

大别造山带岩石圈结构与超高压变质岩折返的另类模型

袁学诚 李善芳

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 氮同位素研究确定, 大别山榴辉岩等超高压岩石矿物并非来自地幔, 而是生成于岩石圈地幔顶部。结合深部地球物理, 提出一个岩石圈地幔顶部形成超高压矿物的模型。即表壳岩石俯冲到岩石圈地幔顶部, 形成超高压变质岩, 然后由于地壳隆升、剥蚀, 出露到地表。冲入大别山地区岩石圈地幔顶部的表壳岩石之所以会形成超高压变质岩是因为它同时受到板块会聚的强大压力和蘑菇云地幔产生的高温。沿六安—黄石综合地球物理、地球化学剖面实测的热流剖面显示, 南大别构造带的莫霍面温度达到 1307°C, 超高压变质作用所需要的高温条件至今依然存在。已有文献表明黏塑性的大陆板块在碰撞俯冲时, 岩石圈地幔的变形远比通常认定的那种刚性板块俯冲要复杂。俯冲呈对冲形式, 方向大都向下, 在岩石圈地幔中, 俯冲板块和制动板块像麻花一样相互楔入, 在深部甚至改变俯冲方向, 制动板块反而向俯冲板块俯冲。当岩石圈地幔顶部局部熔融时, 无疑俯冲物质将向局部熔融层扩散, 在高温高压下发生超高压变质作用。大别山变形晚期, 在核部形成“背形穹隆”。将形成于岩石圈地幔顶部的超高压变质岩带到地表, 接受剥蚀而出露地表。已有资料表明, 全球主要超高压变质岩的分布带与古特提斯洋分布有关, 古特提斯洋碰撞带是全球最长的一条陆内碰撞俯冲带。它们是否均为黏塑性板块之间的软碰撞、在邻近碰撞带的岩石圈地幔顶部是否都有高温的区域则尚待验证。

关键词: 大别山; 超高压; 氮同位素; 软碰撞; 反射地震; 地热流

中图分类号: P542 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2008)04-0565-12

1 大别山超高压谜团

解放战争时期, 刘邓大军千里跃进, 挺进大别, 大别山成为家喻户晓尽人皆知的红色革命根据地。20 世纪 80 年代以来, 就是从这块尽人皆知的红色革命根据地不断传出发现柯石英^[1,2]、金刚石^[3]等超高压矿物的消息, 又使大别山名声大振, 成为地学圣地。一大批国内外知名学者来到大别山, 想要破解这些通常认为只有在地幔深处才会存在的超高压矿物为什么会大面积出露在地表的谜团。

超高压所暗示的动力学真谛也惊动了国际地学组织。1993 年, 国际岩石圈委员会建立第 III-6 任务组《碰撞造山带型超高压变质岩及地球动力学》。1998

年, III-6 任务组结束后又建立了 III-8 任务组《超高压变质地体形成与演化的过程与动力学》, 旨在动员全球专家, 通过国际合作来研究这一重要课题。

原地质矿产部则部署所属安徽、湖北、河南、江苏等省地矿局开展了包括大别山在内的 1:5 万系统地质填图及专题研究。国内的许多科研院所和高等院校的专家们也都来到大别山, 作了许多出色的工作, 得到了丰硕的成果。

1998 年, 国家自然科学基金委员会建立了“超高压变质作用与碰撞造山动力学”重大项目, 对大别山造山带的岩石学、矿物学、同位素年龄、构造几何学、运动学、地球化学、岩石圈细结构以及超高压变质作用的过程和碰撞造山带的形成机制等各个方面

进行了多方法多学科深入研究。

其中的岩石圈细结构研究课题,选择从安徽六安,经霍山、英山,到湖北黄石,横穿大别山造山带完成一条以反射地震为主的综合地球物理地球化学剖面,以期得到大别山岩石圈探深剖面,从而为揭示超高压变质岩的折返过程提供深部依据^[4]。虽然项目结题已经4年,并已出版了专著^[5]和一系列论文,但是,大别山超高压变质岩的折返始终萦绕在笔者的脑海中,挥之不去,总觉得还有问题有待解决,并随着资料的不断丰富,认识不断深化,就会砰然心动,有“蓦然回首,那人却在灯火阑珊处”那种感觉。

在参加国土资源部“中国岩石圈三维结构”项目,对秦岭大别造山带作背景研究时,再次将已取得的地球物理与地球化学资料进一步融合消化,对大别山的构造和超高压变质岩的折返作进一步探讨。

2 氦同位素研究对深俯冲超高压变质说“不”

1980年李春昱首次应用板块理论,提出大别山是华北板块与扬子板块之间的缝合带。Sengor进一步提出大别山是特提斯造山带的一部分。

由于柯石英是压力大于2.8 Gpa,温度大于700℃时的稳定相,大别山地区柯石英和金刚石微粒的发现,很自然地引伸出结论,认为在扬子与华北的会聚过程中,陆壳曾俯冲到100 km以下,经受超高压过程,其中有一部分迅速折返,并在大别—苏鲁这样一个特殊的构造背景下,出露地表。

随着工作的深入,有些学者对此提出质疑。认为超高压矿物只要在温压条件适当的环境中就可以生成,而不需要有这种板快插入到100多千米的深处经历了超高压变质作用,再折返到地面的过程。

然而,不论是壳源物质冲入地幔,在地幔中形成超高压变质岩,又折返到地面;或是在适当的温压条件下,岩石遭受超高压变质,又以某种地质动力作用下使它们出露到地表,都是推论。最好要有像DNA检测亲缘关系那样的指标,直接指示它们来自何方,这使笔者想到应用氦同位素³He。³He是一个“宇宙成因”的原始同位素,生成于形成宇宙时的大爆炸,在它原始增生时与地球合成一体,是地球胎里带来的。它不是放射性衰变产物,在地球中的总量比较稳定。根据³He的含量可以有效地判断岩石来源于地幔还是地壳。但是因为氦非常活动,氦在岩石中的绝

对丰度很难确定,通常用比值 $R = ^3\text{He}/^4\text{He}$ 作为³He含量的量度,而不是直接用³He的含量数值。⁴He是U和Th的 α 衰变的产物,随时间积聚。在富U+Th的岩石中积聚很快,在U+Th含量少的岩石中积聚很慢。幔源岩石的³He/⁴He的比值达到 10×10^{-6} ,但壳源岩石的³He/⁴He的比值却仅有 0.02×10^{-6} ,与幔源岩石相比,要差3个数量级^[6]。

当今大气中的³He/⁴He比值稳定,通常用 R_a 表示, $R_a = 1.38 \times 10^{-6}$ ^[6],常用它对岩矿的³He/⁴He比值进行归一化。将壳源岩石和幔源岩石按大气氦归一化后,它们的值分别为 $R/R_a \approx 0.014$ (壳源岩石),和 $R/R_a \approx 7.2$ (幔源岩石)。

对大别山—苏鲁地区超高压变质榴辉岩及其围岩(片麻岩、大理岩和超基性岩)48个样品测定氦同位素组成^[7],得到榴辉岩及其围岩的³He/⁴He的比值为 $0.013 \times 10^{-6} \sim 0.760 \times 10^{-6}$,平均 0.2×10^{-6} 。

