

大别山双河超高压榴辉岩中变质锆石： 离子探针和微区结构研究*

陈道公¹ Etienne DELOULE² 夏群科¹ 吴元保¹ 程昊¹

CHEN DaoGong¹, Etienne DELOULE², XIA QunKe¹, WU YueBao¹ and CHENG Hao¹

1. 中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026

2. 岩石地球化学研究中心, 南锡 54501, 法国

1. Department of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2. CRPG-CNRS, Nancy 54501, France

2001-11-30 收稿, 2002-05-28 改回.

Chen DG, Deloule E, Xia QK, Wu YB and Cheng H. 2002. Metamorphic zircon from Shuanghe ultra-high pressure eclogite, Dabieshan: ion microprobe and internal micro-structure study. *Acta Petrologica Sinica*, 18(3):369–377

Abstract Zircon from Shuanghe UHP eclogite, Southern Dabieshan was analysed for observation and determination of cathodoluminescence image, Raman spectrometer, SIMS U-Pb and oxygen isotopes. Most of zircon grains show core-mantling structure with different U, Th and Pb concentrations, Th/U ratios, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages and $\delta^{18}\text{O}$ values. The rings show characteristics of metamorphic zircon structure and chemical compositions. Whereas the cores show transition from magmatic to metamorphic zircon. Most of 17 measured SIMS ages are discordant, and discordia line obtained from 14 positive discordant data points yield their lower and upper intercept ages of $2489 \pm 25\text{Ma}$ and $248 \pm 16\text{Ma}$, respectively. The upper intercept age represents the protolith formation and lower intercept represents the time of re-crystallization of magmatic zircon and metamorphic zircon overgrowth during prograde to peak UHP metamorphism. The genesis of metamorphic zircon of Dabieshan is quite complicated. It could be new zircon growth of either forming an independent grain or as a ring of protolith zircon, and also a product of re-crystallization of magmatic zircon under solid state and/or fluid existence. Different degree of re-crystallization is a major physico-chemical phenomenon happened for protolith zircon of Shuanghe eclogite during the whole UHP stage. It caused reduce of U, Th, Pb content and Th/U ratio, and removing of magmatic oscillatory zoning.

Key words Zircon, Metamorphic re-crystallization, Overgrowth, Ion microprobe dating, UHPM, Dabieshan chronology

摘要 对南大别双河超高压岩板榴辉岩中锆石进行了阴极发光、喇曼光谱、U-Pb 和氧同位素离子探针微区分析。发现大部分锆石具有核边结构,其核和边有明显不同的 U, Th, Pb 含量、Th/U 比、 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $\delta^{18}\text{O}$ 值。锆石边部具有变质锆石的结构和化学特征,核部具有岩浆锆石向变质锆石变化的过渡特征。17 个点 U-Pb 同位素分析中大多数为不一致年龄,由 14 个正向不一致点所构成的不一致线与一致曲线的上、下交点年龄分别为 2489 ± 25 和 $248 \pm 16\text{Ma}$,它们代表了榴辉岩原岩形成时间和前进变质至峰期变质过程中原岩岩浆锆石重结晶和变质增生作用的时间,大别山变质锆石的成因是复杂的,它既可以是变质新生锆石,呈独立的颗粒或原岩岩浆锆石的增生边,也可以是由原岩锆石在固相或流体存在下的重结晶作用形成。不同程度的重结晶作用是超高压条件下双河榴辉岩原岩岩浆锆石发生的主要的物理化学变化,它导致锆石中 U、Th、Pb 和 Th/U 比的降低和岩浆振荡环带的消退。

关键词 锆石; 变质重结晶; 内部结构; 离子探针; UHP 作用; 大别山年代学

中图法分类号 P597.3; P588.346

* 国家重点基础研究发展规划项目(1999G075503)和国家自然科学基金(40033010,49973019)联合资助。

第一作者简介: 陈道公, 男, 1940 年 12 月生, 教授, 地球化学专业, E-mail: dgchen@ustc.edu.cn

锆石作为最主要的 U/Pb 体系计时对象,在大别造山带研究中有广泛的应用(李曙光等, 1997; Ames *et al.*, 1996; Rowley *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 1997; 陈道公等, 2001)。特别是引入离子探针锆石微区定年以来,积累的数据越来越多(Hacker *et al.*, 1998; Maruyama *et al.*, 1994; 程裕淇等, 2000)。然而,一方面由于造山带变质作用是一个有一定时段的多相地质过程,人们对锆石在高压、超高压(UHP)变质环境下的性质和行为知之甚少,另一方面地质年代学工作者往往只注重 U/Pb 计时方法本身和计时的结果,忽视对锆石结构和成因方面的探讨,再加上锆石既是一个难熔矿物,对各种地质过程有相当强的抵御能力,又可能在无明显地质作用下由 U, Th 衰变引起的蜕晶化作用而发生 Pb 丢失(Mezger *et al.*, 1997)。因而当锆石所得的 U/Pb 年龄越来越多时,一方面数据可能会分散,另一方面,即使是相同年龄,亦会有完全不同的解释。如关于碧溪岭榴辉岩中约 700Ma 和约 230Ma 的年龄,一种观点认为前者代表了榴辉岩原岩的形成年龄,后者代表了超高压变质作用时代(Ames *et al.*; 陈道公等, 2001; Chavagnac *et al.* 2001)另一种观点认为前者代表了超高压变质作用时代,后者代表了后期流体改造时代(程裕淇等, 2000; 刘若新等, 1995)。同样对北大别地区一些片麻岩锆石的 660~770Ma 和 130Ma 左右的上、下交点年龄,一种观点认为上交点代表了残留锆石年龄,下交点代表了原岩侵位年龄(Hacker *et al.*, 1998),另一种观点则认为上交点代表了原岩侵位年龄,下交点代表了变质扰动年龄(陈道公等, 2000)。在某些地区,还出现 Sm/Nd 等时年龄大于 U/Pb 年龄的现象,这和一般意义上的锆石 U/Pb 封闭温度高于所有矿物 Sm/Nd 封闭温度概念相抵触。因而正确解释变质岩中锆石的 U/Pb 年龄的含义显得十分必要。为了深入探讨超高压变质作用环境下锆石的行为和可能发生的物理化学变化,本文在对大别山双河超高压岩片中榴辉岩锆石进行离子探针微区 U/Pb 定年的同时,还开展了阴极发光(CL)、背散射电子(BSE)、激光喇曼光谱和氧同位素组成的同步研究。从年龄、结构和化学组成三方面相结合探讨锆石成因,试图对锆石年龄所包含的地质信息给予更为具体的限定。

