

北大别片麻岩的多阶段演化：锆石 U-Pb 年代学证据

谢 智 高天山 陈江峰

(中国科学技术大学地球物质循环实验室, 地球和空间科学学院, 合肥 230026. E-mail: zxie@ustc.edu.cn)

摘要 片麻岩是大别-苏鲁造山带中广泛发育的一种岩石类型, 其中部分与榴辉岩共生的片麻岩同样经历了三叠纪超高压变质作用。尽管部分片麻岩在白垩纪受到大规模岩浆活动的加热再变质, 但是不清楚这部分片麻岩是否同样受到过三叠纪变质作用的影响。本文报道了北大别超高压榴辉岩围岩片麻岩中锆石 SHRIMP 法 U-Pb 定年结果。数据显示, 该片麻岩原岩形成时代是新元古代(746 ± 31 Ma), 与北大别花岗岩片麻岩的原岩形成时代一致。U 和 Th 含量不同的增生锆石分别给出三叠纪(212 ± 21 Ma)和白垩纪(120 ± 11 Ma)的谐和年龄。它们的 Th/U 比值均 <0.1 , 因此锆石的两期增生均是流体作用造成的。本文研究结果表明, 北大别片麻岩既参与了三叠纪的大陆板块俯冲和折返, 也受到白垩纪岩浆事件的改造, 这为理解整个大别造山带中片麻岩的构造演化过程提供了重要的同位素年龄依据。

关键词 片麻岩 多阶段变质 U-Pb 定年 锆石增生

在大别造山带北部, 灰色片麻岩(TTG)是分布最广泛的岩石类型。已有的锆石 U-Pb 年龄资料表明, 大别造山带内花岗岩片麻岩的原岩形成时代是在 600~800 Ma, 并主要集中在约 750 Ma 左右^[1~3]。如谢智等人^[1]在北大别石竹河片麻岩中获得年龄为 707 ± 42 Ma; 郑永飞等人^[2]在洪庙片麻岩中获得年龄为 718 ± 95 Ma。这些年龄多为锆石 U-Pb 不一致线上交点年龄或谐和年龄, 一般认为代表片麻岩原岩的形成时代^[1,2]。但也有人认为北大别杂岩带中 TTG 片麻岩是晚中生代侵入的岩浆杂岩, Xue 等人^[4]和 Hacker 等人^[5]在北大别片麻岩中获得新元古代年龄的同时, 获得了白垩纪的锆石 U-Pb 年龄 $137 \sim 126$ Ma。他们根据北大别片麻岩中缺乏三叠纪年龄, 将 137 Ma 解释为北大别片麻岩的形成时代。但最近的锆石 U-Pb 年代学结果表明, 北大别片麻岩中不仅有新元古代年龄和白垩纪年龄, 也多处记录有三叠纪年龄。例如, 谢智等人^[1]在石竹河片麻岩中获得 229 ± 18 Ma 的不一致线下交点年龄, 江来利等^[6]在漫水河片麻岩中获得 217.8 ± 8.9 Ma 的谐和年龄, 郑永飞等人^[2]在洪庙片麻岩中获得不一致线下交点年龄为 262 ± 28 Ma。这些 U-Pb 年龄数据表明, 北大别片麻岩同样参与了三叠纪高级变质作用。片麻岩中给出的白垩纪年龄则并非如 Hacker 等人^[5]所认为代表原岩形成时代, 而可能反映了片麻岩折返后受大规模白垩纪岩浆活动影响的结果^[7]。

已有的年龄资料显示, 北大别片麻岩可能曾经经历了多阶段演化, 其原岩形成时代范围可能主要

为 700~800 Ma; 在三叠纪大陆板块深俯冲过程中经历了高压变质作用, 变质年龄与造山带中超高压岩石的变质时代^[2,5,8~12]一致; 在白垩纪大规模岩浆活动中^[7,13], 北大别片麻岩再次受到热事件的影响, 导致所形成锆石的 U-Pb 年龄与造山带中侵入岩体形成年龄一致, 同时这也是北大别片麻岩混合岩化作用发生的时代^[14]。但是上述概括是基于对北大别片麻岩中不同样品研究的综合结果, 而不是对同一样品的锆石 U-Pb 定年结果。换句话说, 目前尚无直接的同位素年代学证据表明, 同一岩石在新元古代形成后, 既经历了三叠纪超高压变质作用, 也在其后的白垩纪岩浆活动受到影响。由于这种年代学证据对于认识大别造山带变质岩的形成和演化具有重要意义, 本文采用 SHRIMP 定年方法对北大别超高压榴辉岩围岩片麻岩中的锆石进行了详细的 U-Pb 定年, 获得其经历多阶段演化的同位素年代学证据。

1 地质背景和样品描述

大别造山带位于安徽、湖北和河南三省交界处。其东部边界为郯庐断裂, 南部边界为襄樊-广济断裂, 北部以合肥盆地与华北板块分开。在构造上, 自北向南分为 4 个构造单元: 北淮阳褶皱带(NHB)、北大别杂岩带(NDC)、中大别超高压带(UHP)和南大别宿松变质带(SDC)(图 1)。北大别杂岩带北部以晓天-磨子潭断裂与 NHB 为边界, 南部以五河-水吼断裂与 UHP 分界。其中主要岩石类型为 TTG 片麻岩, 并分布大量中生代酸性侵入体^[4,5,15]和少量同时代基性-超基性

