

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*

陈道公 李彬贤 夏群科 吴元保 程昊

中国科学技术大学地球和空间科学系, 合肥 230026

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

2000-11-10 收稿, 2001-01-01 改回.

CHEN DaoGong, LI BinXian, XIA QunKe, WU YuanBao and CHENG Hao. 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

Abstract Zircon is the most widely used mineral for U-Pb age determinations, and shows particular importance to a complicated geological history of a metamorphic terrain, like Dabie Shan collision orogen. Zircon from metamorphic rocks may suffer from Pb diffusion loss, metamictization caused by lattice radiation damage, overgrowth-mixing and recrystallization. All of these processes would affect the accuracy and validity of zircon ages to some extent. In order to get geological meaningful ages, one must pay particular attention to mineral genesis and texture of zircons, and decide firmly zircon genetic process through internal structure observation, especially CL and BSE image before zircon U-Pb dating. The selection of reasonable common Pb correction, reasonable measured ^{204}Pb value and simple genetic zircon is preferred for TIMS dating. Here, we emphasize the advantage of SIMS dating technology in Dabie orogen research.

Key words Zircon dating, Magmatic zircon and metamorphic zircon, Metamictization, Overgrowth-mixing, Recrystallization, Dabieshan geochronology

摘要 锆石是 U-Pb 计时的首选对象, 对于地质历史复杂的变质岩地区, 如大别碰撞造山带的年代学研究, 具有不可替代的重要性。变质岩中锆石经历了 Pb 的扩散丢失作用; 晶格损伤导致的蜕晶化作用; 增生-混合作用和重结晶作用。这些过程对锆石计时的准确性和有效性带来不同程度的影响。为了使测定的年龄有确定的地质意义, 在进行锆石 U-Pb 定年前, 必需对锆石进行成因矿物学和矿物内部结构研究, 特别是阴极荧光和背散射电子成像研究, 通过内部结构特征确定锆石成因过程。在化学 U-Pb 法定年时注意普通铅校正和 ^{204}Pb 测定值对年龄的影响, 尽量选择单一成因锆石。特别强调在大别造山带年代学研究中引入锆石微区离子探针定年技术。

关键词 锆石计时; 岩浆锆石和变质锆石; 蜕晶化作用; 增生-混合作用; 重结晶作用; 大别山年代学

中图法分类号 P588.34; P597.3

1 引言

锆石作为一种常见的含铀矿物, 由于其分布广泛, 具有很低的普通铅含量, 一直是作为岩浆岩和变质岩 U-Pb 计时的首选对象, 有所谓“锆石学”之称。研究发现, 一方面, 锆石能经受岩浆侵入、部分熔融、区域变质等作用而不完全丢失其年龄信息 (Harrison *et al.*, 1987; Williams, 1992; Lanyon *et al.*, 1993; Holzl *et al.*, 1994)。另一方面, 某些锆

石在低级变质作用甚至风化作用中也能造成 U-Pb 平衡体系的破坏 (Stern *et al.*, 1966; Gebauer & Grunenfelder, 1976; Black, 1987)。因此, 锆石的这种对高温地质作用具有很强的抗干扰能力和同样可以受低温地质作用的影响构成了锆石 U-Pb 计时体系的矛盾的两方面。正因为如此, Mezger *et al.* (1997) 在他关于不一致 U-Pb 年龄解释的综述文章中提出“锆石是唯一的一种矿物, 它既能记录所经历的复杂历史, 也有可能使这种记录变得非常混乱”。所以, 为了能够对锆石 U-Pb 年龄特别是像大别苏鲁超高压碰撞造山

* 本文为国家重点基础研究发展规划项目(编号 499075503)和国家自然科学基金(编号 49973019 和 49794042)资助项目。

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

带中变质岩的锆石 U-Pb 年龄的含义有一个比较正确的认识, 必须了解超高压变质作用中锆石的 U-Pb 同位素行为, 搞清哪些锆石能够抵御高温变质作用, 哪些锆石容易丢失 Pb。

