岩片麻岩经历了加里东期超高压变质作用,为横贯中国大陆中部的中央碰撞造山带可能存在一条西起阿尔金—祁连,东延至秦岭—大别—苏鲁长约 4000 km 的早古生代超高压变质带的推断增添了又一重要证据。在此研究基础上,提出在中央碰撞造山带中存在加里东期和印支期两期超高压变质作用(杨经绥等, 2002),根据目前已有资料,加里东期超高压变质岩石主要分布在中央碰撞造山带的西段,包括阿尔金、柴北缘和东秦岭;印支期超高压变质岩石主要分布在东段大别苏鲁一带。

然而,除了中央造山带存在两期超高压变质作用的想法外,有些人认为大别山超高压变质作用是新元古代(757±7 Ma,程裕淇等, 2000),另有一些人认为苏鲁的超高压变质带也是形成于新元古代,

如曹国权等(1990),王来明等(1994),康维国等(1996)和宋明春等(2003)。

对超高压变质作用形成时代认识上存在分歧的主要原因,可能由于岩石所经历复杂的历史所造成,另一方面,也可能由于经历过超高压变质作用的榴辉岩和围岩片麻岩的原岩形成时代也不尽相同,如大别苏鲁榴辉岩的围岩片麻岩的年龄多为 800~700 Ma(Harker et al., 1998; 刘福来等, 2003),我们最近报道的胶东榴辉岩的原岩年龄为 1821±19 Ma,超基性岩的原岩年龄为 581±44 Ma,但获得山东超基性岩中含柯石英锆石的原位超高压变质年龄为 221±12 Ma(杨经绥等, 2002b)。由此看来,如何准确确定超高压变质作用的年代十分关键,认为目前最有效的和最直观的方法就是对锆石的含超高压矿物的微区进行 U-Pb 原位定年。

2 柴北缘片麻岩含柯石英锆石 SIMS 离子探针原位定年

近年发现的柴北缘超高压变质岩石由榴辉岩、石榴石橄榄岩和围绕它们的一些片麻岩类组成,由西至东主要分布在大柴旦、锡铁山和都兰北 3 个地区(图 2)。自柴北缘地区发现榴辉岩和超高压变质带以来,对于榴辉岩和超高压变质事件发生的年代已取得一些同位素年代学数据,如大柴旦榴辉岩的锆石采用热离子质谱方法(TIMs)获得 U-Pb 年龄为 494.6±6.5 Ma,认为代表榴辉岩峰期变质锆石的结晶年龄;同一榴辉岩的多硅白云母的 Ar-Ar 坪年龄和等时线年龄分别为 466.7±1.2 Ma 和 465.9±5.4 Ma,认为是榴辉岩抬升过程中的冷却年龄(Zhang Jianxin et al., 2000);SHRIMP U-Pb 方法测得都兰榴辉岩锆石的年龄为 495~443 Ma(平均 473±20 Ma),同一样品 Sm-Nd 全岩—矿物等时线年龄为 457.7±3.3 Ma(Yang Jingsui et al., 2002);沙柳河榴辉岩锆石 TIMs U-Pb 年龄为 497±10 Ma(陆松年, 2003)。已有的 SHRIMP, TIMs 和 Sm-Nd 同位素定年均表明超高压变质作用发生在早古生代,但存在一个较大的年龄跨度(500~440 Ma),很难开展深入讨论,尤其缺少对同一样品精确界定其超高压变质年龄和退变质年龄,在此基础上开展精确的俯冲和折返速率和模式的讨论。以下报道我们最近完成的含柯石英锆石的原位测年取得的初步数据。单颗粒锆石 U-Pb 定年是在法国 Nancy 的岩石及地球化学中心(CNRS-CRPG)离子探针国家实验室完成,使用仪器为 CAMECA IMS-1270 型离子

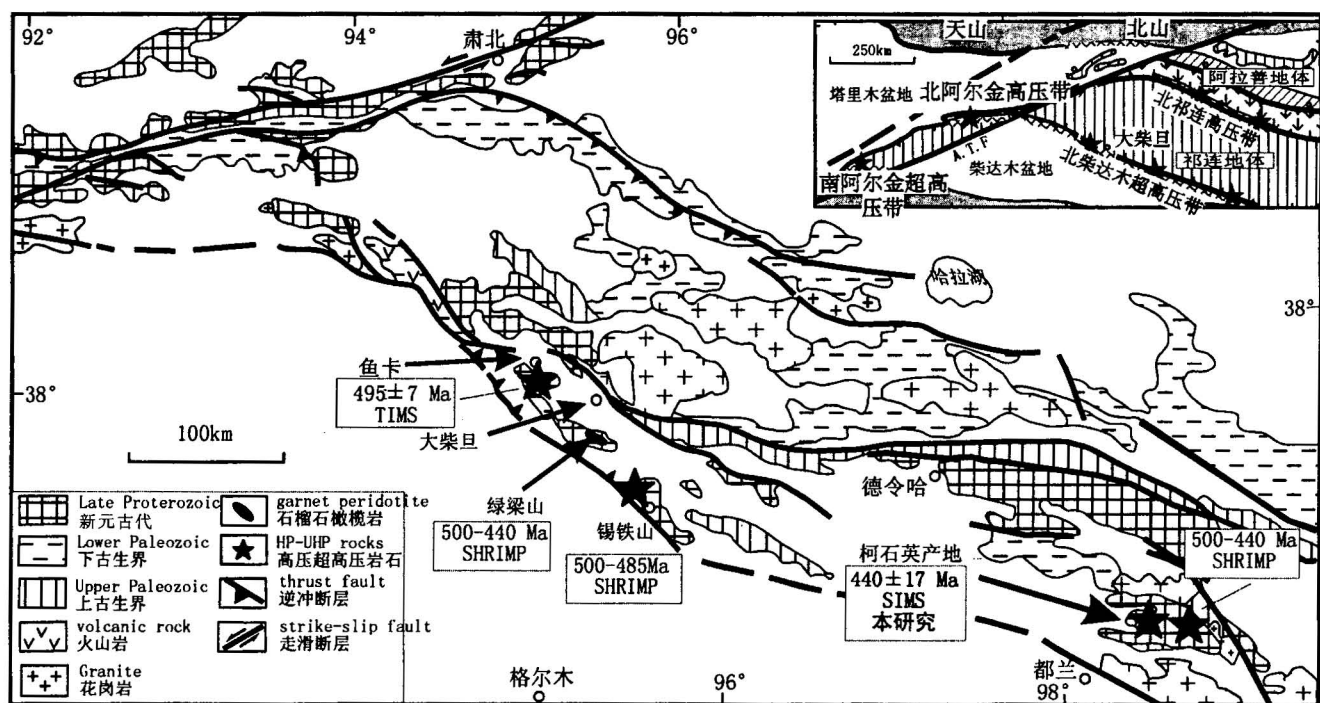


图 2 柴北缘超高压变质岩石及其同位素年龄分布

Fig. 2 Distribution of UHP metamorphic rocks and their ages in the North Qaidam Mountains

探针, 仪器及有关方法、测试条件参看 Compaston (1992)。

含柯石英片麻岩的样品(编号为 00Y-132)取自都兰北带, 为榴辉岩的围岩片麻岩, 已在片麻岩的锆石中找到了柯石英的包裹体。这些片麻岩产在榴辉岩块之间或周边。岩石均已强烈变形, 主要矿物有石榴子石(5%)+白云母(30%)+黑云母(<10%)+石英(>50%)+榍石(少)。石榴子石被拉长并旋转; 白云母呈窄片状; 黑云母局部分布, 为石榴子石退变产物。未见峰期变质矿物被保留, 而是一套退变质超高压矿物组合。样品中分选出的锆石多为浑圆状, 具典型变质锆石特征; 阴极发光影像显示有核和边缘之分(图 3)。锆石中测得的超高压矿物包体有柯石英, 蓝晶石, 多硅白云母, 石榴子石和金红石, 均在核部。柯石英的激光拉曼谱主位移峰在 523~525 之间, 并有 272、181 等次峰(杨经绥等, 2001)。在核部测得的原位年龄为 467 ± 8.9 Ma 和 448 ± 6.7 Ma, 含柯石英部位测得的年龄为 440 ± 16.7 Ma, 三者平均 452 ± 13.8 Ma, 代表超高压变质作用年龄。锆石边缘强阴极发光部分与超高压阶段形成的锆石中心的较暗的阴极发光特点不同, 测得其年龄为 419 ± 6.7 Ma, 认为代表折返过程的退变年龄。核部和边部的 Th/U 值均 < 0.1, 属典型变质锆石的特点。该

样品的年龄数据的深入地质意义讨论有待更多的含超高压矿物锆石的原位测点, 此项工作仍然在继续, 这里不再展开讨论。

3 秦岭超高压岩石锆石 SHRIMP U-Pb 定年

秦岭于 1994 年发现榴辉岩(胡能高等, 1995), 2002 年报道在榴辉岩及其围岩片麻岩中均发现变质成因金刚石, 认为是西部阿尔金—柴北缘超高压变质带和东部大别—苏鲁超高压变质带之间的一个重要连接(杨经绥等, 2002b)。根据含金刚石榴辉岩围岩片麻岩中锆石的 SHRIMP 定年, 认为片麻岩锆石的边部获得的 507 ± 38 Ma 代表超高压变质事件年龄, 而锆石核部获得的 1200~1800 Ma 代表片麻岩原岩年龄(杨经绥等, 2002a)。但用一个年龄样品数据说明一次与前人结论不同的重大地质事件, 须得十分谨慎, 为此我们又完成了两个样品的锆石 SHRIMP 年龄, 一个是含金刚石片麻岩, 另一个是榴辉岩。