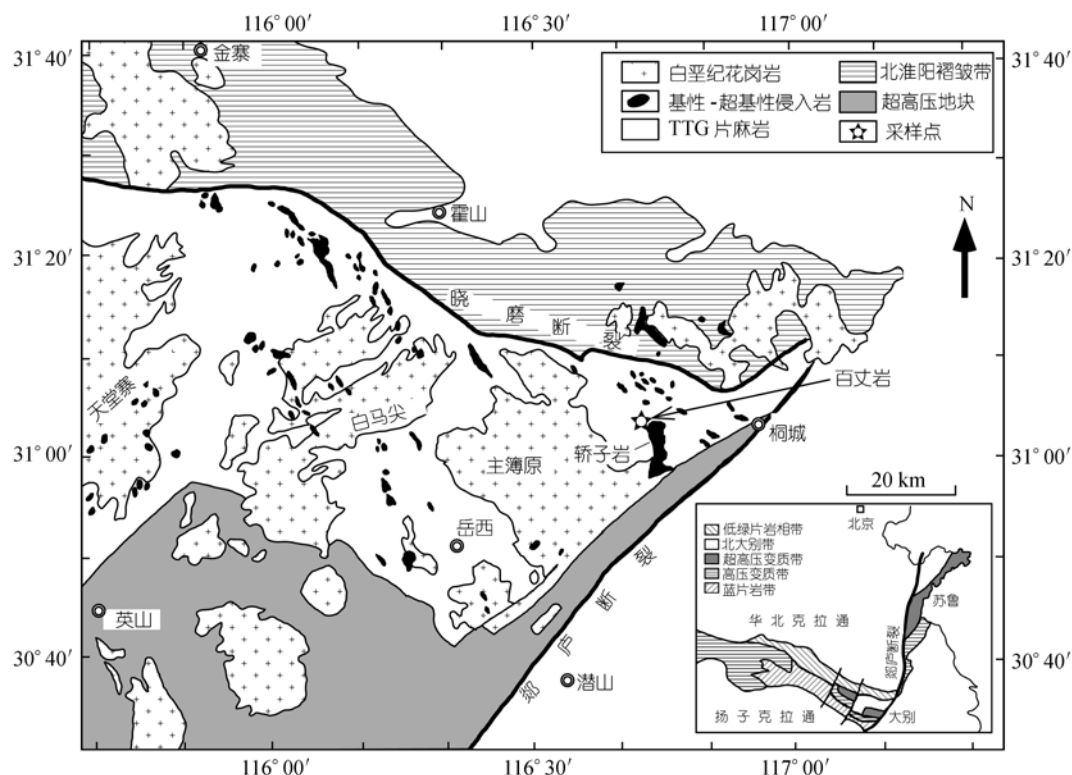


图1 大别造山带地质图和采样点(根据Jahn等人^[17]修改)

侵入体^[5,7,16]。详细的地质调查结果显示,北大别杂岩带中还有一些榴辉岩相岩石或榴辉岩相矿物残留^[17],主要分布于饶拔寨、洪庙和官庄一带^[18,19]。徐树桐等人^[20]在北大别杂岩带的榴辉岩发现了微粒金刚石,证明北大别地块(至少一部分)也和中大别超高压岩石一样经历了超高压变质作用。年代学结果显示,这些榴辉岩相岩石均记录了三叠纪超高压变质作用^[12,21]。此外,北大别杂岩带中还有一些榴辉岩的围岩片麻岩也具三叠纪年龄^[1,2,22]。

本文研究样品(XD09)采自造山带北部舒城洪庙乡百丈岩(31°03'50"N, 116°05'E),轿子岩基性岩体的西北方向,属于北大别杂岩带的范围(图1)。在该地区,有大量的花岗片麻岩出露,其中有角闪岩相岩石团块,在部分团块中有残余榴辉岩相岩石,三者野外产状一致。片麻岩呈肉红色,有显著的重熔特征,暗色矿物定向排列明显。显微镜下观察,主要的矿物组合为石英+钾长石+斜长石+角闪石+黑云母,副矿物为褐帘石、锆石、磷灰石等。

从约10 kg样品中,通过常规选矿方法选出较多的锆石。在双目显微镜下,这些锆石表现出两种不同的形态特征。一种锆石呈菊黄色,纯净透明,粒状

或柱状,晶形完整,表面光滑,有明显的岩浆锆石特征,颗粒较小;另一种锆石呈棕褐色,不透明,有明显裂纹,颗粒晶形完好,表面较粗糙,粒度相对较大,达到500 μm,有明显的蜕晶化特征。在透射光下,可以观察到锆石核部浑浊而不透明,但有宽度不等的透明的边缘。

2 分析方法和结果

锆石的处理、照相和测定在中国地质科学院北京离子探针中心和电子探针室完成。将样品中两类不同锆石和标准锆石TEMORA(年龄为417 Ma)在玻璃板上用环氧树脂固定、抛光,进行反射光和透射光照相后,进行阴极发光(CL)和背散射(BSE)图像分析,以检查锆石的内部结构。同位素分析所用仪器为SHRIMP,详细的测定流程参见文献^[23,24]。测试时所用的标准锆石为SL13和TEMORA,前者用于标定U和Th的含量,后者用于校正年龄。束斑直径约为20 μm。测定结果用实测的²⁰⁴Pb进行普通Pb的校正,数据处理采用Squid和Isoplot程序^[25]。