1 样品及实验方法

测定的样品采自潜山县双河村研究程度较高的 UHP 岩板(Cong *et al.*, 1995)。该岩板由榴辉岩、大理岩、硬玉石英岩、片麻岩及片岩组成。从大约 25kg 重的榴辉岩中按常规法选出二百多颗锆石。锆石大多数呈无色透明,少数浅灰色,短柱状,半自形,长宽比在 1:1.5 左右,长轴一般不超过 100~150 μm ,短轴在 60~100 μm 之间。多数晶体的棱面显得不很平整,部分抛光面有裂痕。根据尽可能的选择透明、无裂隙和不同的颜色、晶形及大小的原则,在双目显微镜下挑选出大约四十颗锆石颗粒嵌入环氧树脂样品座中,放置时尽量使其

C 轴近于水平。样品经磨平、抛光至大约切去锆石颗粒的一半,以露出其核心部分。实验前、后对部分锆石颗粒进行 CL 和 BSE 成像观察和记录。

锆石的 U/Pb 同位素和氧同位素组成是在 Cameca IMS-1270 离子探针仪器上进行,其基本原理及测试条件和 SHRIMP 离子探针基本相同(Compston *et al.*, 1992)。二次离子束为 25 \times 30 μm 大小的椭圆形束斑。用单接受器电子倍增管离子计数记录各峰的强度。U-Pb 分析时测定 9 个同位素,其质量数分别是 196, 203.5, 204, 206, 207, 208, 238, 248 和 254,测量时间分别为 2, 10, 10, 10, 45, 10, 2, 2 和 2 秒。每个样品测量时扫描 15 次。U-Pb 年龄和氧同位素标样是 91500 锆石(Wiedenbeck *et al.*, 1995),10 次标样测定的权重平均²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄为 1061 \pm 45Ma(包括常数外部误差)。测定过程中每分析 3 个样品即插入一个标样,标样需和样品装在同一个样品座中,尽量靠近样品并严格保持样品和标准处于同一水平位置上。普通铅用 Stacey 和 Kramers 二阶段铅模式校正(Stacey *et al.*, 1975)。U/Pb 年龄和氧同位素在法国科研中心的岩石学地球化学中心(CNRS-CRPG)离子探针国家实验室进行。CL 和 BSE 成像在法国 Nancy 大学材料分析中心的 Philips OXFORB mono CL 仪上观察和记录,喇曼光谱微区分析在中国地大(武汉)喇曼光谱实验室进行,采用 Renishaw MKI-1000 型仪器。

2 实验结果

2.1 CL 图像

选择晶体完整晶形较大的颗粒锆石分别逐个进行 BSE 和 CL 成像观察记录(图 1), CL 的图象比 BSE 清楚,它显示了复杂的内部结构。7 个颗粒中的 5 颗在不同程度上出现核-边结构或核-幔-边结构。核部有偏暗的 CL 图象,其中 SH3-8 和 SH3-9 号颗粒内核有明显的振荡环带结构,其余三颗则呈混杂状、模糊状(SH3-6, SH3-t, SH3-T),它们均可看作是程度不同的部分退化了的振荡环带结构。和典型的岩浆锆石振荡环带结构相比较,它们黑白相间的环带明显要粗,并出现弯曲,界限不很清晰。4 个颗粒幔部出现比较均一基本不分带的亮色 CL 图象(SH3-6, SH3-8, SH3-9, SH3-T),它们和核部区域大致呈同心椭圆状分布。这种亮色 CL 的幔部在某种意义上可以看作是很粗的黑白相间振荡环带中的白色条带。5 颗有核边结构锆石的边部均为灰色至暗灰色 CL 图像,边部区域晶面分布方向和核、幔区域有所不同,SH3-9 颗粒灰色 CL 边的顶点和核部明显不同,旋转一个角度。SH3-6 颗粒的边部主要出现在核幔区域的下部和两端,SH3-8 颗粒则出现在上部。此外,在某些颗粒的最外部有一不连续分布的极弱 CL 强度的外边,宽仅 5~15 μm 。有二颗锆石无核边结构,它们整体上表现为亮度中等的均衡混杂状 CL(SH3-10)和扇形分带 CL(SH3-7)。按照已获得之多数锆石内部结构资料分析(Rubatto *et al.* 1999; Gebauer *et al.* 1996; Vavra

et al. 1996), SH3 锆石复杂 CL 图象表明有核锆石的核部和幔部是岩浆锆石遭受后期地质作用产生变质重结晶作用的结果,岩浆锆石发生重结晶作用的直接结果就是振荡环带模糊、变粗、淡化或消失。重结晶锆石区域和岩浆锆石区域相比,通常其 CL 强度会增高,这和我们所观察到的现象完全一致。那些有核锆石的边部和无核锆石,从 CL 图像结构来看,应该是在变质条件下形成的增生锆石,变质增生锆石的 CL 图象常常呈不规则、无结构状,或局部呈云雾状、冷杉状和扇形分带(Rubatto *et al.* 1999; Vavra *et al.* 1999; Vavra *et al.* 1996)。

有核锆石无论是核边之间还是幔边之间,其界线都不是很尖锐平直,说明它们之间存在有溶蚀现象。SH3-7 颗粒的扇形分带和 SH3-10 颗粒的多晶面混杂状结构都是变质锆石最显著的特点。根据 CL 显微结构特征,我们可以把 SH3 锆石分成二类:一类是岩浆锆石,它们在 UHP 条件下遭受了不同程度的变质重结晶作用,它们以有核-边结构锆石的核部和幔部为代表;另一类是变质增生锆石,它们以有核-边结构锆石的边部和无核-边结构锆石为代表,它们代表了 UHP 条件下的锆石增生作用。锆石最外部极弱 CL 强度的窄边,可能和最晚期的增生或蚀变作用有关。如何明确区分变质增生锆石和完全重结晶的原岩岩浆锆石,单凭 CL 图像很难确切判断,需要非常仔细的微区结构、微量元素分布、晶格内亚颗粒的晶体取向等资料(Hoskin *et al.*, 2000; Hermann *et al.*, 2001)。CL 图象强度变化的原因目前还不十分清楚,它可能主要和锆石中 U, Th, Hf 等微量元素含量有关(Poller *et al.*, 2000),这些元素可以促进或抑制其强度。一般来说,为了结构清晰,CL 图象的强度和对比度是可以在实验中调节的。因而不同锆石颗粒之间的 U, Th 等微量元素在不同的图像中是不能直接对比的。本文研究的锆石中,大多数锆石核部,相对于其边部,均具有较高的 U 含量。