3.1 含金刚石片麻岩锆石 SHRIMP 定年

含金刚石片麻岩样品(00Y-827)采自北秦岭官坡(图 4), 为石榴白云石英片麻岩。岩石片麻理发育, 矿物粒度较粗(粒径 2~4 mm), 矿物以白云母

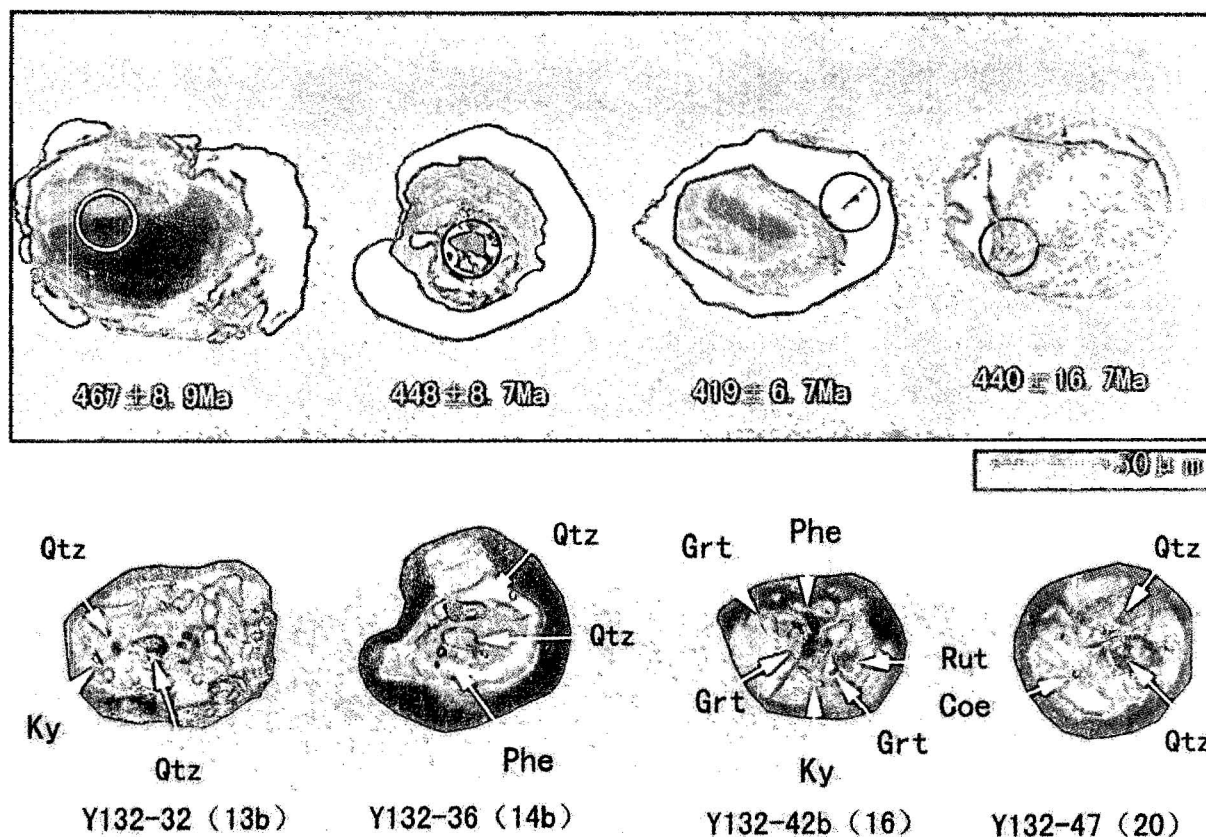


图3 柴北缘都兰含柯石英片麻岩(编号00Y-132)锆石的显微镜透射光照相,阴极发光影像(CL)和SIMS U-Pb原位定年

Fig. 3 Cathodoluminescence images of single zircon from coesite-bearing gneiss from Dulan

Qtz—石英;Ky—蓝晶石;Phe—多硅白云母;Grt—石榴子石;Ru—金红石;Coe—柯石英

Qtz—Quartz;Ky—kyanite;Phe—phengite;Grt—garnet;Ru—rutile;Coe—coesite

和石英为主,有一些钠质长石及少量石榴子石,矿物组合表明岩石为一套副片麻岩。锆石边缘浑圆状,粒度达100 μm 以上。锆石中矿物包体较多,发现金刚石,有大量石墨和磷灰石,以及金红石和石英等。锆石的分选,采用常规的粉碎、分选、磁选和重液流程,最后在双目镜下挑选。制样方法参看 Liu Fulai 等(2001)。

样品的定年用北京离子探针中心 SHRIMP II 完成,共测得15粒锆石21个年龄值(表1)。阴极发光照片能显示锆石的内部结构,即锆石的核部保留岩浆锆石的残核,边部为变质过程中新增生的部分。15粒锆石的阴极发光影像有6粒锆石显示较好的环带(图5)。结果获得6组内核和边缘年龄,分别为:① 529 ± 13 Ma(边), 1159 ± 33 Ma(核);② 476 ± 12 Ma(边), 1475 ± 38 Ma(核);③ 525 ± 13 Ma(边), 990 ± 28 Ma(核);④ 494 ± 13 Ma(边), 743 ± 21 Ma

(核);⑤ 552 ± 14 Ma(边), 1559 ± 42 Ma(核);⑥ 573 ± 16 Ma(边), 9110 ± 25 Ma(核)。另有一粒没有环带锆石的年龄为 467 ± 12 Ma,将其归入边部年龄组,由此,获得7个边的平均值为 511 ± 35 Ma (MSWD=8.4 2σ)。所有边部的测点均显示低的Th/U值(< 0.1),但核部的值均 > 1 。在Tera-Wasserburg图解上,该样品年龄测点分为两个年龄组,并产生下交点年龄为 502 ± 45 Ma,上交点为 1545 ± 100 Ma (MSWD=8.7 2σ) (图6),下交点年龄与锆石边部年龄平均值较为一致,相差不到10 Ma,为误差范围之内。认为下交点值是由所有测点获得应更具代表性,因此,取下交点年龄 502 ± 45 Ma代表变质年龄,上交点年龄 1545 ± 100 Ma为核部年龄,认为代表原岩年龄,并具岩浆锆石结构。

3.2 秦岭榴辉岩锆石 SHRIMP U-Pb 定年

用于定年的榴辉岩样品(编号01Y-826)为块状

表 1 秦岭含金刚石片麻岩(样号 01Y-827)锆石的 SHRIMP U-Pb 测年数据

Table 1 U-Th-Pb SHRIMP zircon dating of diamond-bearing gneiss (01Y-827) from North Qinling UHPM belt

样号	U ($\times 10^{-6}$)	Th ($\times 10^{-6}$)	Th U	$^{206}\text{Pb}^*$ ($\times 10^{-6}$)	^{206}Pbc (%)	$^{206}\text{Pb}^*$ ^{238}U	$\pm\%$	① $^{207}\text{Pb}^*$ ^{235}U	$\pm\%$	Total ^{207}Pb ^{206}Pb	$\pm\%$	Total ^{238}U ^{206}Pb	$\pm\%$	① ^{206}Pb ^{238}U (Ma)	$\pm\%$	② ^{206}Pb ^{238}U (Ma)	$\pm\%$	③ ^{206}Pb ^{238}U (Ma)	$\pm\%$	打点 位置
1.1	91	97	1.11	20.2	—	0.2581	2.7	3.41	3.0	0.09861	0.91	3.86	2.7	1,480	35	1,475	38	1,500	41	中心
2.2	603	296	0.51	120	1.08	0.2320	2.6	2.898	2.6	0.09101	0.51	4.31	2.6	1,345	32	1,338	33	1,332	34	中心
3.1	184	146	0.82	32.5	3.92	0.2048	2.6	2.536	2.9	0.09094	10	4.88	2.6	1,201	29	1,188	30	1,159	33	中心
3.2	815	22	0.03	60.0	0.22	0.0856	2.6	0.681	2.8	0.05833	0.79	11.67	2.6	529	13	530	13	529	13	边缘
4.1	137	73	0.56	30.4	0.80	0.2587	2.6	3.269	2.8	0.09334	0.74	3.86	2.6	1,483	35	1,485	38	1,475	38	中心
4.2	615	6	0.01	40.5	0.15	0.0767	2.6	0.592	3.0	0.05710	1.0	13.03	2.6	476	12	477	12	476	12	边缘
5.2	643	84	0.13	65.2	1.58	0.1179	2.6	1.236	2.7	0.07652	0.55	8.47	2.6	719	18	708	18	708	18	中心
6.2	571	79	0.14	55.6	1.50	0.1132	2.6	1.197	2.9	0.07747	1.0	8.83	2.6	691	17	680	17	682	18	中心
7.1	206	131	0.66	30.1	2.35	0.1693	2.6	1.742	3.1	0.07791	1.1	5.88	2.6	1,008	25	1,006	26	990	28	中心
7.2	534	21	0.04	39.0	0.31	0.0850	2.6	0.683	2.8	0.05916	0.87	11.75	2.6	526	13	526	13	525	13	边缘
8.1	127	39	0.31	13.6	1.81	0.1245	2.8	1.438	3.3	0.0828	1.8	8.04	2.8	756	20	739	20	743	21	中心
8.2	702	100	0.15	47.6	—	0.0786	2.6	0.624	2.9	0.06057	0.84	12.68	2.6	488	12	487	12	494	13	边缘
9.2	512	51	0.10	33.4	0.89	0.0757	2.6	0.625	2.8	0.06199	0.88	13.18	2.6	470	12	468	12	467	12	边缘
10.1	1023	470	0.48	175	0.21	0.1991	2.6	2.565	2.7	0.09420	0.39	5.02	2.6	1,171	28	1,151	29	1,170	30	中心
11.2	715	267	0.39	140	1.09	0.2285	2.6	2.901	2.6	0.09277	0.34	4.37	2.6	1,327	31	1,317	33	1,315	33	中心
12.2	778	129	0.17	173	-0.02	0.2576	2.6	3.99	2.7	0.11396	0.53	3.87	2.6	1,478	34	1,445	36	1,481	35	中心
13.1	221	201	0.94	52.0	-0.01	0.2734	2.6	3.651	2.7	0.09712	0.52	3.656	2.6	1,558	37	1,558	40	1,559	42	中心
13.2	471	38	0.08	36.8	1.67	0.0908	2.6	0.760	2.8	0.06205	0.71	10.99	2.6	561	14	559	14	552	14	边缘
14.1	260	98	0.39	35.3	4.14	0.1578	2.6	1.700	2.9	0.07970	0.99	6.32	2.6	945	23	936	24	910	25	中心
14.2	485	40	0.09	39.1	1.07	0.0936	2.8	0.777	3.1	0.06278	0.74	10.65	2.8	577	15	576	16	573	16	边缘
15.2	154	81	0.54	27.7	2.95	0.2091	2.6	2.654	2.8	0.09309	0.70	4.78	2.6	1,224	29	1,209	31	1,192	32	中心