在CL图像中(图2(a)),从核部→幔部→壳部仅呈现简单的黑→白→黑色,而BSE图像(图2(b), 3)则

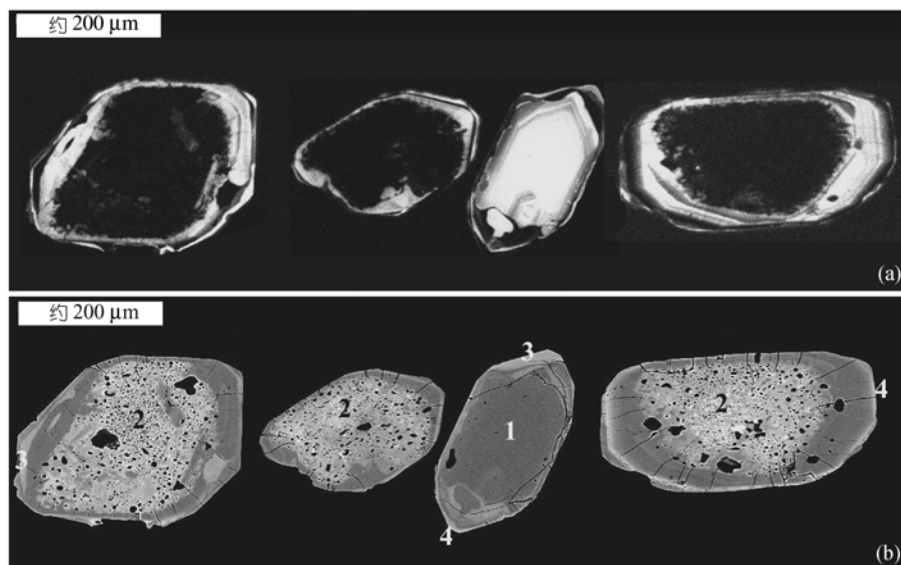


图 2 百丈岩片麻岩中锆石的阴极发光(CL)和背散射(BSE)图像
(a) CL 图像; (b) BSE 图像. 1. 深灰色晶域; 2. “海绵”状蜕晶化晶域; 3. 浅灰色晶域; 4. 白色晶域

反映出较 CL 图像更为清晰和复杂的特征. 因此在本文中均采用 BSE 图像. 颗粒较小的粒状和长柱状锆石内部较干净, 核部晶域呈深灰色, 部分区域仍保留有岩浆环带特征(图 2(a)); 周围被稍浅灰色的晶域所包裹, 但宽度不均匀, 如粒状锆石周边被完全包围, 而柱状颗粒在晶体尖端较边部厚. 而较大的不透明颗粒图像较复杂, 有多层环带, 核部较大面积呈现“海绵”状, 近于白色的核部有较多黑色颗粒分布, 是明显蜕晶化作用的结果, 并与深灰色晶域共存; 幔部晶域呈稍浅灰色; 壳部呈现近于白色, 反映了较高的 U(或/和 Th)含量; 并且有较多的裂纹垂直晶面从颗粒表面联通核部晶域(图 2(b)). 从获得的图像中, 可以看出, 所研究的锆石有复杂的演化历史, 其中较大颗粒有明显的蜕晶化作用, 由于蜕晶化过程中, 颗粒从核部膨胀, 导致产生大量裂隙, 并垂直晶面; 而较小而纯净的颗粒没有呈现出“海绵”状, 还保持透明的光学特征. 因此针对不同颗粒和颗粒的不同部分分别进行离子探针 U-Pb 分析. 由于蜕晶化部分可能给出不确定的结果, 因此主要选择透明、无杂质的不同晶域进行测定.

表 1 列出获得的 13 个点的锆石 U-Pb 测定结果. 在图 3 中, 除 1, 2, 5 点因给出不谐和年龄而标注点号外, 其余具谐和年龄的点将 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄标注在测定点附近. 从表 1 和图 3 中可以看出, 纯净透明, 未呈“海绵”状的粒状或柱状颗粒的深灰色给出从 715 ~

780 Ma 的年龄(点 4, 11, 12). 尽管 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄误差较大(图 4(a)), 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 746 ± 31 Ma(图 4(b)); 浅灰色的晶域给出谐和的 U-Pb 年龄(点 7, 10, 13), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 212 ± 21 Ma(图 4(c)), 同一颗粒中深灰色晶域年龄为 768 Ma, 浅灰色晶域为 213 Ma; 而近于白色的晶域给出更年轻的谐和的 U-Pb 年龄(点 6, 8, 9), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄为 120 ± 11 Ma(图 4(d)). 而点 1, 2, 5 给出明显的不谐和年龄(图 4(a)), 点 3 给出明显偏年轻的年龄, 可能是具新元古代年龄的晶域和具三叠纪年龄或白垩纪年龄晶域的混合结果.

