

大别山高压-超高压片麻岩锆石的拉曼光谱学研究*

刘文元^{1, 2, 3} 刘景波²

LIU WenYuan^{1, 2, 3} and LIU JingBo²

1. 福建省矿产资源重点实验室,福州大学紫金矿业学院,福州 350108
2. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室,北京 100029
3. 西北大学大陆动力学国家重点实验室,西安 710069

1. Fujian Key Laboratory of Mineral Resources, Zijin Mining College of Fuzhou University, Fuzhou 350108, China

2. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

3. National Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710029

2009-01-02 收稿,2009-03-23 改回.

Liu WY and Liu JB. 2009. Laser-Raman spectroscopic studies on zircons from the HP-UHP gneisses of Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 25(9):2157–2164

Abstract The zircons from gneisses in high and ultrahigh-pressure (HP-UHP) metamorphic zones of the Dabie Mountains have been investigated by using Laser Raman microprobe analysis, cathodoluminescence (CL) images, U-Pb ages and trace elements measured by LA-ICP-MS. Most of the FWHMs (full widths at half-maximum) of 1008cm^{-1} band of zircons are less than 20cm^{-1} , suggesting that zircons are well crystallized to moderately damaged. The early inherited zircons from gneisses had undergone significant annealing and recrystallization during the HP-UHP metamorphic event. The α -doses that zircons suffered are probably accumulated from about 200Ma, indicating that HP-UHP metamorphic rocks have been exhumed to the surface of the earth at this time. The magmatic events of Cretaceous age in North Dabie may exert little effect on the HP-UHP rocks, which most of FWHMs and frequencies of zircons in Dabie Mountains fall into the natural radiation damage trend (RDT), indicating completely recrystallization of zircons during the HP-UHP metamorphic event.

Key words Zircon; Raman spectroscopy; Gneiss; Metamictization; High and ultrahigh-pressure metamorphism

摘要 对大别山高压-超高压片麻岩的锆石进行了激光拉曼探针、阴极发光(CL)、U-Pb 年龄和 U、Th 等微量元素的测定分析。研究表明:锆石拉曼光谱 1008cm^{-1} 峰的半高宽普遍小于 20cm^{-1} , 指示锆石结晶程度较好到中等程度的蜕晶化;早期继承锆石在三叠纪高压-超高压变质作用中经历了退火和重结晶作用,所受的放射性通量是从 200Ma 的早侏罗纪开始积累的,表明高压-超高压岩石在这一时间已出露地表;北大别白垩纪岩浆热事件对高压-超高压岩石的影响很小;大多数锆石数据都落在天然锆石的放射性破坏趋势(RDT)中,表明锆石在高压-超高压过程中基本发生了完全的重结晶。

关键词 锆石;拉曼光谱;片麻岩;蜕晶化;高压-超高压变质作用

中图法分类号 P575.4

沉积岩中广泛出现。锆石属于四方晶系,空间群为 $I4_1/amd$, 理想的锆石结构是由共享一边 SiO_4 四面体和 ZrO_8 三角十二面体构成,形成平行于 c 轴方向延伸的相互交替双链 (Robinson *et al.*, 1971)。锆石晶格中可以容纳 U、Th、Hf、

1 引言

锆石是岩石中常见的副矿物之一,在岩浆岩、变质岩和

* 本文得到国家自然科学基金(40672054)、创新研究群体科学基金(40721062)和西北大学大陆动力学国家重点开放实验室开放课题基金(07LCD15)的资助。

第一作者简介:刘文元,男,1982年生,硕士,岩石学专业,E-mail:15146@163.com

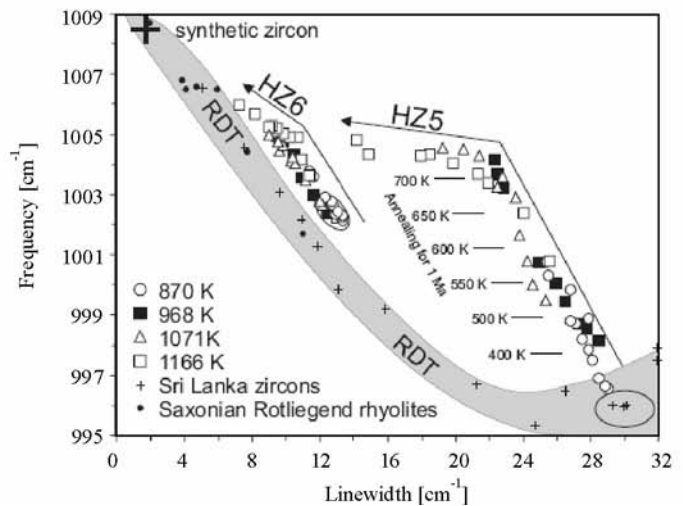
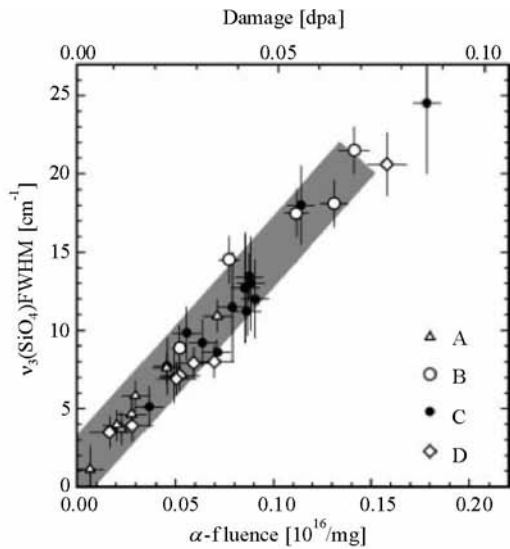


