1000-0569/2007/023(02)-0317-30 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 Lu-Hf 同位素研究*

郑永飞 陈仁旭 张少兵 唐俊 赵子福 吴元保

ZHENG YongFei, CHEN RenXu, ZHANG ShaoBing, TANG Jun, ZHAO ZiFu and WU YuanBao

中国科学技术大学地球和空间科学学院 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026

Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, Chinese Academy of Sciences; School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, *China*

2006-11-14 收稿, 2007-01-10 改回.

Zheng YF, Chen RX, Zhang SB, Tang J, Zhao ZF and Wu YB. 2007. Zircon Lu-Hf isotope study of ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 23(2):317 – 330

Abstract Zircon Lu-Hf isotopic analyses were carried out for ultrahigh-pressure eclogite and granitic gneiss from the Dabie orogen. Together with zircon U-Pb dating, the results provide constraints on their protolith origin, with significant implications for growth of continental crust by rift magmatism during breakup of the supercontinent Rodinia. Analyses and comparison of combined U-Pb and Lu-Hf isotopes in different domains of igneous and metamorphic zircons indicate that different origins of zircons show considerable differences in $^{206}Pb/^{238}U$ age, initial Hf isotope ratio, Th/U and Lu/Hf ratios. Metamorphically grown zircons have lower Th/U and Lu/Hf ratios but higher $\varepsilon_{Hf}(t)$ values than igneous core and mantle. There are positive correlations between Th/U and Lu/Hf ratios for metamorphically reworked zircons, suggesting similar effects of eclogite-facies metamorphism on zircon U-Th-Pb and Lu-Hf isotope systems. Therefore, high-grade metamorphism can cause an increase in $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratios for metamorphically grown grain or domain, resulting in enhanced $\varepsilon_{Hf}(t)$ values as if crystallizing from juvenile crust. Hence caution must be exercised when interpreting metamorphic zircon Hf isotope data for the purpose of source tracing. Zircon U-Pb dating for igneous cores from both eclogite and gneiss clearly indicate bimodal magmatism at about 750Ma, with a minor incorporation of juvenile crust in an age of 2.15Ga. Initial Hf isotope ratios can be categorized into two groups, first with positive $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of 5.9 ± 0.9 to 12.9 ± 0.7 and second with neutral $\varepsilon_{Hf}(t)$ values of -4.3 ± 0.5 to 2.3 ± 0.3 around zero. The positive $\varepsilon_{Hf}(t)$ values correspond to young Hf model ages mostly on early Neoproterozoic and late Mesoproterozoic, whereas negative $\varepsilon_{Hf}(t)$ values to Paleoproterozoic Hf model ages. The former implies growth of continental crust by extraction of juvenile crust from the depleted mantle along rifting volcanic margins at middle Neoproterozoic, with contemporaneous crust-mantle interaction in rifting tectonic zones. Both growth and reworking of juvenile and ancient crusts are evident in the protoliths of both eclogite and gneiss, with prompt reworking of juvenile crust at each time.

Key words Dabie orogen, Eclogite, Granitic gneiss, Zircon, U-Pb dating, Lu-Hf isotopes, Crustal growth

摘 要 对大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩进行了锆石 Lu-Hf 同位素分析,结果为原岩来源提供了制约,表明扬子陆块在 Rodinia 超大陆裂解时的裂谷岩浆活动中发生了显著的陆壳生长。对这些锆石的不同区域进行的 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析和比较表明,不同成因的锆石在$^{206}Pb/^{238}U$年龄、初始 Hf 同位素组成、Th/U 及 Lu/Hf 比值等方面具有明显的差异。与年龄较老的岩浆核部和幔部相比,年轻的变质增生边具有低的 Th/U 和Lu/Hf比值但高的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值。不同成因锆石的 Th/U 和 Lu/Hf比值存在着正相关性,表明变质作用对锆石的 U-Th-Pb 和 Lu-Hf 同位素体系有着相似的影响。高级变质作用有时能够引起岩浆锆石增生边$^{176}Hf/^{177}Hf$比值的显著升高,导致变质新生颗粒或增生边类似于新生地壳的高 $\varepsilon_{Hf}(t)$值假象。对榴辉岩和片麻岩锆石核部的分析发现,镁铁质和长英质原岩在大约 750Ma 左右形成一个双峰式火山岩套,另外包含少量的年龄约为 2.15Ga的陆壳。初始 Hf 同位素组成可分成两组:第一组具有正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值,为 $5.9 \pm 0.9 \sim 12.9 \pm 0.7$;第二组 $\varepsilon_{Hf}(t)$值在零左右,为 $-4.3 \pm 0.5 \sim 2.3 \pm 0.3$。正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值与较年轻的模式年龄相对应,负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$值与古元古代模式年龄相对应。前

* 国家自然科学基金项目(40334036 和 40573011)资助成果。

第一作者简介:郑永飞,男,1959 年 10 生,博士,教授,地球化学专业,E-mail:yfzheng@ustc.edu.cn

者表明,在扬子陆块北缘裂谷岩浆作用将亏损地幔物质加入到大陆地壳中,同时在新元古代中期的裂谷构造带中存在同时期的壳-幔相互作用。因此,在扬子陆块北缘新元古代中期裂谷岩浆活动中,既有新生地壳生长和即时再造,也有古老地壳再造。

关键词 大别造山带; 榴辉岩; 片麻岩; 锆石; U-Pb 定年; Lu-Hf 同位素; 地壳生长

中图法分类号 P588.348; P597.3

1 引言

对同一锆石进行原位 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析,能够直接把岩浆活动或者变质作用与已知的地质事件联系起来,从而为地球化学研究开辟了很多新的领域。近二十年来,锆石的 Hf 同位素分析已经成功的用于示踪原岩来源和地壳、地幔随时间的演化(Amelin *et al.*, 1999, 2000; Bodet and Scharer, 2000; Griffin *et al.*, 2000, 2002; Andersen *et al.*, 2002; Samson *et al.*, 2003, 2004; Halpin *et al.*, 2005; Iizuka *et al.*, 2005; Kemp *et al.*, 2005; Hawkesworth and Kemp, 2006; Zheng *et al.*, 2007)。但是,高级变质岩中的锆石 Lu-Hf 同位素体系研究却相对很少受人关注。锆石 Lu-Hf 同位素体系在高级变质岩中的变质效应如何,它在多大程度上可以用来制约原岩的性质,以及如何制约原岩性质,这些都是亟待解决的重要问题(Zheng *et al.*, 2005a, 2006; Zhang *et al.*, 2006)。

微量元素研究表明,高级变质岩(角闪岩相、麻粒岩相、榴辉岩相)中的变质锆石与岩浆锆石具有相似的 Hf 含量,类似的或略低的重稀土含量(Hoskin and Black, 2000; Rubatto, 2002)。所以,一般认为变质锆石具有与岩浆锆石一样或较低的 Lu/Hf 比值。而锆石阳离子扩散实验则显示,Hf 的扩散速率远低于 Pb 和 O,但稍快于 U 和 Th (Cherniak and Watson, 2003)。因为锆石结晶时吸收 U 但排斥 Pb,所以锆石在变质过程中存在显著的 Pb/U 分馏,因而原位 U-Pb 定年是研究变质锆石 Hf 同位素变化机制的重要途径。通过解析变质锆石复杂的内部结构和年龄,还可以获得可靠的原岩岩浆初始 Hf 同位素组成,进而判断原岩是壳源还是幔源。本文以大别造山带超高压榴辉岩和花岗片麻岩为例,通过锆石 U-Pb 定年和 Lu-Hf 同位素分析,不仅识别出高级变质过程中的锆石 Hf 同位素变化趋势,而且就变质岩原岩示踪和壳幔分异事件等问题进行了探讨。

2 地质背景

华北陆块与扬子陆块在三叠纪时的碰撞形成了大别-苏鲁超高压造山带(图 1)(Wang *et al.*, 1995; Cong, 1996; Liou *et al.*, 1996; Hirajima and Nakamura, 2003; Jahn *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2003),为我们研究高级变质岩中 Lu-Hf 同位素体系的行为提供了极好的野外实验室。这个造山带由郯庐断裂带分开的两部分所组成,分别为大别造山带和苏鲁造山带。大别造山带从北到南有五个主要的构造带(Hacker *et al.*, 2000; Zheng *et al.*, 2005b),依次为:(1) 北淮阳绿片岩带;(2) 北大别高温/超高压麻粒岩带;(3) 中大别中温/超高压榴辉岩带;(4) 南大别低温/超高压榴辉岩带;(5) 宿松低温/高压蓝片岩带。这些俯冲并折返的物质主要是扬子板块前寒武纪结晶基底的一部分和上覆的沉积物。对超高压榴辉岩和片麻岩的稳定同位素和流体包裹体研究表明(Fu *et al.*, 2001, 2003; Li *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2003),在峰期超高压变质期间流体活动性很小,但是在峰期前高压-超高压过渡期间和峰期后超高压-高压过渡期间由于矿物相变和羟基降压出溶出现流体活动,并且折返过程中的退变质流体在化学和同位素组成上具有内部缓冲的特征。根据苏鲁造山带正片麻岩和副片麻岩锆石中含柯石英的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果,刘福来等(Liu and Xu, 2004; Liu et al, 2004a, 2004b)把超高压变质年龄限定在 233 ±4Ma 到 226 ±3Ma 这一范围内。进一步的锆石 U-Pb 年代学研究发现,柯石英相超高压变质作用发生在 240Ma 到 225Ma 之间(Liu *et al.*, 2006; Wu *et al.*, 2006a)。