2.2 喇曼光谱

锆石的喇曼光谱是研究锆石蜕晶化程度的有效工具(Nasdala *et al.*, 1995)。锆石在其形成后的地质历史时期内,由于所含放射性元素 U, Th 的衰变,造成锆石晶体结构的辐射损伤,使锆石逐渐失去其有序结晶态,产生蜕晶化作用。蜕晶化锆石容易产生放射成因铅丢失,明显蜕晶化锆石不宜用作年龄测定。Nasdala 等(1996, 1998)对锆石的蜕晶化和喇曼谱峰间的关系进行了详细研究。他发现,随着蜕晶化程度增加,锆石 Si-O 四面体 Eg(v4)和 B1g(v3)方式的内部振动特征峰(分别在 350~450cm⁻¹和 1000cm⁻¹左右)向低波数位移。其强度减弱,峰半高宽增加。其中四面体 v3 反伸缩振动谱峰的半高宽是最特征的。结晶完好的锆石,其半高宽在 4~10cm⁻¹之间,蜕晶化和严重蜕晶化的锆石半高宽增至 15~30cm⁻¹,甚至高达 40 cm⁻¹以上。表 1 列出的 5 个颗粒 11 点

的测定结果中(共 17 点测定,某些点为平均值),所有测点的半高宽都不超过 7cm⁻¹。最大值出现在 SH3-9 颗粒的核部。三颗有核锆石核部的半高宽稍大于边部,SH3-6 颗粒则相反,这些变化均属于结晶完好锆石内的细微差别。因此,喇曼谱表明,这些锆石不论核部和边部,结晶程度都是很好的。

2.3 U/Pb 年龄

共对 7 个锆石颗粒进行了 17 次测定,每颗进行 2~3 点分析。由于二次离子束孔径为 25×30μm,而且样品座只能作水平运动,不能旋转。实验中离子束长轴方向不能和晶体长轴或结构轴方向保持一致。由于晶体不是足够的大,U/Pb 同位素分析时,不能保证所有分析点均落在同一结构区域。由表 1 可知,有 2 个测点的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 仅在 100 和 120,另一个 1360,其余的在 1380~19000 之间。在所测定的 17 组年龄中,只有 SH3-10 颗粒的二组年龄为一致年龄,其余均为程度不同的不一致年龄。在不一致年龄中有 12 组年龄符合 $t^{207/206} > t^{207/235} > t^{206/238}$ 规则,落在一致线下方,有 3 组具有反向不一致年龄。这三个反向不一致年龄就是 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 最低的三个测定点,过低的 ²⁰⁶Pb/²⁰⁴Pb 值必然带来较大的测定误差。考虑到反方向不一致年龄测定误差大,取所有正向不一致年龄和一致年龄的 14 个点进行线性拟合,采用 Ludwig 最新的 Excel 内设 Isoplot (2.49a 版)软件,得到结果如下(图 2):上交点年龄 2489±25Ma,下交点年龄 249±16Ma,MSWD=0.90。若采用 Monte Carlo 法迭算,得到上交点年龄为 2489±26/25Ma,下交点年龄 249±15/16Ma。如果去掉位于一致线上的两点,即不严格限制其下交点年龄值,则剩余的 12 个点拟合所得的上、下交点年龄分别为 2487±27Ma 和 247±18Ma,MSWD 值 1.05。Monte Carlo 计算所得上、下交点年龄为 2487±28Ma 和 246±18Ma,两者无明显变化。

2.4 氧同位素

三颗锆石 7 个氧同位素微区分析资料显示:颗粒核部的 δ¹⁸O 值变化于 0.0±0.3~0.9±0.3(SMOW 标准),边部的 δ¹⁸O 值变化于 -2.9±0.3~-3.6±0.3(表 1)。同一颗粒核部的 δ¹⁸O 值总是比边部要高,两者的 δ¹⁸O 差值在 2.9~4.1 之间。这些数据表明,SH3 榴辉岩中锆石的核部和边部的氧同位素组成存在一定的差异,不同颗粒间的氧同位素组成大致相同。正如 CL 结构所显示的那样,如果把锆石边部看作是变质增生锆石或重结晶作用比较彻底的岩浆锆石,核部看作是不同程度重结晶作用的岩浆锆石,则变质锆石的氧同位素继承和改造了原岩岩浆锆石的氧同位素组成。二者并未达到氧同位素平衡。

表 1 双河榴辉岩 SH3 锆石 U—Pb 年龄、氧同位素离子探针及喇曼光谱测定结果

Table 1 U/Pb SIMS age, oxygen isotope and Raman data for SH3 eclogite zircon

实验点 ⁺		Pb* ($\mu\text{g/g}$)	U ($\mu\text{g/g}$)	Th ($\mu\text{g/g}$)	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	\pm	Th/U	年龄(Ma) $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	\pm	年龄(Ma) $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	\pm	年龄(Ma) $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	\pm	$\delta^{18}\text{O}$ (SMOW)	半高宽 (cm^{-1})
SH3-T-a	m-r	15	238	29	0.1086	18896	0.074	0.004	1.105	0.055	0.12	460	16	756	10	1772	18	-2.9 ± 0.2	5.5
SH3-T-b	c	61	474	203	0.1419	9253	0.150	0.004	2.931	0.069	0.43	902	3	1390	6	2246	7	0.0 ± 0.3	6.1
SH3-t-1	r	5	158	6	0.0944	103	0.039	0.000	0.159	0.018	0.04	248	15	149	18	0	0	-3.2 ± 0.3	4.9
SH3-t-2	c	43	141	72	0.1609	21837	0.353	0.006	7.819	0.129	0.51	1947	23	2210	10	2465	5	0.9 ± 0.3	5.6
SH3-8-1	c	31	278	94	0.1434	1815	0.130	0.004	2.513	0.078	0.34	787	17	1276	10	2232	9		
SH3-8-2	r-m	6	152	13	0.0815	3786	0.047	0.004	0.517	0.042	0.09	295	17	423	13	1196	38		
SH3-8-3	m	20	341	105	0.1054	6877	0.068	0.004	0.988	0.060	0.31	427	19	698	13	1708	15		
SH3-6-1	m	37	308	67	0.1407	2234	0.141	0.004	2.687	0.075	0.22	850	16	1325	10	2205	11	-3.6 ± 0.2	5.4
SH3-6-2	c	48	327	112	0.1463	7889	0.171	0.008	3.431	0.163	0.34	1016	39	1512	28	2297	10	0.7 ± 0.2	5.3
SH3-6-3	r-m	11	281	9	0.0566	2934	0.044	0.003	0.327	0.025	0.03	275	14	287	5	389	18	-3.4 ± 0.2	5.6
SH3-10-1	r	13	441	13	0.0594	120	0.033	0.000	0.008	0.016	0.03	212	15	8	18	0	0		5.7
SH3-10-2	c	11	304	8	0.0514	3797	0.040	0.003	0.277	0.023	0.03	255	14	248	7	184	33		6.0
SH3-10-3	r-c	12	356	8	0.0522	8050	0.040	0.003	0.285	0.024	0.02	254	14	255	5	263	13		
SH3-7-1	r-c	8	184	4	0.0760	1379	0.048	0.003	0.471	0.036	0.02	301	14	392	13	970	57		
SH3-7-2	r-c	5	119	3	0.0492	1364	0.045	0.003	0.276	0.020	0.02	284	14	248	7	0	0		
SH3-9-1	c	95	560	246	0.1447	21839	0.196	0.005	3.916	0.095	0.44	1156	20	1617	10	2283	5		7.0
SH3-9-2	c-r	40	467	62	0.1293	4576	0.099	0.004	1.754	0.067	0.13	610	16	1029	10	2073	13		5.3

