

超高压变质带的全球分布及其大地构造意义

游振东

(中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

摘要: 对全球28个超高压变质岩产地的地质对比研究发现,超高压变质带的发育,与弧-陆和陆-陆碰撞造山带关系密切。碰撞造山带多发育于活动的大陆边缘。在那里,冷的陆壳物质可以深俯冲到另一个相对稳定的未俯冲的板块之下,其深度可以超过90~120 km,在高压达>2.5 GPa和温度约600℃或更高条件下,导致超高压特征矿物如,柯石英、金刚石等的生成。在空间分布上,超高压变质带集中于欧亚大陆及其周缘,澳洲和北美目前尚未有报道。从时代上看,超高压变质带多出现于显生宙,前寒武纪只有晚元古代(泛非运动期)少数两例。说明以超高压变质带为特征的碰撞造山作用,是显生宙以来,陆壳增生达到一定的规模后,才出现的构造体制;Rodinia和Pangea古大陆的裂解,使地温梯度降低,从而有利于超高压变质带的生成。

关键词: 超高压变质岩;碰撞造山带;深俯冲作用;构造体制;地温梯度

中图分类号: P588.3; P54

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493(2007)03-0383-09

1 引言

自从1984年Chopin在西阿尔卑斯的Dora Maira的变质岩中发现柯石英微粒包裹物以来,各国科学家发现了愈来愈多的新产地(Chopin, 2003)。迄今为止已有16个造山带发现柯石英和变质金刚石微粒包裹物等超高压矿物。如果以柯石英的出现作为岩石发生超高压变质的开始,则超高压变质的温压条件应该是: $T > 600^{\circ}\text{C}$, $p > 2.5 \text{ GPa}$ (Brown, 2007)。所以超高压变质作用是岩石经过深俯冲的地质记录。绝大多数超高压变质带位于欧亚大陆内部的碰撞带。鉴于欧亚大陆是由许多微陆块拼合而成,碰撞带就好比拼合时碰撞的“结痂”,其中最容易出现超高压变质的记录并保留下来。如今,全球只有北美和澳洲还没有发现超高压变质的岩石。本文是在对比全球已发现的超高压变质带地质条件的基础上,探索其时空分布的规律并从中引出其所蕴涵的全球构造演化的节律性的一些信息。

2 超高压变质带的全球分布

迄今为止,世界上已有报道的超高压变质岩

的产地有28个,如果把属于一般高压变质的蓝片岩、榴辉岩也统计在内,则其数目当成倍增长。现今报道的超高压变质带在全球分布如图1所示。

从图1看出超高压变质带多分布在前寒武纪克拉通周围的显生宙造山带的范围内。其中又以欧亚大陆的周缘最为密集。如果以西伯利亚陆块为核心,自北而南可以识别出:(1)亚洲复合山链与中国中央造山带;(2)喜马拉雅造山带;(3)亚洲大陆南缘造山带等3个单位。通过这些构造单位来考察超高压变质矿物的分布,岩石组合,超高压变质作用的温压条件以及超高压变质岩的构造特征等。不难从中总结出超高压变质在全球的空间分布的某些规律。

2.1 亚洲复合山链与中国中央造山带

亚洲复合山链(图2)北端起自极地乌拉尔的Marun Keu(图2中的13)向南经Ufalei到南乌拉尔的Maksyutov,基本上是沿乌拉尔分布的,是夹持在俄罗斯和西伯利亚两个克拉通之间的造山带。现以Maksyutov为例,说明超高压变质带的组成。

Maksyutov杂岩呈南北走向(10 km × 120 km),其中榴辉岩呈分散团块状或石香肠状夹在蓝闪石或云母片岩之中。由于后期岩体的侵入

收稿日期:2007-04-05;修回日期:2007-07-12

基金项目:国家重点基础研究发展规划项目(2003CB716601);国家自然科学基金(40399142, 40472036)资助

作者简介:游振东 男,1928年生,教授;北京大学地质学系(1952)毕业。研究方向:变质地质学。通信地址:北京海淀区成府路20 眷28-162, E-mail: zhendongyou@tom.com

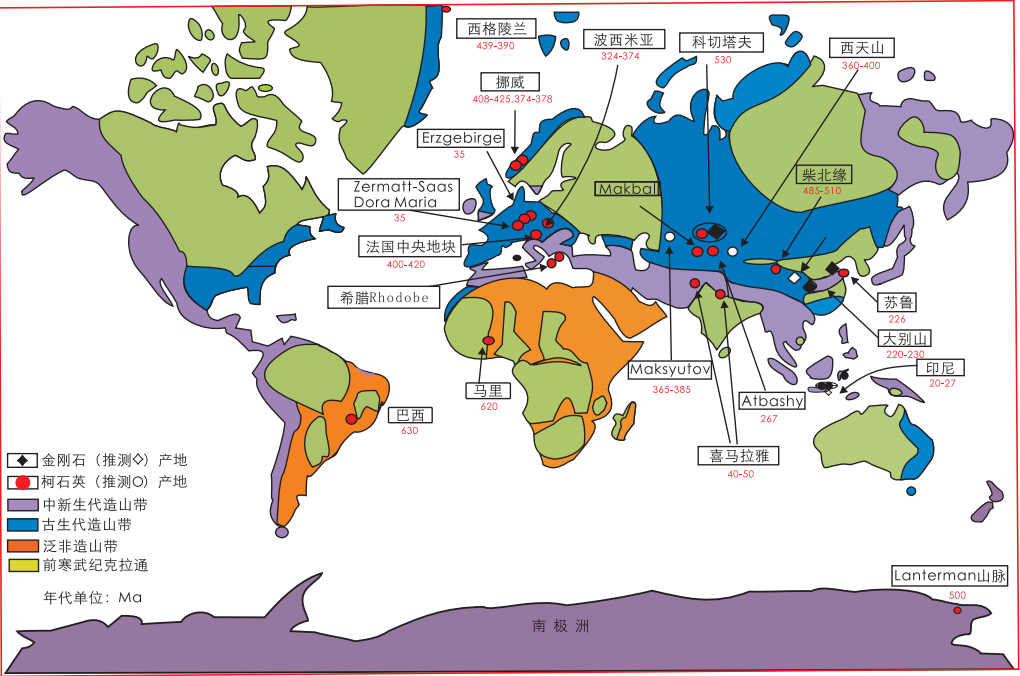


图1 全球超高压变质岩的分布图 (CCSD 2005)
Fig. 1 Distribution map of UHPM rocks in the world (issued by CCSD, 2005)