图1 实验标定的趋势线

图a为Nasdala *et al.* (2001)标定的钻石半高宽与放射性通量之间的线性关系图;图b为Geisler *et al.* (2001a,b)标定的天然钻石的放射性破坏趋势(RDT)

Fig. 1 Trend line calibrated by experiment

REE和Ti等微量元素,其中U、Th、Hf等元素可以达到百分含量的级别。因此,钻石成为最好的U-Pb定年矿物。钻石由于其物理化学稳定性可以被用作处理核废料(Pu)的载体(Ewing *et al.*, 1995, 2003)。U、Th元素发生 α 粒衰变会对钻石内部结构造成放射性破坏,使钻石发生蜕晶化进而影响其物理化学性质,特别是影响着钻石中Pb的丢失(Nasdala *et al.*, 1998, 2004; Geisler *et al.*, 2001a, b)。

天然钻石放射性破坏主要是来源于钻石中U和Th自发衰变产生的 α 粒子事件,导致钻石晶格产生大量的点缺陷(Nasdala *et al.*, 2001)。钻石的蜕晶化作用是指钻石放射性破坏的不断累积导致钻石从晶体向非晶体转化的过程。蜕晶化的结果是钻石晶体中出现大量的点缺陷和非晶态物质。蜕晶化的钻石在随后的地质过程中受到热事件影响,可能会发生退火和取向附生的重结晶作用(exitaxial recrystallization)(Zhang *et al.*, 2000a; Geisler *et al.*, 2001a, 2002a, 2003b; Nasdala *et al.*, 2001)。这个过程会导致蜕晶化钻石重新恢复到结晶状态,如果有流体的存在,钻石退火和重结晶的温度会大大降低,钻石的成分也可能发生变化,进而导致钻石U-Th-Pb系统重置(Geisler *et al.*, 2001b, 2003b, 2007)。

许多方法已经被应用于蜕晶化钻石的研究,包括X-射线衍射、透射电镜、核磁共振、红外光谱和拉曼光谱等。而显微激光拉曼探针对于制样无特殊要求,加上其较短的激发波长和极高的空间分辨率,使拉曼光谱具有其他方法不可替代的优势,能够对钻石微区的蜕晶化程度和内部结构状态进行分析。根据Dawson *et al.* (1971)理论分析预测钻石有12种拉曼谱峰: $2A_{1g} + 4B_{1g} + B_{2g} + 5E_g$ 。实际上大多数钻石晶体只

观察到九种拉曼谱峰, 1008cm^{-1} (ν_3)、 975cm^{-1} 、 439cm^{-1} 、 269cm^{-1} 内部峰和 393cm^{-1} 、 355cm^{-1} 、 225cm^{-1} 、 214cm^{-1} 、 202cm^{-1} 外部峰(Hoskin and Robgers 1996)。

Nasdala *et al.* (1995)研究发现随着放射性破坏程度的加深,钻石的各拉曼谱峰的强度逐渐变弱,半高宽逐渐加宽,峰位值明显地向低波数方向移动。特别是 SiO_4 四面体的反伸缩振动拉曼谱峰 1008cm^{-1} ($\nu_3\text{SiO}_4$)变化最为灵敏,是研究钻石蜕晶化程度最灵敏的指标。钻石拉曼光谱的峰位值和半高宽到底有何含义?由于不同的学者认识不一致,至今还存在着争论(Geisler *et al.*, 2001a, 2002b; Nasdala *et al.*, 2001, 2002)。从宏观来看,半高宽一般反映了钻石晶体的结晶完好程度,即钻石中结晶物质的含量或非结晶物质的含量,半高宽越宽蜕晶化物质含量越高;而峰位值一般反映的是结晶物质的特征,其变化主要与晶体物质的成分变化和结构缺陷有关。

许多学者也陆续使用拉曼光谱方法对钻石的放射性破坏现象进行研究(Nasdala *et al.*, 1998, 2001; Zhang *et al.*, 2000a, b; Zhang and Salje, 2001; Geisler *et al.*, 2001a, 2002a),这些研究发现钻石拉曼光谱谱峰、半高宽(FWHM)和蜕晶化程度之间存在相关关系。这一相关关系是一种潜在的定年技术(Deliens *et al.*, 1977; Pidgeon *et al.*, 1998)。Nasdala *et al.* (2001)对钻石的 $\nu_3\text{SiO}_4$ 伸缩振动峰 1008cm^{-1} 的半高宽与放射性通量(α -fluence)的进行了相关性标定(见图1a)。通过标定的标准曲线可以用来判断未知钻石是否保存了形成以来的放射性破坏,进一步可以判断钻石经历的热历史过程。如果没有发生过明显热退火事件的天然钻石应该落在这条共变曲线范围内,反之则认为钻石在地质过程中经

历了热退火事件,并且可以根据标定的标准曲线反演出最后一次热退火事件发生的时间。由于天然标准样品有限,标准曲线范围中锆石的半高宽值最高只达到 20cm^{-1} 左右,只适合与中等程度或低程度放射性破坏的锆石的研究 ($< 3.5 \times 10^{18} \alpha\text{-events/g}$)。另外放射性破坏年龄像其他定年技术一样也需要一个封闭温度,这个封闭温度不仅与温度变化速率有关,同时也与流体等是否存在有极大关系,因此目前对放射性破坏年龄确定还停留在初步研究的阶段。