⁺ c 代表核部, m 代表幔部, r 代表边部; * 放射成因 Pb; 所有的误差均指 1σ

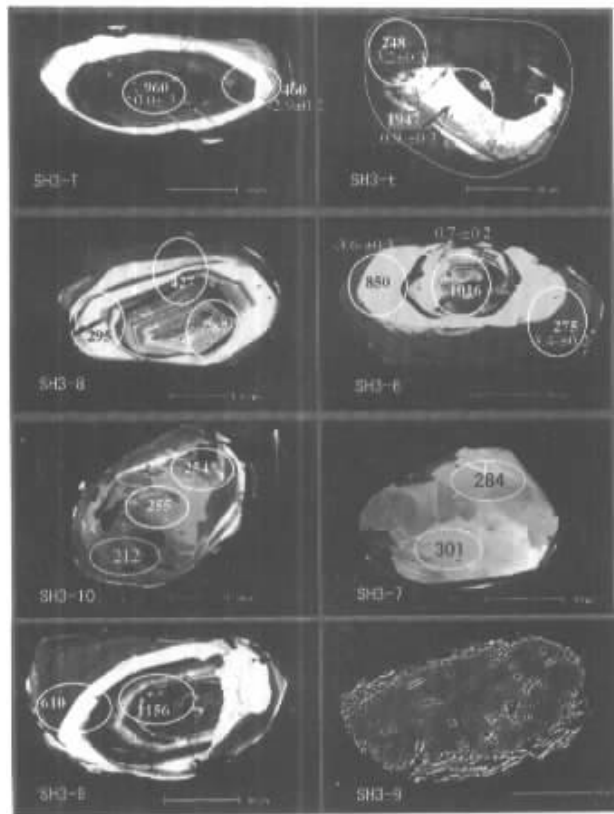


图 1 锆石的 CL 图像

图中右下角为 SH3-9 的 BSE 图,它是所有 BSE 图中最清楚的一个。椭圆内的数字为对应的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和氧同位素值

Fig. 1 Zircon CL images

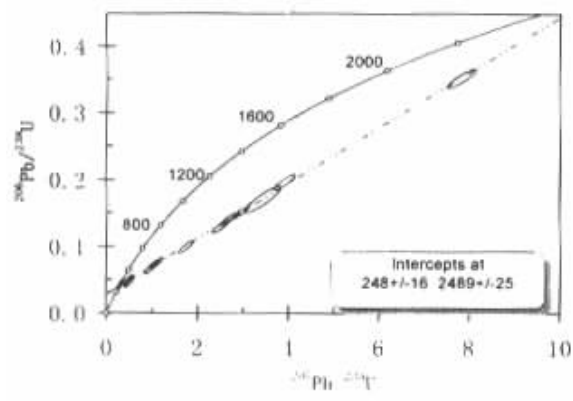


图 2 SH3 锆石的一致曲线图解

Fig. 2 Concordia plot for SH3 zircon

3 讨论

3.1 锆石中的 Th 和 U

研究表明,锆石的化学组成,U,Th 含量和 Th/U 比可以指示其形成环境。根据元素分配理论和花岗岩中 U,Th 的平均含量,Rowley 等估算出从花岗质岩浆中晶出的锆石的 Th/U 比应接近于 1 左右 (Rowley *et al.*, 1997),这一推论和绝大多数南大别的片麻岩围岩、北大别糜棱岩化花岗岩和花岗质片麻岩中锆石的实测 Th/U 比 (0.4~1.8) 大致相符 (Rowley *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998)。欧洲阿尔卑斯造山带研究也表明大量岩浆成因锆石的 Th/U 比也落在这一变化范围内 (Gebauer, 1996; Vavra *et al.*, 1996; Gebauer *et al.*, 1997; Nasdala *et al.*, 1998; Rubatto *et al.*, 1999)。上述比值被认为是从典型的各类熔体中晶出锆石的大致 Th/U 比值范围。在变质作用中,由于变质锆石的成因较为复杂,特别是 Th^{4+} 和 Pb^{2+} 的离子半径比 U^{4+} 的离子半径大,更不容易替换离子半径小的 Zr^{4+} ,在变质作用过程中更难被锆石所接受,因而变质增生、变质重结晶和变质淋滤作用可以导致原有锆石中 Th 和 Pb 比 U 的优先丢失以及 Th/U 比的降低。由于变质环境的差异,变质锆石通常具有低而分散的 Th/U 比,经常在 0.1 左右或更低 (Gebauer, 1996; Vavra *et al.*, 1996; Gebauer *et al.*, 1997; Rubatto *et al.*, 1999)。