从表 1 中可以看出, 具有新元古代年龄的深灰色晶域中, 测定点的 Th/U 值较高, 范围是 0.27 ~ 1.40, U, Th 含量较低, 范围分别是 52 ~ 138 和 19 ~ 74 $\mu\text{g/g}$; 而给出三叠纪年龄的浅灰色晶域的点的 Th/U 值很低, 范围是 0.013 ~ 0.028, 但 U 含量较高, 范围是 1076 ~ 1699 $\mu\text{g/g}$, Th 含量范围是 22 ~ 32 $\mu\text{g/g}$; 给出白垩纪年龄的白色晶域与给出三叠纪年龄的晶域有相似的 Th/U 比值, 为 0.019 ~ 0.035, 但 U, Th 含量均高于后者, 分别是 3687 ~ 5203 和 68 ~ 184 $\mu\text{g/g}$. 而蜕晶化部分(点 1)有相当高的 U, Th 含量(3797 和 1680 $\mu\text{g/g}$), 可能代表有高 U, Th 含量的流体的影响.

3 讨论

百丈岩片麻岩中锆石的 U, Th 含量结果和年龄数据表明, 这些锆石有明显的不同阶段的演化过程: 如

表 1 百丈岩片麻岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄测定结果

序号	测定晶域	U / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	Th/U	$^{206}\text{Pb}^*$ / $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	$^{204}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$\pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 1\sigma$	表面年龄/Ma			
													$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$\pm 2\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$
1	蜕晶化	3796	1680	0.443	194	0.00012	0.0595	17	0.483	14	0.0589	6	373.0	10.0	562	23
2	深灰色	595.3	109.4	0.184	42.7	0.00003	0.0834	23	0.697	24	0.0606	12	516.0	14.0	625	43
3	深灰色	137.7	74.4	0.541	12.9	0.00021	0.1082	36	0.910	53	0.0610	29	662.0	21.0	638	100
4	深灰色	68.4	18.6	0.271	6.99	0.00087	0.1174	39	0.883	78	0.0546	44	715.0	23.0	395	180
5	深灰色	466.3	67.4	0.145	14.6	0.00032	0.0361	10	0.274	13	0.0549	19	228.8	6.5	409	79
6	白色	3572	67.6	0.019	56.7	0.00003	0.0184	5	0.121	4	0.0477	10	117.7	3.2		
7	浅灰色	1694	22.2	0.013	46.7	0.00025	0.0321	9	0.226	7	0.0511	9	203.4	5.6		
8	白色	3686	88.1	0.024	62.8	0.00030	0.0197	6	0.127	6	0.0468	16	125.8	3.5		
9	白色	5202	183.9	0.035	83.1	0.00006	0.0186	5	0.122	4	0.0477	7	118.6	3.3		
10	浅灰色	1699	32.3	0.019	51.0	0.00047	0.0347	10	0.231	14	0.0482	27	219.9	6.2		
11	深灰色	87.1	121.3	1.392	9.55	0.00074	0.1265	52	1.160	107	0.0662	55	768.0	30.0	813	170
12	深灰色	52.1	52.1	1.000	5.96	0.00161	0.1286	54	0.800	312	0.0450	171	780.0	31.0		
13	浅灰色	1076	30.4	0.028	31.3	0.00040	0.0336	10	0.229	11	0.0495	20	213.1	6.0		

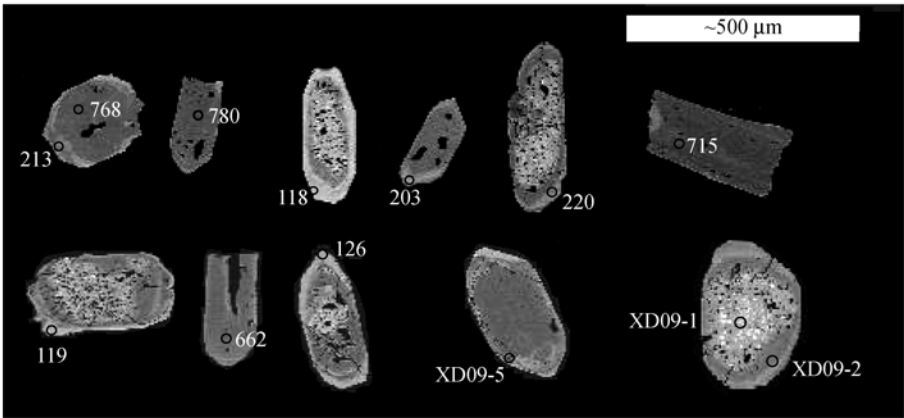


图 3 百丈岩片麻岩中锆石的背散射(BSE)图像和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

浅灰色晶域(三叠纪年龄)与深灰色晶域(新元古代年龄)有相似的 Th 含量, 但前者的 U 含量要高得多; 与白色晶域(白垩纪年龄)有相似的 Th/U 比值, 但后者的 Th, U 含量要高的多; 而且多数颗粒边部有厚薄不等的白色的增生部分. 综上所述, 有理由相信这些锆石经历了多阶段演化, 不同年龄则代表了不同的演化时代.