Geisler *et al.* (2001a) 通过对没有经历过热退火事件的 Saxonian 流纹岩中的锆石和斯里兰卡锆石的研究标定出了天然锆石半高宽与峰位值的共变关系图,并作为天然锆石标准的放射性破坏趋势(RDT)(图 1b)。Geisler *et al.* (2001a) 还通过实验加热对斯里兰卡蜕晶化锆石进行了等温热退火实验,并得出人工加热的热退火趋势,发现等温加热的退火趋势并不是天然锆石放射性破坏趋势的简单反演路径,而经加热退火的锆石都落在放射性破坏趋势外面。他认为天然锆石的放射性破坏趋势(RDT)可以用判断锆石是否经历热退火恢复事件。

本文系统地研究了大别山高压-超高压片麻岩锆石的拉曼光谱特征。在刘景波和叶凯(2005)研究的基础上,通过锆石的拉曼光谱学研究揭示高压-超高压岩石的热演化及折返历史。

2 地质背景和采样

大别-苏鲁超高压变质带是扬子克拉通和华北克拉通三叠纪碰撞形成的造山带(Li *et al.*, 1993; Hacker *et al.*, 1998; Rowley *et al.*, 1997)。该造山带出露大规模的高压-超高压岩石,其中的超高压岩石中发现有柯石英和金刚石等超高压矿物(Wang and Liou, 1991; Xu *et al.*, 1992, 2003; Okay, 1993)。

在大别山地区,根据岩石构造组合可以将大别山地区由南到北分为三个主要的变质岩石单元:(1)北淮阳低级变质带;(2)北大别变质杂岩带;(3)南大别高压-超高压变质带。其中南大别高压-超高压变质带又可以划分为柯石英榴辉岩变质带、石英榴辉岩变质带和宿松变质杂岩带。我们的研究区域主要集中在南大别高压-超高压变质带(SDT),包括柯石英超高压变质带和石英榴辉岩变质带。根据岩石类型和矿物包裹体特征我们把南大别榴辉岩带划分为五个采样亚带,分别是 I 带、II 带、III 带、IV 带和 V 带,具体的采样点见(图 2)。本文测定的样品分别来自五个采样带中的高压-超高压片麻岩,岩石样品的矿物组成见表 1。

3 分析方法

锆石的蜕晶化研究的实验分析流程:首先对锆石做背散射图(BSE)和阴极发光(CL)图像分析,然后根据 CL 图像特

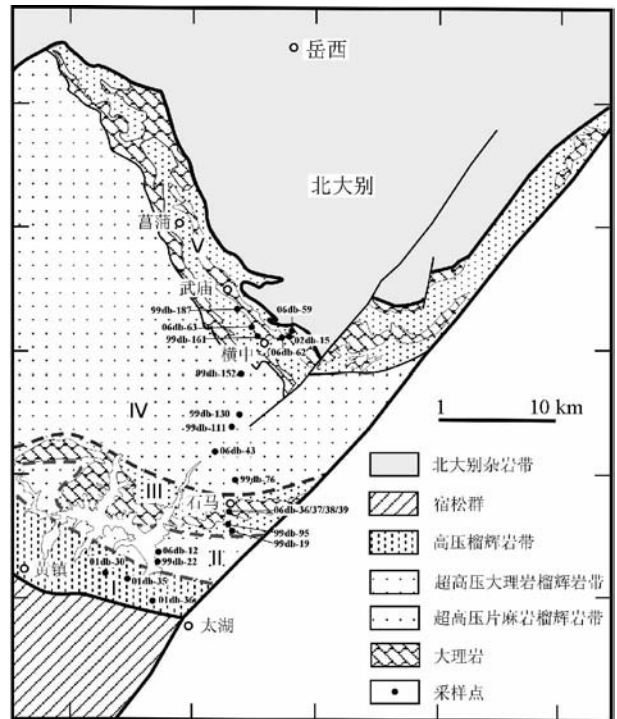


图 2 南大别地质简图和采样点(引自刘景波和叶凯, 2005)

I-黄镇冷榴辉岩带; II、IV-超高压片麻岩-榴辉岩带; III、V-超高压大理岩-榴辉岩带

Fig. 2 Geological map of southern Dabie Mountains and sampling location (after Liu and Ye, 2005)

点对不同结构区域分别进行激光拉曼光谱测试,最后进行 LA-ICP-MS 测试。

锆石的 BSE 和 CL 图像是在中科院地质与地球物理研究所的探针实验室完成的,仪器型号为 JXA-8100,锆石的放射性破坏程度是通过中科院地质与地球物理研究所的 Renishaw RM2000 显微激光拉曼光谱进行分析的。对每个样品,在 BSE 和 CL 观察的基础上,对不同发光特征的区域进行拉曼光谱的测定。对于峰位值,10 个点的重复测量的结果表明误差小于 $\pm 0.3\text{cm}^{-1}$,半高宽小于 $\pm 1\text{cm}^{-1}$ 波数。锆石的 U、Th、Pb 和微量元素是在西北大学大陆动力学实验室的 LA-ICP-MS 仪器上进行分析的,激光束斑 $30\mu\text{m}$,采用 91500 和 NIST610 分别作为微量和年龄的标样,每五个分析点测定一次 91500 标样,每测到 10 个样品点测一组标样(91500、NIST610、GJ-1 和 G4),详细的分析方法见 Liu *et al.* (2007)。锆石的每个 LA-ICP-MS 测试点对应的拉曼光谱参数值是 4~5 次拉曼测试的平均结果。