2 岩浆-变质岩体系中的锆石

2.1 扩散作用

早期的锆石 U-Pb 计时表明, 其²⁰⁶Pb/²³⁸U 和²⁰⁷Pb/²³⁵U 两组年龄经常是不一致的。这种不一致被归结为 Pb 的扩散丢失。Wetherill(1956)最早提出用幕式丢失来定量解释这种不一致性。Wasserburg(1963)则解释为长时期的扩散丢失。其后, 许多人试图测定 Pb 的扩散系数, 获得的扩散系数数值很小, 比较分散, 部分人怀疑它的可信度。最近, Lee *et al.* (1997)对斯里兰卡结晶完好的宝石级锆石晶体进行了详细的扩散实验。其研究手段包括扫描电镜、透射电镜、原子力显微镜和二次离子质谱, 获得了很好的结果。他们的结果表明 Pb 在锆石晶体中的扩散是非常缓慢的。他们在 900 C 和 1100 C 所得到的扩散系数 $\log D$ 值分别为 -20 和 -16, 在 1100 C 下获得的 U 扩散系数比 Pb 还要低四个数量级, 因此, U-Pb 体系的封闭主要取决于 Pb 的扩散。由实验的 Arrhenius 公式所得到的 D_0 值和活化能 E 算得, 对于一个直径为 200 μm 的锆石颗粒, 在冷却速率为 1 C/Ma 和 10 C/Ma 情况下, 锆石中 Pb 的封闭温度分别为 899 C 和 938 C。除了进行扩散实验工作外, 许多地质现象同样表明锆石能够抵御高温 Pb 扩散: 许多花岗岩中含有继承锆石组分(Harrison *et al.*, 1987, Williams, 1992), 它表明在 700~900 C 高温下并不足以使其 U-Pb 体系完全重置。在含金刚石相岩石中, 温度高达 950~1000 C (Sobolev & Shatsky, 1990), 锆石仍然保留其原始母岩的年龄信息(Claoue-long *et al.*, 1991), 在地幔金伯利岩的环境(1200 C)下, 结晶完好的锆石也没有完全重置其年龄(Scharer *et al.*, 1992)。这些都说明锆石中 Pb 的封闭温度应在 900 C 以上。更进一步, 在人工合成锆石的 U、Th 扩散实验测定中, 得到的扩散系数值比天然锆石还要低许多(Cherniak *et al.*, 1997)。这是因为在天然锆石中存在着由于 U、Th 的衰变而引起晶格的辐射损伤使 U、Th 等的扩散相对人工样品要容易些。这样高的封闭温度表明, 对于单纯的热扰动事件, 即使是区域或超高压变质作用等高温地质过程也不能重置锆石 U-Pb 体系。因此, 结晶完好的锆石 U-Pb 体系是迄今为止用于年代学中具有最高封闭温度的同位素体系, 它能够抵御各种高温地质过程。

2.2 蜕晶化作用

另一方面, 因为铀和钍的价态和离子半径与锆的价态和离子半径相近, 在锆石结晶时, 铀、钍易进入锆石晶格, 特别在非平衡状态下的结晶作用。同时, 由于铀、钍的系列衰变产生大量 α 离子和受放射性衰变产物核反冲能的影响,

会导致锆石晶体的辐射损伤。在经历一定时间后, 使锆石逐渐失去其有序结晶态, 产生蜕晶化作用(metamictization)。蜕晶化作用使锆石处于结晶态和玻璃态之间的一种过渡状态, 这种状态的锆石容易遭受铅丢失, 特别是在流体的作用下。正是由于锆石不同程度的蜕晶化作用, 使得锆石对于铅的保存行为产生很大的不同, 导致 U-Pb 年龄偏离一致线, 并使年龄值降低。锆石的蜕晶化作用是锆石产生不一致年龄的最重要原因。Nasdala *et al.* (1995)发现锆石的蜕晶化作用程度可以用锆石硅氧四面体非对称伸展的喇曼谱峰来描述(图 1)。随着蜕晶化程度的增加, 其特征谱峰($\sim 1000\text{cm}^{-1}$, $\sim 430\text{cm}^{-1}$)向低波数位移, 谱峰相对强度减弱, 半高宽从结晶完好的 5cm^{-1} 左右可增至严重蜕晶化的 30cm^{-1} 以上, 相应的所得到的年龄亦下降。导致锆石蜕晶化作用的主要因素可能与锆石经历的时间、环境及锆石中铀、钍的含量等有关。显然, 时间越长, 铀、钍含量越高, 越容易发生蜕晶化作用。