分析本文所得到的榴辉岩锆石,其 U,Th,Pb 含量总的来讲是低的。对每一颗粒而言,从锆石的核部到边部,其 U,Th,Pb 含量依次降低 (表 1)。锆石核部的 U,Th,Pb 含量明显的高于其它区域。核部的 Th 含量最高达到边缘含量的 10 倍,核部的 Pb 含量最高达边缘含量的 4 倍,而核部的 U 含量最高仅为边部含量的 1 倍左右。很明显,从丢失角度来看,锆石边部 Th,Pb 的丢失明显高于 U 的丢失。有核锆石的核部的 Th/U 比为 0.34~0.51,幔部的 Th/U 比为 0.13~0.31,无核颗粒和有核颗粒的边缘部分的 Th/U 比在 0.02~0.09 之间。在所有七个颗粒的 17 次分析中,随测试点离下交点距离的增加,其 Th/U 比大致依次增加。也就是说,锆石中的 Th/U 比和 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄有明显的正相关关系 (图 3)。可以认为,那些 Th/U 比低于 0.1 的区域具有变质锆石的组成特征,而那些比值在 0.13~0.51 的区域则不同程度地继承了岩浆锆石的组成特征,具有过渡的性质。对于无核颗粒的锆石,由于其有很低的 Th/U 比和很低的 Th,Pb 含量,它整个地具有变质锆石的特征。在一致曲线图解上,所有低 Th/U,低 U,Th,Pb 含量的变质锆石区域,其年龄都接近下交点,而高 Th/U,高 U,Th,Pb 含量的过渡锆石区域,其年龄都远离下交点,具有较大的表面年龄和较大的不一致年龄。双河榴辉岩锆石的这种内核高 Th/U,高 Th,U,外边低 Th/U,低 Th,U 的化学分带现象同样在阿尔卑斯的若干 UHP 和 HP 地体锆石中存在 (Rubatto *et al.*, 1998, 1999;

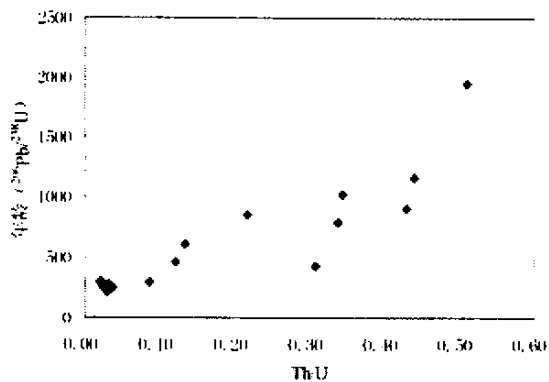


图3 锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 Th/U 关系

Fig. 3 Relation between $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ and Th/U for SH3 zircon

Gebauer, 1996; Gebauer *et al.*, 1997; Vavra *et al.*, 1996, 1999), 它们同时出现在麻粒岩相和榴辉岩相岩石中 (Rubatto *et al.*, 1999; Vavra *et al.*, 1996)。在那些岩石中, 锆石的边部同样被看作是变质锆石组分。它既可以是变质流体中锆石的增生作用, 亦可是原先存在的岩浆锆石在亚固相状态下的重结晶作用, 这一认识和本文 CL 图像所得出的关于岩浆锆石和变质锆石的推论是完全一致的。

3.2 锆石不一致年龄分布原因

一般说来, 造成锆石 U-Pb 年龄不一致线分布并给出上、下交点年龄的解释是多种的, 包括幕式扩散丢失、混合、低温退火和区域抬升等 (Gebauer *et al.*, 1979)。究竟是什么原因造成双河榴辉岩中锆石年龄的这一分布呢? 我们倾向于 Pb 的丢失模型。该模型最初是由 Wetherill (1956) 提出的, 它是指地质热事件中锆石中 Pb 的幕式扩散丢失。本文所指的 Pb 丢失, 是指在高压超高压环境下, 变质岩原岩中存在的岩浆锆石的重结晶作用, 它导致不同程度的 Pb 丢失。这种 Pb 丢失是指在变质重结晶作用过程中 Pb 被排除在锆石晶格之外。如前所述, 那些数据点很靠近下交点或者就落在下交点的锆石区域, 它们要么是变质增生锆石, 要么是重结晶作用比较完全的岩浆锆石, 后者的 U/Pb 同位素体系几乎完全重置。这种锆石区域的化学组成完全显示为新生变质锆石的特点, 它们有最低的 Th/U 比 (0.02~0.03), 变质重结晶和变质增生几乎是同时发生的, 因而可以用幕式丢失模型来处理。那些远离下交点的锆石区域则代表了不完全的部分重结晶, 其 U/Pb 体系仅发生部分重置, 它们的 Th/U 化学组成介于岩浆锆石和变质锆石之间。从 CL 图像中可以观察到, 这种区域出现在锆石的核和幔部, 它们不同程度地保留了原岩岩浆锆石振荡环带的特征, 仅使这种环带变得粗糙、模糊和淡化。应该指出, 由于二次离子束直径往往大于同一结构区域的宽度, 所以实际上测得的 U/Pb 同位素年龄是增生锆

石和不同程度重结晶的岩浆锆石区域之间的混合年龄。

另外, SH3 锆石 U/Pb 年龄在不一致线上的分布是否可能由原岩岩浆锆石和新生变质锆石的简单二元混合作用所致? 这种可能性不大。其原因除上述锆石的核部不具有清晰、典型的岩浆锆石 CL 图象外, 锆石微区喇曼谱峰亦可加以说明。如果锆石颗粒是由两种不同成因, 不同年龄的锆石组分简单的二元混合, 那么不同年龄、不同 U, Th 含量的锆石由于其遭受辐射损伤时间和强度的明显不同, 核部的高 U、Th 和大年龄必然产生大得多的辐射损伤, 而不可能产生和边部相同的结晶完好的喇曼谱峰, 因此合理的解释只能是具有不同程度蜕晶化的原岩岩浆锆石在 UHP 过程中发生了不同程度的变质重结晶作用, 它们的喇曼峰半高宽值是在 UHP 作用中被重新改造过的 (Nasdala *et al.*, 2001)。因此, 根据锆石微区 CL 图象、喇曼谱峰、U-Pb 同位素年龄及其在不一致线上的分布, 我们认为锆石不一致线的上交点年龄代表了榴辉岩的原岩形成年龄, 下交点年龄代表了超高压变质过程中锆石发生重结晶作用和增生作用的时间, 锆石 U-Pb 同位素体系的这种线性排列主要是由原岩锆石不同程度的变质重结晶作用引起。