一般岩浆成因锆石具有较高的Th/U比值, 通常高于 0.4; 而变质锆石一般具有较低的Th/U比值, 通常低于 0.1^[26], 如Vavra等人^[27]在南阿尔卑斯变质岩中具多阶段变质的锆石中残留的岩浆成因的核部获得比值为 0.3 ~ 0.5; Hermann等人^[28]在Kokchetav变质岩锆石中岩浆残留锆石区域获得 0.15 ~ 0.29 的比值范围. 百丈岩片麻岩中锆石深灰色晶域的U, Th含量较低, 但Th/U值较高; 而且部分晶域保存了残留的振

荡环带(图 2(a)). 因此, 百丈岩片麻岩中锆石的核部应为岩浆成因. 片麻岩中, 纯净透明的锆石的核部(深灰色晶域)给出 746 ± 31 Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 平均年龄, 与已知的大别造山带花岗岩片麻岩的原岩形成时代^[2,3,10]一致. 因此, 百丈岩片麻岩锆石核部的新元古代年龄代表了其原岩岩浆岩的结晶年龄.

百丈岩片麻岩锆石的浅灰色和白色晶域有不同的Th, U含量, 分别给出具有三叠纪和白垩纪谐和年龄的增生边, 这种增生代表了片麻岩原岩在形成后经历了多阶段变质作用. Hoskin等人^[29]认为, 变质条件下可能形成不同类型的锆石: (1) 在深熔作用的熔体里形成^[30]; (2) 主要硅酸盐矿物和副矿物在变质分解反应中释放的Si和Zr在亚固相条件下扩散形成^[31,32]; (3) 从富水变质流体中形成^[33]; (4) 原岩锆石重结晶形成^[32,34~36]. 从狭义的概念理解, 所谓变质锆