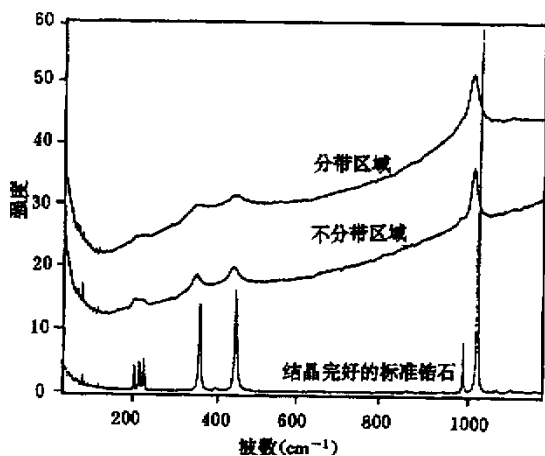


图 1 锆石的典型喇曼谱图

锆石在 25~1170 cm^{-1} 处的喇曼谱峰。上部和中间二条为澳大利亚 Jack Hill 花岗岩分带和不分带锆石谱图, 底部是印度宝石级锆石谱图。该图表明, 随蜕晶化作用的增强, 喇曼峰向低波数位移, 谱峰强度减弱, 半高宽增大。资料引自 Lasdala *et al.* (1995)

Fig. 1 Typical zircon Raman spectroscopy

Woodhead *et al.* (1991)用红外光谱法研究了锆石的蜕晶化作用。他们发现, 由锆石单位晶胞参数所指示的蜕晶化作用程度随其 U、Th 含量增加而增强。红外谱的宽度随 U、Th 含量增加而变宽, 强度则随 U、Th 增加而减少。这一结果和用喇曼谱的研究是一致的。因此, 在绝大多数地壳环境下 Pb 的扩散丢失主要发生在部分和强烈的蜕晶化锆石中。锆石 U-Pb 体系的完全重置发生在锆石的分解(溶解)和重新晶出过程中, 这通常和熔体与流体的加入有关。在地壳岩石部分熔融过程中锆石的行为取决于熔体的性质(Si、Al、K、Na), 如果是碱性岩浆, 由于有很高的锆的溶解度, 原先岩石中的锆石可能会完全被溶解; 而如果是酸性、超酸性岩浆, 在比较低温和少水的条件下, 由于锆的溶解度低, 老锆

石就有可能作为残留组分被保留下来(Dickin, 1995)。

2.3 重结晶作用

由辐射损伤引起的部分蜕晶锆石, 由于晶格受损变得松软、不稳定, 它易通过化学蚀变、淋滤和扩散作用而丢失铅。另一方面, 处于低温下的部分蜕晶锆石, 由于变质作用和热扰动使其温度升高时, 又可以通过重结晶作用使辐射损伤的晶格愈合, 重新有序化。在这个过程中, 由于 Pb^{++} 离子半径相对锆离子半径过大, 在晶格愈合的过程中锆石会把放射成因铅排除在晶格之外, 导致铅丢失。因此部分重结晶作用是锆石产生不一致年龄的又一原因之一。Pidgeon (1992) 和 Pidgeon *et al.* (1998) 对锆石的重结晶现象作了深入的研究。他们用 HF 化学蚀刻抛光的锆石断面, 发现在明显的振荡分带的岩浆锆石的周围或部分锆石区域, 由于后期的重结晶作用, 使分带性变弱或完全不分带, 并导致强分带和弱分带区域二者的年龄不一致和出现锆石内微量元素的分带性(图 2)。研究表明, 角闪岩相变质作用能够完全愈合被破坏的晶格, 减慢其扩散丢失 Pb 过程(Peaucat *et al.*, 1985)。在绿帘-角闪岩相变质作用过程中, 未见到明显的锆石重结晶作用。现在认为, 在大约 600~650°C 温度下, 最容易发生锆石的重结晶作用(Mezger *et al.*, 1997)。

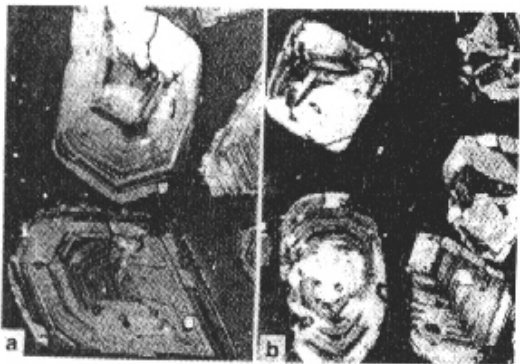


图 2 HF 蚀刻后的锆石显微照片

a. 自形晶锆石由于重结晶作用使岩浆锆石的振荡环带在某些区域变弱至完全退去; b. 锆石的重结晶作用使其呈不规则的布丁状侵入具有环带构造的岩浆锆石, 重结晶区域可以在核心, 也可以在边部或其它区域。该样品的离子探针微区定年表明重结晶锆石具有一致的比较古老的年龄, 分带的岩浆锆石具有分散的不一致年龄。这一现象被解释为在岩浆锆石侵位不久, 某些锆石区域由于重结晶作用而变得稳定, 不易丢失铅。资料引自 Pidgeon (1992) Fig. 1

