

文章编号: 1006-6616 (2000) 03-0039-06

大别山超高压变质岩形成深度的同位素限制

丁 悌 平

(国土资源部同位素地质开放实验室; 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037)

摘 要: 大别山超高压变质岩形成深度是各国地质学家十分关心的问题。它不仅影响对碰撞造山带形成机制和演化过程的认识, 而且影响对地球深部状况及地球动力学的研究。该文对大别山超高压变质岩已有同位素资料进行了分析与讨论。大别山榴辉岩的 ϵ_{Nd} 为 $-6.2 \sim -17$, ϵ_{Sr} 为 $18 \sim 42$, 且显示明显的 Nd 同位素的不平衡现象。大别山榴辉岩的氧同位素组成研究表明, 这些榴辉岩的原岩在超高压变质前, 不同程度地与贫 ^{18}O 的大气降水(或海水)发生过氧同位素交换, 且在超高压变质过程中依然保留了这些痕迹。除一个样品外, 大别—苏鲁地区的榴辉岩的 $^3He/^4He$ 比值都落在 $0.79 \times 10^{-7} \sim 9.35 \times 10^{-7}$ 范围内, 显示陆壳岩石来源 He 的重要贡献。所有 Sr-Nd、O 和 He 同位素研究均表明: 超高压变质岩保存着表壳岩石原岩的同位素特征, 而未显示变质时受到地幔物质的明显影响。对于超高压变质岩的上述同位素特征, 有人认为是由于大别山造山带俯冲和折返的速度太快造成的。由于造山带俯冲和折返的速度太快, 表壳岩石原岩变质时来不及与地幔物质发生交换, 故没有留下地幔物质参与的痕迹。该研究认为这种解释有些勉强, 因为大别造山带俯冲和折返时间至少需要 15Ma。在如此长的时间内, 在 100 多公里地幔深处高于 $700^{\circ}C$ 的高温下发生超高压变质作用, 表壳岩石原岩不可能不与地幔物质发生同位素交换。相反, 如果认为大别山超高压变质岩就在地壳内形成, 则大别山超高压变质岩同位素的所有特征就很好解释了。

关键词: 同位素; 大别山; 超高压变质岩形成深度

中图分类号: P597

文献标识码: A

近年来, 在一些造山带变质岩中相继发现柯石英和金刚石^[1~4], 引起人们的极大关注。我国的大别造山带是世界上目前已发现的超高压变质岩出露面积最广泛的造山带, 是研究超高压变质作用的各国地质学家关注的焦点。

柯石英和金刚石的形成需要很高的压力 ($>2.7GPa$)。假定这样高的压力完全由岩石静压力所引起, 有人估算, 包容它们的变质岩矿物可能形成于地下 100 多公里的地幔深度^[5~8]。但也有人提出, 形成含柯石英与金刚石的超高压变质岩所需压力不一定全来自岩石静压力, 构造静水压力可能作出了相当大的贡献^[9]。根据这种看法, 这些超高压变质岩

收稿日期: 2000-06-22

基金项目: 地质行业基金 (HY979825)

作者简介: 丁悌平 (1941—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事地球化学方面的研究。

的实际形成深度可能小于根据岩石静压力所计算的深度。在这种情况下，含柯石英与金刚石并不意味着这些岩石形成于地下 100 多公里的地幔深度。

这两种看法的不同不仅影响碰撞造山带的形成和演化过程的研究，对地球深部状况及地球动力学研究也有深远的影响。这些变质岩的原岩多为表壳岩石，密度较低。它们能不能下沉到密度较高的地幔深处？这是关系到地球动力学基本理论的关键问题。

为了验证这两种看法，许多构造地质学、地球动力学、乃至力学工作者对形成地球内部压力的诸种因素及其相对贡献，正进行不断深入的研究。许多岩石、地球化学和同位素地质工作者也卷入了这场争论，为查明这些岩石是否到达过 100 多公里的深部，是否进入过地幔提供旁证，寻找解释。

同位素示踪是研究物质来源的一种十分有效的手段。现在，经过数十年的工作，我们已积累了大量数据，对地壳和地幔物质在同位素组成方面的差别有了相当清楚地了解。对超高压变质岩进行深入广泛的同位素示踪研究，应可能查明岩石形成时是否有新加入的地幔物质，或与地幔物质发生过同位素交换，从而为岩石是否形成于地幔深度提供有力的旁证。