3.3 锆石年龄意义

目前还没有双河地区榴辉岩锆石 U/Pb 年龄的报道。在已有的南大别 UHP 地体榴辉岩锆石 U/Pb 年龄工作中, 以程裕淇等 (2000) 对碧溪岭深色榴辉岩的工作最为详细。他们对 26 颗锆石进行了 35 点的 SHRIMP 原位分析, 得到三组年龄, 古老一组在 569~757Ma, 年青一组为 214~231Ma。他们把前一组看作是 UHP 变质事件, 后一组看作是后期流体改造的时间。出现在锆石核部、平均年龄为 676Ma 的第一组锆石区域的 U 含量变化于 286~678 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比变化于 0.64~1.89; 而出现在锆石边部、平均年龄为 223Ma 的第三组锆石区域, 其 U 含量变化于 18~45 $\mu\text{g/g}$, Th/U 比变化于 0.10~0.06。根据上面讨论过的锆石 U 含量和 Th/U 比值关系来判别, 我们有理由相信第一组年龄不应该是变质年龄, 而应该表示原岩的形成时间, 第三组 223Ma 年龄应该代表超高压变质作用时间。此外, Ames 等 (1996) 测定了南大别四个榴辉岩的 U/Pb TIMS 年龄, 其中三个榴辉岩下交点年龄在 214~218Ma, 上交点给出分散的结果。Rowley 等 (1997) 测定了茅屋榴辉岩 6 点的 U/Pb TIMS 年龄, 得到下交点年龄 225Ma 和上交点年龄 447Ma+82/79Ma。

双河地区 UHP 岩板中锆石的 U/Pb 年龄, 只有李曙光等 (1997) 发表的片麻岩资料。他们用 TIMS 法测定了二个片麻岩锆石 U/Pb 年龄, 其中一个样品四组分测定中仅有一种组分得到 238Ma 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{Pb}$ 年龄, 其余三组分得到很分散的表面年龄, 另一样品四组分拟合得到上、下交点年龄分别为 1222Ma 和 219Ma, 但误差非常大, 其中三个组分测定点的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值仅 50 左右。尽管其年龄值和其他作者相同, 但这些年龄数据应该说是不可靠的。Hacker 等 (1998) 用

SHRIMP 离子探针对于南大别的二个片麻岩(地点不祥)锆石进行了测定,一个正片麻岩锆石的边部 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 208~243Ma(平均为 231Ma),核部年龄变化于 380~850Ma。另一副片麻岩锆石的变质边部年龄在 210~250Ma,残留核年龄 504Ma。由此可见,本文 SH3 榴辉岩锆石的下交点年龄落在 Hacker 等(1998)片麻岩锆石边部年龄变化范围的上部,比程裕淇等(2000),Ames 等(1996),Rowley 等(1998)榴辉岩锆石年龄和李曙光等(1997)片麻岩锆石年龄要老 10~20Ma。同时,主要根据 Sm/Nd 矿物等时线,Li 等(2000)认为双河地区 UHP 岩板的峰期变质作用发生在 $226\pm 3\text{Ma}$ 。如果接受这一观点,那么 SH3 锆石的下交点年龄比峰期变质年龄要老约 20Ma,而所获得之接近 25 亿年的上交点年龄则前人未曾报道过。

如何看待 SH3 锆石的年龄结果,它们是否具有地质意义?

大别山超高压地体中的榴辉岩,作为碰撞造山带的一部分,它经历了长时期的进变质、峰期变质和退变质的复杂演化。Cong 等(1995)根据矿物组成和结构关系,对双河 UHP 岩石划分出 5 个阶段的演化:即前榴辉岩阶段,峰期 UHP 柯石英榴辉岩阶段,石英榴辉岩阶段,后成合晶阶段和后成合晶阶段。每一阶段对应一定的温度和压力。其中峰期 UHP 柯石英榴辉岩阶段温压范围是 $700\pm 50\text{C}$ 和 $>28\text{kbar}$,石英榴辉岩阶段又可分为两个亚阶段,它们的温压范围分别是 $700\sim 950\text{C}$ 和 $18\sim 20\text{kbar}$ 以及 $630\sim 730\text{C}$ 和 $13\sim 16\text{kbar}$ 。峰期最高温度和峰期最高压力是不同步的。温度要滞后压力。因此峰期变质作用会跨越一定的时间段。由于矿物的 Sm/Nd, Rb/Sr 和 K/Ar 同位素体系的封闭温度多数情况下低于该超高压变质作用的峰期温度,因而,一方面上述同位素体系不能给出峰期变质前矿物岩石所可能经历的地质过程时间信息,另一方面,由这些同位素计时体系所给出的年龄,严格说来不能代表峰期变质温压条件下的时间,它记录的是峰期变质后的冷却年龄和退变质作用年龄。即使对于具有最高封闭温度的变质石榴石,其 Sm/Nd 的封闭温度变化于 $400\sim 800\text{C}$ (Ganguly *et al.*, 1998),也至多接近峰期变质温度。锆石则不同,结晶完好锆石的 U/Pb 体系封闭温度高达 950C 以上(Lee *et al.*, 1997),是唯一能够保留或部分保留峰期变质前地质信息的矿物。很多情况下,它给出的不是冷却年龄,而是形成年龄。研究表明,在变质岩石升温过程中当温度达到 $600\sim 650\text{C}$ 时,其中的锆石便可发生重结晶作用(Mezger *et al.*, 1997),低于这一温度,锆石一般不发生重结晶作用。因此 SH3 锆石所记录的 246~249Ma 年龄很可能代表了当温度达到 $600\sim 650\text{C}$ 以上时进变质至峰期变质过程中的年龄。Hacker 等(1998)曾指出,由 Ames(1996)和 Rowley 等(1997)所给出的榴辉岩的 219Ma 的变质年龄可能反映的是发生在地壳中由退变质流体所驱动的晚期锆石生长作用,而峰期变质时代大约在 240Ma。事实上,已发表的大别山