锆石拉曼光谱峰中,硅氧四面体($\nu_3\text{SiO}_4$)的伸缩振动谱峰位值(1008cm^{-1} 峰)和半高宽值对锆石结构的变化最为灵敏,是研究锆石蜕晶化最特征的拉曼峰。实验测试所得到的拉曼光谱峰并不对称,我们采用了洛伦兹+高斯函数对所测

表1 片麻岩样品的矿物组成

Table 1 Estimated modes for major minerals of the gneisses

样品号	岩性	Qtz	Pl	Kfs	Amp	Bt	Phn	Ep	Grt	Ap	Mt	Spn	Cc
01db-30	多硅白云母片麻岩	35	30	5		2	25	<1	<1				
01db-35	绿帘黑云片麻岩	20	35			30	2	5					5
01db-36	二云片麻岩	35	35	5		15	5		3				
99db-22	磁铁矿片麻岩	30	40	20			3				3	<1	
01db-37	磁铁矿片麻岩	35	40	20					<1		1	<1	
06db-12	磁铁矿片麻岩	35	20	40							4	<1	
99db-19	绿帘二云片麻岩	25	45			15	5	5					<1
99db-95	绿帘黑云片麻岩	25	45	10		10		5					<1
06db-35	黑云绿帘片麻岩	30	25	20		10		12	1			2	
06db-36	绿帘多硅白云母片麻岩	50	20	5			10	10					
06db-37	绿帘黑云角闪片麻岩	30	20		15	15		8				5	
06db-38	石榴黑云角闪片麻岩	30	20	5	15	15		5	10				
06db-39	黑云角闪石榴片麻岩	15	15		15	10			40	3			
99db-76	多硅白云母片麻岩	30	30	30			5	1			1		
99db-111	多硅白云母片麻岩	10	30				60						
99db-130	多硅白云母片麻岩	35	50			<1	10	<1			<1		
99db-152	多硅白云母片岩		10				85						
06db-43	绿帘二云片麻岩	35	20	12		10	15	6	2				
06db-45	绿帘二云片麻岩 s	30	30	20		10	5	5					
99db-161	绿帘二云片麻岩	25	35	10		12	8	3				<1	3
99db-187	绿帘黑云片麻岩	30	35	10		10		4					
06db-59	绿帘多硅白云母片麻岩	50	20	8			10	8	2				
06db-62	磁铁矿片麻岩	20	30	30		4	6		5				
06db-63	绿帘多硅白云母片麻岩	35	15				30	15					
06db-64	含钙质绿帘黑云片麻岩	25	30			20		18					6
06db-65	角闪黑云钙质片麻岩	15	20		10	15		10					25

注:Qtz:石英 Pl:斜长石 Kfs:斜长石 Amp:角闪石 Bt:黑云母 Phn:多硅白云母 Ep:绿帘石 Grt:石榴石 Ap:磷灰石 Spn:榍石 Cc:方解石 Mt:磁铁矿

得的拉曼谱峰进行拟合。原始测定的锆石拉曼光谱半高宽值与仪器的类型有关,必须经过校正。拉曼光谱半高宽 b 按 Irmer (1985) 给出的公式进行校正: $b = b_s \times \sqrt{1 - 2\left(\frac{S}{b_s}\right)^2}$, 其中 b_s 是实测的半高宽值, S 是特定拉曼系统的光谱分辨率。

锆石的放射性通量 $D\alpha$ (α 衰变事件/毫克) 是根据 Murakami *et al.*, (1991) 和 Firestone and Shirley (1996) 的公式进行计算:

$$D\alpha = 8 \cdot \frac{C_U \cdot N_A \cdot 0.9928}{M_{238} \cdot 10^6} \cdot (e^{\lambda_{238}t} - 1) + 7 \cdot \frac{C_U \cdot N_A \cdot 0.0072}{M_{235} \cdot 10^6} \cdot (e^{\lambda_{235}t} - 1) + 6 \cdot \frac{C_{Th} \cdot N_A}{M_{232} \cdot 10^6} \cdot (e^{\lambda_{232}t} - 1)$$

其中 C_U 和 C_{Th} 是实测的含量 ($\times 10^{-6}$), N_A 是阿伏伽德罗常数, M_{238} , M_{235} 和 M_{232} 是母同位素的分子量, λ_{238} , λ_{235} , λ_{232} 是对应的衰变常数, t 是锆石形成或完全重结晶的年龄。

4 分析结果与讨论

锆石的拉曼光谱测试结果表明,部分锆石拉曼光谱谱峰

的强度降低、峰值向低波数方向移动、半高宽逐渐变大,这是锆石蜕晶化程度加深的结果 (Nasdala *et al.*, 1995, 2001; Geisler *et al.*, 2001a, b; Zhang *et al.*, 2000)。锆石 1008cm^{-1} 峰的半高宽值的变化可以指示锆石的蜕晶化程度。从图 3 中可以看到大别山的片麻岩锆石的半高宽都小于 20cm^{-1} , 属于中等到弱蜕晶化的锆石。锆石的蜕晶化程度与所累积的放射性通量 $D\alpha$ 线性相关,放射性通量 $D\alpha$ 是锆石中 U、Th 的含量和锆石形成或完全重结晶时间的函数。锆石形成年龄越老, U、Th 含量越高,放射性通量越高,其蜕晶化程度越高。因此,锆石 1008cm^{-1} 峰的半高宽与放射性通量 $D\alpha$ 之间是相关的,这种相关关系可能是一种地质年代计 (Nasdala *et al.*, 2001)。