1 大别山超高压变质岩保存着表壳岩石的同位素组成

大别山地区已做了不少同位素地质年代学工作^[9,10~13]和同位素地球化学研究工作^[14~21]。这些研究对解决变质作用的 PTt 轨迹，对于探讨变质原岩的特征，变质作用的条件及变质后的退化、蚀变，提供了很多重要资料。迄今为止，所有研究均一致表明：超高压变质岩保存着原岩的表壳岩石同位素特征，未发现变质时受到地幔物质影响的有力证据。

1.1 Sr-Nd 同位素研究

李曙光等^[10]对大别山榴辉岩的 Rb-Sr、Sm-Nd 同位素体系做了系统的研究，结果发现大别山榴辉岩的 ϵ_{Nd} 为 -6.2 ~ -17， ϵ_{Sr} 为 18 ~ 42 (图 1)，且显示明显的 Nd 同位素的不平衡现象^[12]。据此，他认为这些榴辉岩的原岩为前寒武系岛弧或板间玄武岩，但在变质前受到过古陆壳物质的混染。

1.2 O 同位素研究

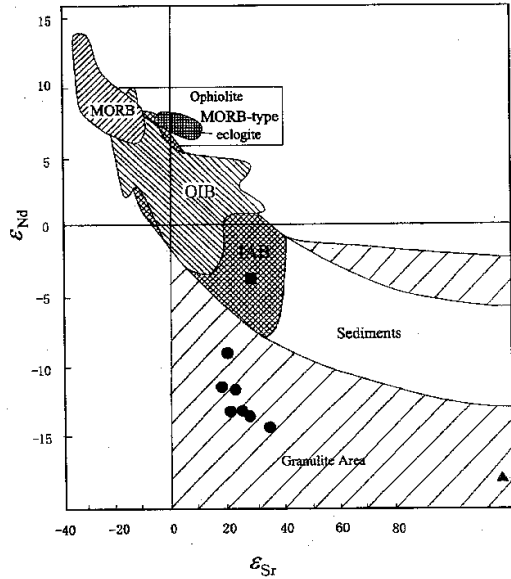


图 1 大别—苏鲁地区榴辉岩及其矿物在变质时的 Nd-Sr 同位素关系图 (据文献 [10])

Fig.1 Nd vs. Sr diagram for eclogites and minerals from the Dabie-Sulu region

MORB, OIB, IAB 与沉积岩区间接 221Ma 估算。图中也表示出德国南部 Munchberg 地块 MORB 型榴辉岩 221Ma 前的 Nd、Sr 同位素组成。实圆点代表 II 型榴辉岩中的矿物，实三角代表 II 型榴辉岩全岩，实方点代表样品 R-4 中之斜方辉石

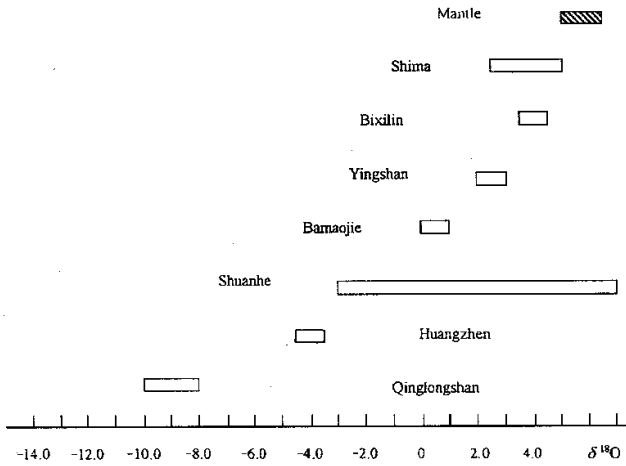


图 2 大别—苏鲁超高压变质带某些地区榴辉岩 $\delta^{18}\text{O}$ 分布情况 (据文献 [14, 16, 18])

Fig. 2 $\delta^{18}\text{O}$ distribution of eclogite from several sites in the Dabie and Sulu UHPM region