注:误差 $\pm\sigma$, Pbc 和 Pb* 分别为普通铅和放射成因的铅;① 普通 Pb 用所测的 ^{204}Pb 校正;② 普通 Pb 校正是假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 的年龄为一致;③ 普通 Pb 校正是假设 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄为一致。

构造,镜下显示等粒状结构,矿物粒度较细,多为 0.5~2 mm 之间。矿物以石榴子石为主,绿辉石有少量保留,但多数已被退变矿物角闪石,以及长石和石英所替代。本样品取样约 10 kg 重,从中选出近 100 粒锆石。锆石大小相差悬殊,明显分为两种。占多数的为长柱状,粒度主要在 50~70 μm 之间,长宽比为(3~4):1,阴极发光影像显示晶体内部为岩浆锆石碎片,保留不完整的岩浆生长结构,有增生边但很窄,对其定年存在困难。少数为短柱状,粒度达 300 μm 以上。短柱状锆石长宽比(1~2):1,显示岩浆锆石生长环带,边部有较宽的增生边,可以定年。锆石中矿物包体数量少,种类也少,仅见金红石、石墨、和石英,未能找见金刚石,但其围岩片麻岩样品(01Y-827,见上文)中已发现。

用 SHRIMP 完成 15 粒锆石 16 个测点。测年工作在美国斯坦福大学 SHRIMP 实验室完成。根据所获得的年龄数据来看,该样品年龄十分复杂,可能记录了岩浆和构造多期事件,但要详细展开,测点显得不够,目前阶段,只能给出初步认识如下。

长窄条状锆石在谐和曲线上截得上交点年龄 1381 ± 82 Ma 代表榴辉岩原岩年龄,为岩浆成因,而

下交点年龄 493 ± 170 Ma 代表榴辉岩的超高压变质事件年龄(图 7)。两个年龄值误差范围大,系因测点少所引起;尤其下交点误差大是因为锆石的增生边很窄,无法测得变质年龄所引起。但由于片麻岩中已测得较好超高压变质年龄,而本样品的下交点年龄基本可以与其对比,因此认为可以代表榴辉岩的变质年龄。该样品的进一步补充定年工作即将进行。超高压变质过程中锆石增生边不发育,有可能变质温度较低或超高压变质过程中流体不发育引起。另一类短柱状粗粒锆石获得的年龄为 1929~2378 Ma,并且,根据其具岩浆锆石的生长环带以及高的 Th/U 值(~ 1),认为是榴辉岩原岩侵位时从围岩中捕获的外来晶。该年龄值与片麻岩中出现的岩浆锆石核部年龄(1946~2284 Ma)较为一致(杨经绥等, 2002a)。

4 苏鲁榴辉岩中加里东期含柯石英锆石微区定年

苏鲁超高压变质带是大别超高压变质带的东延部分,两带的超高压岩石类型、超高压矿物组合,形成的温压条件均可以对比,所不同的是苏鲁比大别

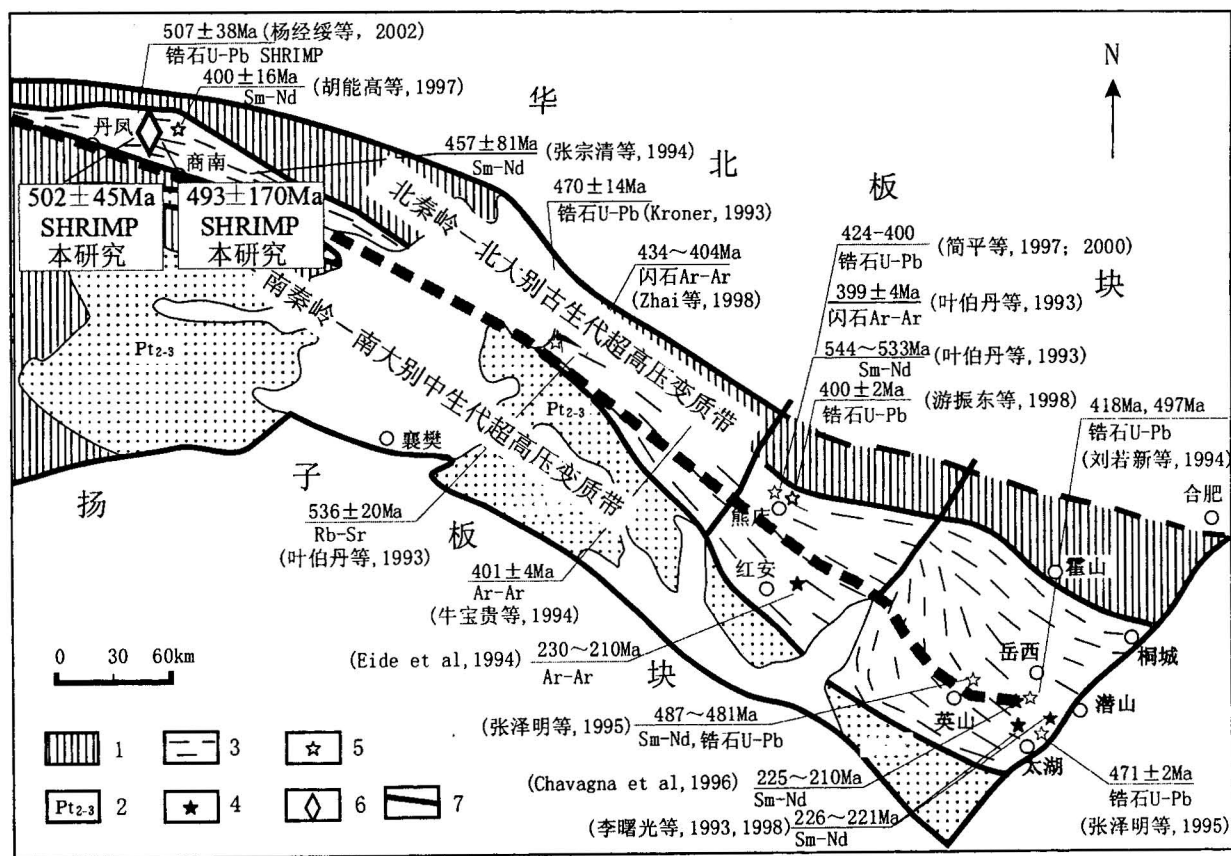


图 4 东秦岭—大别地区两期超高压变质作用和含金刚石超高压变质岩石分布(据游振东等,1998,修改)

Fig. 4 Sketched geological map of the East Qinling and Dabie region (modified after You et al. , 1998)

1—古生界;2—中—新元古代;3—超高压变质带;4—印支期榴辉岩;5—加里东期榴辉岩;6—含金刚石榴辉岩和片麻岩位置;7—构造边界

1—Palaeozoic; 2—middle—new Proterozoic; 3—ultra-high pressure metamorphic belt; 4—Indosinian eclogite; 5—Caledonian eclogite;

6—sampling sites of the diamond-bearing eclogite and gneiss; 7—tectonic boundary

出露较多的地幔岩组合的岩石,被认为代表超高压岩石相对较下部的岩石类型,即,苏鲁比大别抬起得更高些,或剥蚀的更多些(Xu Zhiqin, et al., 1998)。由于苏鲁超高压变质带的基本地质情况国内已有大量文章报道,这里不再赘述,读者可参看文献(山东地质矿产局第六地质队,1995;杨建军,1991)。