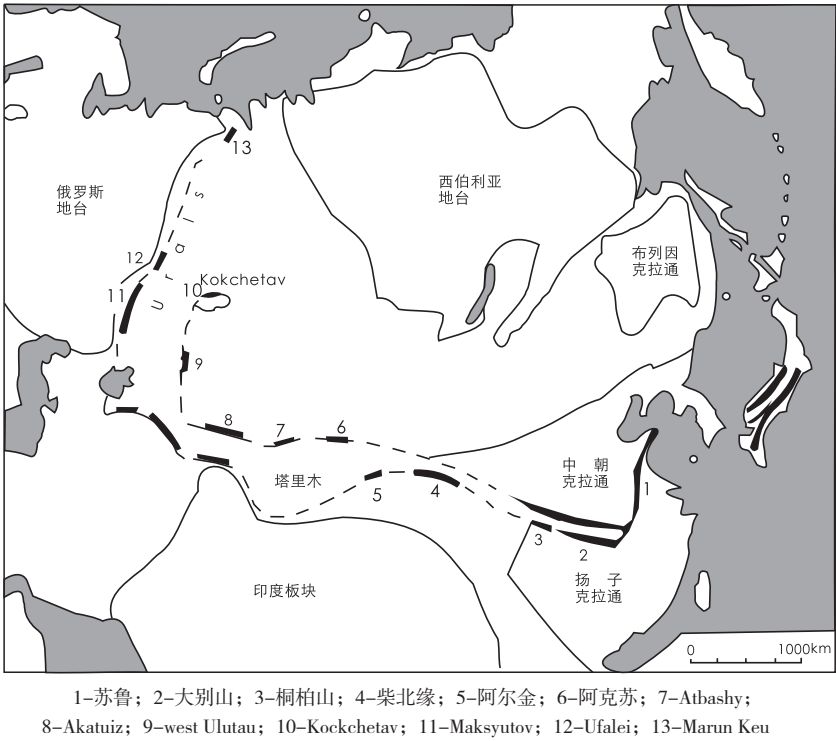


图2 亚洲复合山链位置略图
(据Marakushev et al, 2001)
Fig. 2 The setting of the Asian composite mountain chain

及相应的变质作用，使榴辉岩的定年结果十分分歧。目前据金红石U/Pb谐和曲线定年为 378 ± 4 和 79 ± 5 Ma；榴辉岩的矿物成分：石榴石+绿辉石+

金红石；但是常受到绿帘蓝片岩相变质的叠加；榴辉岩中的石榴石是富铁的 $F = 50\% \sim 75\%$ ($F = Fe^{2+} / (Mg + Fe^{2+})$)。绿辉石中 $Jd = 40.3 \sim 52.2$ 。根据石榴石-单斜辉石温度计， $Jd + 石英 \rightarrow 钠长石$ 反应曲线作为压力计算得： $T = 1060 \sim 680^\circ C$ ， $p = 2.23 \sim 1.41$ GPa。Maksyutov榴辉岩的PT轨迹是降温减压型的。地质上反映出俄罗斯地台与西伯利亚克拉通在泥盆纪时期的碰撞，但后来哈萨克斯坦与俄罗斯地台的三叠纪碰撞对他仍有影响。

中国中央造山带：乌拉尔造山带在Maksyutov以南折转向东，自卡拉库姆沙漠的北部经帕米尔沿塔里木盆地南缘延伸，被北东向的阿尔金构造带截断，向北推即为柴北缘和祁连山，东与秦岭、桐柏、大别相连，又北东向错动到苏鲁，构成整个中国中央碰撞造山带（图3）。这样洲际的巨型山链，必然是具有复杂的

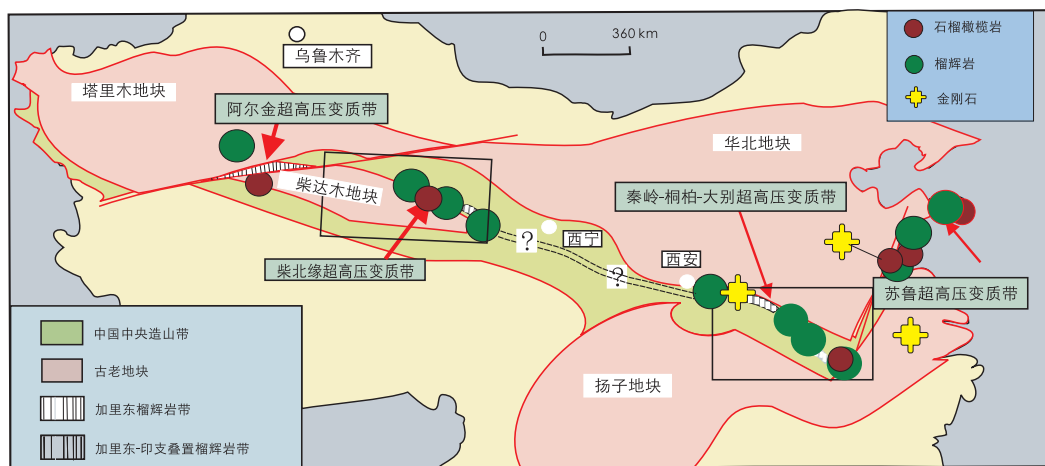
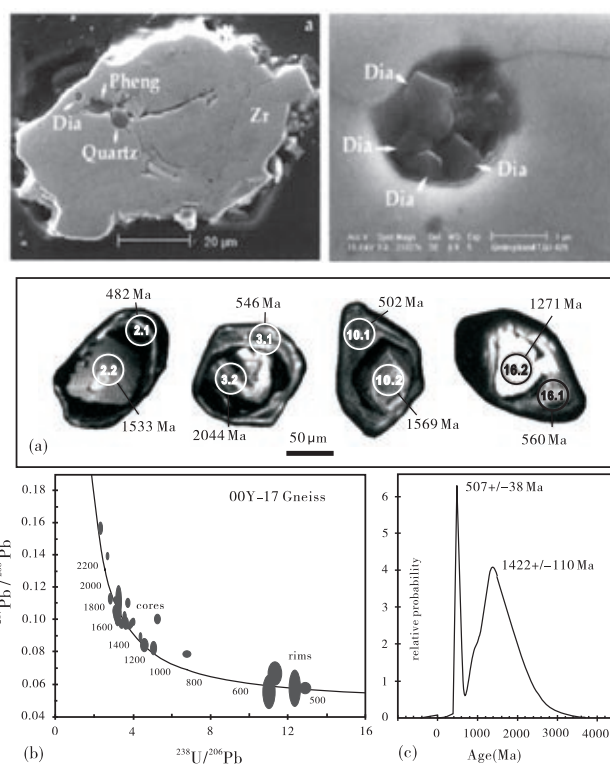