如将48个榴辉岩和它的围岩的样品的³He/⁴He进行统计,求得其概值为 $0.01 \times 10^{-6} \sim 0.1 \times 10^{-6}$ (图1)。它们显然不是幔源的。

如将榴辉岩和它们围岩的³He和⁴He值投在³He—⁴He分布图(图2)上。它们都位于大气氦与地壳氦的过渡区。

为了进一步减少放射性成因⁴He对榴辉岩形成时初始氦同位素比值的影响,特地从含柯石英榴辉

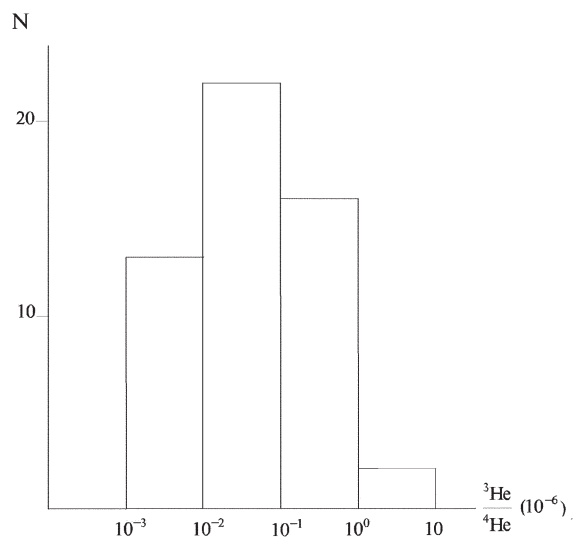


图1 榴辉岩及其围岩的³He/⁴He统计图
Fig.1 Histogram bar chart of ³He/⁴He values of eclogite and its country rocks

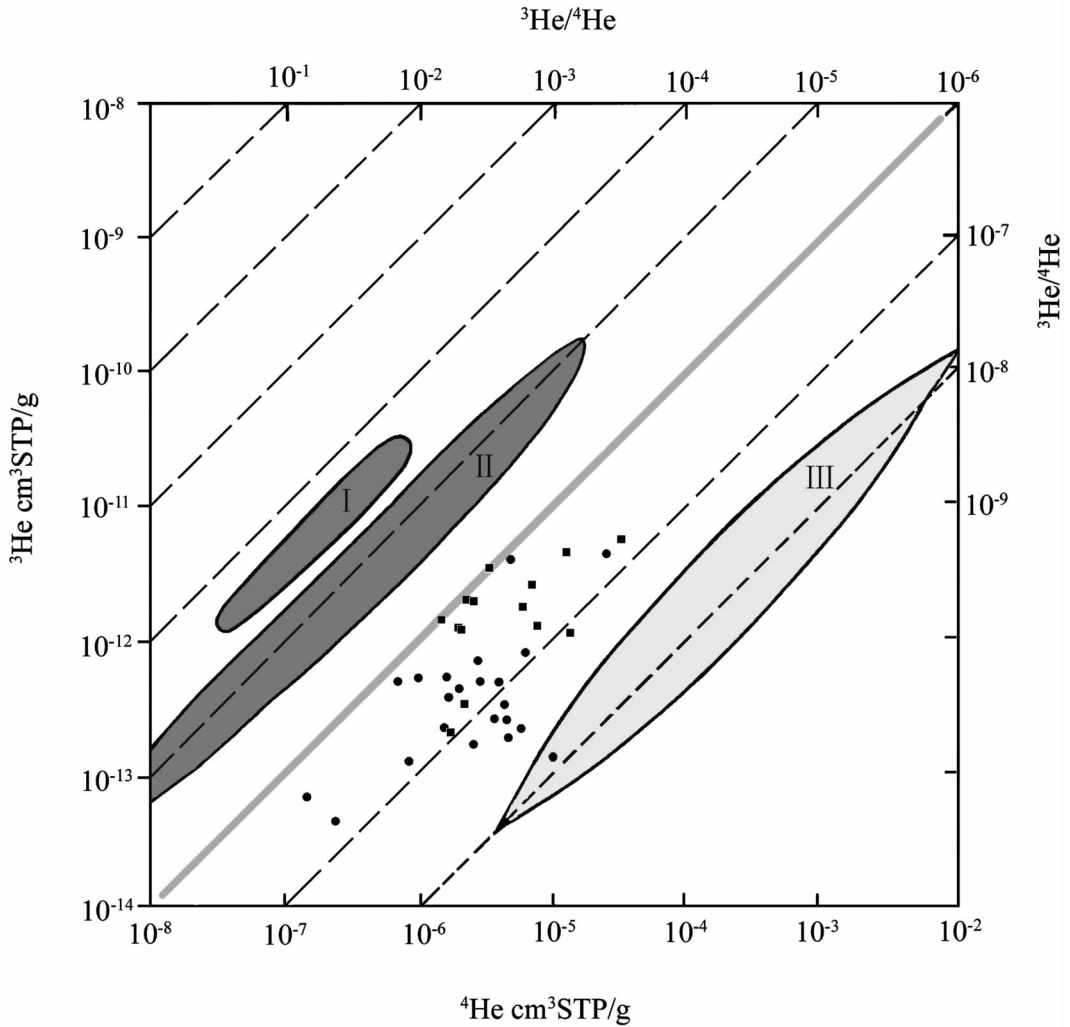


图 2 大别—苏鲁地区榴辉岩的氦同位素分布图^[7]

I—地幔热点; II—洋中脊玄武岩; III—古老陆壳

Fig.2 Helium isotopic composition of eclogite from the Dabie-Sulu region^[7]

I -Hotspot of the mantle; II -MORB; III -Old continental crust

岩中挑选出石榴子石和绿辉石单矿物送到日本大阪大学采用真空压碎法分析其氦同位素组成。2 件样品的 ^3He 均低于质谱仪的检出限, ^4He 含量分别为 0.00542×10^{-6} 和 $0.00781 \times 10^{-6} \text{ cm}^3\text{STP/g}$, 远离地幔氦的分布范围^[7]。

因此根据氦同位素的研究测定, 可以确定大别山榴辉岩等超高压岩石矿物并非来自地幔, 而是生成于岩石圈地幔的顶部^[7]。

3 超高压变质作用的另类模型

已发表有多种深俯冲—折返模型。如角流模型^[8-9]认为在俯冲带内, 上部被正断层所限, 下部被逆断层

所限的俯冲板块内形成物质流动, 可以将榴辉岩带到地表。又如: 浮力折返模型^[10], 认为浮力能将轻的陆壳物质带到地表, 当超高压变质岩重结晶后, 含超高压变质岩构造沿俯冲应力通道折返。再如: 叠瓦状逆冲模型或连续俯冲—仰冲模型^[11], 认为连续的俯冲使更早俯冲的岩片因后一岩片的俯冲而引起逆掩上升。还有, 增生楔张裂模型或造山楔模型^[12], 认为俯冲带增生楔下部由于大陆壳物质俯冲, 由褶皱作用引起拆离和缩短, 由叠瓦作用形成双冲体, 由于板底垫托作用引起楔形体后端增厚增高, 楔形体表面坡度亦增大。由正断层作用或深部塑性流动产生伸展, 更深处受到高温高压变质作用, 连续的垫托作用引起