Fig. 2 Zircon micro-photograph after HF etching

如果长时间处在 600~650°C 的高温下, 蜕晶锆石会不断地、及时地进行调整, 使得由蜕晶到重结晶过程变得相对短暂、迅速。这时, 相对而言, 铅的扩散丢失就要少些(Peaucat *et al.*, 1985)。岩浆锆石在变质作用过程中会产生重结晶

作用, 这时伴随有 U、Th、Pb 从锆石中被逐出, 振荡环带结构退化和消失。重结晶、不分带的锆石对于晚期的 Pb 丢失有很大的稳定性, 它常常能提供重结晶作用的时间。完全重结晶的锆石有可能失去以往的年龄信息(Pidgeon, 1992)。

2.4 增生作用

研究表明, 在各种变质作用中锆石还可以像结晶作用中类似的晶核、籽晶, 在原有锆石的周围结晶出新生锆石, 称为增生锆石。锆石增生的主要证据有: 锆石成分的环带结构。这种环带结构表现在 U、Th、Zr、Hf、REE 等元素的变化上, 通常这种变化是突变, 而不是服从扩散规律的渐变。锆石的外边和内核常具有不很相同的 Th/U 比。在内部结构方面, 增生锆石的背散射电子(BSE)、阴极萤光(CL)和二次电子(SE)成像均表明其内核和外边有很不相同的特征, 并且其界线也是分明的(Gebauer, 1996, 图 3)。

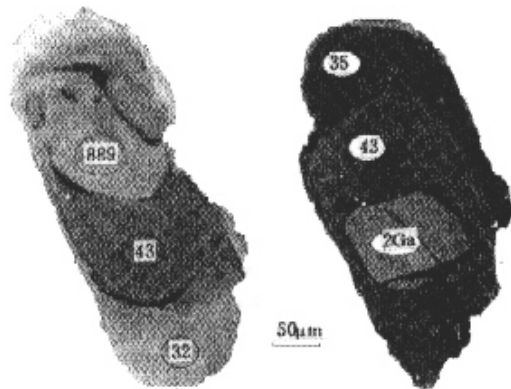


图 3 阿尔卑斯造山带中超高压地区的石榴辉石岩中两个锆石的 CL 照片和 $^{206}Pb/^{238}U$ 年龄

图中两锆石颗粒均具有古老核和变质增生现象, 其中 889Ma 和 2Ga 分别表示残留锆石的最低年龄, 43Ma 为石榴辉石岩侵位年龄, 由于重结晶作用使其生长环带退去, 32~35Ma 表示阿尔卑斯的超高压变质时期增生锆石年龄, 右边边缘可能有更年轻的第四个年龄值。资料引自 Gebauer(1996)

Fig. 3 CL images and $^{206}Pb/^{238}U$ ages of garnet pyroxenite from Alps ultrahigh pressure terrain

SHRIMP 微区定年技术为锆石的增生提供了最为直接的证据: 对于具有相对复杂演化历史的变质岩地区而言, 不仅同一岩石样品中分离出来的不同锆石颗粒具有不同的年龄, 而且同一锆石的不同部分也可能具有不同的年龄。在澳洲、格陵兰、阿尔卑斯、哈萨克斯坦等许多古老变质岩和碰撞造山带地区各类岩石中均发现了锆石中具有非常古老的内核和比较年轻的外边, 甚至在一个锆石晶体中有 3~4 个年龄的出现(*e.g.* Gebauer 1996; Gebauer *et al.* 1997; Katayama *et al.* 1998; Vavra *et al.* 1996, 1999; Whitehouse *et al.* 1998)。作者最近的研究表明, 在大别地区变质岩锆石计时

中, 同样出现这种复杂年龄的情况(图 4)。很显然, 对于这种类型的变质锆石, 如果采用常规的化学 TIMS 定年, 所得到的必然是一种由不同比例组成的不同年龄(不同成因)锆石组分的一种混合年龄, 它是没有地质意义的。