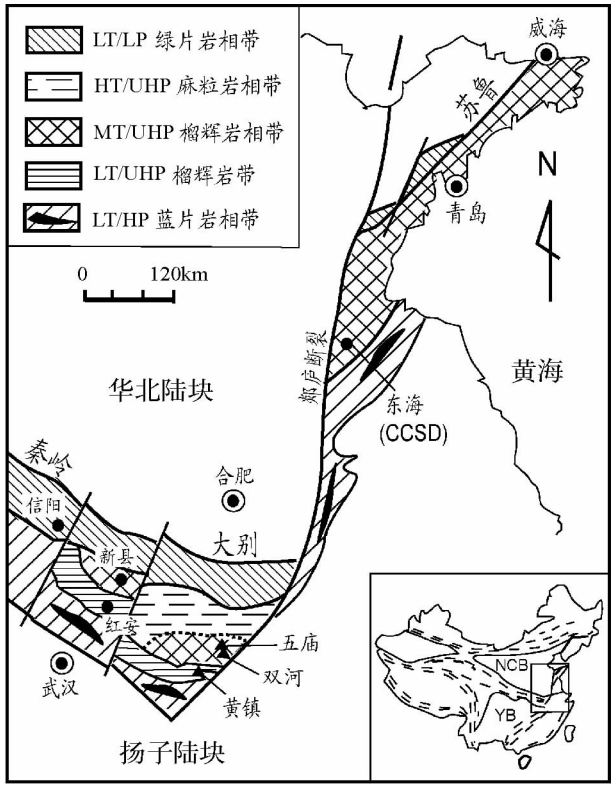


图 1 大别-苏鲁造山带地质简图

Fig. 1 Sketch map of geology in the Dabie-Sulu orogenic belt

岩石学、地质年代学和地球化学研究表明，超高压变质岩的原岩主要是新元古代中期的火成岩及相应的沉积物，同时还有少量的古元古代残留地壳（Zheng *et al.*，2003，2004，2005b）。因为变火成岩具有双峰式的特点，一般认为它们形成于新元古代中期沿扬子陆块北缘的裂谷环境（Ames *et al.*，1996；Hacker *et al.*，1998；Zheng *et al.*，2004，2006）。进一步，一般认为扬子陆块其他边缘在 740～830Ma 的同时期岩浆活动是对 Rodinia 超大陆裂解的响应（Li *et al.*，2003；Zheng *et al.*，2007）。如 Thompson *et al.*（2001）所指出，陆壳减薄带（如陆内裂谷和弧后盆地）是陆-陆碰撞产生增厚造山带的合适区域。尽管沿大陆裂谷带可能在垂向上有大量物质和能量输入，大陆裂谷边缘是否是新生地壳生长的地方仍需要验证。

3 变质作用对锆石 Lu-Hf 体系的影响

由于超高压变质岩都受到了变质作用不同程度的影响，在利用超高压变质岩石的锆石 Hf 同位素进行示踪之前，先要评估变质作用对锆石 Lu-Hf 同位素体系的影响。我们对两个双河花岗片麻岩和一个黄镇榴辉岩中锆石核部和增生边的 U-Pb 同位素和 Lu-Hf 同位素体系进行了比较。锆石 CL 图像特征表明，锆石核部和幔部均为岩浆成因，但是部分颗粒受到了不同程度固态重结晶或深熔重结晶作用的改造（图 2）。花岗片麻岩中的变质锆石表现为无环带的变质增生边，榴辉岩中则以变质新生颗粒的形式出现。

两个花岗片麻岩锆石 U-Pb 定年得到的不一致线上交点年龄分别为 758 ± 27Ma 和 779 ± 43Ma，下交点年龄分别为 223 ± 10Ma 和 233 ± 13Ma；榴辉岩的不一致线上下交点年龄分别为 1817 ± 102Ma 和 254 ± 30Ma（Zheng *et al.*，2005a）。因此，花岗片麻岩的原岩时代为新元古代中期，榴辉岩的原岩年龄为古元古代。三叠纪的下交点年龄代表了变质锆石的生长时间，而且可以进一步细分为 242.3 ± 2.8Ma 和 220.8 ± 3.8Ma 两个年龄组。由于柯石英相超高压变质年龄限定在 233 ± 4Ma 到 226 ± 3Ma 这一狭窄范围内（Liu and Xu，2004；Liu *et al.*，2004a，2004b），这两组年龄说明锆石生长主要出现在峰期超高压变质前后。在峰期超高压变质作用期间，尽管超高压变质矿物中含有分子水和羟基水，但是总体上处于相对不活动状态（Zheng *et al.*，2003）。由于流体迁移支配着颗粒边界 Zr 和 Si 的传输与供应，进而控制了锆石的生长（或增生），因此流体的可得到性及其处于活动状态对于高级变质作用期间锆石的有效生长或增生是必需的（Wu *et al.*，2006a）。

对锆石不同区域的分析结果表明，三叠纪年龄的区域以低 Th/U 比值（花岗片麻岩为 0.01～0.08，榴辉岩为 0.002～0.02）为特征，是典型的变质成因；而年龄较老的核部和幔部具有较高的 Th/U 比值（花岗片麻岩为 0.37～2.91，榴辉岩为 0.38～0.51），表明它们是岩浆成因的，虽然可能受到了不同程度的变质重结晶改造。如图 3 所示，具有三叠纪年龄的变质区域显示出低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值，花岗片麻岩为 0.00017～0.000664，榴辉岩为 0.000017～0.000069；而大于三叠纪年龄的核部和幔部具有相对较高的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值，花岗片麻岩为 0.001138～0.005924（图 3a 和 3b），榴辉岩为 0.000137～0.000373（图 2c）。花岗片麻岩和榴辉岩中锆石边部的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值比核部均低了约一个数量级。Th/U 与 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值在花岗片麻岩（图 4e）和榴辉岩中（图 4f）均呈现出正的相关性，这表明在榴辉岩相变质过程中 Th/U 和 Lu/Hf 比值具有相似的元素配分行为。

岩浆核部和幔部与增生边之间不仅在 CL 特征和 U-Pb 年龄上有显著的差别，其 Th/U 比、$\varepsilon_{Hf}(t)$、$^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值均有显著的差别。无论是花岗片麻岩还是榴辉岩，锆石岩浆核部或幔部具有比变质增生边或者变质颗粒高的 Th/U 比和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比，而变质区域锆石 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值比原岩锆石显著高 3.1 到 13.5 不等。对花岗片麻岩和榴辉岩而言，变质区域与原岩锆石的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比分别可以以 0.001 和 0.0001 区分开来（图 4）。变质区域低的 Th/U 比值和低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值表明，榴辉岩相变质过程中锆石生长或增生时 Th 与 U 之间以及 Lu 与 Hf 之间达到了平衡。这样，锆石不同成因区域可以参照相应的 U-Pb 年龄及 Th/U 比值，并根据它们的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值来区分。也就是说，变质区域以低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值为特征，其中花岗片麻岩小于 0.001，榴辉岩小于 0.0001。

在同一锆石颗粒核部和边部得到的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 有显著差别。15 个核-边对得到的边部与核部 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 差值均为正值（图 5a），从 3.1 到 13.5。这表明，在三叠纪榴辉岩相变质作用时有更多的放射成因 Hf 同位素被带入变质边部。对其它高级变质岩中锆石 Hf 同位素研究同样发现，高级变质作用有时能够引起岩浆锆石增生边 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值的显著提高（Flowerdew *et al.*，2006；Wu *et al.*，2006a；Zhang *et al.*，2006），导致变质新生颗粒或增生边类似于新生地壳的高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值假象，这点在应用变质岩中锆石进行源区示踪时必须予以注意。在大别山超高压榴辉岩的变质锆石中曾经观测到极高的 Hf 含量（Wang and Griffin，2004），这暗示着 Hf 比 Lu 更容易结合进入变质锆石。但是，花岗片麻岩中核-幔对的幔部与核部的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 差值很小，说明在三叠纪榴辉岩相变质作用时没有很多的放射成因 Hf 同位素进入幔部。这意味着，岩浆成因的幔部只能通过有限的固态重结晶或深熔重结晶作用实现变质重置。

变质区域的 U-Th-Pb 和 Lu-Hf 同位素组成反映了富 Lu 矿物溶解和重结晶时流体的活动性和 Th/U 和 Lu/Hf 的配分。因为石榴石对重稀土元素（HREE）有较大的配分系数，高级变质作用过程中石榴石的结晶或重结晶都会显著降低相关介质的重稀土元素含量，导致与石榴石同时结晶的其他矿物具有重稀土亏损的特征（Rubatto，2002；Rubatto and Hermann，2003），这样也就导致了变质锆石具有低的 Lu/Hf