的伸展,使高压岩石上升到地表。楔形体后端的伸展,引起侧向运动和向前缘的逆冲作用,垫托作用和伸展作用,使高压岩石在地表下 15 km 内进一步剥蚀。再如:俯冲带迁移(后退)模式,认为高压变质岩的上升是 B 型俯冲带向洋移动的结果。当洋壳俯冲到大陆陆壳下时,上升到 B 型俯冲带断坡上的高压岩片增生到大陆岩石圈,俯冲带每后退一次就产生一个新的增生岩片。各增生岩片之间由于深度不同可以出现压力差。其他还有变质核杂岩模式^[13-14]、隐伏楔形体抽拉伸展模型等等。

但是超高压深成论遭到部分学者的强烈反对。首先受到质疑的是超高压岩形成的深度。深成论学者认为,柯石英和微粒金刚石的产出,意味着俯冲深度可达 100~120 km。又因发现钛斜硅镁石和菱铁矿,推测其俯冲深度达 150~170 km(5.6Gpa)。根据石榴橄榄岩中 β 橄榄石内针状含钛铬磁铁矿的出溶推测其俯冲深度大于 300 km^[15]。

但是,反对超高压深成论的学者们认为,超高压变质岩深成论的推论有一个根本错误,就是他们的深度测算方法的前提有问题。他们的测算方法采用帕斯卡定律,即认为岩石所处的深度(H)等于压力(P)除以其上岩柱的密度(σ), $H=P/\sigma$ 。但是帕斯卡定律只适用于流体静力学模型。不适用于固体的地球,地球的压力梯度要比按帕斯卡定律计算得到的大得多。他们在构造附加压力及温度异常等因素作了大量工作,包括实验室实验和数学模拟,认为超高压变质作用发生在壳内 20~30 km 深处^[16-17]或约 32 km 处^[18],最大深度不超过 45 km^[19]。因而认为超高压变质岩是形成于地壳内的,不妨称持这种观点的为超高压地壳成因论,或浅成论。

超高压变质要同时具备高压与高温的外部条件。持浅成论观点的学者似乎对超高压的温度条件研究不足,给人的印象似乎在中下地壳内,普遍会形成超高压变质岩层。

笔者从氦同位素的工作结果和深部地球物理出发,提出岩石圈地幔顶部形成超高压矿物的模型,也可以说是中深论。即认为由于表壳岩石俯冲到岩石圈地幔顶部,形成超高压变质岩,然后由于推覆、隆升、剥蚀、出露到地表。需要特别指出的是并非所有俯冲到岩石圈地幔顶部的表壳岩石都会形成超高压变质岩,大别山地区形成超高压变质岩是由于它同时具备既是碰撞带又是蘑菇云地幔发育的地区^[20-21]这两个重

要条件。

蘑菇云构造是指岩石圈地幔由于软流圈物质上升而遭破坏,软流圈物质与本地地幔残存块体并存的一种特殊的岩石圈地幔构造。它的顶部是近于水平成层的局部熔融壳幔过渡层,下部是近于垂向的软流圈物质与残存地幔的互层。中生代以来,中国的东部和整个西太平洋地区岩石圈地幔均发育这样的岩石圈地幔蘑菇云构造^[20-22]。

华北与华南两陆块在晚古生代时沿秦岭—大别山开始碰撞,整个岩石圈都处在异常强大的压力下,已经具备形成超高压变质岩的压力条件,只欠东风,这东风便是高温。无独有偶,这时,在中国东部发育蘑菇云地幔,它的顶部是一个已达到岩石局部熔融的高温层。当俯冲的表壳岩进入到这个高温层时,便同时具备生成超高压变质岩所需要的高压与高温,超高压变质岩便应运而生。当外部压力或温度降低,达到临界点时,已形成的超高压变质岩瞬时过渡到稳定相而保持下来。

图 3 是沿六安—黄石综合地球物理地球化学剖面实测的热流剖面^[23]。北淮阳构造带的莫霍面温度为 902℃,北大别构造带的莫霍面温度为 590℃,南大别构造带的莫霍面温度为 1307℃,而宿松变质杂岩带的莫霍面温度则为 415℃。可见南大别的莫霍界面温度最高,已超过地幔岩石局部熔融的温度 1300℃,北大别和宿松变质杂岩带均较低。从岩石圈温度等值线的分布中也可以看到,在大别山地区深 70 km 的岩石圈范围内,温度均已达到形成柯石英的温度条件。

要说明的是,笔者实测剖面的热结构是当今的岩石圈热状态,并不是中生代形成超高压变质岩那时候的热状态。用它来外推中生代时大别山的岩石圈地幔热结构多少会有风险,但可以用它来说明南大别岩石圈地幔内的超高压变质作用所需要的高温条件至今依然存在。

4 大别山地壳构造模型与超高压变质作用

在揭示大别山地壳构造模型前,先对地表地质背景作简要介绍。

大别山的面积并不很大,但地质情况复杂。笔者对横穿大别山的六安—霍山—英山—黄石的反射地震剖面作初步解释^[4]时,采用从柏林、王清晨等^[24-25]

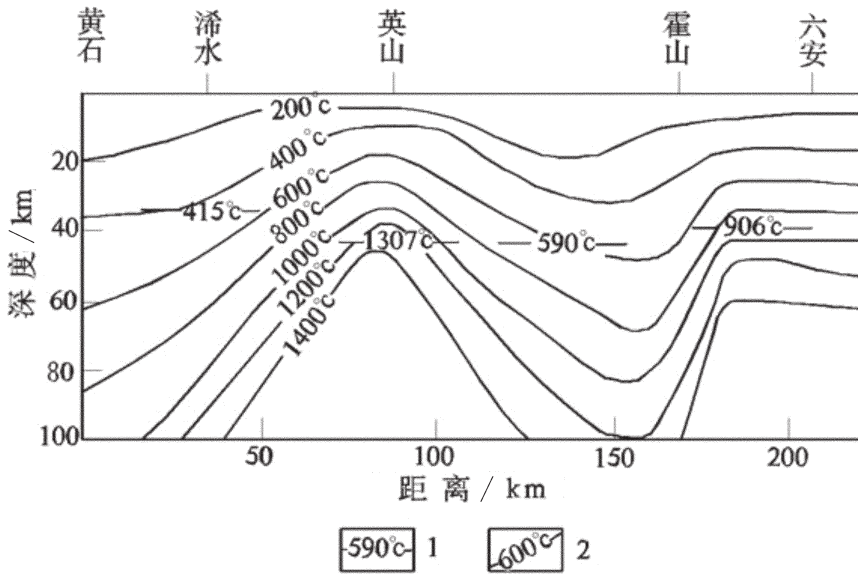


图 3 大别造山带岩石圈温度分布图^[23]

1—构造单元莫霍面温度;2—岩石圈温度等值线

Fig.3 Lithospheric temperature section across the Dabie orogenic belt

1—Moho temperature of different tectonic units;2—Temperature contours of the lithosphere^[23]