图3 中国中央碰撞造山带

Fig. 3 The central collisional orogenic belt of China (issued by CCSD, 2005)

历史。目前年代学资料表明, 桐柏、秦岭、祁连及其以西为加里东造山带, 大别、苏鲁则明显属印支造山带。这样构造历史复杂的造山带, 必有各不相同的变质 p - T - t 轨迹 (Haugerud and Zen, 1991), 有关大别—苏鲁地区的超高压变质作用历史和 p - T - t 轨迹, 已经有了较系统的认识。仅管所求的温压条件有所不同, 但是变质 p - T - t 轨迹总体显示顺时针趋势, 并且有明显的近等温减压的过程 (张泽明, 1993; 张泽明等, 2005, 2006; Liu et al, 2006)。结合东海大陆科学钻主孔的岩心研究, 刘福来等 (2003) 对苏鲁地体的榴辉岩及其周围的片麻岩作了系统的锆石微区SHRIMP U-Pb定年, 结果表明榴辉岩及其周围的片麻岩具有相似的形成和折返时限: 形成年龄220~234 Ma; 折返年龄202~219 Ma。在中央造山带内, 从东到西已有多处报道发现柯石英。大别, 苏鲁和秦岭的东段 (河南西峡北部) 则发现有金刚石 (Xu, 1992; Yang, 2003)。据Yang等报道, 东秦岭含金刚石片麻岩中锆石SHRIMP定年约在500 Ma, 即大致为早古生代 (图4)。关于大别、苏鲁陆壳俯冲的深度问题, 叶凯等 (Kai Ye et al, 2000) 据苏鲁榴辉岩中石榴石富Na, Ti的出溶物, 恢复其原先的石榴石应为majoritic, 这说明大陆物质俯冲的深度可达200 km。最近刘良 (2006) 等在阿尔金构造带的榴辉岩中发现了斯石英退变质的出溶物。这些资料都说明中央造山带具有深俯冲的历史。

中亚Kokchetav和天山一带的单斜辉石岩-榴辉岩组合, 总体走向也是从南北向转为东西, 与



国土资源部大陆动力学重点实验室年报 (2004.9-2005.12)

图4 东秦岭的金刚石和含金刚石片麻岩中的锆石SHRIMP定年

Fig. 4 Diamond from eastern Qinling and the zircon SHRIMP dating of the diamond-bearing gneiss

上述乌拉尔—中国中央造山带带相平行。东起阿克苏 (新疆)—Atbashi—Makbal-Aktuiz—western Ulutau—Kokchetav (哈萨克斯坦), 该带在阿克苏以北进入我国, 即西南天山的420~400 Ma蛇绿岩和蓝片岩带, 为晚志留世洋壳俯冲产物。关于中国的蓝片岩带的分布, 董申保院士曾有精辟的论

述(董申保1990; Dong et al, 1999)。

Kokchetav地块是中亚增生带中的一个孤立岩块,夹持于西伯利亚地台,俄罗斯地台和哈萨克斯坦—北天山微古陆之间。Kokchetav杂岩是由破碎再拼合所组成晚里费前的硅铝壳、部分具有透入性变形的前寒武纪基底,周围包绕着显生宙褶皱带。老基底的年龄是2.2~2.3 Ga (Dobretsov et al, 1995),被文德纪上元古代盖层所覆盖,其上还有中上古生代的地台并弧后盆地沉积的超覆。晚奥陶世同构造花岗岩,志留、泥盆纪非造山花岗岩体均侵入于Kokchetav杂岩中。杂岩整体上包含7个前奥陶纪单元组成的构造混杂岩,其中有4个变质后的侵入体和沉积变质形成的片岩,副片麻岩中含有生物成因的碳。微粒金刚石赋存于沉积变质矿物:石榴石,蓝晶石,单斜辉石,锆石等变晶中。在互层状黑云母片麻岩和榴辉岩的石榴石、锆石中含有柯石英微粒包裹物,变质作用压力达4.0 GPa;温度>900℃。这些超高压变质年龄大致530~540 Ma (Sm-Nd, 锆石U-Pb),推断晚文德—早寒武世时期,深俯冲深度约达125 km (Ernst and Liou, 2000)。

Makbal位于吉尔吉兹斯坦境内的北天山西段,含有两个基本岩性单元:即Neldy和Makbal两个组。Makbal组以石英片岩与泥质片岩互层为特征,中夹薄层大理岩和斑花大理岩。榴辉岩和角闪石化榴辉岩呈1米至数十米厚的似层状和透镜体,在该组石榴石硬绿泥石滑石片岩的石榴石中,曾经发现柯石英的多晶石英假像(Tagiriand Bakirov, 1990)。超高压变质组合是:柯石英+铁铝榴石+硬绿泥石+滑石+多硅白云母(Si = 3.42 p.f.u.) + 金云母+金红石。榴辉岩受到后期退变质, $p = 2$ GPa, $T = 560^\circ\text{C}$, 其中钠云母K-Ar法年龄为480 Ma。