对大别山榴辉岩的氧同位素组成已做了大量研究。Yui 等^[14]首先报道在苏鲁地区的青龙山, 发现 ^{18}O 极贫的榴辉岩 ($\delta^{18}\text{O} - 8 \sim -10$)。据此他提出这些榴辉岩的原岩在超高压变质前与贫 ^{18}O 的大气降水发生过氧同位素交换, 在超高压变质过程中依然保留了这些痕迹。郑永飞等^[16]也报道了类似的结果并作出了相同的解释。现在, 不少人已对大别—苏鲁地区的榴辉岩的氧同位素作了研究, 其结果可概括于图 2。已有资料表明: ①这些榴辉岩的原岩在超高压变质前不同程度地与贫 ^{18}O 的大气降水 (或海水) 发生过氧同位素交换; ②在超高压变质过程中依然保留了这些痕

迹; ③榴辉岩中不同矿物间普遍存在氧同位素不平衡, 反映退化变质过程中与贫 ^{18}O 流体的交换作用的影响。值得注意的是: 迄今为止还没有人提出过在超高压变质过程中有地幔流体的参与, 或与地幔物质发生过氧同位素交换作用的证据。

1.3 He 同位素研究

李延河等^[19]与孙明良等^[21]对大别—苏鲁地区的榴辉岩进行了 He 同位素研究。图 3 示李延河等^[18]所得结果。图中数据可以看出, 除一个样品 (采自碧溪岭) 的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值较高 (7.82×10^{-6}), 落在 MORB 范围内外, 其它样品的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值都落在 $0.79 \times 10^{-7} \sim 9.35 \times 10^{-7}$ 范围内, 显示陆壳岩石来源 He 的重要贡献。结合榴辉岩的分布特征分析, 李延河等认为这些榴辉岩的原岩可能为侵入陆壳的基性、超基性岩体或岩脉, 侵入陆壳时与陆壳物质或古大气降水发生过强烈的同位素交换。与氧同位素一样, He 同位素研究也未能提供地幔物质参与形成含柯石英与金刚石的超高压变质岩的证据。

所有 Sr-Nd、O 和 He 同位素研究均表明: 超高压变质岩保存着表壳岩石原岩的同位素特征, 而未显示变质时受到地幔物质的明显影响。

2 是快速俯冲到地幔快速折返? 还是根本未达到地幔?

面对超高压变质岩保存着表壳岩石原岩的同位素特征, 而未显示变质时受到地幔物质的明显影响的不争事实, 出现两种不同的解释。

一种解释认为: 这是因为大别山造山带俯冲和折返的速度太快造成的。由于造山带俯冲和折返的速度太快, 表壳岩石原岩变质时来不及与地幔物质发生交换, 故没有留下地幔物质参与的痕迹。但这种解释显得有些勉强。因为据持这种看法的人较保守的估计, 大别造山带俯冲和折返所需时间也达 15Ma。在 100 多公里深的地幔之中, 温度至少高于 700°C 。表壳

岩石原岩在高于 700°C 的高温下，在地幔区间停留十数个百万年计的时间发生超高压变质作用，有什么因素能避免它们与地幔物质发生同位素交换呢？为了避开这一难题，有学者提出：也许俯冲陆块和被冲入区的地幔都很“干”，没有什么流体。但这并没有解决问题，反而引出了新的问题。因为这需要超高压变质岩的原岩和它俯冲进入的地幔都特别“干”的证据。至今没有能提出这方面的证据，倒是出现了许多相反的证据。例如，早有证据表明大别山俯冲陆块的原岩在俯冲前与古海水或大气降水发生过同位素交换。这意味着原岩中必然有含水矿物。这些矿物中的结构水到达高温高压区会不会形成流体？另外，在大别山变质地层中含有大量碳酸盐沉积物，它们在地幔区的高温下会不会产生 CO₂，会不会成为同位素交换的媒介？由于这些问题，大别山形成于地下 100 多公里的地幔深度的说法显然缺乏说服力。

相反，如果我们接受大别山超高压变质岩在地壳内形成，并未到达过地幔深度的说法，则所有关于大别山超高压变质岩同位素组成方面的问题就迎刃而解了。当然，这种说法也面临着要对形成超高压变质岩，特别是柯石英和金刚石的压力作出解释的问题。但是，“形成含柯石英与金刚石的超高压变质岩所需的压力不一定全由岩石静压力所引起，构造静水压力可能作出了相当大的贡献”的新观点，正好为这一说法提供了有力的根据。反过来说，证明大别山超高压变质岩形成于地壳环境的同位素证据，同时也为“地球内部压力是上复岩石静水压力与构造压力和其它压力的总和”的看法提供了证据。