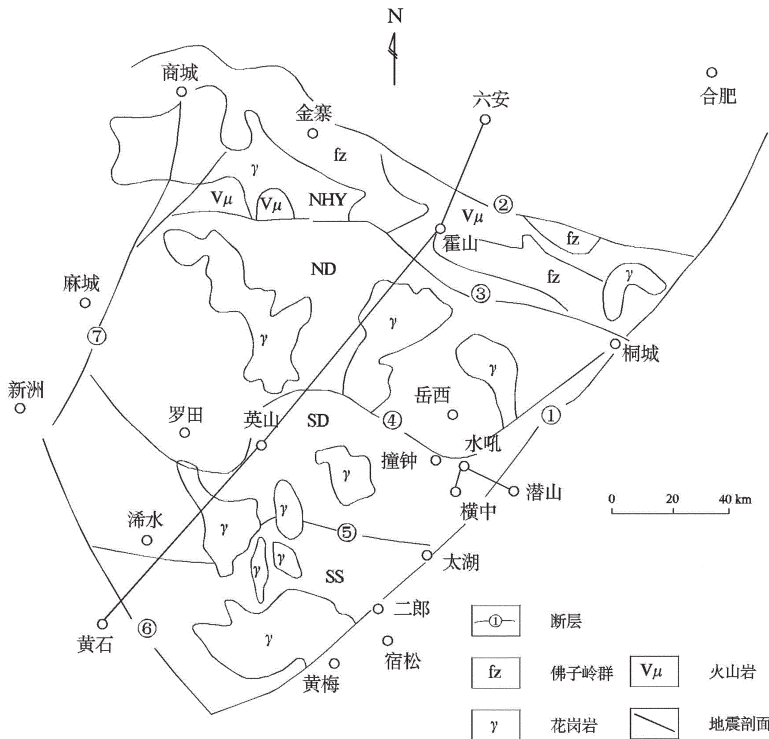


图 4 大别山构造单元^[24-25]

NHY—北淮阳构造带;ND—北大别构造带;SD—南大别构造带;SS—宿松变质杂岩带;①—郟庐断裂;
②—龟山—梅山断裂;③—晓天—磨子潭断裂;④—水吼—五河断裂⑤—太湖—马庙断裂;⑥—襄樊断裂;⑦—麻城断裂

Fig.4 Tectonic units of the Dabie area^[24-25]

NHY—North Huaiyang tectonic belt;ND—North Dabie tectonic belt;SD—South Dabie tectonic belt;
SS—Susong metamorphic complex;①—Tanlu fault;②—Guishan—Meishan fault;③—Xiaotian—Mozitan fault;
④—Shuihou—Wuhe fault;⑤—Taihu—Mamiao fault;⑥—Xianfang fault;⑦—Macheng fault

对大别山所做的构造分区方案。他们将大别山地区分成北淮阳构造带、北大别构造带、南大别构造带和宿松变质杂岩带(图4)。

汤加富等^[6]根据1:5万区域测量成果新编大别山及桐柏张八岭地区地质略图(图5),将大别山造山带划分为3个构造带:北淮阳构造带;桐柏—大别变质杂岩隆起带和随县—张八岭构造带。

两种划分方案对北淮阳构造带的划分基本相同。北淮阳构造带从南向北可分为卢镇关群和佛子岭群,为早古生代复理石沉积。此带经历绿片岩相变质作用,局部达角闪岩相。主期构造变形为印支期,燕山期有大量岩浆活动,并且发生向北推覆逆冲,将卢镇关群和佛子岭群推覆在石炭系和侏罗系上。

对宿松变质杂岩带,除了分布范围略有差别外,

两种划分方案也基本相似。宿松变质杂岩带为中生代变质的晚前寒武纪地层,主要由各种片麻岩、片岩、变质磷块岩及大理岩组成。变质作用达绿片岩相至角闪岩相,南部一些岩石还经历了蓝片岩相变质作用。

至于大别山的主体部分,从柏林等将它分成北大别构造带与南大别构造带。北大别构造带由英云闪长岩质片麻岩组成,变质达角闪岩及麻粒岩相。南大别构造带由各种片麻岩、片岩、榴辉岩、大理岩组成,其他还有超镁铁质岩和硬玉石英岩,并出露UHP变质岩。UHP变质作用的峰期变质年龄为220~245 Ma。它与北大别构造带的分界是水吼—五河断裂。汤加富等则将大别山主体部分划分成一个构造带,称为桐柏—大别变质杂岩隆起带。在这个隆

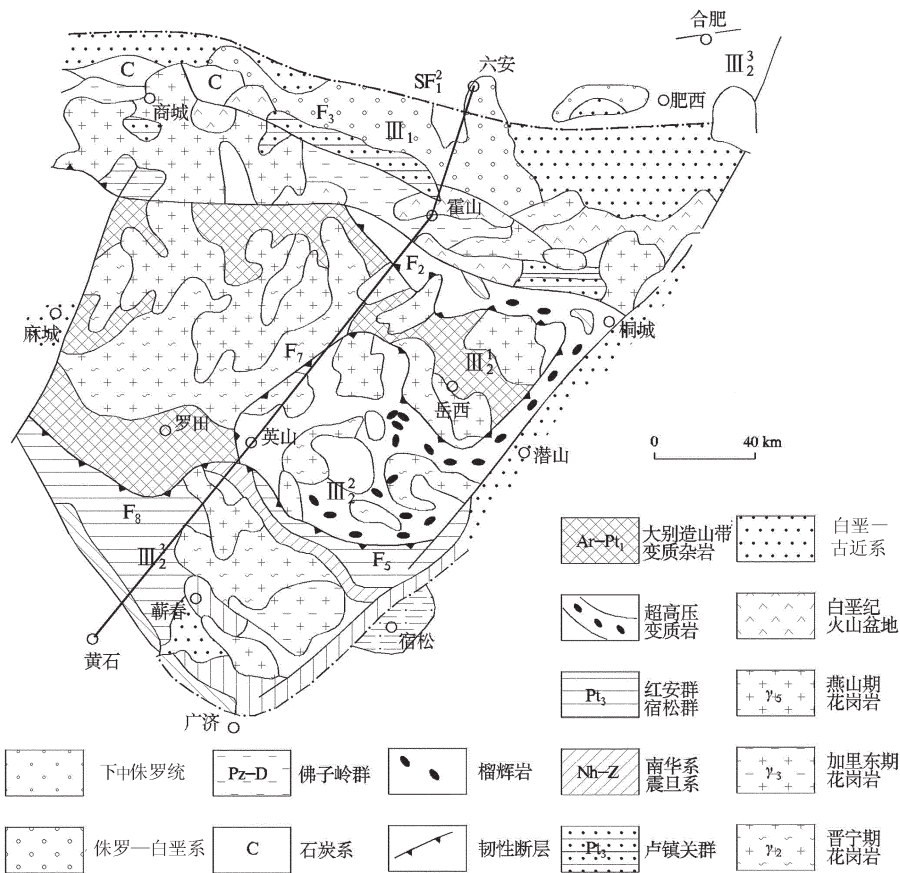


图5 大别山地质略图^[6]