Atbasyh位于吉尔吉斯境内的南天山山脉,在泥质和硅质片岩中夹超高压榴辉岩薄层。其上不整合覆盖着晚古生代的磨拉石层和硅质火山岩系,含柯石英的榴辉岩中有自形的石榴石,绿辉石和多硅白云母,后期有绿片岩相矿物的叠加,如绿泥石、阳起石和钠长石等。在石榴石和绿辉石中均发现柯石英的多晶石英假像。石榴石的成分环带明显,核部低镁(Pyr = 5.8~8.6)高钙(Grs

= 32~38),含有绿辉石、榴石和石英等微粒包裹物;幔部则高镁而贫钙,含有柯石英多晶石英假像和绿辉石等微粒包裹物;边部不含任何包裹物,峰期变质温度 $T = 660^\circ\text{C}$,压力 $p = 2.5$ GPa, Rb-Sr矿物等时线年龄为270 Ma。

2.2 喜马拉雅山链

喜马拉雅山链是印度板块与欧亚大陆碰撞所形成的。一般认为,印度板块俯冲于欧亚大陆之下,沿喜马拉雅山链可以看到东西两个构造结。东构造结位于我国境内即Namjagbarwa,刘焰等在那里发现了高压麻粒岩(Liu and Zhong, 1997);西构造结位于巴基斯坦境内的Kaghan, O'Brien (1999)在其榴辉岩中发现了柯石英。

巴基斯坦Kaghan山谷在构造上属于Indus缝合带,前人在该缝合带发现蓝片岩。后来Spencer在Kaghan Valley高喜马拉雅结晶杂岩中发现高压榴辉岩;O'Brien (1999)在距Indus缝合带仅几km处的Loihalo Nala的榴辉岩绿辉石中发现柯石英,最大颗粒60 μm 。柯石英的边有栅状石英冠状体,其周围辉石中见放射状裂隙。榴辉岩呈块状,由细粒(<1mm)的石榴石、绿辉石组成,内有拉长状的金红石,边部已变成榴石;毫米级的多硅白云母被后期生长的粗粒(达1cm)的无定向角闪石所包裹。石榴石具环带结构,核部富Ca ($\text{Alm}_{50}\text{Prp}_{18}\text{Grs}_{29}\text{Sps}_3$)边部贫Ca ($\text{Alm}_{56}\text{Prp}_{21}\text{Grs}_{21}\text{Sps}_1$),绿辉石Jd = 25~33,多硅白云母Si = 3.6 p.f.u., O'Brien运用石榴石绿辉石Fe-Mg分配温度计, Jd等值线压力计求得 $p > 1.4$ GPa, $T = 650^\circ\text{C}$ 。榴辉岩中柯石英的出现推断俯冲深度至少75 km,石榴石、绿辉石Sm-Nd法年龄为 49 ± 6 Ma,代表超高压峰期变质年龄属始新世(Eocene),从而为建立印度亚洲板块碰撞模型提供了事实证据(O'Brien et al, 2001)。

2.3 亚洲大陆周缘: 印尼高压超高压变质带

在印尼,高压超高压变质岩有多处出露,最典型的要数苏拉威西。苏拉威西是一个K字形的岛屿,大地构造上夹持于欧亚板块、太平洋板块和Sundaland克拉通之间。

苏拉威西地区的前第三纪基底由一系列的混杂岩、蛇绿岩和不同变质程度的增生杂岩的逆冲岩片所组成,其中有一些是超高压变质岩。

Bantimala位于苏拉威西的南端, 出露的白垩纪增生杂岩中有榴辉岩, 石榴石-蓝闪石岩 ($p = 1.8 \sim 2.4$ GPa, $T = 580 \sim 620^\circ\text{C}$), 硬玉-石榴石石英岩 ($p > 2.7$ GPa, $T = 720 \sim 760^\circ\text{C}$)。在这些岩石的锆石和硬玉中含有柯石英微粒包裹物, 证明属于超高压变质。在东苏拉威西中部, 深度 > 60 km 的石榴二辉橄榄岩与高压片岩共生 ($p = 2.2 \sim 2.8$ GPa, $T = 1\,000 \sim 1\,100^\circ\text{C}$)。

此外, 印尼爪哇中部的Luk Ulo榴辉岩, 硬玉-蓝闪石石英岩 ($p = 2.2$ GPa, $T = 530^\circ\text{C}$), 这些高压超高压岩石是Sundaland克拉通的边缘于早白垩世向北俯冲所引发, 其折返则起因于Gondwana古陆残片与Sundaland克拉通边缘的碰撞, 时代约为 $120 \sim 115$ Ma, 即中白垩世的Aptian期。(Ernst and Liou, 2000)。

从上述超高压变质带的空间分布可以看出:

(1) 90%的超高压变质带位于欧亚大陆范围内, 而且多与碰撞造山带有关, 这是因为超高压变质作用要求很低的地温梯度, 有的甚至进入变质作用的禁区(即地温梯度 $< 5^\circ\text{C}/\text{km}$), 只有陆壳的深俯冲或因碰撞使陆壳增厚, 才会有这样的变质条件; (2) 陆内碰撞造山带往往有着复杂的变质历史, 大多数超高压矿物在后期减压退变质的过程中变得不稳定, 从而分解为其他相对低压的矿物或矿物组合, 这就大大增加识别他们的难度, 有些地区没有发现超高压矿物证据, 可能只是工作还没有到位; (3) 长英质的岩石比镁铁质的岩石更难以保存它们的超高压矿物信息, 现今长英质片麻岩中的柯石英, 绝大多数是在锆石中发现的微细粒包裹物, 激光拉曼显微技术是发现它们的重要手段。