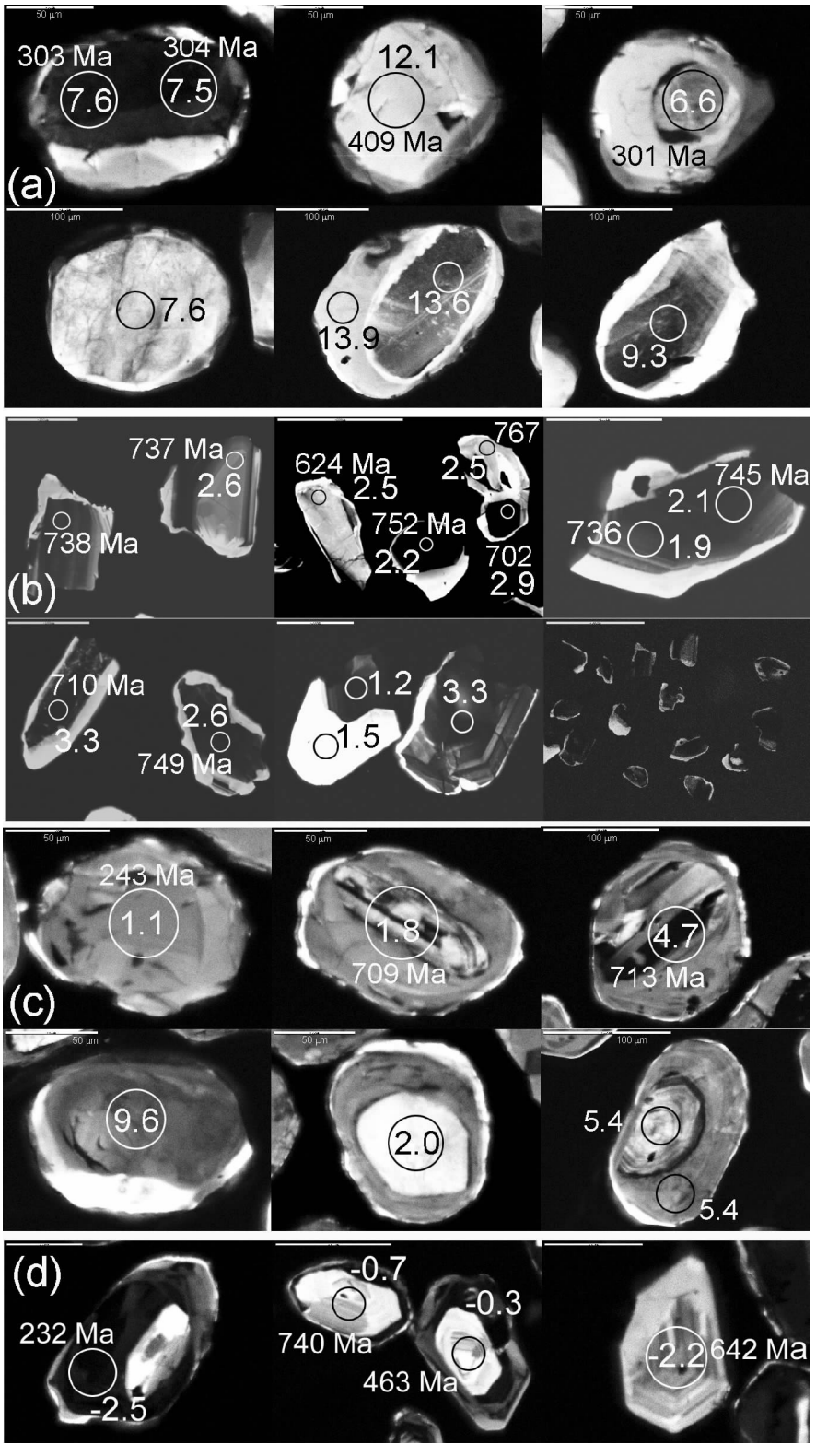


图 2　大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 CL 图像。图中数字表示$^{206}Pb/^{238}U$ 年龄和/或$\varepsilon_{Hf}(t)$值。a-五庙榴辉岩，b-双河榴辉岩，c-五庙片麻岩，d-双河片麻岩。

Fig. 2　CL images of zircon grain with $^{206}Pb/^{238}U$ age and/or initial Hf isotope ratio in $\varepsilon_{Hf}(t)$ for eclogite and gneiss in the Dabie orogen (after Zheng *et al.*, 2006). a-eclogite at Wumiao, b-eclogite at Shuanghe, c-gneiss at Wumiao, d-gneiss at Shuanghe.

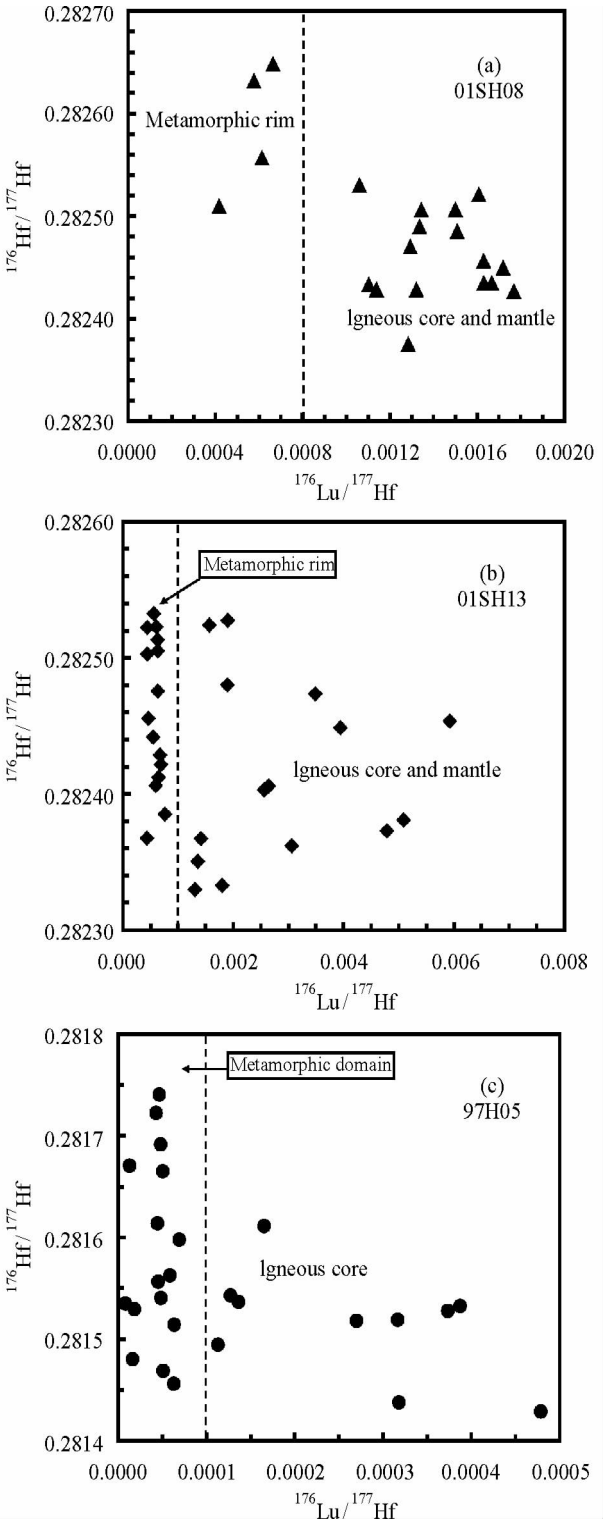


图 3 大别山双河花岗片麻岩和黄镇榴辉岩中采用 SHRIMP 法 U-Pb 定年鉴定的不同成因锆石微区 Lu-Hf 同位素关系

Fig. 3 Zircon Lu-Hf isotope relationship for different domains as identified by the SHRIMP U-Pb dating for granitic gneiss from Shuanghe and eclogite from Huangzhen in the Dabie orogen (after Zheng *et al.*, 2005a).

比值。因此，像石榴石这样富集 HREE 的矿物对形成高 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值和低 Lu/Hf 比值的变质流体媒介是必需的，而锆石变质增生边的形成则伴随有富集重稀土的基质矿物的结晶或溶解重结晶。岩相学观察也表明，榴辉岩相变质过程中锆石和石榴石从同一储库中同时结晶。在高级变质作用中，石榴石的结晶或重结晶通常出现在角闪岩相、榴辉岩相和麻粒岩相，锆石新生（或增生）区域的形成可能发生在高 $^{176}Hf/^{77}Hf$ 比值和低 $^{176}Lu^{177}Hf$ 比值的变质流体中。由于石榴石是引起这种变质生长锆石 $^{176}Hf/^{77}Hf$ 比值升高的基本原因，因此通常称为石榴石效应（Zheng *et al.*, 2005a）。理论上讲，板块俯冲阶段随着温度压力的升高会发生脱水作用；深俯冲板片折返阶段含水矿物分解（Li *et al.*, 2004）和/或名义上无水矿物的羟基出溶（Zheng *et al.*, 2003）等过程都能产生变质流体。然而只有含水矿物分解和与之相伴的石榴石重结晶才能使变质流体具有高的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值和低的 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值。这样第一组三叠纪年龄 242.3 ± 2.8Ma 可能反映了早三叠纪俯冲时高压蓝片岩相/榴辉岩相向超高压榴辉岩相转变时的锆石生长和石榴石结晶，而第二组三叠纪年龄 220.8 ± 2.8Ma 可能对应于晚三叠纪折返时高压榴辉岩相时期的锆石生长和石榴石重结晶。只有在这两个时期变质流体的活动性较大，有利于变质锆石的生长，也有利于同位素交换和元素运移。

4 锆石 Hf 同位素对原岩性质的制约

锆石原位 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析，使得我们能把变质区域与继承的岩浆核部和变质改造的幔部区分开来。因而对锆石岩浆核部和幔部的 Lu-Hf 同位素数据的解释有助于我们对原岩性质的理解。我们在研究大别造山带中黄镇、五庙和双河的榴辉岩和片麻岩的原岩时发现，它们的原岩主要为 750Ma 左右的镁铁质和长英质岩浆岩，也包含少量的古元古代地壳（Zheng *et al.*, 2004, 2005a, 2006）。而锆石 Hf 同位素对这些原岩的性质进行了进一步的限定（表 1）。值得注意的是，在应用变质岩中锆石 Hf 同位素示踪原岩性质时，应该采用原岩岩浆结晶年龄来计算初始 Hf 同位素比值，而不是采用变质年龄或对应测点的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄。

五庙榴辉岩的 U-Pb 不一致线的上交点年龄为 749 ± 55Ma，反映了其原岩的形成时代，对应的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值有两组，峰值分别为 12.9 ± 0.7 和 8.2 ± 0.7；相应的 Hf 模式年龄为 821 ± 72Ma 和 999 ± 50Ma，反映了新元古代新生地壳的生长（图 6a, 6b）。其中最年轻的模式年龄达到 747 ~ 820Ma。高 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的锆石模式年龄与 U-Pb 年龄接近，是岩浆作用时新生地壳生长的明显信号，也表明在这个地质事件中有大量的能量和物质从亏损地幔进入陆壳。这些模式年龄不仅与锆石结晶时间相近，还与扬子板块周边的裂谷岩浆活动时间 740 ~ 830Ma 相似（Li *et al.*, 2003; Zheng *et al.*, 2004），这指示了新元古代中期新生地壳的生长。换句话说，亏损地幔物