III₁—北淮阳构造带; III₂—桐柏—大别变质杂岩带; III₃—新县—潜山超高压变质带; III₄—红安—宿松构造带; F₁—郟庐断裂; F₂—晓天—磨子潭断裂; F₃—内乡—桐柏—商城断裂; F₄—六安断裂; F₅—襄樊断裂; F₆—狮子口—回龙山韧性断裂带; F₇—麻城—团风韧性断裂带

Fig.5 Geological sketch map of the Dabie Mountains^[6]

III₁—North Huayang tectonic belt; III₂—Tongbai—Dabie metamorphic complex; III₃—Xinxian—Qianshan UHP metamorphic belt; III₄—Hongan—Susong tectonic belt; F₁—Tanlu fault; F₂— Xiaotian Mozitan fault; F₃—Neixian—Tongbai—Shangcheng fault; F₄—Liu'an fault; F₅— Xiangfan fault; F₆— Shizikou—Huilongshan ductile fault; F₇— Macheng—Tuanfeng ductile fault

起带内出露的是大别杂岩。在它的东部自北而南分为岳西(北大别)变质杂岩带,潜山(南大别)超高压变质带和宿松构造带。在他们图上,对南大别穹隆以及超高压变质岩的分布规律表现得更为清晰。

从安徽六安,经霍山、英山到湖北黄石,正穿大别山的反射地震偏移剖面如图 6-A,其地质解释如图 6-B^[4]。

反射地震剖面的图像显示^[4],在晓天—磨子潭断层处,有一个俯冲碰撞带。

根据经典板块理论,俯冲板块的俯冲在剖面上成舌状连续地直线下插到制动板块的下方。但是,最近的数学模拟研究证明,大陆岩石圈地幔在俯冲时的习性决定于物质的流变性质及构造环境。陆陆碰撞时岩石圈地幔的俯冲过程不是像大洋俯冲那样,向制动板块直线下插,而是代之以存在各种构造复

杂性^[26-27]。

Pysklywec^[27]的数字模拟系统由地壳(厚 20 km)和地幔两部分组成,均为黏塑性物质。

图 7 为模型的三阶段累进变形。当会聚量为 $\Delta x = 200$ km 时,俯冲板块岩石圈地壳及岩石圈地幔的上部,向制动板块俯冲。在它的内部只有极小的变形,然而在岩石圈地幔的下部则有强烈变形,在地幔岩石圈塑性区域发育俯冲剪切带。在碰撞带地壳变厚并上隆,岩石圈对称下降。当会聚量为 $\Delta x = 300$ km 时,制动岩石圈地幔楔入俯冲板块,楔入体在俯冲板块中引发塑性屈服,并且将板块分裂成二。当会聚量为 $\Delta x = 400$ km 时,俯冲板块沿新发育的剪切带拆离,并且楔入体的岩石圈地幔开始俯冲到右侧的板块之下,使原来是制动方的板块转变为俯冲方,俯冲的极性反转。

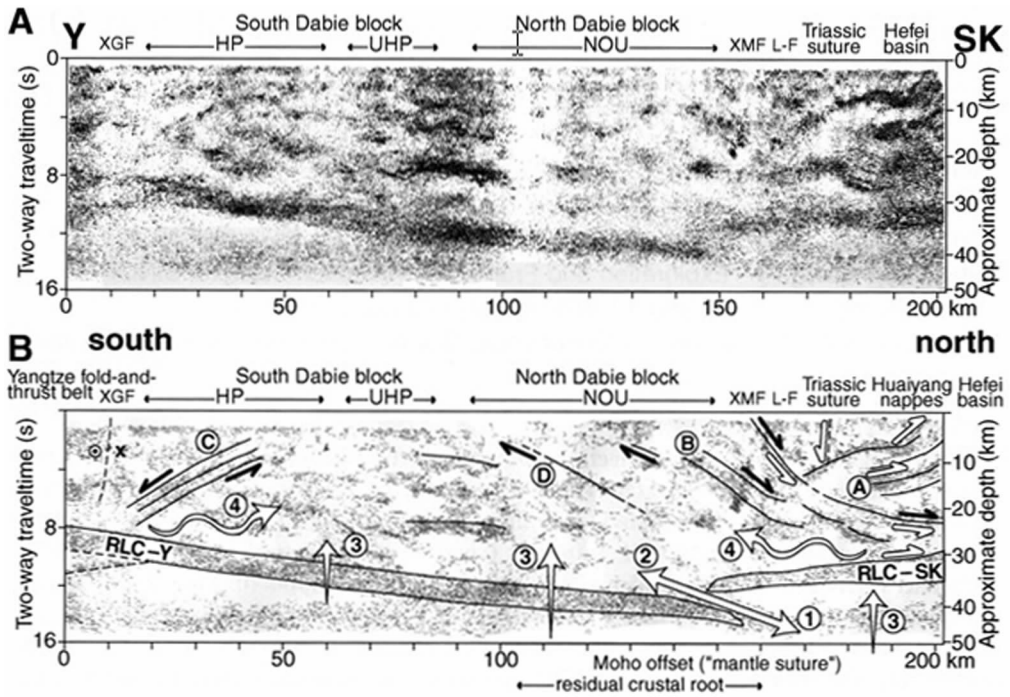


图 6 六安—黄石反射地震剖面解释图^[4]

SK—中朝克拉通;Hefei basin—合肥盆地;Huaiyang nappe—淮阳推覆体;Triassic suture—三叠纪缝合带;
 North Dabie block—北大别块体;South Dabie block—南大别块体;Yangtze fold-and-thrust belt—扬子褶冲带;
 Y—扬子克拉通;HP—高压变质岩带;UHP—超高压变质岩带;NOU—北大别正片麻岩块体;XMF—晓天—磨子潭断
 裂;TLF—庐枞断裂;XGF—襄樊—广济断裂;L-F—卢钲关及佛子岭群;Two-way traveltime—双程旅行时;
 approximate depth—近似深度;Moho offset—莫霍面错断;residual crustal root—地壳残根;
 RLC—Y—扬子克拉通地壳底部反射;RLC—SK—中朝克拉通地壳底部反射

Fig.6 A: Migrated seismic reflection profile and its interpretation profile from Huangshi to Liu'an^[4]
 SK—Sino-Korean craton; Y—Yangtze craton; HP—High-pressure metamorphic rocks; UHP—Ultrahigh-pressure metamorphic
 rocks; NOU—North Dabie orthogneiss block; XMF—Xiaotian-Mozitang fault; TLF—Tanlu fault;
 XGF—Xiangfan-Guangji fault; L-F—Luzhengan and Foziling "groups"; RLC—Y—reflection of the lower crust of the Yangtze
 craton; RLC—SK—reflection of the lower crust of the Sino-Korean craton