2 超高压变质作用的时代

几种主要的变质岩, 都有随时代分布的特点, 它能反映地球演化的节律。关于高压变质蓝片岩相岩石的随时间变化的规律, Ernst (1972) 曾经作过统计, 认为高压变质岩主要限于显生宙变质带。Dobretsov (1987) 在评述亚洲蓝片岩相变质的周期性时, 还发现时代上的周期性: 大致在中生代 30 Ma 一周期, 古生代是 $30 \sim 60$ Ma 为一周期。笔者据此曾经认为超高压变质的时代分布必

然也有其周期性(游振东, 1997)。

2.1 前寒武纪的超高压变质

全球已发现的28个超高压变质岩产地中, 90%属于显生宙, 前寒武纪的产地很少, 现已有报道的是加拿大的Snowbird, 却只不过属于高压麻粒岩, 真正发现前寒武纪超高压变质作用的是西非的马里和巴西的San Francisco克拉通的南部和东北边缘的泛非造山带。

Snowbird构造带位于西加拿大地盾, Saskatchewan省的北部, 由下地壳高压麻粒岩和榴辉岩相的岩石组成。据计算, 基性麻粒岩最低变质温压条件: $p = 1.5 \sim 1.9$ GPa, $T = 900 \sim 1000^\circ\text{C}$, 榴辉岩压力稍高, 达 2.0 GPa。榴辉岩中的锆石具扇状双晶, 中包裹石榴石、蓝晶石、刚玉和石英等高压变质包裹物, U-Pb定年为 1.9 Ga; 另一个包裹在绿辉石中的锆石, 用SHRIMP测的变质年龄为 $1\,905.0 \pm 19$ Ma, 由此判断高压变质是古元古而非太古代。

泛非造山带: 西非马里和巴西都先后报道发现超高压变质带。大部分非洲大陆是通过泛非造山运动 ($800 \sim 550$ Ma) 而稳定的, 由西非、刚果和Karahari克拉通与几个岛弧、微古陆, 于晚元古至早寒武世拼接构成冈瓦纳超大陆。西非和刚果克拉通之间的缝合线上有榴辉岩和蓝片岩构成推覆体, 覆盖在西非克拉通的前缘。西Hoggar, 中Hoggar (中Sahara) 和Lato Hill等地的含石英榴辉岩, 估算其变质温度和压力为 $T = 700 \sim 750^\circ\text{C}$, $p > 1.4 \sim 1.7$ GPa。在马里北部的Trans-Sahara段的超高压变质的不纯大理岩的一个镁铁质团块绿辉石中, 发现柯石英微粒包裹物; 在其附近的榴辉岩质的变质沉积岩石榴石中发现柯石英的假象。榴辉岩质云母片岩中, 超高压变质矿物组合包括: 蓝晶石, 富镁铝石榴石, 硬玉质绿辉石, 多硅白云母 ($\text{Si}_{3.35 \sim 3.40}$) 金红石等。温压条件: $T = 700 \sim 750^\circ\text{C}$, $p > 2.7$ GPa。据云母片岩中的多硅白云母Ar-Ar变质年龄: $1\,045 \pm 9$ Ma, 榴辉岩呈厚约 3 km 的岩片盖在低级变质的绿片岩相千枚岩之上; 岩片的顶板是Gouma被动边缘的页岩建造。此类近水平的推覆岩片说明大部分的被动大陆边缘陆源碎屑沉积曾深俯冲达 90 km 以上地幔深度。另外在该处以南 $1\,500$ km 的Togo的被动大陆边缘发现蓝晶石榴辉岩, 其中锆石的年龄约 820 Ma。

2.2 超高压变质带的时代对比

根据以上所述，不妨将已经报道的28个超高压变质带，分别大致按其时代从老到新为序，列表如下（表1）：

把以上资料投绘到年代-频数图上，可以得到一张概略的超高压变质岩时代分布频数图（图5）。从中可以看出：报道显生宙超高压变质的占主导地位，元古宙只有2处，太古宙尚无报道。

3 关于地球演化节律的思考

自从星子的聚结（accretion）形成原始地球之后，其构造作用极不同于今日，那时地球表层盖着厚达>700 km的岩浆海洋，此时下沉的铁滴（iron blob）构成地核，释放出大量的重力能，这就从内部对地球加热，所以，在这个阶段地球上并没有刚性的板块。大概在冥生宙（Hadean）时期（4.6~4.0 Ga），开始形成原始海洋，地表温度才

表1 超高压变质的时代
Table 1 The evolution of ultrahigh-pressure metamorphic belts with Timing