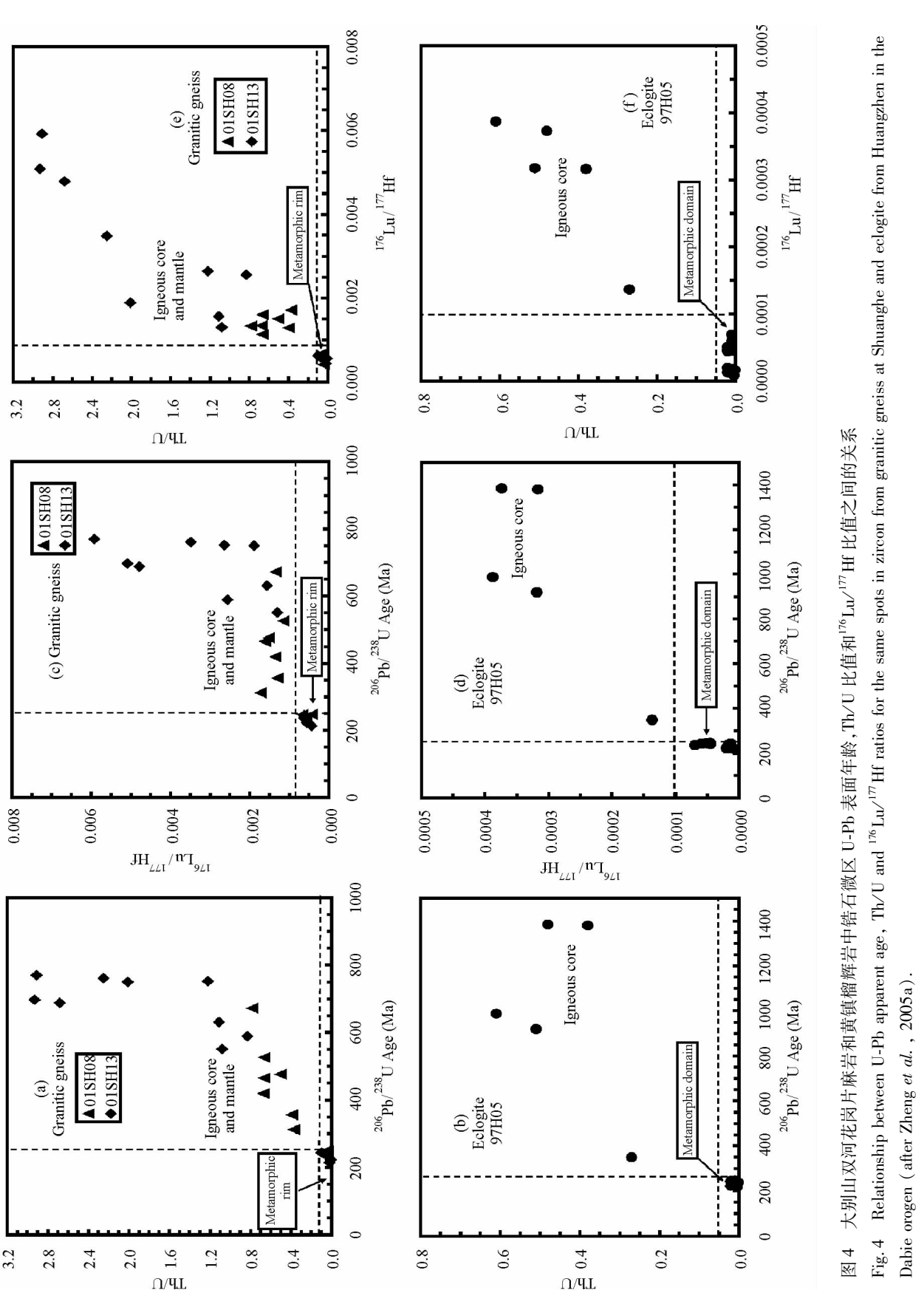


图 4 大别山双河花岗片麻岩和黄镇榴辉岩中锆石微区 U-Pb 表面年龄,Th/U 比值和 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值之间的关系

Fig. 4 Relationship between U-Pb apparent age, Th/U and $^{176}Lu/^{177}Hf$ ratios for the same spots in zircon from granitic gneiss at Shuanghe and eclogite from Huangzhen in the Dabie orogen (after Zheng *et al.*, 2005a).

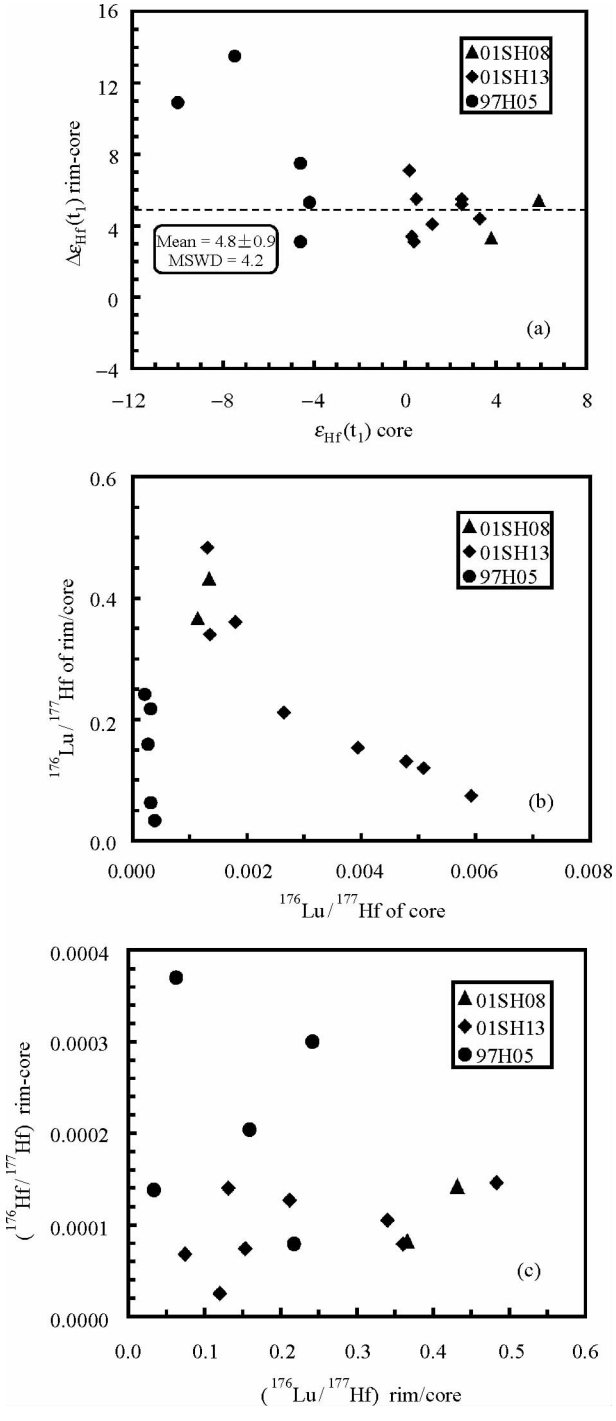


图 5 大别山双河花岗片麻岩和黄镇榴辉岩中锆石核与边之间在 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 与 $^{176}Lu/^{177}Hf$ 比值之间的关系

Fig. 5 Relationship of $^{176}Hf/^{177}Hf$ and $^{176}Lu/^{177}Hf$ ratios between core and rim in zircon from granitic gneiss at Shuanghe and eclogite from Huangzhen in the Dabie orogen (after Zheng *et al.*, 2005a). a-Relationship of rim-core $\varepsilon_{Hf}(t)$ difference to core $\varepsilon_{Hf}(t)$ value at timing of protolith formation; b-Relationship of partition in $^{176}Lu/^{177}Hf$ between rim and core to core $^{176}Lu/^{177}Hf$ ratio; c-Relationship of difference in $^{176}Hf/^{177}Hf$ ratio between rim and core to partition in $^{176}Lu/^{177}Hf$ between rim and core.

质通过裂谷岩浆作用加入陆壳，暗示着新元古代中期存在同期的壳-幔相互作用。

五庙片麻岩的原岩有两种，一种年龄为 2147 ±22Ma，另一种为 753 ±47Ma（Zheng *et al.*, 2006）。对新元古代的残留锆石，计算 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值和模式年龄时取 t = 750Ma，结果表现出明显的双峰式分布（图 6c）。第一组 27 个分析点给出的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 1.8 ~ 9.6，平均为 5.9 ±0.9，对应的单阶段 Hf 模式年龄为 933 ~ 1271Ma，平均为 1080 ±72Ma（图 5d），说明这些新元古代的原岩为迅速再造的新生地壳。第二组余下的 8 个分析点得到的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -23.3 ~ -20.4，平均为 -22.6 ±0.6，对应的单阶段 Hf 模式年龄为 2186 ±96Ma（图 6d），两阶段模式年龄为 2931 ~ 3091Ma。对古元古代的残留锆石，2150Ma 的年龄被用来计算初始 Hf 同位素比值和两阶段模式年龄。结果得到加权平均的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 8.5 ±0.6 和 T_{DM2} 为 2209 ±154Ma（图 6e 和 6f）。再加上 T_{DM1} 年龄为 2186 ±96Ma，表明残留锆石的 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素体系记录了 2.1 ~ 2.2Ga 时亏损地幔物质加入地壳引起的新生地壳生长。

SHRIMP 锆石 U-Pb 定年表明，双河榴辉岩原岩形成于 744 ±8Ma，对应 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 1.2 到 3.3，平均为 2.3 ±0.3，单阶段 Hf 模式年龄为 1196 ~ 1285Ma，平均为 1244 ±44Ma（图 6g 和 6h），这些结果说明镁铁质原岩中有地壳物质的进入。

我们一共分析了三个双河花岗片麻岩样品（Zheng *et al.*, 2005a, 2006）。三个样品给出了相似的原岩年龄，其中一个样品用 LA-ICPMS 法和 ID-TIMS 法分别得到原岩年龄为 759 ±30Ma 和 755 ±64Ma，另两个样品用 SHRIMP 法得到的原岩年龄分别为 756 ±42Ma 和 758 ±27Ma。第一个双河花岗片麻岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -4.1 ~ -0.3，平均为 -2.7 ±0.6，对应的两阶段 Hf 模式年龄为 1676 ~ 1916Ma，平均为 1822 ±74Ma（图 6i 和 6j）。第二个双河花岗片麻岩中锆石岩浆核部和幔部的 $\varepsilon_{Hf}(t_1)$ 值为 1.9 ~ 7.5 且为双峰式分布，加权平均值分别为 3.9 ±0.4 和 6.3 ±0.7，T_{DM} 年龄为 1024 ~ 1249Ma，平均为 1165 ±18Ma（图 6k 和 6l）。第三个花岗片麻岩中为 0.2 ~ 7.2 且为准单峰式分布，加权平均值为 1.1 ±0.6，T_{DM} 年龄为 1046 ~ 1381Ma，平均为 1295 ±31Ma（图 6m 和 6n）。这些结果表明花岗质岩浆活动虽然发生在 760Ma 左右，但其源区物质主要来源于 760Ma 之前某个时间的壳幔分异作用。因而其源区物质可能最初起源于亏损地幔，但后来不同程度地混染了最小年龄为中元古代中期的陆壳成分。以岩浆侵位时间 t_1 = 760Ma 为参照，对双河花岗片麻岩的全岩 Sm-Nd 数据（Jahn, 1998; Li *et al.*, 2000）进行重新计算，我们得到负的 $\varepsilon_{Nd}(t_1)$ 值为 -4.9 ~ -4.0，相应的亏损地幔 Nd 模式年龄为 1569 ~ 1763Ma。这表明地壳组分的最小年龄可能不低于 1.8Ga。锆石 Hf 同位素与全岩 Nd 同位素之间出现脱耦，可能暗示着在新元古代中期花岗质岩浆活动时或之前存在着广泛的新生地壳深熔作用并伴有强烈的 Sm/Nd 分异，即它从亏损地幔分离后又经历了多次部分熔融和长英