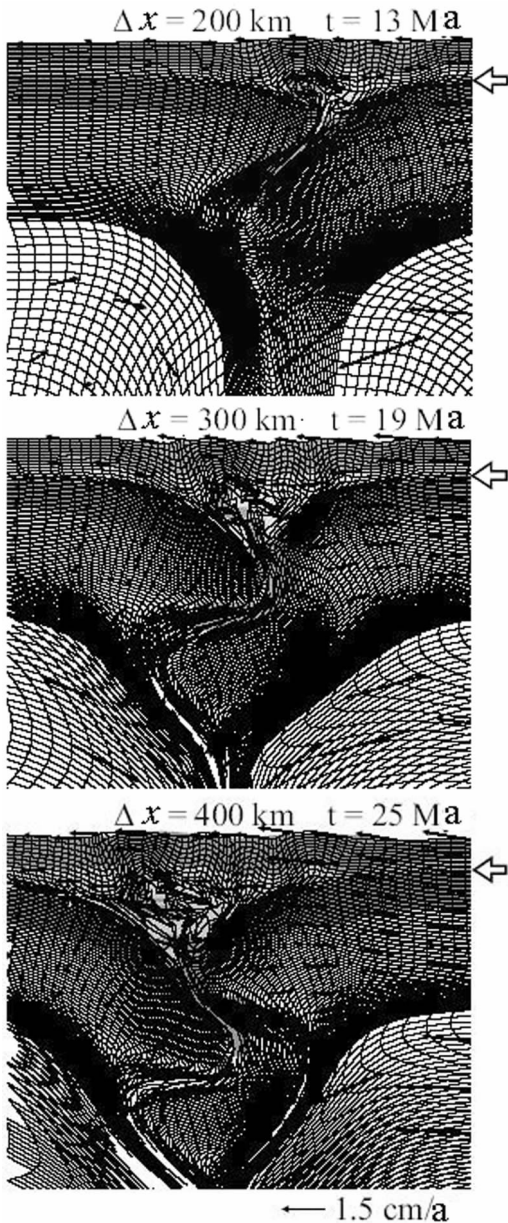


图7 陆陆碰撞时岩石圈地幔的俯冲过程模型三个阶段变形, Δx 是会聚量, t 为相对于会聚起始时间。图中绘有速度矢量, 壳幔分界位置以空心箭头示于右侧。每一阶段该模型为塑性的范围用深灰色表示, 别的地区则为粘性^[27]
Fig.7 Subduction process of the lithospheric mantle during continent-continent collision

Progressive deformations of three stages of the model; Δx is accumulated convergence, t is the time relative to the onset of convergence. Velocity vectors are plotted and the position of the crust-mantle interface is indicated by the open arrow at the right. For each stage, the region of the model that is at that time in the plastic domain is shaded by dark grey; all the other regions are in the viscous domain^[27]

这个数字模拟结果显示,黏塑性的大陆板块在碰撞俯冲时,岩石圈地幔的变形远比通常认定的那种刚性板块俯冲要复杂。俯冲方向大都向下,在岩石圈地幔的上部出现一个由地壳岩石形成的俯冲漏斗。在岩石圈地幔中,俯冲板块和制动板块像麻花一样相互楔入,在深部甚至改变俯冲方向,制动板块反而向俯冲板块俯冲。当岩石圈地幔顶部局部熔融时,无疑俯冲物质将向局部熔融层扩散。很难想象超高压岩能沿着这种形态的俯冲带返回它们阔别多年的地表。

从反射地震剖面上还可以看到,碰撞形成地壳花状构造。在北大别三叠纪碰撞缝合带两侧,在类似的深度(图6-B中140~170 km处)南倾反射段与北倾反射段形成镜像反映,以及在卢钲关佛子岭群中可以见到北倾的剪切带,形成一个以缝合线为中心的不对称双向仰冲构造。形成在莫霍界面断裂处的花状地壳反射,反射地震剖面得到的这一结论,与大别山造山带的详细构造填图结果相一致。大别山造山带的详细构造填图和解析,确定造山带及邻区的主体变形样式是双向挤压的扇形非完全对称的“科伯构造”^[28,16]。

这个非对称仰冲构造将形成在岩石圈顶部的超高压变质岩推向地壳。

另一个反射地震剖面的结论是在大别山地壳内存在地壳规模的穹隆。北大别北倾反射段(图6-B中ⓑ)与南大别南倾反射段(Ⓒ,20~40 km)组成另一个镜像。它们和在剖面中部(80~100 km处)近水平的反射段共同组成地壳规模的穹隆。向北倾的并且反射特性变化的反射面(图6-B中Ⓓ)的地表投影为南北大别的分界线,地表填图可观察到变质相的改变但是是一个向南倾斜的剪切正断层。这个反射地震剖面的结论也得到大别山造山带的详细构造填图的证实。大别山变形晚期,在核部形成“背形穹隆”,并组成“链状穹隆”的构造带,在造山带边部,形成向外侧盆地滑覆逆冲构造。

由于穹隆上升,将超高压变质岩进一步推向地表,接受剥蚀而出露地表。

5 超高压带形成规律的初步探讨

超高压变质岩曾被看作是大陆板块构造中的一个特殊现象,它的出露被认为隐藏着大陆地质中的一些重要问题。引起国内外地学工作者的普遍关

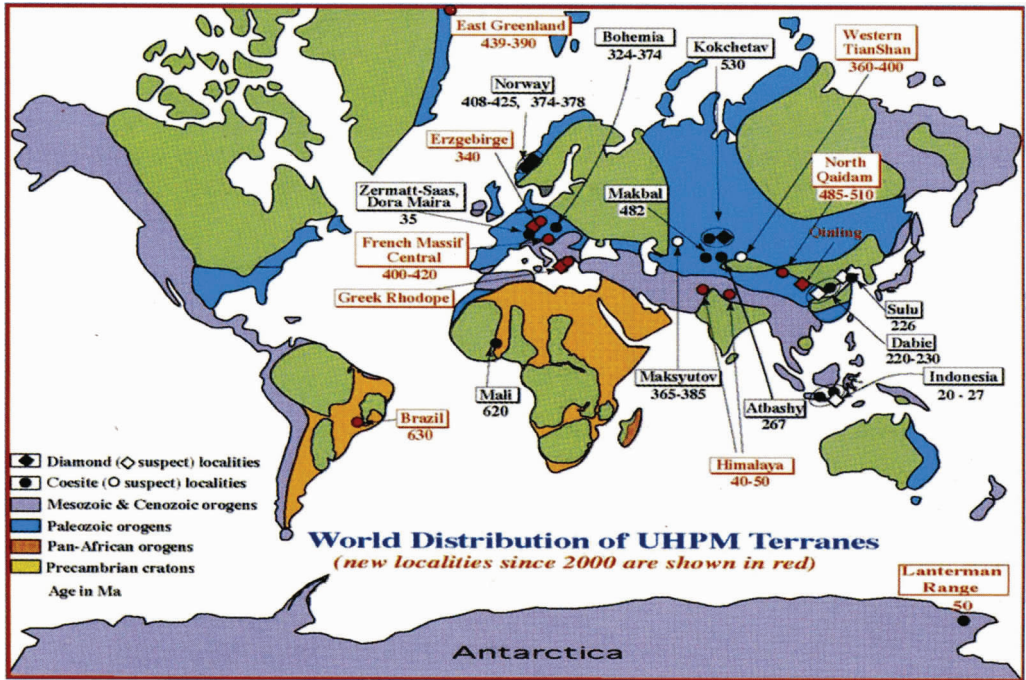


图 8 全球超高压带位置

英语图例中译: Diamond (◇suspect) localities 金刚石(◇可疑)产地, Coesite (○suspect) localities 柯石英(○可疑)产地, Mesozoic and Cenozoic orogens 中生代造山带, Paleozoic orogens 古生代造山带, Pan-African orogens 泛非造山带, Precambrian craton 前寒武克拉通. 注记年代单位为 Ma, 2000 年后发现的新产地用红色标注