用于定年的样品取自江苏连云港地区东海县的青龙山(图8)。由于建设高速公路,使得该地大量新鲜岩石得以剥露。青龙山被剥露出来的榴辉岩带宽数百米,岩石类型可分为多硅白云母榴辉岩、多硅白云母-蓝晶石榴辉岩,石英榴辉岩以及绿帘-角闪榴辉岩等,其围岩片麻岩也有不同类型,包括二长片麻岩,霓石片麻岩,黑云母片麻岩,辉石-石榴片麻岩,绿帘-白云母片麻岩、蓝晶石石英岩及绿帘-多硅白云母片岩等。

测年样品为含金红石多硅白云母榴辉岩(编号

QL-1)。锆石中矿物包体的激光拉曼测定在日本东京工业大学完成;锆石阴极发光在日本千叶大学完成。

锆石外形均为浑园状,为常见变质锆石特征。激光拉曼光谱结合阴极发光研究表明,该榴辉岩的锆石普遍存在增生边和残余核两层结构。柯石英等超高压矿物主要在锆石的核部增生边出现。经初步研究测得 10 粒锆石的 15 件年龄数据,可分为 3 组。其中两组为变质增生锆石,含有柯石英、绿辉石、金红石和石榴子石等超高压矿物包体,两组年龄分别为加里东期和印支期;另一组为锆石内部的残余核,年龄为新元古代。

出现加里东期年龄的锆石有两种产出,分别是无或有老核残留,以下分别举例说明。

锆石 1(图 9-1,2):编号 QL1-7。锆石边部为浑圆状,内部没有明显分带,在核和幔均存在震荡环

带,并且环带相对较宽,说明形成时环境较稳定,最外部无法区分是否另有边。锆石的核、幔部均有包体矿物柯石英(coe)+绿辉石(omp)+金红石(Rt),说明形成于超高压变质作用,所测两个年龄值分别为 449 ± 9 Ma 和 441 ± 9 Ma,变化于误差范围之内,取其平均值 445 ± 9 Ma 代表变质锆石年龄。本锆石的特殊之处是具有震荡环带,Th/U 值分别为 0.64 和 0.60,较本样品中岩浆锆石的 Th/U 值(1.34,见下文)要明显低,但可能为继承性锆石。据文献记载,变质过程中形成的锆石具有振荡结构已在 Alpine Sesia-Lanzo 带中变质石英-硬玉脉中的锆石中发现(Rubatto et al, 1999),但它们究竟是变质流体结晶形成还是属继承性锆石,仍值得进一步研究。

锆石 2(图 9-3、4):编号 QL1-22,锆石外轮廓浑

圆,内部分出明显环带构造,CL 影像显示核部颜色浅,边部(幔部)暗,核部边界平直,晶面发育较好,并有清晰震荡环带,但相对较窄,其 U(188×10^{-6})和 Th(242×10^{-6})含量均较高,Th/U 值高(1.34),其中包体有斜长石(Pl)和磷灰石(Ap),认为属岩浆型锆石,形成于超高压变质前,所测得年龄(761 ± 13 Ma)代表原岩年龄;锆石边部 CL 影像没有震荡环带,颜色较暗,并且有柯石英和绿辉石矿物包体,其 U(157×10^{-6})和 Th(92×10^{-6})含量及 Th/U 值(0.61)相对核部均已明显降低(与上一锆石的 0.64 和 0.60 较一致),测得年龄为 442 ± 9 Ma,认为代表超高压变质年龄。

变质锆石一般有两种成因,一是早期存在的岩浆或碎屑锆石在亚固相状态的重结晶,二是从变质

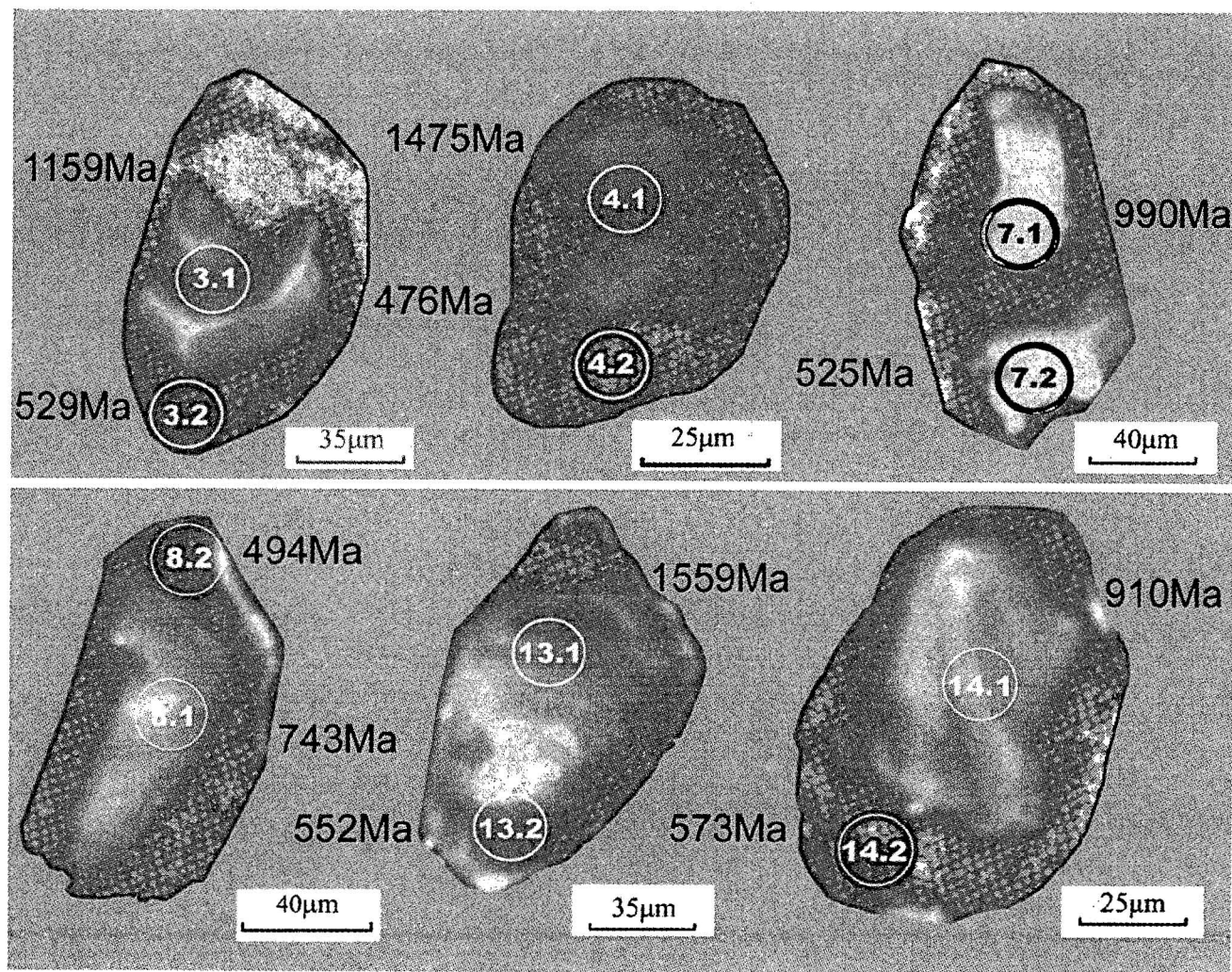


图 5 秦岭含金刚石片麻岩(01Y-827)锆石的 CL 影像和 SHRIMP U-Pb 原位定年数据分布图

Fig. 5 SHRIMP U-Pb age and cathodoluminescence images of single zircon in Qinling diamond-bearing gneisses (01Y-827)

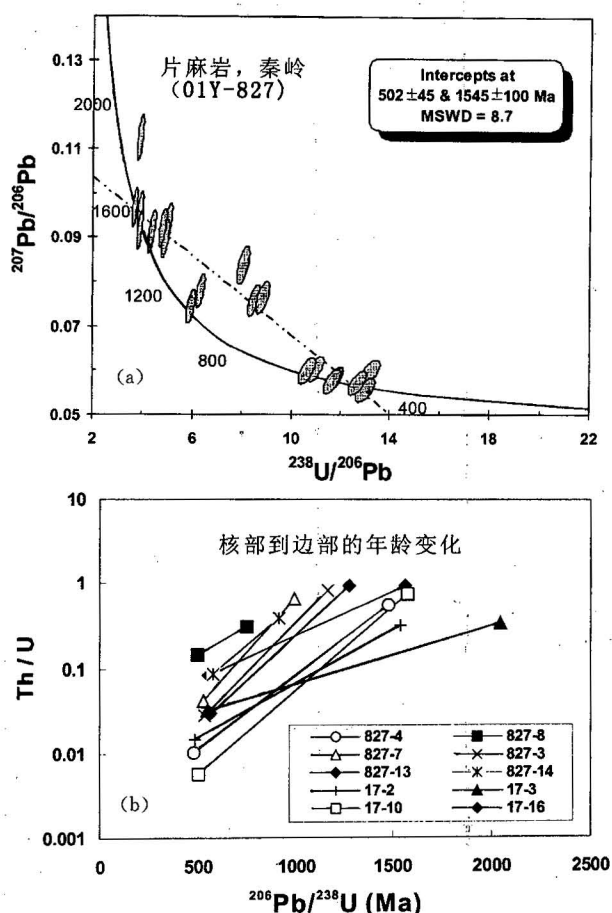


图6 (a)秦岭含金刚石片麻岩(01Y-827)SHRIMP年龄值在Tera-Wasserburg图中显示边部锆石(rims)和核部锆石(cores)两个群,取得下交点年龄为 502 ± 45 Ma和上交点 1545 ± 100 Ma ($\text{MSWD} = 8.7$),前者代表超高压变质年龄的平均值,后者为超高压变质之前的早期锆石年龄的平均值;(b)秦岭两个片麻岩(01Y-827和00Y-17)中10粒锆石的核和边部两组年龄和 Th/U 值变化图(b)