我们选取了三个重要的时间来研究锆石 1008cm^{-1} 峰的半高宽与放射性通量 $D\alpha$ 之间的关系: (1) 锆石形成年龄:包括早期岩浆锆石和变质锆石的年龄; (2) 锆石重结晶结束的年龄;大别山超高压变质岩峰期变质时间发生在 $220 \sim 245\text{Ma}$, 这个过程很可能导致锆石完全重结晶。经过超高压变质的锆石所累积的放射性通量 $D\alpha$ 应该起始于重结晶之后某个时间。李任伟等 (2004) 研究表明大别山高压-超高压变质岩在早侏罗时期已经出露地表,因此,我们人为的假设锆石放射性通量 $D\alpha$ 累积的开始时间为 200Ma ; (3) 北大别岩

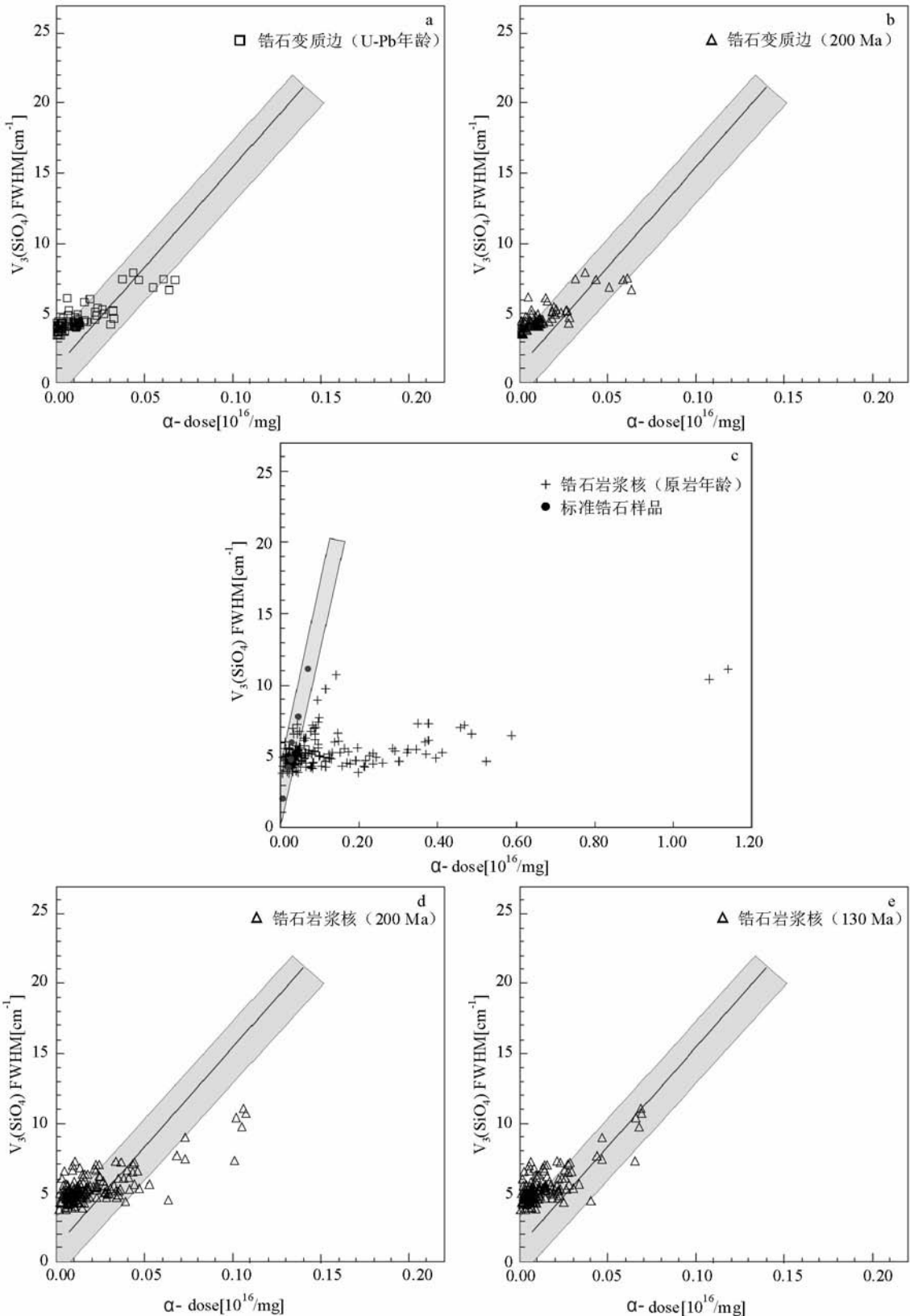


图3 大别山片麻岩锆石放射性通量与半高宽关系图

a和b为锆石变质边拉曼光谱半高宽(FWHM)和放射性通量(α -dose)的关系图;c,d,e为锆石岩浆继承核拉曼光谱半高宽(FWHM)和放射性通量(α -dose)的关系图

Fig. 3 Radiation damage dose versus full width at half-maxium (FWHM)