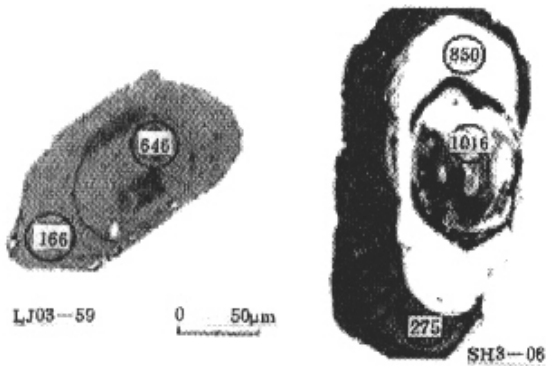


图 4 大别山锆石的背散射照片和离子探针测定的微区 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄

其中 LJ-03-59 为北大别地区李集片麻岩, 该颗粒的二个年龄为 646 和 166Ma, 由 4 个颗粒 8 点分析所给出的交点年龄分别是 740 和 145Ma, 表示了原岩年龄和受燕山期岩浆活动的扰动年龄; SH-3-06 为南大别地区双河榴辉岩, 该颗粒锆石三个年龄值分别为 1016、850 和 275Ma, 这种不同年龄可能是在变质作用过程中由于不同程度的重结晶作用或是由于颗粒内 U、Th 分布不均一造成不同程度的 Pb 丢失所造成的。这个样品 15 个点测定的上交点为 25 亿年, 可能代表了物源区的形成时代, 下交点为 240~230Ma, 表示了超高压变质时代。资料为陈道公等发表数据 Fig. 4 CL images and SIMS $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages from Dabie zircons

因此, 从增生角度来看, 一个变质岩地区的岩石, 可能存在各种类型的锆石, 既有变质作用中形成的变质锆石, 亦有变质前岩浆作用形成的岩浆锆石(如果是正变质岩)或变质前沉积岩物源区中的碎屑锆石(如果是副变质岩), 或者是岩浆作用前源区的残留古老锆石, 甚至是外来的捕虏晶锆石。变质增生锆石也可出现在二期以上变质作用中, 变质锆石既可以是变质作用中新生成的, 也可以是原先蜕晶化锆石在固相状态下重结晶作用形成的锆石。这种锆石具有二元、三元或多元组分的混合特征。不同成因的锆石可以各自以独立的锆石颗粒出现, 也可以出现在一个颗粒内部。增生是常规同位素稀释法分析(TIMMS)中锆石出现不一致年龄的又一个重要原因。

我们用经典的 Wetherill(1956)一致曲线图解对锆石的增生现象作一说明(图 5)。

图 5 示意了变质岩中锆石三阶段增生或三元混合模型。原则上具有三阶段增生的锆石, 其 U、Pb 同位素组成在没有发生母子体丢失的情况下, 应该分布在源区(残留锆石和/

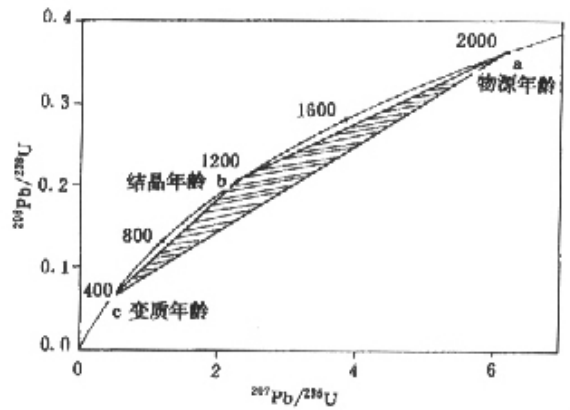


图 5 锆石的三阶段增生-混合模型

Fig. 5 Zircon three stage overgrowth-mixing model

或碎屑锆石)年龄 a、岩浆结晶年龄 b 和变质年龄 c 三点所确定的三角形 abc 内的任一区域。一般说来, 三组成因锆石用 TIMS 法测定时实验点不能构成一条直线。如果碰巧能构成一条直线, 则取决于各种锆石组分的数量关系, 它们在谐和图上所得到的交点可以落在弧 abc 内任意一点, 亦可跨越弧 abc 之外的某一点。因此, 在三阶段演化模型中, 通常意义的交点年龄是没有地质意义的。只有在一些特殊情况下, 即所测定的锆石是以某一成因类型为主体时, 所测得的不一致线的数据点可能集中在点 a、b、c 附近, 它所构成的交点年龄能够逼近年龄 a, 或 b, 或 c。由此可见, 无论是单颗粒或多颗粒的常规 TIMS 锆石定年, 很重要的一个原则就是要尽量选取单成因的颗粒, 使得实验点尽可能靠近一致曲线, 同时还要避免测定具有蜕晶化作用的锆石。

综上所述, 岩浆-变质岩地区锆石, 既有变质成因, 也有岩浆成因, 还可以是原岩物源区的碎屑成因。这些锆石均可能遭受高温连续 Pb 扩散作用、蜕晶化作用、重结晶作用以及增生作用, 这些过程不同程度地对锆石 U-Pb 计时的一致性和有效性带来重大影响。在我们测定锆石年龄之前, 以及对年龄结果意义的分析中都应充分考虑这些过程对被测锆石的影响。