Fig.8 Distribution of UHP metamorphic rocks in the world
Age unit:Ma. New localities found after 2000 are indicated by red

注。近年来,在中国的柴北缘发现柯石英,在秦岭北带的片麻岩和榴辉岩的锆石中发现微粒金刚石^[29],证实在中国中部存在着一条长 4000 km 的超高压带,使人感到事情有点蹊跷。似乎超高压变质岩的出露并不稀有。如果注意到,全球现已确定的超高压变质岩分布的地区,主要是:中国的苏鲁、大别山、祁连山、阿尔金、中亚的 Kokchetav、西天山的 Makabal、南乌拉尔的 Maksutov、中欧的 Bohemia、北非的 Sifnov、西阿尔卑斯的 Dora Maria、北非的 Beni Bousera、挪威、马里。它们大都位于古特提斯洋关闭所形成的全球最长的一条陆内碰撞俯冲带及其相邻地区。那么它们的形成应具有某种共性,笔者初步归纳出以下几条:

- (1) 陆内俯冲碰撞带的存在是形成超高压变质岩带的最重要的前提。它将表壳岩石送入岩石圈地幔。
- (2) 大陆板块并不是刚性的,因此它们之间的碰撞一般是软碰撞,陆壳消减方向近垂直向下,俯冲深度不大。

(3) 在邻近碰撞带的岩石圈地幔顶部应该有地幔物质上升,形成高温区域。

(4) 后期有造山作用将超高压变质岩抬升,经受剥蚀。

6 结 论

(1) 氦同位素的研究确定,大别山榴辉岩等超高压岩石矿物并非来自上地幔,而是生成于岩石圈地幔的顶部。

(2) 从氦同位素的工作结果和深部地球物理出发,可以得到一个岩石圈地幔内形成超高压矿物的模型。即是表壳岩石俯冲到岩石圈地幔顶部,形成超高压变质岩,然后由于地壳隆升、剥蚀,出露到地表。

(3) 并不是所有俯冲到岩石圈地幔顶部的表壳岩石都会形成超高压变质岩,大别山地区形成超高压变质岩是由于它同时具备既是碰撞带又是蘑菇云岩石圈地幔发育的地区。

(4) 沿六安—黄石综合地球物理地球化学剖面实测的热流剖面显示。北淮阳构造带的莫霍面温度

为 902℃, 北大别构造带的莫霍面温度为 590℃, 南大别构造带的莫霍面温度为 1307℃, 而宿松变质杂岩带的莫霍面温度则为 415℃。在大别山地区深度达到 70 km 的岩石圈温度均已达到形成柯石英的温度条件。南大别岩石圈地幔内的超高压变质作用所需要的高温条件至今依然存在。

(5) 反射地震剖面显示, 在晓天—磨子潭断层处, 有一个俯冲碰撞带, 这个碰撞俯冲带是扬子洋中扬子板块与大别—桐柏—陡岭列岛之间的碰撞俯冲带。碰撞俯冲带的形态也证实黏塑性的大陆板块在碰撞俯冲时, 岩石圈地幔的变形远比通常认定的那种刚性板块俯冲要复杂。俯冲方向大都向下, 在岩石圈地幔的上部出现一个由地壳岩石形成的俯冲漏斗。在岩石圈地幔中, 俯冲板块和制动板块像麻花一样相互楔入, 在深部甚至改变俯冲方向, 制动板块反而向俯冲板块俯冲。当岩石圈地幔顶部局部熔融时, 无疑俯冲物质将向局部熔融层扩散。

(6) 反射地震剖面与大别山造山带的详细构造填图结果相一致, 证实大别山造山带及邻区的主体变形样式是双向挤压的扇形非完全对称的“科伯构造”。

(7) 反射地震剖面与大别山造山带的详细构造填图结果还证实大别山变形晚期, 在核部形成“背形穹隆”, 并组成“链状穹隆”的构造带, 在造山带边部, 形成向外侧盆地滑覆逆冲构造。正是由于穹隆上升, 将形成于岩石圈地幔顶部的超高压变质岩带到地表, 经受剥蚀而出露地表。

参考文献 (References):

- [1] 许志琴. 扬子板块北缘的大型深层滑脱构造及动力学分析 [J]. 中国区域地质, 1987, 6(4):289-300.
Xu Zhiqin. Large deep-level décollement structure on the northern margin of the Yangtze Plate and its dynamic analysis [J]. Regional Geology of China, 1987, 6 (4):289-300 (in Chinese with English abstract).
- [2] Wang Xiaomin, Liou J G, Mao H K. Coesite-bearing eclogite from Dabie Mountain in central China, Geology, 1989, 17:1085-1088.
- [3] Xu S, Okay A I, Ji S Y, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting [J]. Science, 1992, 256:80-82.
- [4] Yuan Xuecheng, Simon L, K, Teng Wenbang, et al. Crustal structure and exhumation of the Dabie Shan ultrahigh-pressure orogen, eastern China, from seismic reflection profiling [J]. Geology, 2003, May, 31(5):435-438.
- [5] 《超高压变质作用与碰撞造山动力学》编写组. 超高压变质作用与碰撞造山动力学. 2000.
Compilation Team of "Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Collisional Orogeny Dynamics. Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Collisional Orogeny Dynamics. 2000(in Chinese).
- [6] Anderson D L, Foulger G R, Meibom A. Helium: Fundamental models [J]. www.MantlePlumes.org, 2006.
- [7] 李善芳, 李延河, 丁梯平, 等. 大别山超高压变质榴辉岩的氦同位素组成及其形成环境的制约 [J]. 地质论评, 2005, 51(3):243-249.
Li Shanfang, Li Yanhe, Ding Tiping, et al. Helium isotope compositions and forming conditions of UHP metamorphic eclogites from the Dabie Mts. Terrane in East China [J]. Geological Review, 2005, 51(3):243-249(in Chinese with English abstract).
- [8] Cloos M, Shreve R L. Subduction-channel model of prism accretion, mélange formation, sediment subduction, and subduction erosion at convergent plate margins: 1. Background and description [J]. Pure and Applied Geophysics, 1988, 128(3/4):457-500.
- [9] Maruyama M, Liou J G, Zhang R. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure and high-pressure metamorphic belts from central China [J]. The Island Arc, Jour. Mineral., 1994, 3:112-121.
- [10] Ernst W G, Liou J G. Ultra-high pressure metamorphism and geodynamics in collision-type orogenic belts [C]//Final report of the Task Group III-6 of the International Lithosphere Project, International Book Series, Volume 4, Bellwether Publishing, Ltd for the GSA 2000, 293.
- [11] Chopin C. Very-high-pressure metamorphism in the western Alps: implications for subduction of continental crust [J]. Phil. Trans. R. Soc. Land. 1987, A 321:183-197.
- [12] Platt J P. Dynamics of orogenic wedges and the uplift of high-pressure metamorphic rocks [J]. Geological Society of America Bulletin, 1986, 97:037-1053.
- [13] Coney P J. The regional tectonic setting and possible causes of Cenozoic extension in the North American Cordillera [C]//in Coward M P, et al (eds.). Continental Extensional Tectonics, 1987:177-186.
- [14] Butler R W H., Thrust-tectonics, deep structure and crust subduction in Alps and Himalayas [J]. J. Geol. Soc. London, 1986, 143:857-873.
- [15] 金振民, 金淑燕, 高山, 等. 大别山超高压岩石形成深度局限于 100-150 km 吗? [J]. 科学通报, 1998, 43(7):767-770.
Jin Zhenmin, Jin Shuyan, Gao Shan, et al. Is the formation depth of the Dabie UHP rocks restricted to 100-150 km? [J]. Chinese Science Bulltin, 1998, 43(7), 767-770(in Chinese).
- [16] 汤加富, 周存亭, 侯明金, 等. 大别山及邻区地质构造特征与形成演化 [M]. 北京:地质出版社, 2003:264.
Tang Jiafu, Zhou Cunting, Hou Mingjin, et al. The Geological Characteristics, Formation and Evolution of Dabie Mountains and Its Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2003. 264(in Chinese).