序号	时代（Ma）	产地	构造位置	特征矿物	岩石类型/共生杂岩	资料来源
1	820~1045±9	马里	泛非造山带	柯石英	榴辉岩质云母片岩	Caby（1994）
2	630	巴西	泛非造山带	柯石英	榴辉岩、蓝晶麻粒岩	Vaughn（2003）
3	450	格陵兰东北	加里东带：劳亚/波罗的地块边缘	柯石英	蓝晶榴辉岩	Gilotti（2004）
4	400	西挪威：Selje	“	Coe, Di	白云石榴辉岩	Smith（1984）； Dobrzhinskaya（1993）
5	530±7	Kokchetav[哈]	中亚增生带的孤立岩块	Di, Coe	石榴辉石岩，黑云母片麻岩	Sobolev and Shatsky（1990）
6	480	Makbal[吉]	吉尔吉斯天山带	Coe	榴辉岩/Makbal Fm	Tagiri（1995）
7	360±7	Erzgebirg[德]	Bohemia 华力西带	Di, Coe	榴辉岩，片麻岩	Massonne（1998）
8	400~420	French massif Central[法]	欧洲华力西带	Coe	榴辉岩，片麻岩	Smith D C（1988）
9	375±10	Maksutov[俄]	乌拉尔造山带	Coe	榴辉岩/maksutov杂岩	Marakushev（2001）
10	452~500	都兰、锡铁山	柴达木北缘	Coe	榴辉岩	Yang J S（2002）
11	507±38 511±35	北秦岭官坡	秦岭造山带	Coe, Di	榴辉岩、石榴云母麻岩	杨经绥（2002）
12	~500	Lanternman range	Antarctica	Coe	eclogite	Ghiribelli et al.（2002）
13	480~510	Qiashikansayi	阿尔金造山带	Coe, Stish	榴辉岩，片麻岩	Qi XX, Li HB（2005）
14	>352	苏台德[波兰]	波希米亚华力西带	Coe	榴辉岩，绿辉石麻粒岩	Bakun Czubarow（1993）
15	270	Athashy[吉]	南天山带	Coe	榴辉岩/泥质硅质片岩	Tagiri（1995）
16	226±3	大别	中国中央造山带	Coe, Di	榴辉岩/大别杂岩	Li S G（2000）
17	221~228	苏鲁	同上	同上	榴辉岩/胶南杂岩	Xu Z Q（2004，2006）
18	140~115	Bantimala [Sulawesi]	欧亚、太平洋板块与 Sundaland 间的汇聚带	柯石英	硬玉石英岩+榴辉岩+高压片岩	Kadarusman & Parkinson（2000）
19	120~115	Sulawesi [印尼]	Sundaland 俯冲边缘	Coe	榴辉岩/白垩纪增生杂岩	Parkinson（1998）
20	120~110	Luk ulu [Java]	澳洲大陆与欧亚大陆碰撞	石榴橄榄岩PT计算	榴辉岩+石榴橄榄岩	Chris Parkinson（1998）
21	50~60?	西藏东巧	斑公努江缝合带	Coe, Di Si-rutile	豆荚状铬铁矿	Yang J S（2003）； 杨经绥等（2004）
22	50~46.2±0.7	Kaghan Valley [巴基斯坦]	喜马拉雅山链	Coe	榴辉岩/高喜马拉雅结晶杂岩	O'Brien（1999）； Kaneko Y（2003）
23	52±18	Zermatt-Saas [意]	西阿尔卑斯俯冲洋壳	Coe	榴辉岩/变质沉积岩系	Gebauer（1997）
24	35~40	Dora Maira [意]	西阿尔卑斯造山带	Coe	镁铝榴石石英岩/Venasca complex	Chopin（1984）
25	21.5~15.7	Beni Bousera [摩洛哥]	摩洛哥 Betico Rifean 褶皱带	Di	橄榄岩中石榴辉石岩岩筒	Pearson D G（1993）
26	40	Alpe Arami [意]	阿尔卑斯造山带	橄榄石出溶钛铁矿 石墨化金 刚石	石榴二辉橄榄岩	Dobrzhinskaya（1996）
27	21.1~24.5	Ronda [西班牙]	Betic Cordilleras	石榴橄榄岩	石榴橄榄岩	Pearson（1995）
28	65~30	Rhodope [希腊]	Rhodope 变质省	金刚石、过 硅石榴石	变质泥质岩	Mposkos E D（2001）

注：资料来源除本文所列文献外均转引自Ernst and Liou（2000）

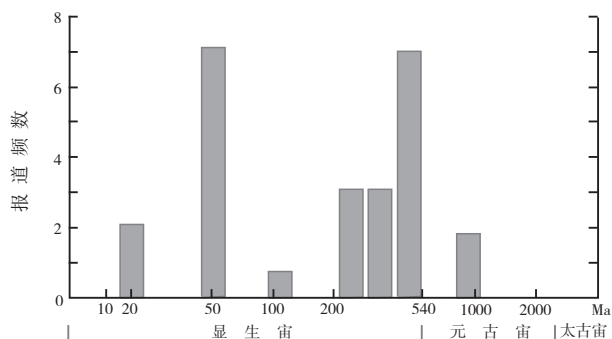


图5 超高压变质岩时代分布频数图

Fig. 5 Histogram showing the temporal distribution of ultrahigh-pressure metamorphic rocks

降到100℃以下,直至大洋岩石圈首次发生板块俯冲才开始有花岗岩质的陆壳。

大陆地壳从无到有,是一个增生的过程。资料表明,4.0 Ga以来累计形成的大陆长英质(felsic crust)地壳的总体积可达 $7.76 \times 10^9 \text{ km}^3$ (Maruyama, 1994)。地球构造-热状况随时代的变化,大陆地壳在地质历史各时期的聚合和离散,无疑将影响到变质作用随时代的改变。Ernst (1972)就已经注意到蓝片岩随时代分布的规律。还注意到蓝片岩相矿物随时代的变化。麻粒岩相岩石也有随时代分布的趋势,虽然目前有一些麻粒岩的年代很新,但总体看来还是以前寒武纪为主。

图5反映了超高压变质作用具明显随时代分布的趋势:(1)总体看来显生宙的超高压变质占主导地位,元古宙仅2处,太古宙尚无确切的超高压产地的报道;(2)从显生宙看,中生代占绝对优势,早古生代也有一个高值,所以是否应当考虑Rodinia和Pangea古大陆的裂解,消耗了能量,致使古大陆的地温梯度降低,从而有利于显生宙早期和中新生代高压—超高压变质带的集中形成。最近许志琴等(2006)通过南苏鲁超高压变质带的榴辉岩、片麻岩等不同类型变质岩的原岩恢复,揭示了超高压变质带基底的大地构造属性,也认为它们是罗迪尼亚超大陆形成后新元古代裂解事件的产物。

从超高压变质的时代分布,可以看到前寒武纪时期很少超高压变质岩。现今报道的两个产地,一个是西非洲的马里,另一个是巴西的San Francisco克拉通边缘(见图1)。但是两个都属于