地区某些岩石的 Sm/Nd 年龄可以高达 245Ma(Okay *et al.*, 1993; Li *et al.*, 1993), $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可大于 219Ma(Eide *et al.*, 1994; Hacker *et al.*, 1995),这说明大别山峰期变质年龄有可能在 240~245Ma 或更老。Hacker 等(1998)还认为,大别山地区同时存在一个早期变质锆石结晶作用。我们认为 SH3 榴辉岩锆石的年龄就是这种变质锆石结晶作用时间的反映。SH3 锆石微区 U/Pb 年龄记录表明,在大约 246~249Ma 时,大别山双河超高压岩片的俯冲作用已达到了 $600\sim 650\text{C}$ 以上的高温。这时,一方面发生了原岩岩浆锆石的变质重结晶作用,它导致岩浆锆石中的振荡环带退化消失,锆石中 Th, Pb 和 U 等元素丢失,使晶体结构更趋稳定(Pidgeon *et al.*, 1992, 1998)。同时还有变质增生锆石形成,这种变质增生锆石既可以在原岩浆锆石四周结晶长大,也可以成单独的颗粒。因此,以往所获得之多数 220Ma 左右的 TIMS 法锆石 U-Pb 年龄,正如 Hacker 等所认为的那样可能是退变质流体所驱动的峰期变质后的改造事件,或石英榴辉岩阶段变质重结晶年龄,峰期变质年龄可能在 240Ma 左右。Fraser 等(1997)研究了麻粒岩相中各主要造岩矿物的锆的赋存状况,他发现石榴石是锆的主要寄主矿物,其含量高达 $20\sim 50\mu\text{g/g}$,比麻粒岩其它造岩矿物(黑云母、辉石、斜长石)高一个数量级。因此,从变质反应角度来看,岩石中消耗石榴石的反应将有可能伴随着锆的重新分配和锆石的结晶作用。目前还没有榴辉岩相岩石各矿物中锆的分配情况资料。借用麻粒岩相岩石,在双河退变质榴辉岩后成合晶阶段,出现石榴石+绿辉石+兰晶石+水生成斜长石和角闪石的反应(Cong *et al.*, 1995),这一过程有可能形成新的变质增生锆石。因此,220Ma 的锆石年龄很可能代表了后成合晶阶段流体驱动下的锆石增生作用。这在一定程度上也可解释为什么会出现锆石 U-Pb 年龄低于 Sm-Nd 等时年龄及 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄可大于 219Ma 的原因。在 SH3 锆石的 CL 图像中最外边的暗色 $5\sim 15\mu\text{m}$ 窄的条带可能就是这种晚期增生作用的反映。目前探针分析的分辨还不能独立检测到这一年龄值。Hacker 等(1998)和我们关于双河超高压岩片变质年龄的说法尚需要确切的岩石矿物学证据。最近 Katayama 等(2001)和 Hermann 等(2001)关于哈萨克斯坦超高压岩石中锆石中矿物包裹体研究为解决这一问题提供了启示。

在研究中国东南部地区各类岩石的 Sm/Nd 同位素组成时,Chen and Jahn (1998)发现,大多数大别地区变质岩的 T_{DM} 年龄在 $1.4\sim 1.9\text{Ga}$,只有双河地区的花岗片麻岩、硬玉石英岩的 T_{DM} 高达 $2.57\sim 3.28\text{Ga}$ 。这为我们有可能在双河地区发现 2500Ma 左右的原岩年龄找到了合理的依据,它表明大别地区除了有晚前寒武纪的晋宁期岩浆活动产物外,还存在早元古至晚太古代的地壳物质。这是大别山地区榴辉岩中首次用 U-Pb 不一致线所获得之精确的晚太古年龄,尽管刘若新等(1995)也获得过类似年龄,但误差很大。

4 结论

(1) 对双河榴辉岩中锆石的显微结构、喇曼谱峰、U-Pb 同位素和氧同位素的综合研究表明, 锆石的组成和结构是很不均一的, 这种不均一性主要是由岩浆锆石在超高压变质作用中遭受不同程度的重结晶作用和变质增生作用所致。

(2) 微区原位 SH3 锆石 U-Pb 离子探针分析表明, 其 U-Pb 同位素体系能构成一条不一致线, 上交点年龄为 2489Ma, 可能代表了榴辉岩原岩的形成年龄, 下交点年龄为 248Ma, 代表了大别山超高压变质作用中温度达到 600~650°C 时进变质阶段至峰期阶段的时间, 它可以看作是峰期变质时代的上限, 详细的锆石 U/Pb 年代学研究有可能对 UHP 地质演化的许多过程做出更具体的限定。

(3) 变质锆石的成因是复杂的, 对锆石进行同步的结构、化学组成和年龄的研究, 对认识锆石成因具有重要意义。同一地区、同一岩石或同一颗粒锆石中的 Th/U 比和 Th, U, Pb 的含量和矿物包裹体组成对判断锆石成因有良好的指示意义。

References

- Ames L, Zhou G Z, Xiong B C. 1996. Geochronology and isotopic character of ultrahigh-pressure metamorphism with implications for collision of the Sino-Korean and Yangtze cratons, central China. *Tectonics*, 15(2): 472-489
- Chavagnac V, bor-ming Jahn, I M Villa *et al.* 2001. Multi-chronometric evidence for an "in-situ" origin of the Ultra-High Pressure Metamorphic terrane of Dabieshan, China. *J. of Geology*, (in press)
- Chen Daogong, E Deloule, Xia Qunke *et al.* 2000. Preliminary U-Pb ion probe age determination of zircons from gneisses, Northern Dabie Terrain. *Acta Petrologica Sinica*, 16(2): 199-202 (in Chinese with English abstract)
- Chen Daogong, Li Binxian, Xia Qunke *et al.* 2001. An evaluation of zircon U-Pb dating for metamorphic rocks and comments on zircon ages of Dabie orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1): 129-138 (in Chinese with English abstract)
- Chen J and B Jahn. 1998. Crustal evolution of southeastern China: Nd and Sr isotopic evidence. *Tectonophysics*, 284:101-133
- Cheng Yuqi, Liu Dunyi, I S Williams *et al.* 2000. SHRIMP U-Pb dating of zircons of a dark-colored eclogite and a garnet-bearing gneissic-granitic rock from Bixiling, Eastern Dabie Area. *Acta Geologica Sinica*, 74(3): 193-205 (in Chinese with English abstract)
- Compston W, Willms L S, Kirschvink J L *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *J Geol. Soc. London.*, 149: 171-184
- Cong, Zhai M, Carswell D A *et al.* 1995. Petrogenesis of ultrahigh pressure rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabie, Central China. *Eur. J. Mineral.*, 7:119-138
- Eide L, M O McWilliams and J G Liou. 1994. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronologic constraints on the exhumation of HP-UHP metamorphic rocks in east-central China. *Geology*, 22:601-604
- Fraser G, D Ellis, S. Eggins. 1997. Zirconium abundance in granulite-facies minerals with implications for zircon geochronology in high-grade rocks. *Geology*, 25(7):607-610
- Ganguly J, Tirone M, Hervig R L. 1998. Diffusion dynamics of Samarium and neodymium in garnet and a method for determining cooling rates of rocks. *Science*, 281:805-807
- Gebauer D, Schertl H P, Brix M *et al.* 1997. 35 Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence for very rapid exhumation in Dora Maria Massif, Western Alps. *Lithos*, 41, 5-24
- Gebauer D. 1996. A P-T-t Path for an (Ultra?)high-pressure ultramafic/mafic rock-association and its felsic country-rocks based on SHRIMP-dating of magmatic and metamorphic zircon domains. example: Alps Arami Central Swiss Alps, in: Reading the Isotopic Code, Geophysical Monograph, 95: 307-329
- Gebauer D, Grunfelder M. 1979. U-Th-Pb Dating of minerals in "Lectures in Isotope Geology" edited by Jager and Hunziker, Springer-verlag, 105-131
- Hacker B R and Q C Wang. 1995. Ar/Ar geochronology of the ultra-high-pressure metamorphism in central China. *Tectonics*, 14:994-1006
- Hacker B R, Ratschbacher L, Webb L *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 161:215-230
- Hermann J, Rubatto D, Korsakof A *et al.* 2001. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141:66-82
- Hoskin P W, L P Black. 2000. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. *J. Metamorph. Geol.*, 18:423-439
- Katayama I, Maruyama S, Parkinson C *et al.* 2001. Ion micro-probe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stage of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 185-198
- Lee J, Williams I and Ellis D. 1997. Pb, U and Th diffusion in nature zircon, *Nature*, 390(13): 159-162
- Li S, Li H, Chen Y *et al.* 1997. The UHP metamorphic geochronology of Dabie-Sulu terrain—II Zircon U-Pb isotope system. *Science in China(D)*, 27(3): 200-206 (in Chinese)
- Li S, Jagoutz E, Chen Y *et al.* 2000. Sm-Nd and Rb-Sr isotopic geochronology and cooling history of ultrahigh pressure metamorphic rocks and their country rocks at Shuanghe in Dabie mountains, Central China. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 64: 1077-1093