(样品00Y-17的SHRIMP数据引自杨经绥等,2002)

Fig. 6 (a) SHRIMP ages of diamond-bearing gneiss (01Y-827) plotted on Tera-Wasserburg diagram; (b) 10 rims and cores of zircons from 00Y-17 and 01Y-827 show systematic variation of Th/U ratios with $^{236}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages

(data 00Y-17 quoted from Yang et al., 2002)

流体中新生长出锆石,通常,变质作用的结果都是导致 Th/U 降低(Rubatto et al., 1999)。本研究表明, Th/U 值在变质过程中相对核部也明显降低,但没有前人报道的印支期榴辉岩的 Th/U 值低(≈ 0.1) (杨经绥,2002b)。据报道,变质新形成的锆石的 Th/U 值可以变化较大,UHP变质过程中发生的深融作用,产生的新锆石可以具有高的 Th/U 比,例如喜马拉雅西构造带Kishar Formation中片麻岩中的变质

锆石,该锆石由早期锆石融熔形成,此种锆石也具分带结构,但为变质成因,并且 Th/U 值高(Dipietro et al., 2001)。此外,阿尔金走滑断裂产生的深融作用形成的脉体中的变质锆石也具环带,其 Th/U 值($0.5 \sim 0.6$)也高于常见变质锆石的 Th/U 值(≈ 0.1) (Li等,2001)。认为出现中等 Th/U 值的变质成因锆石的原因可能与原岩的成分或流体的成分有关。

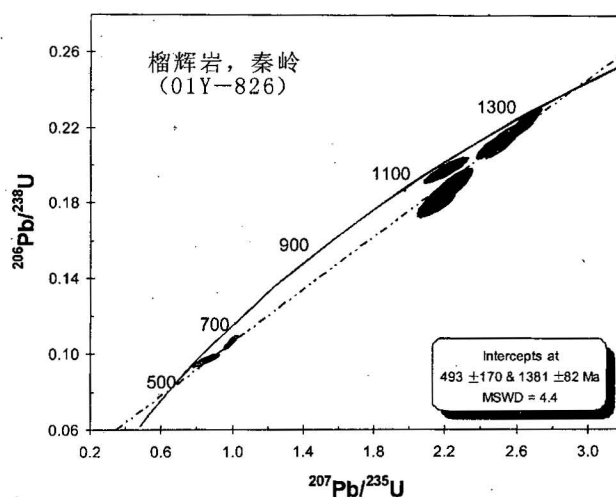


图7 秦岭榴辉岩样品(01Y-826)中锆石的SHRIMP年龄谱和图

Fig. 7 SHRIMP age plots of eclogite (01Y-826) from Qinling

青龙山榴辉岩样品中也取得含柯石英锆石的印支期超高压变质年龄,变质年龄为 $240 \sim 220$ Ma,由于详细的工作尚未完成,有关印支期的榴辉岩超高压年龄数据和讨论将另文发表。

5 大别—苏鲁已有的含柯石英锆石的印支期超高压变质作用证据

为了让读者较全面地了解两期超高压变质事件,这里将已取得的苏鲁印支期超高压变质岩石含柯石英锆石原位定年的证据再简单介绍一下。大别—苏鲁超高压变质岩中首次获得的含柯石英锆石原位定年的样品取自山东威海的超镁铁岩。其锆石的核部保留岩浆锆石的残核,边部为含柯石英新增锆石,另有一些锆石为超高压变质过程中新生锆石,其中含有柯石英包体,对含柯石英包体的锆石微区定年获得超高压变质年龄为 221 ± 12 Ma,其核部的原岩年龄为 581 ± 44 Ma(杨经绥等,2002b)。

刘福来等(2003)报道了中国大陆科学钻探预先导孔(PP2)片麻岩含柯石英锆石的 SHRIMP U-Pb 年代学研究,获得含柯石英锆石微区年龄为印支期,其中获得副片麻岩含柯石英锆石微区年龄为 234~220 Ma;正片麻岩样品的含柯石英锆石微区年龄为 242~224 Ma。

有关大别山超高压变质岩石的年龄最近又有一些新的数据发表。例如,高山等(2002)也发表一批大别山超高压榴辉岩岩石的 SHRIMP 测年,其获得超高压榴辉岩中有 3 组年龄,认为 771~730 Ma 年龄组代表原岩年龄,461~449 Ma 和 216 Ma 分别为二期超高压变质作用年龄,与苏鲁的榴辉岩获得的 3 组年龄值十分吻合。但遗憾的是该年龄数据缺少矿物学的制约,如,两期超高压事件均需要来自柯石英等典型超高压矿物方面的证明,或提供其他方面的超高压证据。因此,3 组年龄数据的解释依然存在多解性,而未能跳出前人存在分歧的圈子,即超高压变质作用被认为是早古生代(如简平等,1999),元古代(如程裕淇等,2000),或印支期,但三者均缺乏有力矿物学证据。而根据我们的经验,对于超高压变质年龄的确定,目前最好的办法是首先通过激光拉曼光谱开展锆石中包体矿物的研究,在此基础上采用阴极发光(CL)确定这些包体矿物的空间分布位置,然后利用离子探针方法开展锆石微区定年(杨经绥等,2002b)。

6 中国巨型超高压变质带中存在两期超高压变质事件

至此,我们对中国中部巨型超高压变质带的认识可以说又深入一步。

最初的时候,基于在柴北缘陆续发现一批榴辉岩出露(杨经绥等,1998,2000,张雪亭等,1999,张建新等,2000),提出中国中部存在一条巨型超高压变质带(杨经绥等,2000),认为加里东期超高压变质带由阿尔金柴北缘延至大别—苏鲁,认为加里东造山事件之后大别—苏鲁又叠加了一期印支期超高压变质作用。

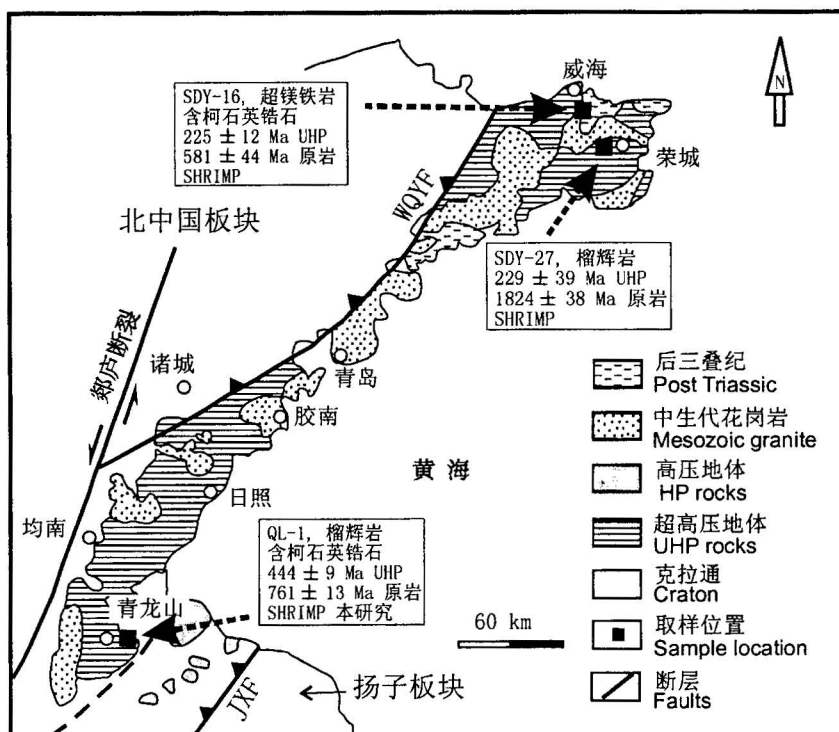


图 8 苏鲁超高压变质带中近期完成的 SHRIMP 测年含柯石英锆石样品位置图
(据 Liu et al., 2001 修改, 图中 SDY-16 和 SDY-27 年龄值引自杨经绥等, 2002b)

Fig. 8 Location of SHRIMP U-Pb dating samples(modified from Liu et al., 2001;
SDY-16 and SDY-27 data from Yang Jingsu et al., 2002b)

当时的情况是:在柴北缘和阿尔金仅发现高压变质证据,尚未发现超高压证据;胡能高等(1994)在秦岭发现榴辉岩,虽然报道有柯石英,但由于没有激光拉曼数据,加之照片不典型,并没有被多数人所接受;对大别山超高压变质年龄存在 3 种观点,元古宙、加里东期和印支期,3 种观点都缺乏矿物学和微区年代学结合的证据,即,没有柯石英或金刚石等典型超高压矿物的原位定年;对于苏鲁超高压变质作用的时期有两种观点:元古宙和印支期,但与大别山一样,也缺乏超高压矿物的原位定年证据。

其后,我们在柴北缘片麻岩中发现了典型超高压变质矿物柯石英及榴辉岩中一些有关超高压变质作用的证据(杨经绥等,2001;宋述光等,2001);在秦岭榴辉岩和片麻岩中发现金刚石(杨经绥等,2002);并且在山东威海角闪石化橄榄岩中的锆石中发现柯石英并取得柯石英原位年定为 221 ± 12 Ma(杨经绥等,2002b)。