3 大别-苏鲁造山带年代学

大别-苏鲁造山带是一个相当复杂、经历多次构造热事件的超高压变质带(Cong *et al.*, 1996)。就年代学而言, 截至 1998 年底, 统计已发表的年龄数据大约 200 个, 其中早期以 Sm-Nd(Rb-Sr)、Ar-Ar(K-Ar)为主。有意义的 U-Pb 年龄始于 1993 年。数量上大约不到 60 个(李曙光等, 1994; 刘若新等, 1995; 曹荣龙, 1995; 刘晓春等, 1996; 陈能松等, 1996; Ames *et al.*, 1996; You *et al.*, 1996; Rowley *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 1997; 李曙光等, 1997; Hacker *et al.*,

1998; Xie *et al.*, 1998; Ge *et al.*, 1998)。从 1999 年起 U-Pb 年龄文章明显增多, 1999 至 2000 年国内至少有 8 篇 U-Pb 计时文章发表(葛宁洁等, 1999; 李曙光等, 1999; 谢智等, 1999; Chen *et al.*, 2000; 陈道公等, 2000; 刘贻灿等, 2000; 程裕淇等, 2000; 简平等, 2000)。可见 U-Pb 计时对大别造山带研究已日益显示其重要性。尽管仍存在一些不同看法, 发生在 215~245 Ma 的三叠纪碰撞和超高压变质事件和发生在 125~135 Ma 的强烈而广泛的燕山期岩浆活动这两点已为多数人共识。由锆石上交点所提供的年龄范围较广, 从 400Ma—800Ma—2000Ma, 甚至更大, 误差也大, 一般笼统地称之为原岩年龄, 也有人把它们视为多期变质作用年龄。这些年龄是否有意义, 需要进一步研究。对于从 140~210 Ma 之间散布的年龄, 目前多把它们称为冷却抬升和受后期热事件影响年龄, 有所谓二阶段、三阶段折返模式。考虑到 UHP 岩石可能经历的多期地质事件, UHP 条件下元素和同位素行为的特殊性以及空间上可能存在的俯冲和抬升速率的不同, 已有的年龄数据, 无论是精度上还是数量上, 对了解和解释整个大别造山带的演化是远远不够的。如前所述, 由于完好锆石晶体的 U-Pb 计时具有很高的封闭温度(850~900°C 以上, Lee *et al.*, 1997), 它所记录的是锆石的形成时间而不是冷却年龄。同时在变质作用中锆石常具有增生的特征, 即使发生 Pb 丢失, 在其核部亦能保留变质前的年龄信息, 因而不像 Sm-Nd、Ar-Ar 计时那样只能反映最后一次扰动事件以来所经历的时间, 有可能记录像前进变质作用、超高压峰期变质作用和退变质作用等多次高温地质时间。在大别山研究中 U-Pb 锆石计时具有优于其它计时方法的不可替代性, 下面仅举二例说明锆石 U-Pb 计时所具有的优越性。

3.1 超高压变质作用(UHPM)规模

榴辉岩只是整个 UHPM 碰撞造山带的很少一部分, 有关榴辉岩和其围岩是一个统一的 UHP 地块还是后期地质作用把它们推到一起, 即 UHPM 的规模和范围究竟有多大, 一直有争议, 此即所谓的榴辉岩和围岩的原地(in situ)和外来(in foreign)之争。大别地区榴辉岩主要有两类围岩, 一类是云母片岩、硬玉石英岩和大理岩等变沉积岩, 这些岩石中有 UHP 的矿物组合, 人们相信它经历了和榴辉岩一样的 UHPM。另一类是花岗质片麻岩。除少数几个露头之外, 绝大多数岩石目前尚没有发现 UHPM 矿物。关于它们和榴辉岩是原地或外来的关系则存在分歧。部分人认为只有近榴辉岩的花岗片麻岩经历了 UHPM; 而分布较广的区域围岩片麻岩则未受 UHPM(Cong *et al.*, 1995); 持原地观点者认为, 到目前为止, 榴辉岩和其围岩都得到了 220Ma 左右年龄, 它们在时代上是一个不可分的统一地质体(Ames *et al.*, 1996)。他们相信 UHPM 带中绝大多数花岗片麻岩都经历了 UHPM 作用, 但这种作用的记录又被后期的地质过程掩盖或抹去(Carswell *et al.*, 2000; Ye *et al.*, 2000)。因