作者与张炳熹、董申葆院士，刘宗光、刘敦一、李曙光、郑永飞教授，吕古贤、李延河研究员及肖益林博士的讨论，对本文大有裨益，特致谢意。

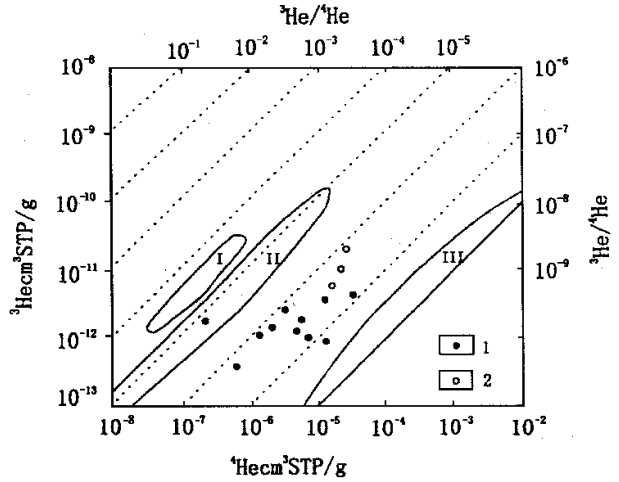


图 3 大别—苏鲁地区榴辉岩 He 同位素组成 (据文献 [20])

Fig.3 Helium isotope compositions of eclogites from the Dabie-Sulu region
 I. 地幔柱; II. MORB; III. 古陆壳;
 1. 大别—苏鲁地区; 2. Kokchetav 地块

参 考 文 献

- [1] Chioubn C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the western Alps : a first record and some consequences [J]. *Contrib. Mineral. Peteol.* , 1984 , 86 : 107~118.
- [2] Sobolev N V , Shatsky V S. Diamond inclusions in garnets from metamorphic rocks : a new environment for diamond formation [J]. *Nature (London)* , 1990 , 343 : 742~746.
- [3] Okay A I , Xu S , Sengor A M C. Coesite from the Dabie Shan eclogites , central China [J]. *Eur. J. Mineral.* , 1989 , 1 : 595~598.
- [4] Okay A I. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrane : Dabie Shan , China [J]. *European Journal of Mineralogy* , 1993 , 5 : 659~673.
- [5] Wang X , Liou J G , Maruyama S. Coesite-bearing eclogites from the Dabie mountains , central China : Petrogenesis , P-T paths , and implications for regional tectonics [J]. *J Geol.* , 1992 , 100 : 231~250.
- [6] Zhang R , Liou J G. Coesite-bearing eclogite in Henan Province , central China : detailed petrography , glaucophane stability and PT-path [J]. *European Journal of Mineralogy*. 1994 , 6 : 217~233.
- [7] Liou J G , Wang Q , Zhang R et al. . Ultrahigh-P metamorphic rocks and their associated lithologies from the Dabie mountains , central China : A field trip guide to the 3rd international eclogite field symposium [J]. *Chinese Science Bulletin* , 1995 , 40 (Supplement) : 1~71.
- [8] Cong B , Zhai M , Carswell D A et al. . Petrogenesis of ultrahigh-pressure rocks and their country rocks in Shuanghe of Dabieshan mountains , Central China [J]. *European Journal of Mineralogy* , 1995 , 7 : 119~138.
- [9] 吕古贤 , 陈 晶 , 李晓波 , 刘瑞 . 构造附加静水压力研究与含柯石英榴辉岩成岩深度测算 [J]. *科学通报* , 1998 , 43 (24) : 2590~2602.
- [10] Li S , Xiao Y , Liou D , et al. . Collision of the north China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites : Timing and processes [J]. *Chemical Geology* , 1993 , 109 : 89~111.
- [11] 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 [J]. *Geology* , 1993 , 21 : 239~342.
- [12] 李曙光 , Jagouts E. 大别山—苏鲁地体超高压变质年代学——I. Sm-Nd 同位素体系 [J]. *中国科学 (D)* , 1996 , 26 (3) : 249~257.
- [13] 李曙光 , 等. 大别山—苏鲁地体超高压变质年代学——II. 锆石 U-Pb 同位素体系 [J]. *中国科学 (D)* , 1997 , 27 (3) : 200~206.
- [14] Yui T F , Rumble III D , Lo C H. Unusually low $\delta^{18}\text{O}$ ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Sulu Terrain , eastern China [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta* , 1995 , 59 : 2859~2864.
- [15] Yui Tzen-Fu et al. . Stable isotope Characteristics of eclogites from the Ultrahigh-pressure metamorphic terrain , east-central China [J]. *Chemical Geology* , 1997 , 137 : 135~147.
- [16] Zheng Y F , Fu B , Gong B and Li S. Unusually light oxygen in eclogite from Qinglongshan in the Su-Lu terrane [J]. *Chin. Sci. Bull.* , 1995 , 40 : 129~130.
- [17] 郑永飞 , 傅 斌 , 肖益林 , 等. 大别山榴辉岩氢氧同位素组成及其地球动力学意义 [J]. *中国科学 (D 辑)* , 1997 , 27 (2) : 121~126.
- [18] 傅 斌 , 郑永飞 , 肖益林 , 等. 大别苏家河地区榴辉岩和大理岩的地球化学研究 [J]. *地质学报* , 1998 , 72 (4) : 323~339.
- [19] 李延河 , 刘晓春 , 等. 大别苏鲁地区榴辉岩的 He 同位素特征及地质意义 [J]. *地球科学* , 1997 , 18 (增刊) : 77~79.
- [20] Li Y H , Li J C , Song H B , Liu X C. Helium isotope geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphic eclogites from the Dabie-Sulu terrane in east China [J]. *Acta Geologica Sinica* , 2000 , 74 (1) : 14~18.
- [21] 孙明良 , 叶叶仁 , 杜建国. 大别山榴辉岩的单矿物中 He、Ar 同位素特征 [J]. *地球科学* , 1997 , 18 (增刊) : 80~82.