本文报道了柴北缘都蓝片麻岩含柯石英锆石的原位测年为 440 ± 16.7 Ma(平均 452 ± 14 Ma),代表该样品的超高压变质年龄;报道了秦岭含金刚石

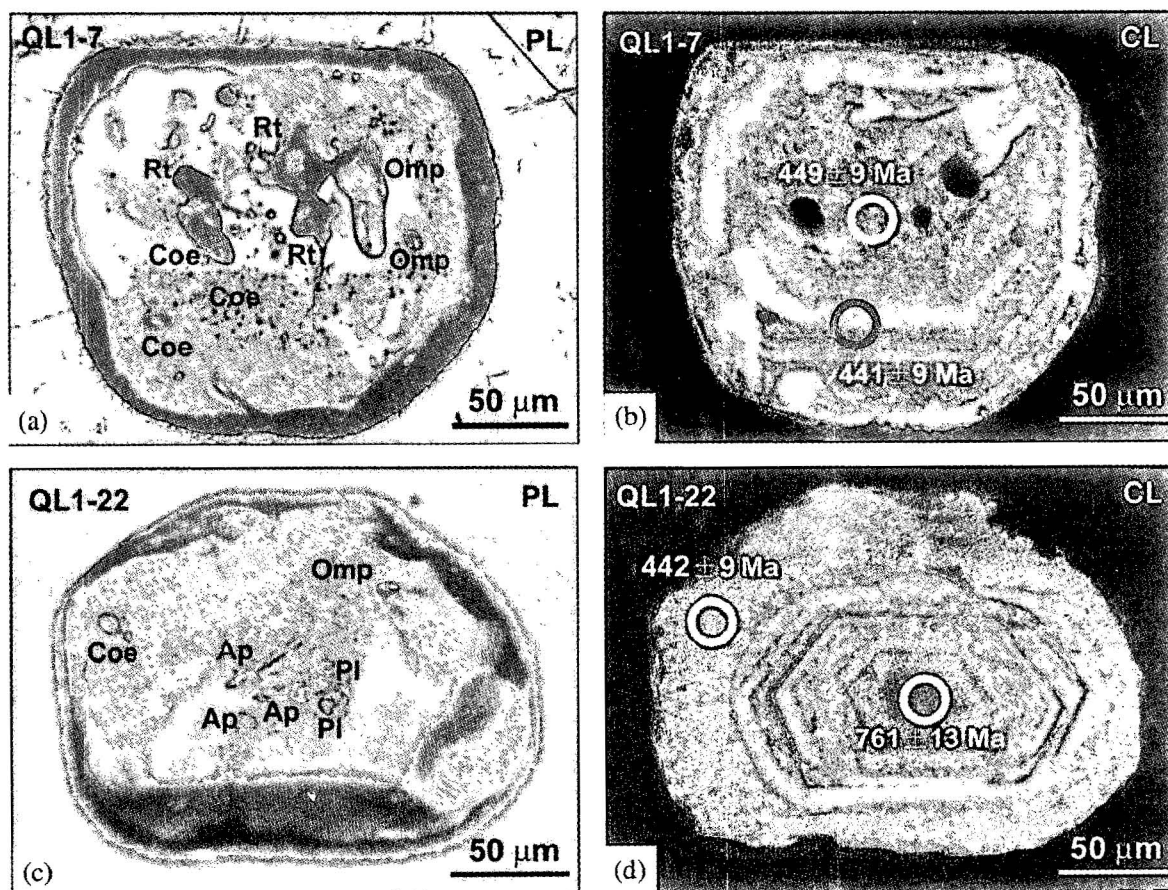


图9 青龙山榴辉岩中锆石的CL影像和包体矿物及SHRIMP U-Pb年龄

Fig. 9 CL image of coesite-bearing zircons and SHRIMP U-Pb ages of Qinglongshan eclogite

片麻岩样品的SHRIMP定年,超高压年龄约为500 Ma,榴辉岩的SHRIMP年龄493 Ma;报道了江苏东海青龙山榴辉岩中测得加里东期和印支期两期超高压变质事件,前者为450 Ma,后者为240~220 Ma,两期年龄均有柯石英等超高压变质矿物为证据。

7 两期超高压变质作用的构造意义的讨论

至此,越来越多证据表明中国中部沿中央造山带存在一条巨大的高压超高压变质带,该带中存在两期超高压变质作用,第一期为早古生代,即通常所说的加里东期,第二期为早中生代,即印支期,至于是否存在更早的元古代超高压变质作用,有待于关键性证据的发现,如含柯石英等超高压矿物的锆石原位微区定年。

造山带中的超高压变质作用通常由陆-陆或洋-陆俯冲碰撞阶段所形成,其反映板块之间的会聚作用,是研究大陆形成、山脉或高原隆升的窗口。中国

中部横贯东西的巨大山链的形成,与中国南北板块及周围一些大陆块的会聚、俯冲、碰撞有关。从目前的研究结果看,中国中央造山带应是一个多期活动的造山带,较早的形成罗德尼亚大陆(Rodinia)的格林威尔(Greivillian)造山运动可能留下了10亿年左右的构造岩浆事件记录,如中央造山带中大量10亿年左右的花岗岩及基性超基性岩类(张建新等,2000;陆松年,2003)。之前是否存在18亿年吕梁运动的记录也是可能的,因为我们在秦岭和山东都发现了榴辉岩的原岩为18亿年的基性岩(杨经绥等,2002a,2002b)。罗德尼亚大陆之后第一次裂解作用可能发生在8亿年左右,柴北缘榴辉岩的原岩时代为800~750 Ma及我们最近在柴北缘早古生代滩洞山群中划分出一套新元古代(800~750 Ma)时期的蛇绿岩洋壳,可能是该期裂解作用的证据;早古生代加里东期的洋盆裂开,蛇绿岩和超高压变质岩石的大量出现是一次十分强烈的板块构造事件,从东到西,沿中央造山带均有分布;加里东期造山事件之

后印支期沿该造山带又有一次大的板块裂解和俯冲碰撞作用,勉略蛇绿岩洋壳的出现及大别—苏鲁印支期超高压变质带的存在应该是不用再怀疑了。由此认为我们在 2000 年提出的巨型超高压变质带是可能存在的,下一阶段应注意在西秦岭和西昆仑寻找超高压岩石或有关岩石单元露头;并应该在大别山也开展锆石中超高压矿物包体与原位定年相结合的研究,证明所测得的年龄能够代表超高压变质事件;认为早古生代超高压变质作用应该同样在大别—苏鲁地区存在,但摸清楚其空间展布恐怕需要大量工作,原因是印支期超高压变质作用的叠加和强烈改造使得这种恢复十分困难。从秦岭—大别造山带区域地质分析,我们认为早古生代超高压变质岩石在北大别有可能保留多些。

近些年,国外对全球板块的会聚、裂解及漂移的事件和过程讨论较多。中央造山带保留和记录了多期大陆裂解、会聚事件,提供了得天独厚的研究大陆动力学的野外实验室。也许当我们将中央造山带中的地质构造事件和造山作用搞清楚了,我们对全球的大陆漂移、一系列大裂解和大会聚的地质作用也就有发言权了。

致谢:锆石 U-Pb SHRIMP 定年分别在美国斯坦福大学和北京离子探针中心完成,锆石 U-Pb SIMS 定年在法国 Nancy 国家实验室完成,美国斯坦福大学刘忠光教授和 Joseph L. Wooden 博士,法国国家实验室的 Etienne Deloule 博士,法国蒙贝利埃大学 Maurice Brunel 教授和 Julie Schneider 博士在多方面的给予帮助,在此表示诚挚感谢。