- Li S, Y Xiao, D Liu *et al.* 1993. Collision of the North China and Yangtze blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chem. Geol.*, 109:89–111
- Li R, Fan Q, Li H *et al.* 1995. Geochronology of UHP garnet peridotite and eclogite from Bixiling, Dabieshan. *Chinese Science Bulletin*, 40(14): 1304–1307(in Chinese)
- Ludwig. 2001. Isoplot for Microsoft Excel. Ver2. 49a
- Maruyama S, Liou J G, Zhang R Y. 1994. Tectonic evolution of the ultrahigh-pressure(UHP) and high-pressure(HP) metamorphic belts from central China. *The Island Arc*, 3:112–121
- Mezger K, Krogstad E J. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. *J. Metamor. Geol.*, 15:127–140
- Nasdala L, Pidgeon R T, Wolf D. 1995. Heterogeneous metamictization of zircon on a microscale. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(6):1091–1097
- Nasdala L, Irmer G, Wolf D *et al.* 1996. The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study. *European J. of Mineral.*, 1995, 7: 471–478
- Nasdala L, Gotze J, Pidgeon T *et al.* 1998. Constraining a SHRIMP U-Pb age: micro-scale characterization of zircon from Saxonian Rotligend rhyolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132: 300–306
- Nasdala L, Pidgeon R T, Wolf D *et al.* 1998. Metamictization and U-Pb isotopic discordance in single zircons: a combined Raman microprobe and SHRIMP ion probe study. *Mineral. Petrol.*, 62:1–27
- Nasdala L, Wenzel M, Vavra G *et al.* 2001. Metamictization of natural zircon: accumulation versus thermal annealing of radioactivity-induced damage. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 141:125–144
- Okay A L, A M C Sengor, M Satir. 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure metamorphic terrain: the Dabie Shan/Tongbai Shan orogen, China. *Tectonics*, 12:1320–1334
- Pidgeon R T, Nemchin A A, Hitchen G J. 1998. Internal structures of zircon from Archean granites from the Darling range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132:288–299
- Pidgeon R T. 1992. Recrystallisation of oscillatory-zoned zircon: some geochronological and petrological implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110:463–472
- Poller U, J Huth, P Hoppe. 2000. What causes the changes in Cathodoluminescence intensity in natural zircons? In Goldschmidt J. of Conference Abstracts 5(2):810
- Rowley D B, Xue F, Tucker R D *et al.* 1997. Ages of ultra-high pressure metamorphism and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan; U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151:191–20
- Rubatto D, Gebauer D, Fanning M. 1998. Jurassic formation and Eocene subductions for the geodynamic evolution of the Central and Western Alps. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132: 269–287
- Rubatto D, Gebauer G, Compagnoni R. 1999. Dating of eclogite-facies zircons: the age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps). *Earth and Planetary Science Letters*. 167:141–158
- Stacey J S, Kramers J D. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207–221
- subducted continental crust (Kokchetav massif, kazakhstan). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2001, 141:66–82
- Vavra G, Gebauer D and Schmid R *et al.* 1996. 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.*, 122: 337–358
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D. 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: geochronology of the Ivrea Zone(Southern Alps), *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134:380–404
- Wetherill G W. An interpretation of Rhodesia and Witwatersrand age patterns, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1956, 9: 290–292
- Wiedenbeck M, Alle P, Corfu F *et al.* 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-Hf, trace element and REE analyses. *Geostandards Newsletter*, Vol. 19(1):1–23
- Xue F, Rowley D B, Tucker R D *et al.* 1997. U-Pb ages of granitoid rocks in the North Dabie Complex, Eastern Dabieshan, China. *J. Geol.*, 105:744–753

附中文参考文献

- 陈道公, E. Deloule, 夏群科等. 2000. 北大别片麻岩中锆石 U-Pb 年龄离子探针初步测定. *岩石学报*, 16(2):199–202
- 陈道公, 李彬贤, 夏群科等. 2001. 变质岩中锆石 U-Pb 计时问题评述—兼论大别造山带锆石定年. *岩石学报*, 17(1):129–138
- 程裕淇, 刘敦一, Willams I S 等. 2000. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗质岩石 SHRIMP 分析—晋宁期高压超高压变质作用同位素依据. *地质学报*, 74(3):193–205
- 李曙光, 李惠民, 陈移之等. 1997. 大别—苏鲁地体超高压变质年代学. II. 锆石 U-Pb 同位素体系. *中国科学(D 辑)*, 27(3):200–206
- 刘若新, 樊祺诚, 李惠民等. 1995. 大别山碧溪岭石榴石橄榄岩—榴辉岩高压变质作用体的年代学的研究. *科学通报*, 11(3):243–255