ISOTOPIC CONSTRAINTS ON THE FORMATION DEPTH OF ULTRAHIGH PRESSURE METAMORPHIC ROCKS IN THE DABIE REGION

DING Ti-ping

1. *Open research laboratory on isotope geology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100037, China;*
2. *Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China)*

Abstract : The formation depth of metamorphic rocks in the Dabie ultra-high pressure metamorphic (UHPM) zone is a question attracting attention of geologists in the world. It has some bearing not only on our understanding of formation mechanism and evolution processes of collision orogenic belt, but also on studies on earth's interior and geodynamic processes.

In this study, the isotopic data of metamorphic rocks in the Dabie UHPM zone are analyzed and discussed to give constraints on the formation depth of in the Dabie UHPM zone.

The ϵ_{Sr} of eclogite in the Dabie UHPM zone varies from 18 to 42, and ϵ_{Nd} from -6.1 to -17, showing remarkable isotopic disequilibrium. The oxygen isotope studies indicate that the protoliths of these UHPM rocks have experienced oxygen isotope exchange with meteoric water (or sea water) depleted in ^{18}O before metamorphism and remained unchanged in the processes of metamorphism. Except for one from the Bixiling, all samples of eclogite from Dabie UHPM zone have the $^3\text{He}/^4\text{He}$ ratios falling within the range between 0.79×10^{-7} and 9.35×10^{-7} , indicating an important contribution of He from continental crust. All studies of Sr, Nd, O and He isotopes indicate that the UHPM rocks have retained the isotopic characteristics of the original surface rocks. No significant influence of mantle derived materials has been found in them.

Some researchers attributed the above isotopic characteristics, to rapid subduction and exhumation that no isotopic exchange between the two would take place, with no remains of mantle materials in these UHPM rocks. However, this assumption is not justified with present knowledge. It was estimated that the whole process of UHPM has spanned a time of at least 15Ma. During such a long period, it seems impossible that no isotopic exchange between mantle materials and original surface rock would occur at a depth of $\geq 100\text{km}$ where the temperature would rise to $\geq 700^\circ\text{C}$. Conversely, the isotopic characteristics will be well explained by assuming that the UHPM occurred in the crust instead in the upper mantle.

Key words : isotope ; Dabie region ; formation depth of UHPM rocks