此, 仔细地比较近榴辉岩的围岩片麻岩和区域围岩片麻岩中锆石和超高压榴辉岩中锆石 U-Pb 年代学信息, 就有可能对这一问题提供制约。因为如果区域围岩片麻岩经历了 UHPM 作用过程, 记录在锆石中的年代学信息是不可能象 Sm-Nd、Ar-Ar 那样会被后续地质过程完全抹去, 如果能在区域片麻岩锆石中比较普遍地发现~220Ma 左右的年龄, 将支持原地观点(Rowley *et al.*, 1997; Hacker *et al.*, 1998)。同时, 对片麻岩中锆石的矿物包裹体的种类、成份进行研究, 并和超高压矿物进行比较, 也将有助于对它们是否经历过 UHPM 阶段的认识(Schertl & Schreyer, 1995; Katayama *et al.*, 1998; Tabata *et al.*, 1998)。此外, 配合其它计时, 比较片麻岩和榴辉岩等 UHP 岩石是否具有相同的冷却历史, 也可以确定它们是何时拼合在一起的。

3.2 北大别的构造属性

UHPM 岩石在整个大别造山带中仅是其中一部分。大面积出露的北大别地体的岩浆构造历史如何? 由榴辉岩所代表的 UHPM 和由北大别 TTG 灰色片麻岩为主所代表的麻粒岩相和角闪岩相变质作用的时间和空间关系究竟如何是造山带研究中的一个重要问题。目前对于北大别的构造属性大致有以下几种不同的看法: (1)是扬子克拉通前寒武纪变质基底和盖层, 在大陆俯冲时插入超高压地体(Okay *et al.*, 1993); (2)主体是碰撞造山后的白垩纪水平扩张期岩浆构造穹隆(Hacker *et al.*, 1998); (3)是古生代或前寒武纪安第斯型岛弧(Zhai *et al.*, 1994; Zhang *et al.*, 1996); (4)是位于扬子和华北两大陆块之间的微陆块(Li *et al.*, 1998); (5)是扬子和中朝大陆碰撞造山带中的变质蛇绿混杂岩带(徐树桐等, 1994)。北大别出露的岩石中, 70%是 TTG 片麻岩, 其次是花岗岩、麻粒岩和近 200 个大小不等的超镁铁和镁铁岩团块。要回答北大别的构造属性, 除了要了解它现在的特征, 更主要的是弄清它在碰撞前的岩石构造特征。这其中一个重要方面是回答这些岩石的时代。北大别地区花岗岩属白垩纪燕山晚期活动(120~130 Ma)确定无疑。已发表的几个 TTG 岩石多数得到 129~138 Ma 的下交点年龄和 771~798 Ma 的上交点年龄, 以及不能构成不一致线的 U-Pb 年龄(Hacker *et al.*, 1998; 陈道公等, 2000)。最近刘贻灿等(2000)在北大别西部获得了一个英云闪长质片麻岩的 U-Pb 一致年龄为 226Ma, 谢智等(2001)亦获得了北大别一个片麻岩的下交点年龄为 229Ma。尽管只是少量的三叠纪片麻岩年龄的出现, 但它表明了北大别部分片麻岩可能也经历了和南大别一样的超高压和/或超高压变质作用, 只是后来又被强烈的燕山期岩浆活动叠加。同时也表明了北大别地区片麻岩组成和岩石类型的复杂性。北大别镁铁和超镁铁岩石曾得到 220~240 Ma 的 Sm-Nd 年龄, 现在则认为其中仅饶拔寨和高坝岩等石榴辉石岩、石榴橄榄岩具有印支期的年龄, 和南大别的榴辉岩是同期的。而多数辉石辉长岩则是碰撞后的岩浆活动产物(李曙光等, 1999; 葛宁洁等, 1999; 刘贻灿

等,2000)。近年来陆续在北大别地区发现榴辉岩露头以及所获得的 230Ma 的榴辉岩 U-Pb 年龄(刘贻灿等,2000)则又一次表明北大别地区榴辉岩也经历了和南大别榴辉岩同期变质作用。

目前有一种观点认为北大别的石榴辉石岩为榴辉岩相岩石,它与南大别榴辉岩的不同之处在于尚未发现柯石英,它类似苏鲁地区某些榴辉岩经历过麻粒岩相退化变质作用叠加。在大别山西部罗田发现的中酸性麻粒岩粗略的 U-Pb 上、下交点年龄分别为 1690 和 2660Ma(陈能松等,1996),它和北大别其它麻粒岩相岩石是什么关系不清楚。对北大别的这些主要变质岩石,搞清它们的规模、侵位和变质时代,对确定北大别的构造属性是极为重要的。如果北大别整体上经历了和南大别一样的超高压变质作用,而这种 UHP 作用又被后来的角闪岩相、麻粒岩相变质作用掩盖,那么 Sm-Nd、Ar-Ar 计时不能发现早期 UHP 作用印记,只有利用 U-Pb 锆石计时才能够发现早期 UHPM 作用的痕迹。