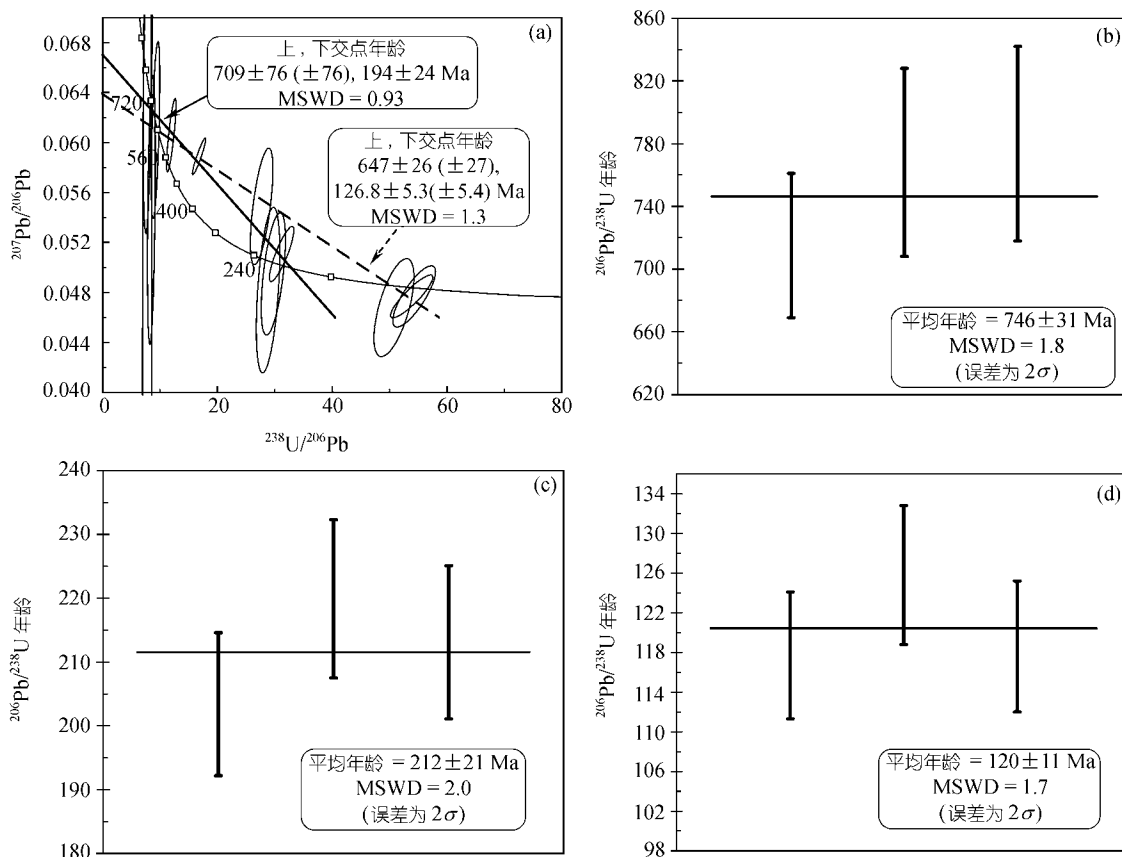


图 4 百丈岩片麻岩中获得的锆石 SHRIMP 测定结果

(a) 所有点给出的不一致年龄; (b) 深灰色晶域给出新元古代平均年龄; (c) 浅灰色晶域给出三叠纪平均年龄; (d) 白色晶域给出白垩纪年龄

石的形成应与流体(或熔体)无关,而且变质锆石中没有振荡环带,而可能出现按片带现象。实际上,变质锆石还可以由岩浆锆石在高级变质条件下的结晶学转变(固态重结晶或深熔重结晶)形成。对于流体作用下形成的锆石,一般会表现出较低的Th/U比值(< 0.1),Rubatto等人^[37]在西阿尔卑斯的榴辉岩相脉岩中获得锆石年龄为 45 ± 1 Ma, 锆石的Th/U比值范围是 $0.01 \sim 0.086$, 远低于围岩榴辉岩的 $0.2 \sim 1.6$ 的范围,他们认为这些低Th/U比值的脉岩锆石是从含水流体中形成的。造成低Th/U比的原因是U较Th有更高的溶解度,易于进入流体中,因此造成流体有较低的Th/U比值。而且Th较U更易进入褐帘石,因此少量褐帘石的出现会造成流体中Th/U比值的降低^[37]。此外, Th^{4+} 较 U^{4+} 的离子半径约大 4%^[29], 相对而言,后者更易进入矿物晶格中,也会造成锆石中Th/U比的降低。

百丈岩片麻岩中部分锆石浅灰色增生边给出谐和的三叠纪年龄,与大别造山带超高压岩石峰期变

质时代接近。目前,大别-苏鲁造山带中超高压岩石变质的峰期时代是在三叠纪^[2,8-10,38-41]已为较多人接受。而本文中锆石给出年龄为 212 ± 11 Ma, 接近或略晚于峰期变质时代,与峰期变质后超高压岩石折返过程中的角闪岩相退变质时间范围一致^[42,43]。此外,该片麻岩是该地区榴辉岩相岩石的围岩,与榴辉岩露头仅有百米距离,已有岩石学研究证实该榴辉岩相岩石经历了超高压变质作用^[20],矿物Sm-Nd同位素等时线年龄结果表明榴辉岩相变质作用发生在 226 Ma左右^[21],而对片麻岩中锆石的TIMS定年方法也给出三叠纪年龄结果^[2]。因此,百丈岩片麻岩也经历了三叠纪的变质作用。

而片麻岩中具有白垩纪年龄的锆石增生则与造山带内中生代大规模岩浆活动有关。已有的同位素年代学资料表明,大别-苏鲁造山带中在白垩纪有一期大规模的岩浆活动,形成为数众多的基性、中酸性和碱性岩浆岩。如Jahn等人^[7]和赵子福等人^[16]在花岗岩和基性岩中获得Sm-Nd等时线和锆石年龄约为 130

Ma; Xue等人^[4]在北大别花岗闪长岩中获得 125.6 ± 0.3 Ma的谐和年龄; Xie等人^[44]在花岗质脉岩中获得锆石年龄约为 133 ± 4 Ma. 同时, 年代学资料也表明, 造山带内广泛分布的片麻岩受到岩浆事件的影响, 一些变质岩的锆石U-Pb体系也给出约 130 Ma的年龄. 如Hacker等人^[5]在北大别片麻岩中获得约 130 Ma 的年龄, 因此认为在白垩纪前北大别片麻岩不存在, 但这种认识受到较多研究人员的质疑. 多数研究者认为, 片麻岩给出的白垩纪年龄是对岩浆烘烤作用的反映^[7,44]. 如Ames等人^[10]在桐柏杂岩中得到 132 ± 10 Ma的下交点年龄; Xie等人^[44]在北大别片麻岩中获得 129 ± 5 Ma的锆石谐和年龄; 侯振辉等人¹⁾在惠兰山麻粒岩中获得Sm-Nd矿物等时线年龄为 136 ± 18 Ma. 而且对北大别北部混合岩的年代学研究也表明, 混合岩化作用发生在白垩纪^[14], 也是由于白垩纪岩浆活动造成的, 百丈岩片麻岩的野外露头表现出明显的重熔特征, 具有类似流动构造的韧性变形. 因此, 可以推测, 百丈岩片麻岩在白垩纪同样受到岩浆作用的影响, 在岩浆活动期间, 形成具有白垩纪年龄的增生边.

这两种具谐和年龄的锆石均有相当低的Th/U比值, 其比值范围与前人认为的流体成因锆石的Th/U比范围一致^[26-28,37], 而且具有相当高的U含量, 因此具有三叠纪和白垩纪谐和年龄的锆石是流体成因的. 对于前者, 由于超高压变质作用中, 压力较高(> 25 kbar), 因此变质过程中, 很少流体活动; 但在后期折返过程中, 由于压力降低, 流体被释放出来, 促进了超高压岩石的退变质作用和新矿物的形成^[3]. 与此同时也产生锆石增生, 这时形成的锆石给出的年龄要稍晚于峰期变质时代. 在白垩纪岩浆活动中, 流体活动和岩浆活动应基本同时发生. 谢智等人^[1]和Zhang等人^[45]认为大别造山带白垩纪花岗岩是地球化学性质与北大别片麻岩类似的下地壳物质深熔形成的. 在岩石熔融过程中, 会有大量流体产生, 这种流体如含Zr, Si等元素, 就可以形成增生锆石, 并给出白垩纪年龄. 但对流体来源和演化的直接证据, 尚需进一步的岩石学和地球化学资料来澄清.