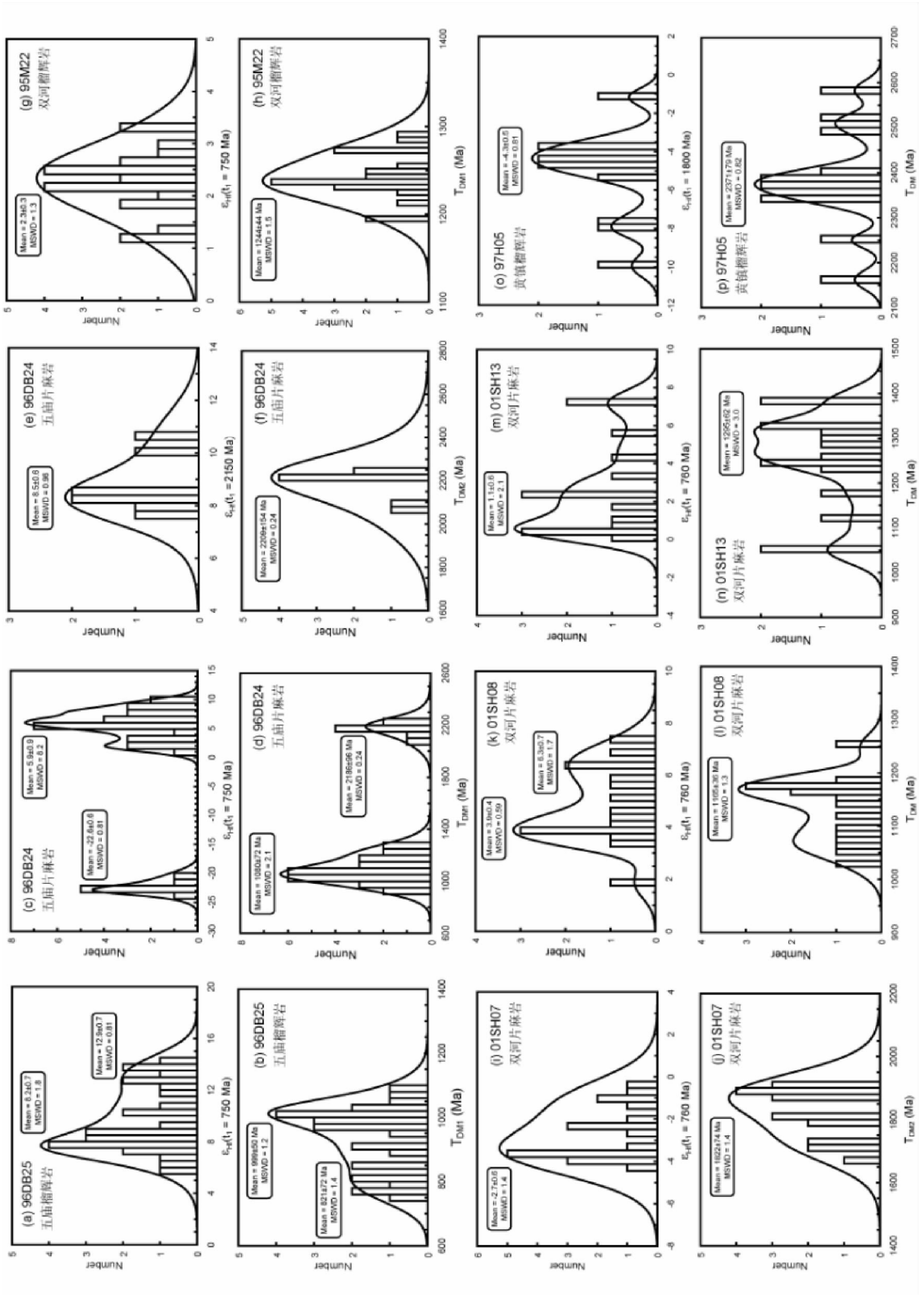


图 6 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石初始 Hf 同位素比值和 Hf 模式年龄直方图

Fig. 6 Histogram of initial Hf isotope ratio and Hf model age for zircons from the Dabie orogen (data after Zheng *et al.*, 2005a, 2006)

质组分分异。由于锆石具有非常低的 Lu/Hf 比值，并且一旦结晶后相对稳定从而能够保存其从岩浆获得的 Hf 同位素组成，因此锆石 $\varepsilon_{Hf}(t_1)$ 一般能够较好地记录新生地壳熔融所形成岩浆的 Hf 同位素组成。对于这类 Hf-Nd 同位素脱耦现象，一般解释为源区继承的结果，因此称为锆石效应（Wu *et al.*，2006b；Zheng *et al.*，2007）。两个花岗片麻岩锆石具有负的 $\delta^{18}O$ 值 -4.3‰和 -3.2‰，这表明它们的原岩为裂谷构造带中的低 $\delta^{18}O$ 值岩浆岩，这种构造带以地壳物质短时间的局部再循环为特征（Zheng *et al.*，2004）。

SHRIMP 定年结果表明，黄镇榴辉岩的原岩年龄为 1817 ±102Ma，锆石核部的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值为 -10.0 ~ -1.2（平均 -4.3 ±0.5），T_{DM} 年龄为 2162 ~2515Ma（平均 2371 ±19Ma）（图 6o 和 6p）。这说明其原岩为约 1.8Ga 的玄武质岩浆岩，源区物质可能来源于富集地幔或遭受了地壳混染的亏损地幔，并且这种地壳组分的年龄为古元古代早期（或更老）。前人已经在双河黑云母副片麻岩中获得了一个锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄 2458 ±76Ma（Chavagnac *et al.*，2001），说明大别山可能存在古老地壳的残余。全岩 Sm-Nd 同位素研究得到黄镇榴辉岩在 1800Ma 时的 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值为 4.7 ~6.0，亏损地幔 Nd 模式年龄为 1.8 ~1.9Ga（Li *et al.*，2004）。锆石 Hf 同位素与全岩 Nd 同位素之间出现脱耦，指示了在约 1.8Ga 时玄武质岩浆侵位过程中受到陆壳混染，锆石可能以捕虏晶的形式进入幔源岩浆。对于这类 Hf-Nd 同位素脱耦现象，一般解释为地壳混染的结果，因此也称为锆石效应。这类锆石效应最可能出现在蛇绿岩套组合橄榄岩的构造侵位过程中，因此根据锆石 Hf 同位素和全岩 Nd 同位素分析，能够用来区分地壳混染与源区继承。锆石核部 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值从 -10.0 变化到 -1.2，反映了锆石是从受到过地壳混染的幔源岩浆中结晶形成的。黄镇榴辉岩中锆石的 $\delta^{18}O$ 值为 -4.3‰，表明它的原岩在新元古代中期裂谷岩浆活动中经历了高温超固相水岩反应（Zheng *et al.*，2004）。

尽管大别山榴辉岩和片麻岩的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的变化很大，从 -22.6 ±0.6 到 12.9 ±0.7；但都明显亏损 ^{18}O，它们的 $\delta^{18}O$ 值从 -4.1‰变化到 4.4‰（Zheng *et al.*，2005a，2006）。如 Zheng *et al.*（2004）所述，低 $\delta^{18}O$ 的锆石结晶自低 ^{18}O 的岩浆，且这些岩浆是在新元古代中期 Rodinia 超大陆裂解时形成的裂谷构造带中产生的。因而 758 ±15Ma 的加权平均 U-Pb 年龄可能是锆石从低 $\delta^{18}O$ 的镁铁质和长英质岩浆中结晶的时间。如图 7 所示，Hf 和 O 同位素组成的变化能用三个端元的不同程度混合来解释。这三个端元为：$\varepsilon_{Hf}(t)$ =13、$\delta^{18}O$ =5.3 ±0.3‰的新元古代亏损地幔；$\varepsilon_{Hf}(t)$ = -23、$\delta^{18}O$ =5.7 ~7‰的古元古代老陆壳；$\delta^{18}O$ = -11‰到 -2‰的大气降水-热液流体。750Ma 左右的裂谷岩浆作用把地幔中的物质和能量传递给地壳，造成老地壳和热液蚀变的年轻地壳沿活动裂谷带混合与重熔。

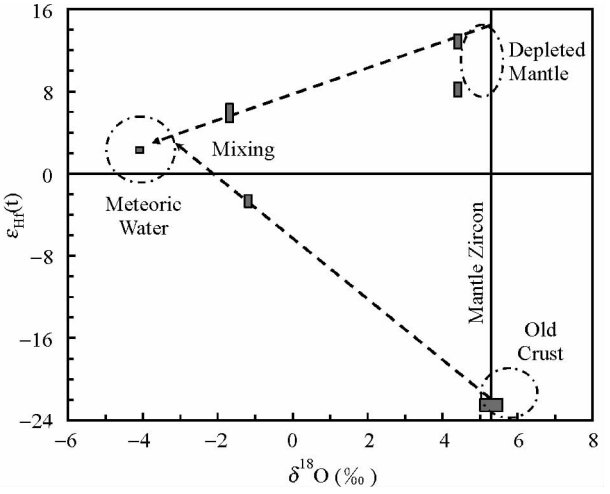


图 7　大别山超高压变质岩中锆石 Hf-O 同位素解释图解

Fig. 7　Interpretative diagrams for zircon Hf-O isotopic variations in the Dabie orogen (after Zheng *et al.*, 2006). Varying degrees of mixing is indicated between different sources (depleted mantle, old crust and meteoric water). Bimodal magmatism at about 750Ma was triggered by mantle upwelling with transport of both heat and material from the asthenospheric mantle to the continental crust, resulting in coherent mixing and remelting of both the Paleoproterozoic old crust and the hydrothermally altered juvenile crust along an active rifting zone.