- [17] 马昌前, 杨坤光, 许长海, 等. 大别山中生代钾质岩浆作用与超高压变质地体的剥露机理[J]. 岩石学报, 1999, 15(3):379-393.
Ma Changqian, Yang Kunguang, Xu Changhai, et al. Mesozoic potassic magmatism in the Dabie Mountains: Implication for exhumation mechanism of ultrahigh-pressure metamorphic terranes [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(3):379-393(in Chinese with English abstract).
- [18] 吕古贤, 陈晶, 李晓波, 等. 构造附加静水压力与含柯石英榴辉岩成岩深度测算[J]. 科学通报, 1998, 43(24):2590-2602.
Lü Guxian, Chen Jing, Li Xiaobo, et al. Measurements of additional structural hydrostatic pressures and depths of formation of coesite-bearing eclogite [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43 (24):2590-2602 (in Chinese).
- [19] 王方正. 高压、超高压变质岩形成深度讨论[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1996, 21(1):41-44.
Wang Fangzheng. Depth of high-pressure and ultra-high-pressure metamorphism [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(1):41-44(in Chinese with English abstract).
- [20] 袁学诚. 秦岭岩石圈速度结构与蘑菇云构造模型 [J]. 中国科学, (D 辑), 1996, 26(3):209-215.
Yuan Xuecheng. Velocity structure of the Qinling lithosphere and mushroom cloud model [J]. Science in China (SeriesD), 1996, 36 (3):235-244.
- [21] 袁学诚, 再论岩石圈地幔蘑菇云构造及其深部成因[J]. 中国地质, 2007, 34(5):737-758.
Yuan Xuecheng. Mushroom structure of the lithospheric mantle and its genesis at depth: [J]. Geology in China, 2007, 34 (5):737-758(in Chinese with English abstract).
- [22] 路凤香, 郑建平, 李伍平, 等. 中国东部显生宙地幔演化的主要样式:“蘑菇云”模型[J]. 地学前缘, 2000, 7(1):97-106.
Lu Fengxiang, Zheng Jianping, Li Wuping, et al. The main evolution pattern of Phanerozoic mantle in the eastern China: the “mushroom cloud” model [J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(1): 97-106(in Chinese with English abstract).
- [23] 金昕, 任光辉, 曾建华, 等. 东秦岭造山带岩石圈热结构及断面模型[J]. 中国科学, 1996, 26(增刊):13-22.
Jin Xin, Ren Guanghui, Zeng Jianhua, et al. Lithospheric thermal structure and section model in the East Qinling orogenic belt [J]. Science in China (Supp.), 1996, 26, 13-22 (in Chinese).
- [24] 王清晨, 从柏林. 大别山超高压变质带的大地构造框架[J]. 岩石学报[J]. 1998, 14:481-492.
Wang Qingchen, Cong Bolin. Tectonic Framework of the Ultrahigh-Pressure metamorphic zone from the Dabie Mountains [J]. Acta Petrologica Sinica, 1998, 14 (3) 481-492 (in Chinese with English abstract).
- [25] Wang Q, Cong B. Exhumation of UHP Terranes: A case study from the Dabie Mountains, Eastern China[C]//Ernst WG and Liou JG (ed.). Ultra-high Pressure Metamorphism and Geodynamics in collision-type orogenic belts, 2000, GSA, 293.
- [26] Pysklywec R. N. Beaumont C, Fullsack P. Modeling the behavior of the continental mantle lithosphere during plate convergence[J]. Geology, 2000, 28:655-658.
- [27] Pysklywec R. N. Evolution of subducting mantle lithosphere at a continental plate boundary [J]. Geophysical Research Letters, 2001 28(23):4399-4402.
- [28] 汤加富, 钱存照, 高天山. 大别山榴辉岩浅变质火山-碎屑岩层组合的发现及其地质意义[J]. 安徽地质, 1995, 5(2):29-36.
Tang Jiafu, Qian Cunzhao, Gao Tianshan. The discovery of meso- and epi-metamorphic volcanic clastic rock bed association in the eclogite belt and its geologic implications, the Dabie Mt, Area [J]. Geology of Anhui, 1995, 5 (2):29-36 (in Chinese with English abstract).
- [29] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 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[J]. 地质学报, 2002, 76(4):484-495.
Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Pei Xianzhi, et al. 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 [J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(4):484-495(in Chinese with English abstract).

Lithospheric structure under the Dabie orogen and another model of exhumation of UHP rocks

YUAN Xue-cheng, LI Shan-fang

(Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: Study of helium isotope of UHP rocks in the Dabie area shows that minerals of UHP rocks such as eclogite in the Dabie area were not derived from the mantle but formed at top of the lithospheric mantle (LID). According to the deep geophysical data, the authors propose a new model for the formation of UHP minerals at the lithospheric mantle lid, i.e. when supracrustal rocks were subducted to the LID, UHP metamorphic rocks were formed at strong pressures caused by convergence of plates and high temperatures produced by the mushroom cloud mantle, and then were exposed at the surface due to doming and erosion of the crust. The available literature indicates that when visco-plastic continental plates collided and were subducted the deformation of the LID was much more complex than the deformation due to subduction of a rigid plate. The direction of subduction was mostly vertically downward, and the subducted plate and retro-side wedged each other like fried dough twist and the subducting direction might change at depth. When the LID partially melted, subducted materials would spread in the locally molten layer and formed UHP metamorphic rocks at high pressures and temperatures. The global distribution of main UHP metamorphic rocks is associated with the distribution of the Paleo-Tethys Ocean. However, it is not certain whether both of them were soft collision between visco-plastic continental plates and whether there were high-temperature regions at the LID near the collision zone.

Key words: Dabie Mountains; UHP; helium isotope; soft collision; seismic reflection profiling; heat flow

About the first author: YUAN Xue-cheng, male, born in 1928, senior engineer, mainly engages in deep geophysical research; E-mail: xcyuan@263.net.cn.