参 考 文 献

- 曹国权,王致本,张成基. 1990. 山东胶南地体及其边界断裂五莲—荣成断裂的构造意义. 山东地质, 1990, 6(1): 1~15.
- 程裕淇,刘敦一, I S Williams, 简平, 庄育勋, 高天山. 2000. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗岩岩石 SHRIMP 分析. 地质学报, 74(3): 193~205.
- 高山, Yumin Qin, 凌文黎, Neal J McNaughton, 张本仁, 张国伟, 张泽明, 钟增球, 索书田. 2002. 大别山英山和熊店榴辉岩单颗粒锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 地球科学, 27(5): 558~564.
- 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 1995. 北秦岭官坡地区高压—超高压榴辉岩岩相学及变质作用研究. 矿物岩石, 15(4): 1~9.
- 康维国, 胡克, 梁万通, 等. 1996. 华中元古宙高压变质带. 北京: 地质出版社.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 万渝生, 史仁灯, J G Liou, P Tapponnier, T R Ireland. 2001. 阿尔金断裂带印支期走滑活动的地质及年代学证据. 科学通报, 46(16): 1333~1338.
- 刘福来, 许志琴, 宋彪. 2003. 苏鲁地体超高压和退变质时代的厘定: 来自片麻岩锆石微区 SHRIMP U-Pb 定年的证据. 地质学报, 77(2): 230~237.
- 刘良, 孙勇, 校培喜, 等. 2002. 阿尔金发现超高压(>3.8 Ga)石榴二辉橄榄岩. 科学通报, 47(9): 657~662.
- 陆松年. 2003. 青藏高原北部前寒武纪地质初探. 地质出版社, 北京, 125.
- 陆永增. 1998. 苏北超基性岩某些超高压变质特征. 江苏地质, 22(1): 1~9.
- 山东省地质矿产局第六地质队. 1995. 威海等九幅 1:5 万中华人民共和国区域地质调查报告.
- 宋明春, 金振民, 王来明, 张希道, 李远友. 2003. 鲁东官山榴辉岩与围岩接触关系的新发现及其对年代学的启示. 地质学报, 77(2): 239~244.
- 宋述光, 杨经绥. 2001. 柴北缘都兰地区榴辉岩中透长石+石英包裹体: 超高压变质作用的证据. 地质学报, 75(2): 181~185.
- 王来明, 宋彪, 吴洪祥, 等. 1994. 山东榴辉岩的生成时代. 科学通报, 39: 1788~1791.
- 许志琴, 杨经绥, 张建新, 等. 1999. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 73(3): 193~205.
- 许志琴, 杨经绥, 吴才来, 李海兵, 张建新, 戚学祥, 宋述光, 万渝生, 陈文, 邱海峻. 2003. 柴达木北缘超高压变质带形成与折返的时限及机制. 地质学报, 77(2): 163~176.
- 杨建军. 1991. 中国东部山东和江苏北部的榴辉岩、辉石岩和有关的超基性岩. 北京: 地质出版社, 26~52.
- 杨经绥, 许志琴, 白文吉, 等. 1999. 苏鲁地区榴辉岩中发现金刚石——21 世纪我国潜在的寻找金刚石矿床的远景地区. 地学前缘, 6(1): 69.
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 吴才来, 史仁灯, 张建新, 李海兵, 万渝生, 刘焰, 邱海峻, 刘福来, Shigenori Maruyama. 2001. 柴达木盆地北缘早古生代高压—超高压变质带中发现典型超高压矿物——柯石英. 地质学报, 75(2): 175~179.
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵, 等. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩. 科学通报, 43: 1544~1548.
- 杨经绥, 许志琴, 宋述光, 等. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压—超高压变质带的分布及构造意义. 地质学报, 74(4): 156~168.
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 史仁灯, 吴才来, 张建新, 李海兵, 孟繁聪, 戎合. 2002a. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484~495.
- 杨经绥, 许志琴, 吴才来, 刘福来, 史仁灯, J. Wooden, S. Maruyama. 2002b. 含柯石英锆石的 SHRIMP U-Pb 定年: 胶东印支期超高压变质作用的证据. 地质学报, 76(3): 354~372.
- 游振东、韩郁菁、张泽明, 等. 1998. 东秦岭大别高压—超高压变质带. 武汉: 中国地质大学出版社, 1~157.
- 张建新, 许志琴, 杨经绥, 张泽明, 崔军文. 2001. 阿尔金西段榴辉岩岩石学、地球化学和同位素年代学研究及其构造意义. 地质学报, 75(2): 186~197.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 等. 2000. 柴北缘榴辉岩的峰期和退变质年龄: 来自 U-Pb 及 Ar-Ar 同位素测定的证据. 地球化学, 2000, 29(3): 217~222.

- 张建新, 张泽明, 许志琴, 等. 1999. 阿尔金构造带西段榴辉岩的 Sm-Nd 及 U-Pb 年龄. 科学通报, 44: 1109~1112.
- 张建新, 杨经绥, 许志琴, 孟繁聪, 宋述光, 李海兵, 史仁灯. 2002. 阿尔金榴辉岩中超高压变质作用证据. 科学通报, 47(3): 231~234.
- 张雪亭, 吕惠庆, 陈正兴, 等. 1999. 柴北缘造山带沙柳河地区榴辉岩相高压变质岩石的发现及初步研究. 青海地质, 2: 1~13.

References

- Ames L, Tilton G R, Zhou G. 1993. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 21: 339~342.
- Ames L, Zhou G, Xiong B. 1996. Geochronology and geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15: 422~489.
- Cao Guoquan, Wang Zhiben, Zhang Chenji. 1990. Tectonic significance of the Jiaonan terrane, Shandong, and the its marginal Wulian-Rongchen fault. *Journal of Shandong Geology*, 6 (1): 1~15.
- Chavagnac V, Jahn B M. 1996. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chemical Geology*, 133: 29~51.
- Cheng Yuqi, Liu Dunyi, I S Williams, Jian Ping, Zhuang Yuxun, Gao Tianshan. 2000. SHRIMP U-Pb dating of zircons of a dark-coloured eclogite and a garnet-bearing gneissic-granitic rock from Bixiling, Eastern Dabie Area. *Acta Geologica Sinica*, 74 (3): 193~205.
- Cong B L, Wang Q, Zhai M, Zhang R, Ye K. 1994. UHP metamorphic rocks on the Dabie-Su-Lu region, China: their formation and exhumation. *Island Arc*, 3: 135~150.
- Cong B L. 1996. Ultrahigh-pressure Metamorphic rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science Press, 1~224.
- Daniela Rubatto, Dieter Gebauer, Roberto Compagnoni. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*, 167: 141~158.
- Gao Shan, Yumin Qiu, Ling Wenli, et al. 2002. SHRIMP Single Zircon U-Pb Geochronology of Eclogites from Yingshan and Xiongdi. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 558~564.
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D, Dong S. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen. China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215~230.
- Hu N G, Zhao D L, Xu B Q, Wang T. 1995. Petrography and metamorphism study on high-ultrahigh pressure eclogite from Guanpo area, northern Qinling Mountains. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 15(4): 1~9.
- Jahn B M. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites of the Dabie orogen: Implications for continental subduction and collisional tectonics. In Hacker B and Liou J G eds., *When continents collide: Geodynamics and geochemistry of Ultrahigh-pressure rocks*; Dordrecht, Kluwer Acad. Publ, 203~240.
- Jahn B M. 1999. Sm-Nd isotope tracer of UHP metamorphic rocks: implications for continental subduction and collisional tectonics. *International Geology Review*, 41: 859~885.
- Jian P, Liu D, Yang W, Williams I S. 2000. Petrological study of zircons and SHRIMP dating of the Caledonian Xiongdi eclogite, northwestern Dabie mountains. *Acta Geologica Sinica*, 74: 259~264 (in Chinese with English abstract).
- Jian P, Yang W, Li Z, Zhou H. 1997. Caledonian eclogite in Xiongdi, west Dabie: Evidence in isotopic chronology. *Acta Geologica Sinica*, 71(2): 133~141.
- Joseph A Dipietro, Clark E Isachsen. 2001. U-Pb zircon ages from the Indian plate in northwest Pakistan and their significance to Himalayan and pre-Himalayan geologic history. *Tectonics*, 20 (4): 510~525.
- Kang Weiguo, Hu Ke, Liang Wantong et al. 1996. High Pressure Metamorphic Belt of Middle China. Geological Publishing House, Beijing.
- Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Wu Cailai, Wan Yusheng, Shi Rendeng, Juhn G Liou, P Tapponnier, Trevor R Ireland. 2001. Geological and chronological evidence of Indo-Chinese strike-slip movement in the Altyn Tagh fault zone. *Chinese Science Bulletin*, 47(1): 27~32.
- Li S G, Hart S R, Zheng S G, Liu D L, Zhang G W, Guo A L. 1989. Timing of collision between north and south China blocks-The Sm-Nd isotopic age evidence. *Science China*, 32: 1393~1400.
- Li S, Chen Y, Cong B, Zhang Z, Zhang R, Liou D, Hart S R, Ce N. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogite: Timing and processes. *Chemical Geology*, 109: 70~89.
- Li S, Jagoutz E, Chen Y, Li Q. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotope chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie Mountains, central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077~1093.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Song Biao. 2003. Determination of UHP and Retrograde Metamorphic Ages of the Sulu Terrane: Evidence from SHRIMP U-Pb Dating on Zircons of Gneissic Rocks. *Acta Geologica Sinica*, 77(2): 230~237.
- Liu Fulai, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, S Maruyama, J G Liou, I Katayama H Masago. 2001. Mineral inclusions of zircon and UHP metamorphic evidence from paragneiss and orthogneiss of pre-pilot drillhole CCSD-PP2 in north Jiangsu Province, China. *Chinese Science Bulletin*, 46(12): 1037~1042.
- Liu L, Wang Y, Sun Y, Xiao P, Chen D, Luo J, Che Z. 2001. The ultrahigh-pressure (> 3.5 GPa) magnesite-bearing garnet ilmenite in Altyn Tagh, northwestern China. Abstract of the