4 结论

对变质岩中锆石进行详细的离子探针U-Pb定年,

能够恢复和再造岩石的多期多阶段变质演化历史. 对大别山北部灰色片麻岩中锆石的 SHRIMP 定年结果表明, 其花岗质原岩形成时代为新元古代, 与大别造山带中其他花岗片麻岩原岩的形成时代一致. 岩浆锆石结晶后, 曾经受到过蜕晶化作用, 导致锆石内部晶格破坏, 易于受到变质作用的改造. 在三叠纪大陆板块俯冲过程中, 受到超高压变质作用影响, 并在折返过程中因流体作用, 在古老锆石边部形成增生边. 在随后的白垩纪岩浆作用中, 再次受到流体影响, 形成新的增生边.

致谢 在野外研究中得到法国雷恩大学地质系 M. Balleve 和 P. Gautier 的帮助; 选矿得到廊坊地质调查研究所李林庆、赵春华、王建华的帮助; 在样品分析中得到北京离子探针中心宋彪、石玉若、杨之青的帮助; 在成文过程中承蒙郑永飞教授和万渝生研究员指点. 稿件承蒙简平博士和陈福坤博士的审阅并提出宝贵修改意见, 在此表示衷心感谢. 本工作受国家自然科学基金(批准号: 40203004)资助.

参 考 文 献

- 1 谢智, 陈江峰, 张翼, 等. 北大别石竹河片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 2001, 17: 139~144
- 2 郑永飞, 陈福坤, 龚冰, 等. 大别-苏鲁造山带超高压变质岩原岩性质: 锆石氧同位素和U-Pb年龄证据. 科学通报, 2003, 48(2): 110~119[摘要][PDF]
- 3 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. Earth Sci Rev, 2003, 62: 105~161[DOI]
- 4 Xue F, Rowley D B, Tucker R D, et al. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie Complex, eastern Dabie Shan, China. J Geol, 1997, 105: 744~753
- 5 Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L E, et al. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen, China. Earth Planet Sci Lett, 1998, 161: 215~230[DOI]
- 6 江来利, 刘贻灿, 吴维平, 等. 大别山北部漫水河灰色片麻岩的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 地球化学, 2002, 31(1): 66~70
- 7 Jahn B M, Wu F Y, Lo C H, et al. Crust-mantle interaction induced by deep subduction of the continental crust: geochemical and Sr-Nd isotopic evidence from post-collisional mafic-ultramafic intrusions of the northern Dabie complex, central China. Chem Geol, 1999, 157: 119~146
- 8 Li S G, Xiao Y L, Liou D L, et al. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes. Chem Geol, 1993, 109: 89~111[DOI]
- 9 Li S G, Jagoutz E, Chen Y Z, et al. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic chronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in the Dabie terrain, Central China. Geochim Cosmochim Acta, 2000, 64: 1077~1093[DOI]

1) 侯振辉, 李曙光, 陈能松, 等. 大别造山带惠兰山基性麻粒岩的 Sm-Nd 和锆石 SHRIMP U-Pb 同位素年代学及锆石微量元素地球化学. 同位素地质新进展: 技术、方法、理论与应用学术研讨会. 北京, 2003. 41~42