5　岩石成因机制与壳幔相互作用

在应用锆石 Hf 同位素示踪岩石成因时，需要考虑岩石中 Zr 的饱和程度与锆石生长之间的关系。Zheng *et al.*（2006）对地壳和地幔不同类型储库 Zr、Hf 和 Lu 元素地球化学行为进行了考察，发现随着原始地幔逐渐分异形成陆壳和亏损地幔，陆壳中 Zr 和 Hf 含量越来越高（表 2），$\varepsilon_{Hf}(t)$ 值越来越负。当锆石从含地壳的熔体中结晶时，熔体的 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 比值被记录在锆石中。U-Pb 定年能揭示锆石的结晶时间，而锆石中 $^{176}Hf/^{177}Hf$ 和 Lu/Hf 比值能用来确定裂谷岩浆作用时亏损地幔与陆壳混合的时间。原则上，单阶段 Hf 模式年龄（T_{DM1}）处于幔源岩浆侵位和所含地壳的形成年龄之间。因而具有最高的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值、最低的锆石 T_{DM1} 年龄反映了岩浆从同期亏损地幔提取的最大年龄，而具有最低 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的最大的 T_{DM1} 年龄反映了地壳组分的最小年龄。对后者，把锆石初始同位素比值投到亏损地幔演化线上，就可得到两阶段 Hf 模式年龄（T_{DM2}），T_{DM2} 年龄为地壳从具有不同 Lu/Hf 比值的幔源岩石分异出来后的居留时间。如果 U-Pb 年龄与有高度正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值的锆石 T_{DM1} 年龄相近，就指示了岩浆作用

表 1 大别山超高压榴辉岩和花岗片麻岩中锆石 U-Pb、Lu-Hf 和 O 同位素小结

Table 1 Summary of zircon U-Pb, Lu-Hf and O isotope results from UHP eclogite and granitic gneiss in the Dabie orogen

样品位置	样品号	岩 性	原岩年龄(Ma)	$\varepsilon_{Hf}(t)$	T_{DM}(Ma)	$\delta^{18}O$ (‰)
五庙	96DB25	榴辉岩	749 ±55	8.2 ±0.7	999 ±50	4.4
				12.9 ±0.7	821 ±72	
五庙	96DB24	片麻岩	753 ±47	5.9 ±0.9	1080 ±72	−1.7
			2147 ±22	8.5 ±0.6	2186 ±96	
双河	95M22	榴辉岩	744 ±8	2.3 ±0.3	1244 ±44	−4.1
双河	01SH07	片麻岩	758 ±25	−2.7 ±0.6	1822 ±74	−1.2
双河	01SH08	片麻岩	756 ±42	3.9 ±0.4	1165 ±18	−3.2
				6.3 ±0.7		
双河	01SH13	片麻岩	758 ±27	1.1 ±0.6	1295 ±35	−4.3
黄镇	97H05	榴辉岩	1817 ±102	−4.3 ±0.5	2371 ±19	−4.3

表 2 地球壳幔不同储库微量元素丰度一览

Table 2 A compilation of trace element abundances in different Earth's reservoirs

Reservoir	Zr (ppm)	Hf (ppm)	Lu (ppm)	Zr/Hf	Lu/Hf	Reference
Upper crust	193	5.3	0.31	36	0.06	Rudnick and Gao (2003)
Middle crust	149	4.4	0.40	34	0.09	Rudnick and Gao (2003)
Lower crust	68	1.9	0.25	36	0.13	Rudnick and Gao (2003)
Continental arc andesite	137.2	3.56	0.23	39	0.06	Kelemen *et al.* (2003)
Continental arc basalt	92.7	2.14	0.28	43	0.13	Kelemen *et al.* (2003)
Oceanic arc basalt	62.2	1.65	0.27	38	0.16	Kelemen *et al.* (2003)
Primitive MORB	92.6	2.31	0.41	40	0.18	Kelemen *et al.* (2003)
Depleted mantle	7.94	0.199	0.063	40	0.32	Salters and Stracke (2004)
Primitive mantle	10.8	0.3	0.0717	36	0.24	Palme and O'Neill (2003)

期间新生地壳的生长和直接再造,同时在此过程中有大量物质和能量从亏损地幔运输到陆壳。两个类似的例子(Samson *et al.*, 2003, 2004)为:来自法国东北部 Cadomian 造山带 Morvan 和 Jospinet 的正片麻岩的原岩;来自 Morocco Anti-Atlas 造山带 Tasriwine 与蛇纹石有关的斜长花岗岩。

对 Cadomian 造山带的正片麻岩,Samson *et al.* (2003)对锆石进行了 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素分析。对两个地区正片麻岩的整颗粒锆石 ID-TIMS U-Pb 定年得到它们原岩的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄为 754.6 ±0.8Ma 和 746.0 ±0.9Ma。Lu-Hf 同位素分析给出了非常高的$\varepsilon_{Hf}(t)$值,从 12.2 ±0.4 到 13.9 ±0.3(采用^{176}Lu 衰变常数 $1.865 \times 10^{-11}\ yr^{-1}$ 对原始数据重新计算),其 T_{DM1} 年龄为 0.77 ±0.01Ga 到 0.83 ±0.01Ga,与岩浆侵位的 U-Pb 年龄 746.0 ~ 754.6Ma(图 8 中空心三角)极为接近。Samson *et al.* (2003)因此认为,在新元古代中期岩浆活动时有物质从地幔输送到地壳。对 Anti-Atlas 造山带的斜长花岗岩,Samson *et al.* (2004)也作了类似的研究。两个样品的全颗粒锆石 ID-TIMS U-Pb 定年得到的不一致上交点年龄为 761 ±2Ma 和 762 ±2Ma,为岩浆结晶的时间;同时 Lu-Hf 分析给出正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值为 14.0 ±0.3 ~ 14.9 ±0.6 和年轻的 T_{DM1} 年龄 0.74 ±0.02 ~ 0.77 ±0.01Ga(图 8 中空心四边形)。锆石 U-Pb 年龄与 Hf 模式年龄的一致性,明确地指示了约 760Ma 岩浆活动时从亏损地幔的新生地壳的生长和直接再造。

壳幔相互作用过程中结晶出的锆石 Hf 同位素组成,取决于两个端元中 Hf 的元素浓度及同位素比值的质量平衡。岩浆锆石中正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值表明岩浆源区因源区混合经历了熔融作用,但还主要由亏损地幔的 Hf 同位素储库主导。相反,负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值表明地壳 Hf 同位素为主导,有时可能是未经历再造过程的地壳混染导致的。因而混合的源区可能具有亏损地幔型的 Hf 同位素组成,也可能有富集地幔型的组成,这取决于岩浆中地壳所占的比例。锆石中$\varepsilon_{Hf}(t)$值变化较大,可能反映了熔融过程中的不充分混合或岩浆侵位时的不均一混染作用。

在壳幔混合时,具有老的 T_{DM} 年龄和较低的$\varepsilon_{Hf}(t)$值通常暗示着岩浆源区有相当大的壳源物质贡献。另一方面,在壳-幔分异时,具有年轻的 T_{DM} 年龄的很高的$\varepsilon_{Hf}(t)$值表明岩浆中有相当大的幔源物质贡献。因而负的$\varepsilon_{Hf}(t)$值和老的 T_{DM2} 年龄能用来反映地壳的居留时间,而有最正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值的最年轻的 T_{DM1} 年龄被看作是新生地壳从地幔提取出来的最大年龄。不论哪种情况,我们在这里强调,只有最大的正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值与同期亏损地幔的初始 Hf 同位素比值一致,且相关的最小的 Hf 模式年龄与锆石从幔源岩浆中生长的时间相

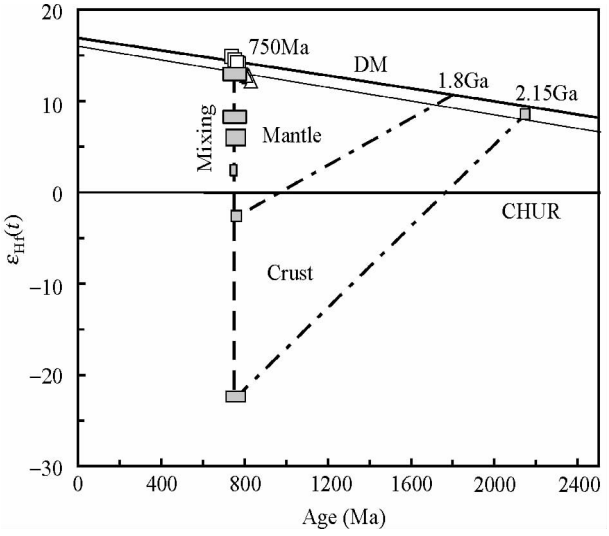


图 8 扬子陆块北缘新元古代中期双峰式岩浆岩中锆石 Lu-Hf 同位素演化图解

（灰色矩形为扬子陆块样品）

Fig. 8 Schematic diagrams for zircon Lu-Hf isotopic evolution of bimodal magmatism in the northern margin of the Yangtze Block during the middle Neoproterozoic (after Zheng *et al.*, 2006). The bimodal magmatism at about 750Ma involves both source mixing and crustal contamination along an active rifting zone, with varying degrees of mixing between the different ages of crust. The thick line denotes the evolution of depleted mantle (DM) with a present-day $^{176}Hf/^{177}Hf$ = 0.28325 and $^{176}Lu/^{177}Hf$ = 0.0384 (Griffin *et al.*, 2000), and the thin line denotes the evolution of depleted mantle that is drawn by using $\varepsilon_{Hf}(t)$ = 16 at t = 0Ma for MORB at present (average MORB value, Nowell *et al.*, 1998) and $\varepsilon_{Hf}(t)$ = 6 at t = 2.7Ga (Corfu and Noble, 1992; Vervoort *et al.*, 1999). Magma extraction is assumed from the depleted mantle at 2.15Ga, 1.8Ga and 750Ma, respectively. Open triangles denote the protolith of orthogneiss from Port Morvan and Jospinet within the Cadomian Orogen in northwest France (data after Samson *et al.*, 2003), and open squares denote the plagiogranites associated with the Tasriwine ophiolite from the Anti-Atlas orogen in Morocco (Samson *et al.*, 2004).