- UHPM Workshop 2001, at Waseda University, Fluid/Slab/mantle Interactions and Ultrahigh-P Minerals, 294~297.
- Liu Liang, Sun Yong, Jiap Pixi. 2002. Discovery of ultrahigh pressure ($>3.8\text{Ga}$) garnet peridotite in ALtun. Chinese Science Bulletin, 47 (9): 657~662.
- Lu Songnian. 2003. Preliminary Study of Precambrian Geology in the North Tibet-Qinghai Plateau. Geological Publishing House, Beijing, 125.
- Lu Yongzhen. 1998. Some Ultra-high Pressure Metamorphic Features of Ultrahigh-pressure Rocks in Northern Jiangsu. Jiangsu Geology, 22 (1): 1~9.
- Okay A L, Xu S, Sengor A M C. 1989. Coesite from the Dabie Shan eclogites, central China. European Journal of Mineralogy, 1: 595~598.
- Shandong Geological Bureau. 1995. 1:50,000 Geological Map and report of Weihai, Shandong Province. Bureau of Geological Survey of Shandong Province, China (in Chinese).
- Song Mingchun, Jin Zhenmin, Wang Laiming, Zhang Xidao, Li Yuanyou. 2003. New Discovery of the Contact Relation between Eclogite and Country Rocks in Guanshan Eastern Shandong and Its Enlightenment for Chronology. Acta Geologica Sinica, 77(2): 239~244.
- Song S G, Yang J S. 2001. Sanidine + quartz inclusions in Dulan eclogites: evidence for UHP metamorphism on the north margin of the Qaidam basin, NW China. Acta Geologica Sinica, 75: 180~185.
- Wang Laiming, Song Biao, Wu Hongxiang, et al. 1994. Age of the eclogite in Shandong province. Chinese Science Bulletin, 39: 1788~1791.
- Wang X, Liou J G, Maruyama S. 1992. Coesite-bearing eclogites from the Dabie Mountains, Central China: Petrology and P-T path. Journal of Geology, 100: 231~250.
- Xu S, Okay A I, Ji S, Sengor A M C, Su W, Liu Y, Jiang L. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. Science, 256: 80~82.
- Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X. 1999. Comparison of the tectonic units on both sides of the Altyn Tagh fault and the mechanism of lithospheric shearing. Acta Geologica Sinica, 73: 193~205.
- Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Wu Cailai, Li Haibing, Zhang Jianxin, Qi Xuexiang, Song Shuguang, Wan Yusheng, Chen Wen, Qiu Haijun. 2003. Timing and Mechanism of Formation and Exhumation of the Qaidam Ultra-Pressure Metamorphic Belt. Acta Geologica Sinica, 77(2): 163~176.
- Xu Zhiqin, Yang Wenchai, Zhang Zeming, Yang Tiannan. 1998. Scientific Significance and Site-selection Researches of the First Chinese Continental Scientific Deep Drillhole. Continental Dynamics, 3 (1~2): 1~13.
- Xu Zhiqin. 1987. Etude tectonique et microtectonique de la chaîne paléozoïque et triasique des qinlings (Chine), académie de Montpellier Université des sciences et techniques du Languedoc.
- Yang J J. 1991. Eclogites, garnet, pyroxenites and related ultrabasics in Shandong and north Jiangsu of east China. Beijing: Geological Publishing House, 26~52 (in Chinese).
- Yang J J, Jahn B M. 2000. Deep subduction of mantle-derived garnet peridotites from the Su-Lu UHP terrane in China. Journal of Metamorphic Geology, 18: 167~180.
- Yang J S, Xu Z Q, Li H B, Wu C L, Cui J W, Zang J X, Chen W. 1998. Discovery of eclogite at the northern margin of Qaidam basin, NW China. Chinese Science Bulletin, 43: 1755~1760.
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, Chu J Y, Zhang R Y, Liou J G. 2001. Tectonic significance of caledonian high-pressure rocks in the Qilian-Qaidam-Altun mountains, NW China. The Geological Society of American, Memoir 194: 151~170.
- Yang Jingsui, Song Shuguang, Xu Zhiqin, et al. 2001. Discovery of coesite in the North Qaidam Early Paleozoic ultrahigh-high pressure metamorphic Belt, NW China. Acta Geologica Sinica, 75(2): 175~179.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Bai Wenji et al. 1999. Discovery of diamond in the eclogite of Sulu, potential diamond prospect in China. Earth Science Frontiers, 6(1): 69.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, Shi Rendeng, Wu Cailai, Zhang Jianxin, Li Haibing, Meng Fancong, Rong He. 2002a. Discovery of diamond in North Qinling: evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between North China and Yangtze plates. Acta Geologica Sinica, 76 (4), 484~495.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Song Shuguang, Wu Cailai, Shi Rendeng, Zhang Jinxin, Wan Yusheng, Li Haibing, Jin Xiaochi, Jalivet M. 2000. Discovery of eclogite in Dulan, Qinghai Province and its significance for the HP-UHP metamorphic belt along the central orogenic belt of China. Acta Geologica Sinica, 74: 156~168.
- Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Song Shuguang, Wu Cailai, Shi Rendeng, Li Haibing and Maurice Brunel. 2002b. Early Palaeozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. Terra Nova, 14 (5): 397~404.
- Yang J S, Wooden J L, Wu C L, Liu F L, Xu Z Q, Shi R D, Katayama I, Liou J G, Maruyama S. 2003. SHRIMP U-Pb dating of coesite-bearing zircon from the ultrahigh-pressure metamorphic rocks, Sulu terrane, east China. Journal of Metamorphic Geology, 21: 551~560.
- Ye K, Cong B, Ye D. 2000. The possible subduction of continental material to depths greater than 200km. Nature, 407: 734~736.
- You Zhendong, Han Yuqing, Zhang Zheming, et al. 1998. The High- and Ultra-high Pressure Metamorphic Belt of East Qinglin-Dabie. Publishing House of Geological University of China (Wuhan), 1~157.
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. Lithos, 56 (2~3): 187~206.
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, Meng F C, Song S G, Li H B, Shi R

- D. 2002. Evidence for the ultrahigh-pressure metamorphism in Altun eclogite. *Chinese Science Bulletin*, 47: 231~234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Yang J S, Xu Z Q, Meng F C, Song S G, Li H B, Shi R D. 2002. Evidence for the ultrahigh-pressure metamorphism in Altun eclogite. *Chinese Science Bulletin*, 47: 231~234. (in Chinese with English abstract).
- Zhang J X, Zhang Z M, Xu Z Q, et al. 2001. Petrology and geochronology of eclogites from the western segment of the Altyn Tagh, northwestern China. *Lithos*, 56 (2~3): 187~206.
- Zhang Jianxin, Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Zhang Zemin, Cui Junwen. 2001. Petrology, geochemistry and geochronology of eclogites from the western segment of the Altun tectonic belt, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 75(2): 186~197.
- Zhang JianXin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Zeming, Chen Wen, Li Haibing. 2000. Peak and retrograde age of eclogites at the northern margin of Qaidam basin, Northwestern China: Evidences from U-Pb and Ar-Ar dates. *Geochimica*, 29 (3): p. 217~222.
- Zhang Jianxin, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Zhang Zheming, Li Haibing, Chen Wen. 2000. U-Pb and Ar-Ar ages of eclogites from the northern margin of the Qaidam basin, northwestern China. *Journal of the Geological Society of China (Taiwan)*, 43 (1): 161~169.
- Zhang R Y, Shu J F, Mao H K, Liou J G, 1999. Magnetite lamellae in olivine and clinohumite from Dabie UHP ultramafic rocks, central China. *Amer. Mineral.*, 84: 564~569.
- Zhang Xueting, Lu Huiqing, Chen Zhengxing et al. 1999. Discovery of high P metamorphic rock of eclogitic facies in Shaliuhe, North Qaidam Mountains. *Journal of Qinghai Geology*, 2: 1~13.

Two Ultrahigh Pressure Metamorphic Events Recognized in the Central Orogenic Belt of China: Evidence from the U-Pb Dating of Coesite-bearing Zircons

YANG Jingsui, LIU Fulai, WU Cailai, WAN Yusheng, ZHANG Jianxin, SHI Rendeng, CHEN Songyong
Laboratory of Continental Dynamics, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing, China, 100037

Abstract

A ~4000 km long ultrahigh pressure metamorphic (UHPM) belt has been set up based on the discovery of the coesite-bearing Altun-North Qaidam UHPM terrane in the west of the Central Orogenic Belt of China (COB), the finding of metamorphic diamond in Qinling in the middle, and the Dabie-Sulu UHPM terrane in the east. SIMS and SHRIMP U-Pb dating of zircons from coesite-bearing UHPM rocks indicate two UHPM events in the belt; one is occurred during the Early Paleozoic and the other during the Triassic. Coesite-bearing zircons from gneiss of North Qaidam yielded an UHP metamorphic age of 452 ± 13.8 Ma and a retrograde age of 419 ± 6.7 Ma. A diamond-bearing gneiss sample of Qinling gave a lower intercept age of 502 ± 45 Ma, and an upper intercept age of 1545 ± 100 Ma, while a Qinling eclogite sample gave a lower intercept age of 493 ± 170 Ma and an upper intercept age of 1381 ± 82 Ma. In both samples the lower and upper intercept ages are interpreted as UHPM ages and protolith ages of the rocks, respectively. Coesite-bearing zircons from the Qinglongshan eclogite in south Sulu yielded Early Paleozoic UHPM ages, 441 ± 9 Ma, 449 ± 9 Ma and 442 ± 9 Ma, whereas the core of zircon with plagioclase and apatite inclusion in it gave a protolith age of 761 ± 13 Ma. The age data suggest that the Early Paleozoic UHPM rocks extend from west to east for about 4000 km across the COB and the Triassic UHPM belt extends within the Dabie-Sulu region for about 1000 km. Based on the available geochronological and geochemical data, we suggest the following tectonic model for the evolution of the COB. At about 1000 Ma the area was amalgamated to form the Rodinian continent, which contained some oceanic volcanic rocks, possibly as ophiolitic fragments. This part of Rodinia was then rifted at about 800~750 Ma to form an oceanic basin with a variety of MORB and ocean island basalts. Closure of this ocean basin produced the Neoproterozoic ophiolites and granitic gneisses. The UHPM rocks along with subduction related island arc volcanic rocks and granites of Early Paleozoic age suggest a second cycle from rifting to subduction along the COB; and the Triassic UHPM rocks recorded a final subduction and collision event between the North China and South China blocks.

Key words: Central Orogenic Belt; North Qaidam Mountain; Dabie-Sulu; Qinling UHPM