- 10 Ames L, Zhou G, Xiong B. Geochronology and geochemistry of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of Sino-Korea Cratons, Central China. *Tectonics*, 1996, 15: 472~489
- 11 Rowley D B, Xue F, Tucker R D, et al. Ages of ultrahigh pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Sci Lett*, 1997, 151: 191~203[DOI]
- 12 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 大别山北部榴辉岩的 Sm-Nd 年龄测定及其对麻粒岩相退变质时间的制约. *地球化学*, 2001, 30(1): 79~87
- 13 Chen B, Jahn B, Wei C. Petrogenesis of Mesozoic granitoids in the Dabie UHP complex. Central China: Trace element and Nd-Sr isotope evidence. *Lithos*, 2002, 60: 67~88[DOI]
- 14 Wang J H, Sun M, Deng S X. Geochronological constraints on the timing of migmatization in the Dabie Shan, East-central China. *Eur J Mineral*, 2002, 14: 513~524[DOI]
- 15 陈江峰, 谢智, 刘顺生, 等. 大别造山带冷却年龄的 ^{40}Ar - ^{39}Ar 和裂变径迹年龄测定. *中国科学, B 辑*, 1995, 25(10): 1086~1091
- 16 赵子福, 郑永飞, 魏春生, 等. 大别山沙村和椒子岩基性-超基性岩锆石 U-Pb 定年、元素和碳氧同位素地球化学研究. *高校地质学报*, 2003, 9: 139~162
- 17 Tsai C H, Liou J G. Eclogites-facies relics and inferred ultra-high-pressure metamorphism in the North Dabie Complex, central-eastern China. *Am Mineral*, 2000, 85: 1~8
- 18 徐树桐, 苏文, 刘贻灿, 等. 大别山北部榴辉岩的发现及其岩相学特征. *科学通报*, 1999, 44(13): 1452~1456
- 19 周存亭, 高天山, 汤加富, 等. 安徽大别山北部榴辉岩的分布及主要特征. *中国区域地质*, 2000, 19(3): 253~257
- 20 徐树桐, 刘贻灿, 陈冠宝, 等. 大别山、苏鲁地区榴辉岩中新发现的微粒金刚石. *科学通报*, 2003, 48(10): 1068~1075[摘要][PDF]
- 21 Xie Z, Zheng Y F, Jahn B M, et al. Sm-Nd and Rb-Sr dating for pyroxene-garnetite from North Dabie in east-central China: Problem of isotope disequilibrium due to retrograde metamorphism. *Chem Geol*, 2004, 206: 137~158[DOI]
- 22 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐, 等. 大别山北部榴辉岩和英云闪长质片麻岩锆石 U-Pb 年龄及多期变质增生. *高校地质学报*, 2000, 6(3): 417~423
- 23 Williams I S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. In: McKibben M A, Shanks W C, Ridley W I, eds. *Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes*. Review of Economic Geol, 1998, 7: 1~35
- 24 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作/年龄测定及有关现象讨论. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26~30
- 25 Ludwig K. Isoplot/Ex 2.49. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel. Berkeley Geochronology Center, Special Publication No 1a, 2001
- 26 Rubatto D, Gebauer D. Use of cathodoluminescence for U-Pb zircon dating by ion microprobe: Some examples from the Western Alps. In: Pagel M, Barbin V, Blanc P, et al, eds. *Cathodoluminescences in Geosciences*. Michigan: Springer, 2000. 373~400
- 27 Varva G, Gebauer D, Schmid R, et al. Multiple zircon growth and recrystallization during polyphase Late Carboniferous to Triassic metamorphism in granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An ion microprobe (SHRIMP) study. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 122: 337~358[DOI]
- 28 Hermann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contrib Mineral Petrol*, 2001, 141: 66~82
- 29 Hoskin P W O, Black L P. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J Metamorphic Geol*, 2000, 18: 423~439[DOI]
- 30 Roberts M P, Finger F. Do U-Pb zircon ages from granulites reflect peak metamorphic conditions? *Geology*, 1997, 25: 319~322[DOI]
- 31 Fraser G, Ellis D, Eggins S M. Zirconium abundance in granulite-facies minerals, with implications for zircon geochronology in high-grade rocks. *Geology*, 1997, 25: 607~610[DOI]
- 32 Pan Y. Zircon- and monazite-forming metamorphic reactions at Manitouwadge, Ontario. *Canad Mineral*, 1997, 35: 105~118
- 33 Williams I S, Buick I S, Cartwright I. An extended episode of early Mesoproterozoic fluid flow in the Reynolds Range, central Australia. *J Metamorphic Geol*, 1996, 14: 29~47
- 34 Black L P, Williams I S, Compston W. Four zircon ages from one rock: The history of a 3930 Ma-old granulite from Mount Sones, Enderby Land, Antarctica. *Contrib Mineral Petrol*, 1996, 94: 427~437
- 35 Friend C R L, Kinny P D. New evidence for protolith ages of Lewisian granulites, northwest Scotland. *Geology*, 1995, 23: 1027~1030[DOI]
- 36 Bowring S A, Williams I S. Priscoan (4.00-4.03 Ga) orthogneisses from northwestern Canada. *Contrib Mineral Petrol*, 1999, 134: 3~16[DOI]
- 37 Rubatto D, Hermann J. Zircon formation during fluid circulation in eclogites (Monviso, Western Alps): Implication for Zr and Hf budget in subduction zones. *Geochim Cosmochim Acta*, 2003, 67: 2173~2187[DOI]
- 38 Ames L, Tilton G R, Zhou G Z. Timing of collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons: U-Pb zircon dating of coesite-bearing eclogites. *Geology*, 1993, 21: 339~342[DOI]
- 39 Okay A I, Sengor A M C, Satir M. Tectonics of an ultra-high-pressure metamorphic terrane, the Dabie Shan/Tongbai Shan region, China. *Tectonics*, 1993, 12: 1320~1334
- 40 Chavagnac V, Jahn B M. Coesite-bearing eclogites from the Bixiling Complex, Dabie Mountains, China: Sm-Nd ages, geochemical characteristics and tectonic implications. *Chem Geol*, 1996, 133: 29~51[DOI]
- 41 Ayers J C, Dunkle S, Gao S, et al. Constraints on timing of peak and retrograde metamorphism in Dabie Shan Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, east central China, using U-Th-Pb dating of zircon and monazite. *Chemical Geology*, 2002, 186: 315~331[DOI]
- 42 Zheng Y F, Wang Z R, Li S G, et al. Oxygen isotope equilibrium between eclogite minerals and its constraints on mineral Sm-Nd chronometer. *Geochim Cosmochim Acta*, 2002, 66: 625~634[DOI]
- 43 刘福来, 许志琴. 南苏鲁超高压岩石含柯石英锆石中的流体包裹体. *科学通报*, 2004, 49: 181~189[摘要][PDF]
- 44 Xie Z, Chen J, Zhou T, et al. U-Pb zircon ages of the rocks in the North Dabie terrain, China. *Scientia Geologica Sinica*, 1998, 7(4): 501~511
- 45 Zhang H F, Gao S, Zhong Z Q, et al. Geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of Cretaceous granitoids: constraints on tectonic framework and crustal structure of the Dabieshan ultrahigh-pressure metamorphic belt, China. *Chem Geol*, 2002, 186: 281~299

(2004-04-06 收稿, 2004-04-18 收修改稿)