似时，才能揭示和解释新生地壳生长事件（Zheng *et al.*, 2006）。当然，这一前提是新生地壳完全来自亏损地幔分异，即是从软流圈地幔提取而来。

对于大洋地壳的生长来说，既有来自亏损地幔的部分熔融（例如 N-MORB），也有来自不甚亏损地幔的部分熔融（例如 E-MORB、IAB、OIB 和 OPB）。如果洋岛玄武岩（OIB）和海台玄武岩（OPB）是从地幔柱岩浆直接结晶出来的，这类基性岩可以具有低于同时期亏损地幔初始 Hf 同位素比值的正 $\varepsilon Hf(t)$ 值。如果假定地幔柱物质具有原始地幔的地球化学特点，则其衍生岩浆同样处于 Zr 不饱和状态，因此不可能从中直接结晶出锆石，否则只能是岩浆侵位过程中地壳混染的结果。如果地幔柱物质源区含有锆石，则由于其极高的熔融温度会将这些继承锆石溶解而增加全岩的 Zr 含量。对于大陆地壳的生长来说，既有新生洋壳向大陆方向的水平拼合及其伴随的部分熔融（大陆侧向增生），也有来自裂解大陆边缘亏损地幔的部分熔融（大陆垂向生长）。大陆溢流玄武岩浆活动也能够导致大陆垂向生长，其成因可能与地幔柱活动有关，但是其岩浆源区深度尚难以确定（可以来自核幔边界，或者地幔过渡带，或者软流圈地幔顶部），因此能否结晶出岩浆锆石取决于源岩的 Zr 饱和程度。此外，大陆裂谷岩浆活动过程中既有富集岩石圈地幔的部分熔融，也有亏损软流圈地幔的部分熔融，两者都会引起地壳生长。不过，亏损地幔部分熔融是大洋地壳生长的最基本机制，弧陆碰撞是大陆地壳生长的最主要机制（Rudnick, 1995; Taylor and McLennan, 1995）。而在洋壳向陆壳转化过程中，既存在新生地壳的陈化，也存在古老地壳的加入（Wu *et al.*, 2006b）。从 Hf 同位素示踪壳幔分异时间来说，只有找到亏损地幔端元才能对新生地壳生长事件作出最合理的近似（Arndt and Goldstein, 1987; Zheng *et al.*, 2006）。对于有可能来自不甚亏损地幔的大陆地壳物质，则需要区分是早期分异地壳的陈化还是古老地壳混入的结果，否则所估计的事件和组分具有很大的误差，甚至可能是事实上并不存在的壳幔分异事件。

对于陆壳花岗岩来说，不能简单地将所测定的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值解释为岩浆源于亏损地幔，原因有二：（1）实验岩石学已经证明，地幔橄榄岩部分熔融不可能直接形成花岗岩，必须经过玄武质地壳这一步；（2）亏损地幔和原始地幔均处于 Zr 不饱和状态，由这类地幔岩石部分熔融不可能直接形成锆石，必须通过新生地壳熔融再造或幔源岩浆侵位过程中地壳混染来实现锆石生长这一步。古老岩石圈地幔部分熔融能够产生含有锆石的玄武质岩浆，但是其 Hf 同位素组成表现为明显的富集特点，一般具有大的负 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值，与新生地壳具有正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 的亏损特点形成明显对比。如果中生代岩浆岩中锆石具有正的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值，并且 Hf 模式年龄集中在新元古代，很可能说明这些岩石的岩浆源区为新元古代新生地壳，在中生代由于拉张跨塌发生熔融形成现在所观察到的岩石。这种类型的实例已经通过全岩 Nd 同位素分析在东北碾子山 A 型花岗岩中观察到（Wei *et al.*, 2002）。

五庙榴辉岩的一些锆石给出了最高的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值 12.7 ~ 14.4，相应的最小 T_{DM1} 年龄为 747 ~ 820Ma，与锆石 U-Pb 年龄一致，这显然表明在当时的裂谷岩浆作用中，新生地壳从亏损地幔中生长和直接再造。从这个意义上讲，2.3 ± 0.3 到 8.2 ± 0.7 的正 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值或 −2.7 ± 0.6 的轻微负的 $\varepsilon_{Hf}(t)$ 值以及相对应的 999 ± 25Ma 到 1244 ± 22Ma 的年轻 T_{DM1} 年龄，不能解释为中元古代末期的新生地壳生长。相反地，它们是由新元古代裂谷岩浆作用引起的亏损地幔和老的陆壳的不同

程度的混合导致的。因此,当把正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值和锆石 U-Pb 年龄或 Hf 模式年龄一起用作指示新生地壳来源时,识别产生新生地壳的同期亏损地幔端元是至关重要的。与此类似,五庙片麻岩中残留锆石的亏损地幔 Hf 模式年龄为 2186 ± 96Ma,锆石 U-Pb 不一致上交点年龄为 2147 ± 22Ma,二者基本一致。在 t = 2150Ma 时计算得到了高度正的$\varepsilon_{Hf}(t)$值 8.5 ±0.6 (图 8)。这也指示了古元古代早期新生地壳从亏损地幔中生长和直接再造。并且,这一古元古代新生地壳的 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素特征在新元古代裂谷岩浆作用中都保留了下来。

新元古代裂谷岩浆活动不但能导致双峰式组成的新生地壳的生长,还能引起老的地壳基底的再造。早期的镁铁质岩浆可由上升的软流圈地幔减压熔融实现,而具有低的锆石$\delta^{18}O$值的后期的双峰式岩浆显然是由沿着裂谷构造带新生的和古老的地壳的含水熔融引起的。古元古代地壳的再造,反应在锆石 U-Pb 年龄和 Lu-Hf 同位素数据中。新生地壳与古老地壳来源岩浆的共存清楚地证明了与大陆拉张和最初的裂解有关的高热流和岩石圈尺度的断裂的存在。

6 结语

对大别山超高压榴辉岩和片麻岩的锆石 U-Pb 和 Lu-Hf 同位素研究表明,三叠纪超高压变质作用显著地影响了锆石 U-Pb 同位素体系,锆石 Lu-Hf 同位素体系也受到变质作用的部分影响。与年龄较老的岩浆核部和幔部相比,年轻的变质增生边具有低的 Th/U 和 Lu/Hf 比值但高的$\varepsilon_{Hf}(t)$值。不同成因锆石的 Th/U 和 Lu/Hf 比值存在着正相关性,表明变质作用对锆石的 U-Th-Pb 和 Lu-Hf 同位素体系有着相似的影响。部分锆石的 Hf 模式年龄与锆石从岩浆中结晶的年龄一致,揭示出两期新生地壳生长分别在约 750Ma 和 2.15Ga,并且相应的$\varepsilon_{Hf}(t)$值还与同期亏损地幔$\varepsilon_{Hf}(t)$值接近。进一步,片麻岩中锆石的 Hf 同位素演化表明,大别造山带超高压变质岩原岩记录了在 1.8 ~ 1.9Ga 期间在扬子陆块北缘出现的一次地壳生长事件。750Ma 左右的裂谷岩浆活动引起了新元古代中期新生地壳的生长和古元古代新生陆壳的再造,从而导致了同时期的壳幔相互作用,使双峰式岩浆岩的$\varepsilon_{Hf}(t)$值降低和 Hf 模式年龄升高。在应用锆石 Hf 同位素研究大陆地壳生长事件的情况下,只有当最大正 $\varepsilon_{Hf}(t)$值与同时期亏损地幔的初始 Hf 同位素比值一致,并且对应的 Hf 模式年龄与锆石从幔源岩浆中结晶的时间相似,这时才能将有关的 Hf 模式年龄解释为新生地壳生长事件的时间。

高级变质作用有时能够引起岩浆锆石增生边$^{176}Hf/^{177}Hf$比值的显著提高,导致变质新生颗粒或增生边类似于新生地壳的高$\varepsilon_{Hf}(t)$值假象,这点在应用变质岩中锆石进行源区示踪时必须予以注意。由于石榴石是富集重稀土元素(HREE)的矿物,其 Lu/Hf 比值在所有矿物中最高,所积累的放射成因^{176}Hf含量最大,因此变质作用期间石榴石的分解或重结晶都能够导致新生锆石具有升高的$^{176}Hf/^{177}Hf$比值(所谓的石榴石效应)。不过,在相对封闭体系变质条件下,锆石的初始 Hf 同位素组成,尤其是岩浆核的 Hf 同位素组成,能够很好地反映它们的原岩性质。在应用变质岩中锆石 Hf 同位素示踪原岩性质时,应该采用原岩岩浆结晶年龄来计算初始 Hf 同位素比值,而不是采用变质年龄或对应测点的$^{207}Pb/^{206}Pb$年龄。如果锆石 Hf 同位素与全岩 Nd 同位素之间出现脱耦,不同类型的锆石效应可以用来区分地壳混染与源区继承。

致谢 锆石 Lu-Hf 同位素体系研究得到吴福元研究员的大力支持,高山教授和叶凯研究员所提出修改意见有助于本文在表达上的完善。

References

Amelin Y, Lee DC and Halliday AN. 2000. Early-middle Archean crustal evolution deduced from Lu-Hf and U-Pb isotopic studies of single zircon grains. Geochim. Cosmochim. Acta, 64: 4205 – 4225

Amelin Y, Lee DC, Halliday AN and Pidgeon RT. 1999. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons. Nature, 399: 252 – 255

Ames L, Zhou GZ and Xiong BC. 1996. Geochronology and isotopic characteristics of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. Tectonics, 15: 472 – 489

Andersen T, Griffin WL and Pearson NJ. 2002. Crustal evolution in the SW part of the Baltic Shield: The Hf isotope evidence. J. Petrol., 43: 1725 – 1747

Arndt NT and Goldstein S. 1987. Use and abuse of crust-formation ages. Geology, 15, 893 – 895