晚前寒武纪的泛非褶皱带。Baldwin et al (2004)曾经报道加拿大的Saskatchewan和Snowbird出现古元古界的榴辉岩和石榴石-蓝晶石高压麻粒岩。据石榴石单斜辉石-蓝晶石-石英相平衡计算的压力可达2.7 GPa,温度达880℃,已经相当于超高压的变质条件。在华北地台,赵国春等根据河北省恒山、怀安、河南南部太华群的高压麻粒岩,划分出一条穿华北造山带(Trans-North China Orogen),时代为1 860 Ma (Zhao, 2005)。看来,板块构造体制是可以适用于前寒武纪的,现今发现的高压麻粒岩带,极有可能是显生宙碰撞造山带的对应物。不过,由于前寒武纪时期,即地球发展早期的构造状况(tectonic regime)必然不同于今日,尤其是地温梯度(geothermal gradient)。前寒武纪的地壳较薄,其地温梯度必然高于显生宙,因而不利于超高压矿物的生成,即便有些高压矿物的生成,在后期的构造作用下也极易受到重结晶而无法保存。应该说现今我们对超高压变质作用的认识水平还是有限的,随着科学技术的进步现有的认识必将得到更新。

谨以此文献给董申保院士九十华诞。

参考文献 [References]:

- Baldwin J A, Bowring S A, Williams M L, et al. 2004. Eclogites of the Snowbird tectonic zone: petrological and U-Pb geochronological evidence for Paleoproterozoic high-pressure metamorphism in the western Canadian Shield. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147: 528-548.
- Brown M. 2007. Metamorphism, plate tectonics and the supercontinent cycle. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 1-18.
- Chopin C. 2003. Ultrahigh-pressure metamorphism: tracing continental crust into the mantle. *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 1-14.
- Dobretsov N L, Coleman R G, Liou J G, et al. 1987. Blueschist belts, in Asia and possible periodicity of blueschist facies metamorphism. *Ofioliti* 12 (3): 445-456.
- Dobretsov N L, Sobolev N V, Shatsky V S, et al. 1995. Geotectonic evolution of diamondiferous paragneisses, Kokchetav Complex, northern Kazakhstan: the geologic enigma of ultrahigh-pressure crustal rocks within a Paleozoic fold belt. *The Island Arc*. 4: 267-279.
- Dobrzhinskaya L, Green H W and Wang S. 1996. Alpe Arami: a peridotite massif from depths of more than 300 kilometers. *Science* 271: 1841-1845.
- 董申保. 1990. 中国蓝闪石片岩的特征及分布、地质学报, 63(3): 273-284
- [Dong Shenbao. 1990. The general characteristics and distribution of

- the glaucophane-schist belts of China. *Acta Geologica Sinica*, 63(3): 101–114. (in Chinese)]
- Dong Shenbao and Zhang Lifei. 1999. A general account on the Proterozoic glaucophane-schist belts of China. 见: 北京大学院士文库《董申保文集》. 北京: 北京大学出版社, 165–225.
- Ernst W G and Liou J G, eds. 2000. Ultrahigh Pressure Metamorphism and Geodynamics in Collision Type Orogenic Belts. Final Report of the Task Group III-6 of the ILP. Bellwether Publishing Ltd for GSA.
- Ernst W G. 1972. Occurrence and mineralogical evolution of blueschist belts with time. *Am. Jour. Sci.*, 272: 657–668.
- Gilotti J A, Nutman A P and Brueckner N K. 2004. Devonian to Carboniferous collision in the Greenland Caledonides: U–Pb zircon and Sm–Nd ages of high-pressure and ultra-high pressure metamorphism. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 148: 216–235.
- Ghiribelli B, Frezotta M, Palme. 2002. Coesite in eclogites of Lanterman Range: Evidence from textural and raman studies. *European Journal of Mineralogy*, 14(2): 355–360.
- Haugerud R A and Zen E-An. 1991. An essay on metamorphic path studies or Cassandra in p–T–t space. // Perchuk L L, ed. Progress in Metamorphic and Magmatic Petrology. Cambridge University Press, 323–348.
- Kadarusman A and Parkinson C D. 2000. Petrology and P–T evolution of garnet peridotite from central Sulawesi, Indonesia. *Journal of Metamorphic Geology*, 18 (2): 193–209.
- Kai Ye, Bolin Cong & Danian Ye. 2000. The possible subduction of continental material to depth greater than 200 km. *Nature*, 407: 734–736.
- Kaneko Y, Katayama I, Yamamoto H, et al. 2003. Timing of Himalayan ultrahigh-pressure metamorphism: sinking rate and subduction angle of the Indian continental crust beneath Asia. *Journal of Metamorphic Geology*, 21: 589–599.
- Li S G, Jagoutz E, Chen Y, et al. 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.
- 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): 229–237.
- [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): 229–237. (in Chinese)]
- Liu F L, Gerdes A, Liou J G, et al. 2006. SHRIMP U–Pb zircon dating from Sulu Dabie dolomitic marble, eastern China: constraints on prograde, ultrahigh-pressure and retrograde metamorphic ages. *Journal of Metamorphic Geology*, 24: 569–589.
- Liu L, Zhang J F, Green H W, et al. 2005. Evidence of former stishovite in metamorphosed sediments: exhumation from >300 km. *Science* (in review)
- Liu Yan, Zhong Dalai. 1997. Petrology of high-pressure granulites from the eastern Himalaya syntaxis. *Journal of Metamorphic Geology*, 14: 451–466.
- Marakushev A A, Bobrov A V, Butvna V G, et al. 2001. Petrology of the Maksyutov eclogite blueschist complex, Southern Urals. *Continental Dynamics*, 6(2): 9–16.
- Mposkos E D, Kostopoulos D K. 2001. Diamond, former coesite and supersilicic garnet in metasedimentary rocks from the Greek Rhodope: a new ultrahigh-pressure metamorphic province established. *Earth and Planetary Science Letters*, 192: 497–506.
- Maruyama S. 1994. Plume tectonics. *Jour. Geol. Soc. Japan*, 100: 1: 24–49.
- O'Brien P J, Zotov N, Law R, et al. 1999. Coesite in eclogite from the upper Kaghan Valley, Pakistan: a first record and implications [abs] in 14th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, Kloster Ettal, Germany: *Terra Nova*, 99(2): 109–111
- O'Brien P J, Zotov N, Law R, et al. 2001. Coesite in Himalayan eclogite and implications for models of India-Asia collision. *Geology*, 29: 435–438.
- Qi Xuexiang, Li Haibing. 2005. SHRIMP U–Pb zircon dating for Qiashikansayi granodiorite, the northern Altyn Tagh mountains and its geological implications. *Chinese Science Bulletin*, 50(5): 440–445.
- Van Roermund H L M & Drury M R. 1998. An ultra-deep (>200 km) orogenic peridotite body in Western Norway, *EOS*, 79, F791.
- Williams Q, Revenaugh J. 2005. Ancient subduction, mantle eclogite, and the 300 km seismic discontinuity. *Geology*, 33 (1): 1–4.
- Xu S, Okay A I, Ji S, et al. 1992. Diamonds from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 80–82.
- 许志琴, 刘福来, 戚学祥, 等. 2006. 南苏鲁超高压变质地体中罗迪尼亚超大陆裂解事件的记录. *岩石学报*, 22(7): 1745–1760.
- [Xu Zhiqin, Liu Fulai, Qi Xuexiang, et al. 2006. Record for Rodinia supercontinent breakup event in the south Sulu ultrahigh-pressure metamorphic terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1745–1670. (in chinese with English abstract)]
- Yang J S, Xu Z Q, Zhang J X, et al. 2002. Early Paleozoic north Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova* 14: 397–404.
- Yang J S, Xu Z Q, Dobrzhenetskaya L, et al. 2003. Discovery of metamorphic diamonds in central China: an indication of a >4000 km-long zone of deep subduction resulting from multiple continental collisions. *Terra Nova*, 15: 1–10.
- Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. 2003b. Silicon–rutile an ultrahigh-pressure(UHP) mineral from an ophiolite. *Progress in Natural Science*, 13(7): 528–531.
- 杨经绥, 白文吉, 方青松, 等. 2004. 西藏罗布莎豆荚状铬铁矿中发现超高压矿物柯石英. *地球科学——中国地质大学学报*, 29 (6): 651–660.
- [Yang Jingsui, Bai Wenji, Fang Qingsong, et al. 2004. Coesite discovered from the podiform chromitite in the Luobusha ophiolite, Tibet. *Geosciences—J. China Univ. Geology*, 29(6): 651–660.]
- 游振东. 1997. 超高压变质岩的全球分布与地球演化节律. *地质前缘*, 4(3–4): 271–280.
- [You Zhendong. 1997. The global distribution of ultrahigh-pressure metamorphic rocks and its implication in the rhythms of Earth's evolution. *Earth Science Frontiers*, 4(3–4): 271–280. (in Chinese with English abstract)]
- Zhao Guochun, Sun Min, Li Sanzhong, et al. 2005. Lithotectonic elements and geological events of the Hengshan-Wutai-Fuping belt: review and implications for the evolution of the Trans-North China Orogen. 见: 吴福元等编. 2005年全国岩石学与地球动力学研讨会论文摘要. 259–261.
- 张泽明. 1993. 大别山榴辉岩带的岩石学地球化学及其成因演化.