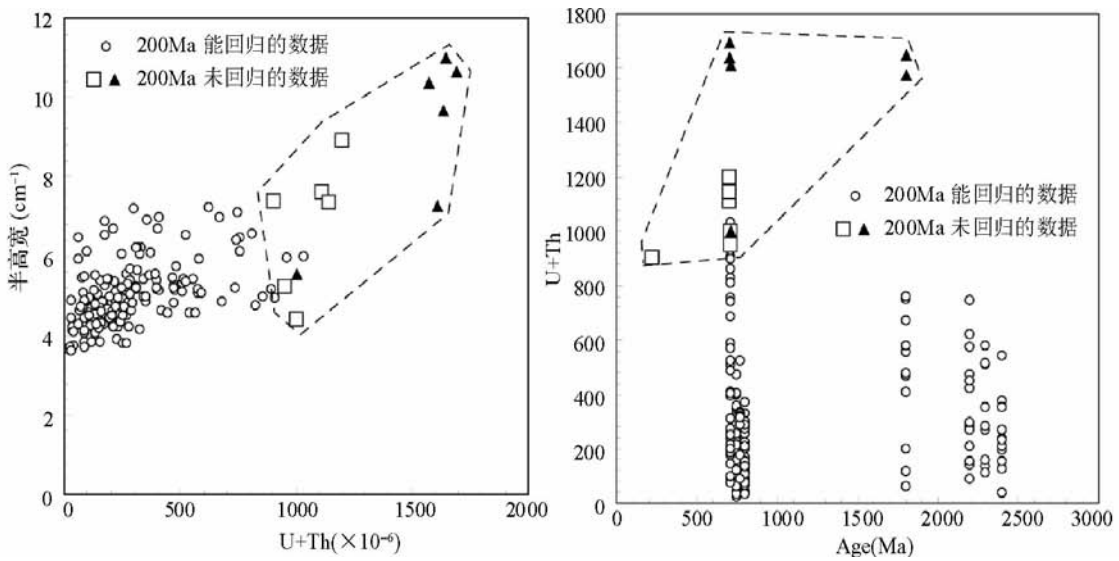


图4 锆石 U + Th 总量与半高宽、年龄之间的关系图

三角形符号为离线性区域较远的点;正方形符号为离离线性区域较远的点;圆圈为能回归的数据

Fig. 4 U + Th total contents versus FWHM and Age diagrams of zircons

浆事件的年龄(130Ma),目的是探究北大别岩浆事件对超高压带片麻岩锆石重结晶的影响。

从图3可以得出如下的结果:(1)高压、超高压过程形成的锆石,主要是变质生长(增生)锆石,U-Pb年龄为200~239Ma之间。用变质年龄计算的放射性通量 $D\alpha$ 与半高宽的关系基本上落入Nasdala *et al.* (2001)回归的线性区域(图3a),假设用200Ma来计算放射性通量时,其数据点回归的更好(图3b),这表明变质锆石记录的是200Ma以来所受的放射性通量,之后它们没有经受过明显的热事件。更进一步的地质意义在于这指示出超高压岩石在200Ma已出露地表,这与李任伟等(2004)研究结果基本一致;(2)片麻岩中早期岩浆继承锆石的形成年龄有三组:700~800Ma、800~1700Ma和2300~2500Ma。以生成时间计算的放射性通量 $D\alpha$ 与半高宽的关系大多数不落入Nasdala *et al.* (2001)回归的线性区域(图3c),表明它们记录的不是锆石形成以来所累积的放射性通量,而是经受过明显的热事件导致锆石发生退火和重结晶,这一过程最可能发生在高压、超高压变质过程中。以锆石重结晶结束的年龄200Ma来计算其放射性通量时,95%岩浆继承锆石落入了Nasdala *et al.* (2001)回归的放射性通量 $D\alpha$ 与半高宽关系的线性区域(图3d),表明它们记录的是高压、超高压事件以后所受的放射性通量,因此岩浆继承锆石在高压、超高压变质过程中发生了明显的退火和重结晶。图3d也显示5%岩浆继承锆石200Ma以来累积的放射性通量 $D\alpha$ 与半高宽的关系不落在Nasdala *et al.* (2001)回归的线性区域,这存在两种可能性:(a)北大别130Ma岩浆事件对超高压带片麻岩锆石产生了影响。以130Ma累积的放射性通量 $D\alpha$ 与半高宽的关系见图3e。 $D\alpha$ 与半高宽的关系完全落入Nasdala *et al.* (2001)回归的线性区域,因此,可

以认为北大别130Ma岩浆事件对超高压带的锆石产生了影响。然而这无法解释变质锆石的数据。变质锆石的 $D\alpha$ 与半高宽的关系基本上落入Nasdala *et al.* (2001)回归的线性区域,表明在200Ma后它们没有经受过明显的热事件,这一矛盾可能存在另一种解释:(b)部分岩浆继承锆石在超高压变质过程中发生退火和重结晶,但重结晶不完全,因此它们的 $D\alpha$ 与半高宽的关系有混合特征,即锆石累积的放射性通量 $D\alpha$ 在高压、超高压变质过程中没有完全被消除。这类锆石应该具有高放射性破坏的特征,对应的锆石具有高的U+Th含量或老的形成年龄,或者两者兼之。图4显示了这些特征,这些锆石分析点均具有高的U+Th含量,而与年龄关系不大。因此,合理的推测是:在高压、超高压变质事件之前,这些锆石累积了大量早期的放射性通量,其内部结构可能已完全破坏。在高压、超高压变质过程中,虽然它们也发生了重结晶,但不彻底,导致锆石形成以来所累积的放射性通量在高压、超高压变质过程中没有完全被消除。