Bodet F and Scharer U. 2000. Evolution of the SE-Asian continent from U-Pb and Hf isotopes in single grains of zircon and baddeleyite from large rivers. Geochim. Cosmochim. Acta, 64: 2067 – 2091

Chavagnac V, Jahn BM, Villa IM, Whitehouse MJ and Liu DY. 2001. Multichronometric evidence for an in situ origin of the ultrahigh-pressure metamorphic terrane of Dabieshan, China. Journal of Geology, 109: 633 – 646

Cherniak DJ and Watson EB. 2003. Diffusion in zircon. Rev. Mineral. Geochem., 53: 113 – 143

Cong BL. 1996. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabieshan-Sulu Region of China. Beijing: Science Press, 224 pp

Corfu F and Noble SR. 1992. Genesis of the southern Abitibi Greenstone belt, Superior Province, Canada: evidence from zircon Hf isotope analysis using a single filament technique. Geochim. Cosmochim. Acta, 56: 2081 – 2097

Flowerdew MJ, Millar IL, Vaughan APM, Horstwood MSA, Fanning CM. 2006. The source of granitic gneisses and migmatites in the Antarctic Peninsula: a combined U-Pb SHRIMP and laser ablation Hf isotope study of complex zircons. Contrib. Mineral. Petrol., 151: 751 – 768

Fu B, Touret JLR and Zheng YF. 2001. Fluid inclusions in coesite-bearing eclogites and jadeite quartzite at Shuanghe, Dabie Shan (China). J. Metamorph. Geol., 19: 529 – 545

Fu B, Touret JLR and Zheng YF. 2003. Remnants of premetamorphic fluid and oxygen isotopic signatures in eclogites and garnet clinopyroxenite from the Dabie-Sulu terranes, eastern China. J. Metamorph. Geol., 21: 561 – 578

Griffin WL *et al.* 2000. The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICPMS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. Geochim. Cosmochim. Acta, 64: 133 – 147

Griffin WL, Wang X, Jackson SE, Pearson NJ, O'Reilly SY, Xu XS and Zhou XM. 2002. Zircon chemistry and magma mixing, SE China: In-situ analysis of Hf isotopes, Tonglu and Pingtan igneous complexes. Lithos, 61: 237 – 269

Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D and Dong S. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. Earth Planet. Sci. Lett., 161: 215 – 230

Hacker BR *et al.* 2000. Exhumation of ultrahigh-pressure continental crust in east central China: Late Triassic-Early Jurassic tectonic unroofing. Journal of Geophysical Research, 105: 13339 – 13364

Halpin JA, Gerakiteys CL, Clarke GL, Belousova EA and Griffin WL. 2005. In-situ U-Pb geochronology and Hf isotope analyses of the Rayner Complex, East Antarctica. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 689 – 706

Hawkesworth CJ and Kemp AIS. 2006. Evolution of the continental crust. Nature, 443: 811 – 817

Hirajima T and Nakamura D. 2003. The Dabie Shan-Sulu orogen. In: D. A. Carswell and R. Compagnoni (Editors), Ultrahigh Pressure Metamorphism. EMU Notes in Mineralogy, pp. 105 – 144

Hoskin PWO and Black LP. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. J. Metamorph. Geol., 18: 423 – 439

Iizuka T, Hirata T, Komiya T, Rino S, Katayama I, Motoki A and Maruyama S. 2005. U-Pb and Lu-Hf isotope systematics of zircons from the Mississippi River sand: Implications for reworking and growth of continental crust. Geology, 33: 485 – 488

Jahn BM. 1998. Geochemical and isotopic characteristics of UHP eclogites and ultramafic rocks of the Dabie orogen: implications for continental subduction and collisional tectonics. In: BR Hacker and JG Liou (Eds.), When Continents Collide: Geodynamics and Geochemistry of Ultrahigh-Pressure Rocks. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 203 – 239

Jahn BM, Rumble D and Liou JG. 2003. Geochemistry and isotope tracer study of UHP metamorphic rocks. In: D. A. Carswell and R. Compagnoni (Editors), Ultrahigh Pressure Metamorphism. EMU Notes in Mineralogy, pp. 365 – 414

Kemp AIS, Wormald RJ, Whitehouse MJ and Price RC. 2005. Hf isotopes in zircon reveal contrasting sources and crystallization histories for alkaline to peralkaline granites of Temora, southeastern Australia. Geology, 33: 797 – 800

Li S, Jagoutz E, Chen Y and Li Q. 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic 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

Li XP, Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B and Li YL. 2004. Low-T eclogite in the Dabie terrane of China: petrological and isotopic constraints on fluid activity and radiometric dating. Contrib. Mineral. Petrol., 148: 443 – 470

Li ZX, Li XH, Kinny PD, Wang J, Zhang S and Zhou H. 2003. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze Craton, South China and correlations with other continents: evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. Precambrian Res., 122: 85 – 109

Liou JG, Zhang RY, Eide EA, Wang XM, Ernst WG and Maruyama S. 1996. Metamorphism and tectonics of high-pressure and ultra-high-pressure belts in the Dabie Sulu region, China. In: MT Harrison and A Yin (Eds.), The Tectonics of Asia. Cambridge University Press, pp. 300 – 344

Liu FL and Xu ZQ. 2004. Fluid inclusions hidden in coesite-bearing zircons in ultrahigh-pressure metamorphic rocks from southwestern Sulu terrane in eastern China. Chinese Sci. Bull., 49: 396 – 404

Liu FL, Xu ZQ and Xue HM. 2004a. Tracing the protolith, UHP metamorphism, and exhumation ages of orthogneiss from the SW Sulu terrane (eastern China): SHRIMP U-Pb dating of mineral inclusion-bearing zircons. Lithos, 78: 411 – 429

Liu FL, Xu ZQ, Liou JG and Song B. 2004b. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, southwestern Sulu terrane, eastern China. J. Metamorph. Geol., 22: 315 – 326

Liu DY, Jian P, Kröner A and Xu ST. 2006. Dating of prograde metamorphic events deciphered from episodic zircon growth in rocks of the Dabie Sulu UHP complex, China. Earth Planet. Sci. Lett., 250: 650 – 666

Nowell GM, Kempton PD, Nobel SR, Fitton JG, Saunders AD, Mahoney JJ and Taylor RN. 1998. High precision Hf isotope measurements of MORB and OIB by thermal ionization mass spectrometry: insights into the depleted mantle. Chem. Geol., 149: 211 – 233

Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. Chem. Geol., 184: 123 – 138

Rubatto D and Hermann J. 2003. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implications for Zr and Hf budget in subduction zones. Geochim. Cosmochim. Acta, 67: 2173 – 2187

Rudnick RL. 1995. Making continental crust. Nature, 378, 571 – 578

Samson SD, D'Lemos RS, Blichert-Toft J and Vervoort J. 2003. U-Pb geochronology and Hf-Nd isotope compositions of the oldest Neoproterozoic crust within the Cadomian orogen: new evidence for a unique juvenile terrane. Earth Planet. Sci. Lett., 208: 165 – 180

Samson SD, Inglis JD, D'Lemos RS, Admou H, Blichert-Toft J and Hefferan K. 2004. Geochronological, geochemical, and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Neoproterozoic plagiogranites in the Tasriwine ophiolite, Anti-Atlas orogen, Morocco. Precambr. Res., 135: 133 – 147

Taylor SR and McLennan SM. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Rev. Geophys., 33: 241 – 165

Thompson AB, Schulmann K, Jezek J and Tolar V. 2001. Thermally softened continental extensional zones (arcs and rifts) as precursors to thickened orogenic belts. Tectonophys., 332: 115 – 141

Vervoort JD, Patchett PJ, Blichert-Toft J and Albarede F. 1999. Relationship between Lu-Hf and Sm-Nd isotopic systems in the global sedimentary system. Earth Planet. Sci. Lett., 168: 79 – 99

Wang X and Griffin WL. 2004. Unusual Hf contents in metamorphic zircon from coesite-bearing eclogites of the Dabie Mountains, east-

central China: implications for the dating of ultrahigh-pressure metamorphism. J. Metamorph. Geol., 22: 629 – 637

Wang XM, Zhang RY and Liou JG. 1995. UHPM terrane in east central China. In: R. Coleman and X. Wang (Eds.), Ultrahigh Pressure Metamorphism. Cambridge University Press pp. 356 – 390

Wei CS, Zheng YF, Zhao ZF, Valley JW. 2002. Oxygen and neodymium isotope evidence for recycling of juvenile crust in northeast China. Geology, 30, 375 – 378

Wu YB, Zheng YF, Zhao ZF, Gong B, Liu XM and Wu FY. 2006a. U-Pb, Hf and O isotope evidence for two episodes of fluid-assisted zircon growth in marble-hosted eclogites from the Dabie orogen. Geochim. Cosmochim. Acta, 70: 3743 – 3761

Wu RX, Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Zhang SB, Liu XM, Wu FY. 2006b. Reworking of juvenile crust: element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. Precambr. Res., 146: 179 – 212

Zhang SB, Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Gao S, Wu FY. 2006. Zircon U-Pb age and Hf-O isotope evidence for Paleoproterozoic metamorphic event in South China. Precambr. Res., 151: 265 – 288

Zheng YF, Fu B, Gong B and Li L. 2003. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. Earth Sci. Rev., 62: 105 – 161

Zheng YF, Wu YB, Chen FK, Gong B, Li L and Zhao ZF. 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. Geochim. Cosmochim. Acta, 68: 4145 – 4165

Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF, Zhang SB, Xu P and Wu FY. 2005a. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. Earth Planet. Sci. Lett., 240: 378 – 400

Zheng YF, Zhou JB, Wu YB and Xie Z. 2005b. Low-grade metamorphic rocks in the Dabie-Sulu orogenic belt: A passive-margin accretionary wedge deformed during continent subduction. Inter. Geol. Rev., 47: 851 – 871

Zheng YF, Zhao ZF, Wu YB, Zhang SB, Liu XM and Wu FY. 2006. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. Chem. Geol., 231: 135 – 158

Zheng YF, Zhang SB, Zhao ZF, Wu YB, Li XH, Li ZX and Wu FY. 2007. Contrasting zircon Hf and O isotopes in the two episodes of Neoproterozoic granitoids in South China: implications for growth and reworking of continental crust. Lithos, doi: 10.1016/j.lithos.2006.10.003