- 见：索书田,桑隆康,韩郁菁,等著.大别山前寒武纪变质地体岩石学与构造学、武汉：中国地质大学出版社,151-178.
- [Zhang Zeming. 1993. Petrology, geochemistry and origin of the eclogite belt in Dabie Mountains. // Suo Shutian et al, eds. The Petrology and Tectonics in Dabie Precambrian Metamorphic Terranes, Central China. Wuhan: China University of Geosciences Press, 151-178. (in Chinese)]
- 张泽明, 沈昆, 赵旭东, 等, 2006. 超高压变质作用过程中的流体——来自苏鲁超高压变质岩石学, 氧同位素和流体包裹体研究的限定. 岩石学报, 22 (7) : 1985-1998.
- [Zhang Zeming, Shen Kun, Zhao Xuedong, et al. 2006. Fluid during the UHP metamorphism: constraints from the petrology, oxygen isotope and fluid inclusion studies of the Sulu UHP metamorphic rocks. *Acta Petrologica Sinica*, 22(7): 1985-1998. (in Chinese with English abstract)]
- 张泽明, 张金凤, 游振东, 等. 2005. 苏鲁造山带超高压变质作用及其 p - T - t 轨迹. 岩石学报, 21(2): 257-270.
- [Zhang Zeming, Zhang Jinfeng, You Zhendong, et al. 2005. Ultrahigh-pressure metamorphic p - T - t path of the Sulu orogenic belt, Eastern central China. *Acta Petrologica Sinica*, 21: 257-270. (in chinese with English abstract)]

Global Distribution of Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belts and Its Geotectonic Significance

YOU Zhen-dong

(China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: On the basis of geological studies of some 28 localities of Ultrahigh-Pressure Metamorphic (UHPM) rocks all over the world it is not difficult to find that most UHPM belts are developed in close relationship with the island arc-continent and the continent-continent collisional orogenic belts. Majority of them are developed within the active continental margins where cold continental materials can be subducted deeply under another relatively stable or non-subducted plate, and the subduction depth of which can exceed 90~120 km. Consequently, under the deep-seated high-pressure (>2.5 Gpa) and high-temperature (c. 600°C or higher) in combination with other favorable metamorphic conditions the UHP typomorphic minerals, such as coesite and diamond, can be formed. According to present data UHPM rocks are spatially concentrated within Eurasia and at its margins. However, there is still lack of information for North America and Australia. Temporally the UHPM rocks are usually Phanerozoic in age. The Precambrian UHPM belts are few, only two of them are Neoproterozoic in age (Pan-African stage). It is suggested that the collisional orogenic process with UHP metamorphism be a tectonic regime when accretion of the continental crust reaches considerable thicknesses. The statistics of temporal distribution of UHPM belts shows two maxima at Paleozoic and Mesozoic-Cenozoic, respectively. It indicates that the break-up of Rodinia and Pangea caused the lowering of geothermal gradient of the continental crust which is favorable for formation of the UHPM belts.

Key words: ultrahigh-pressure metamorphic rocks; collisional orogenic belt; deep subduction; tectonic regime; low geothermal gradient