锆石的拉曼 1008cm^{-1} 峰值和半高宽的关系见图5。图5反映出大多数锆石拉曼数据都落在天然锆石的放射性破坏趋势(RDT)中。放射性破坏趋势的含义是锆石形成以后没有经过任何后期热事件(Geisler *et al.*, 2001a,b)。大多数岩浆继承锆石落入这一趋势中表明它们在高压、超高压过程中基本发生了完全的重结晶,这与上述的结论是一致的。对于少数落在放射性破坏趋势上面的锆石,峰值的升高表明锆石在低温下有点缺陷的恢复,从晶体学上看,这表明了锆石晶体a轴在低温下有所恢复(Geisler *et al.*, 2002a,b, 2003a,b)。

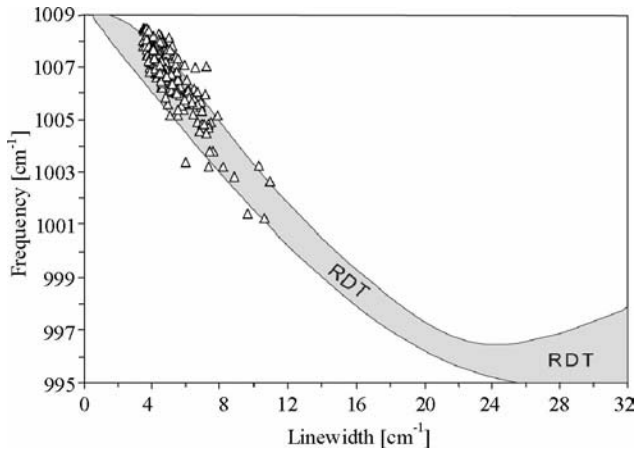


图5 锆石 1008cm^{-1} 峰位值 (Frequency) 和半高宽 (Linewidth) 的关系

RDT: 放射性破坏趋势

Fig. 5 The frequency of 1008cm^{-1} versus its full width at half ~ maximum

5 结论

通过对大别山高压~超高压片麻岩中锆石的拉曼光谱研究发现:

(1) 大别山片麻岩中的锆石大多数发生了中等到低等程度的脱晶化, 锆石 1008cm^{-1} 峰的半高宽小于 20cm^{-1} 。

(2) 锆石所受的放射性通量 $D\alpha$ 与 1008cm^{-1} 峰的半高宽在三个时间条件下进行了研究, 即生成年龄、高压、超高压变质作用后重结晶结束的年龄和北大别 130Ma 岩浆事件的年龄。以 200Ma 计算的放射性通量 $D\alpha$ 与 1008cm^{-1} 峰的半高宽的关系 95% 落入 Nasdala *et al.* (2001) 确定的线性区域, 表明超高压岩石在 200Ma 出露地表。北大别白垩纪岩浆热事件对超高压岩石的影响可能很小。

(3) 大多数锆石数据都落在天然锆石的放射性破坏趋势 (RDT) 中。表明锆石在高压、超高压过程中基本发生了完全的重结晶。少数落在放射性破坏趋势上面的锆石, 峰位值的升高表明锆石在低温下有点缺陷的恢复。

致谢 锆石的制靶工作和电子探针分析得到马玉光和毛骞博士的悉心帮助, 激光 ICP-MS 锆石微区分析及数据处理得到了第五春荣和张红的帮助, 在此一并表示感谢。本研究得到国家自然科学基金 (40672054)、创新研究群体科学基金 (40721062) 和西北大学大陆动力学国家重点实验室的开放课题基金 (07LCD15) 的资助。

References

Dawson P, Hargreave M and Wilkinson G. 1971. Vibrational spectrum of zircon (ZrSiO_4). *Journal of Physics Part C Solid State Physics*, 4:

240 - 256

- Deliens M, Delhal J and Tarte P. 1977. Metamictization and U-Pb systematics—a study by infrared absorption spectrometry of Precambrian zircons. *Earth Planet Science Letters*, 33: 331 - 334
- Ewing RC, Lutze W and Weber WJ. 1995. Zircon: A host-phase for the disposal of weapons plutonium. *Journal of Materials Research*, 10: 243 - 246
- Ewing RC, Meldrum A, Wang L, Weber WJ and Corrales LR. 2003. Radiation effects in zircon. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53: 387 - 425
- Firestone RB and Shirley VS. 1996. *Table of Isotopes 2*. New York: Wiley
- Geisler T, Pidgeon RT, van Bronswijk W and Pleysier R. 2001a. Kinetics of thermal recovery and recrystallization of partially metamict zircon: A Raman spectroscopic study. *European Journal of Mineralogy*, 13: 1163 - 1176
- Geisler T, Ulonska M, Schleicher H, Pidgeon RT and van Bronswijk W. 2001b. Leaching and differential recrystallization of metamict zircon under experimental hydrothermal conditions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141: 53 - 65
- Geisler T, Pidgeon RT, van Bronswijk W and Kurtz R. 2002a. Transport of uranium, thorium, and lead in metamict zircon under low temperature hydrothermal conditions. *Chemical Geology*, 191: 141 - 154
- Geisler T and Pidgeon RT. 2002b. Raman scattering from metamict zircon: Comments on “Metamictisation of natural zircon: Accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage”. *Contributions to mineralogy and Petrology*, 143: 750 - 755
- Geisler T, Rashwan AA, Rahn MKW, Poller U, Zwingmann H, Pidgeon RT, Schleicher H and Tomaschek F. 2003a. Low temperature hydrothermal alteration of natural metamict zircons from the Eastern Desert, Egypt. *Mineral. Mag.*, 67: 485 - 508
- Geisler T, Pidgeon RT, Kurtz R, van Bronswijk W and Schleicher H. 2003b. Experimental hydrothermal alteration of partially metamict zircon. *American Mineralogist*, 88: 1496 - 1513
- Geisler T, Schaltegger U and Tomaschek F. 2007. Re-equilibration of zircon in aqueous fluids and melts. *Element*, 3: 43 - 45
- Hacker BR, Ratschbacher L, Webb L, Ireland T, Walker D and Dong SW. 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet Science Letters*, 161: 215 - 230
- Irmer G. 1985. On the influence of the apparatus function on the determination of scattering cross sections and lifetimes from optical phonon spectra (in German). *Experimentelle Technik der Physik*, 33: 501 - 506
- Hoskin PWO and Rodgers KA. 1996. Raman spectral shift in the isomorphous series ($\text{Zr}_{1-x}\text{Hf}_x$) SiO_4 . *European Journal of Solid State Inorganic Chemistry*, 33: 1111 - 1121
- Li RW, Wan YS, Cheng ZY, Zhou JX, Xu RH, Li Z and Jiang MS. 2004. Provenance of Early Jurassic sediments of Dabie Mountains constraint by SHRIMP U-Pb dating of detrital zircons. *Science in China (Series D)*, 34(4): 320 - 328 (in Chinese)
- Li S, Xiao Y, Liu D, Chen Y, Ge N, Zhang Z, Sun S, Cong B, Zhang R, Hart SR and Wang S. 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and process. *Chemical Geology*, 109: 89 - 111
- Liu JB and Ye K. 2005. Laser-Raman spectroscopic studies on zircon of gneisses from eclogitic zone of the Dabie Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1094 - 1100 (in Chinese with English abstract)
- Liu XM, Gao S, Yuan HL and Hu ZC. 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in $20\ \mu\text{m}$ spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52: 1257 - 1264
- Murakami T, Chakoumakos BC, Ewing RC, Lumkin and Weber WJ. 1991. Alpha-decay event damage in zircon. *American Mineralogist*, 76: 1510 - 1532
- Nasdala L, Irmer G and Wolf D. 1995. The degree of metamictization in zircon: A Raman spectroscopic study. *European Journal of*

Mineralogy, 7: 471–478

- Nasdala L, Götze J, Pidgeon, RT, Kempe U and Seifert T. 1998. Constraining a SHRIMP U-Pb age: Micro-scale characterization of zircons from Saxonian Rotliegende rhyolites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132: 300–306
- Nasdala L, Wenzel M, Vavra G, Imer G, Wenzel T and Kober B. 2001. Metamictisation of natural zircon: Accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 141: 125–144
- Nasdala L, Imer G and Jonckheere R. 2002. Radiation damage ages: Practical concept or impractical vision? Reply to two comments on “Metamictisation of natural zircon: Accumulation versus thermal annealing”. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 758–765
- Nasdala L, Reiners PW, Garver JI, Kennedy, Stren RA, Balan E and Wirth R. 2004. Incomplete retention of radiation damage in zircon from Sri Lanka. *American Mineralogist*, 89: 219–231
- Okay AI. 1993. Petrology of a diamond and coesite-bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. *European Journal of Mineralogy*, 5: 659–675
- Pidgeon RT, Nasdala L and Todt W. 1998. Determination of radiation damage ages on parts of zircon grains by Raman microprobe: Implications for annealing history and U-Pb stability. *Mineralogical Magazine*, 62A: 1174–1175
- Robinson K, Gibbs GV and Ribbe PH. 1971. The structure of zircon: A comparison with garnet. *American Mineralogist*, 56: 782–90
- Rowley DB, Xue F, Tucker RD, Peng ZX, Baker J and Davis A. 1997. Ages of ultrahigh pressure metamorphic and protolith orthogenisses from the eastern Dabie Shan: U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet Science Letters*, 151: 191–203
- Wang X and Liou JG. 1991. Regional ultrahigh-pressure metamorphic terrane in central China: Evidence from coesite-bearing eclogite, marble, and metapelite. *Geology*, 19: 933–936
- Xu S, Wen S, Liu YC, Jiang LL, Ji SY, Sengör AMC and Okay AI. 1992. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 256: 8–12
- Xu S, Liu Y, Chen G and Compagnoni R. 2003. New findings of microdiamonds in eclogites from Dabie-Sulu region in central eastern China. *Chinese Science of Bulletin*, 48: 988–994
- Zhang M, Salje EKH, Farnan I, Capitani GC, Leroux H, Clark AM, Schluter J and Ewing RC. 2000a. Annealing of a-decay damage in zircon: A Raman spectroscopic study. *Journal of Physics C*, 12: 3131–3148
- Zhang M, Salje EKH, Farnan I, Graeme-Barber A, Daniel P, Ewing RC, Clark AM, Rios S and Leroux H. 2000b. Metamictization of zircon: Raman spectroscopic study. *Journal of Physics of Condensed Matter*, 12: 1915–1925
- Zhang M and Salje EKH. 2001. Infrared spectroscopic analysis of zircon: Radiation damage and the metamict state. *Journal of Physics of Condensed Matter*, 13: 3057–3071

附中文参考文献

- 李任伟, 万渝生, 陈振宇, 周剑雄, 许荣华, 李忠, 江茂生. 2004. 根据碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 测年恢复早侏罗世大别造山带源区特征. *中国科学(D辑)*, 34(4): 320–328
- 刘景波, 叶凯. 2005. 大别山榴辉岩带片麻岩的锆石拉曼光谱研究. *岩石学报*, 21(4): 1094–1100