另外,关于扬子和中朝克拉通碰撞的地缝合线(带)位于何处?是晓天-磨子潭断裂,水吼-五河断裂,还是更北的南湾组北部,以及与此有关的北淮阳带庐镇关群的归属问题,都可以用有关岩石的地质年代学证据,特别是 U-Pb 年代学资料加以制约。特别是庐镇关群,目前还没有一个准确的年龄资料发表。

4 锆石年龄意义

考虑到大别超高压变质带地质演化的复杂性,为了获得一个有明确地质意义的 U-Pb 年龄,我们必须通过各种手段(物理的和化学的)尽量选择新鲜、结晶完好、单成因的锆石作为测定对象。下面是判断年龄可靠性及其地质意义的值得注意的几个问题。

4.1 岩浆锆石和变质锆石

大别地区变质岩所获得的锆石 U-Pb 年龄,无论它是一致年龄,还是由不一致线计算所得到的交点年龄,都有一个如何解释其地质意义的问题。即它们是代表了岩石的形成时间,还是代表了遭受变质作用的时间,也就是要回答测定的是岩浆锆石还是变质锆石。如果是变质锆石,最好还要了解其形成方式;即它是通过什么样的变质过程形成的,是变质分解反应析出的 Si 和 Zr 的固态成核作用,还是从含水变质流体中的沉淀作用,还是原有锆石的重结晶作用(Black *et al.*, 1997)。搞清锆石的形成机理,并且将它和实际的变质阶段(前进、峰期、退化)相联系。一个明显的例子便是关于北大别片麻岩的年龄解释。它们通常具有 130Ma 左右的下交点年龄和一致年龄,以及 660~770Ma 的上交点年龄(Hacker *et al.*, 1998)。对于这一组年龄,存在两种看法:一种观点认为 130Ma 年龄代表了白垩纪岩浆侵入活动所产生的岩浆锆石形成时代,770Ma 的上交点年龄则是岩石中残留锆石

年龄,即它代表了形成白垩纪岩浆岩的物源区年龄。另一种观点则认为 130Ma 是片麻岩遭受白垩纪岩浆侵入的扰动时间,因为北大别存在广泛的白垩纪花岗岩侵入,即它们代表了变质和热扰动的的时间,而把 770Ma 看作是片麻岩的原岩侵入时间。这两种看法,哪一种是正确的呢?主要取决于测定的锆石颗粒或锆石区域究竟是岩浆锆石还是变质锆石。如果所测得的 130Ma 的锆石区域是一种岩浆锆石组分,则第一种观点是可取的。反之,如果 130Ma 的锆石区域是一种变质锆石,则第二种观点是正确的。应该说,目前尚没有一种可以完全明确区分二种锆石的定量方法,我们只能根据测定锆石或锆石区域的化学组成、内部结构、结晶习性,以及宏观地质环境进行综合判断。表 1 即是对两种锆石的一些最基本特征的描述。

表 1 岩浆锆石和变质锆石主要特征对比

Table 1 Major characteristic comparison for magmatic and metamorphic zircons

	岩浆锆石	变质锆石
形成环境	熔体中的结晶作用	高级变质岩的深熔作用;变质分解反应和固体成核作用;含水变质流体的结晶作用;岩浆锆石的固相重结晶作用
化学特征	Th、U、Th/U 高,均匀;HREE 富集,Ce、Eu 异常	Th、U、Th/U 低而分散不同程度的 LREE 富集
内部结构	振荡分带,亮色的 CL、HF 易蚀刻	黑色不分带 CL,多种增生结构(冷杉状,星云状,辐射状等),不易蚀刻
结晶习性	自形,晶面简单,晶棱尖锐,平直棱柱面发育,细长柱	半自形,不规则,晶面复杂{312},晶面有溶蚀,晶棱圆滑,短柱,圆形,等轴
年龄意义	冷却年龄	形成年龄,冷却年龄

根据这些判断准则,可以说至少一部分北大别片麻岩中锆石 U-Pb 年龄用第一种观点解释是不很妥当的(陈道公等,2000)。对于南大别和苏鲁地区榴辉岩的超高压变质时期,同样存在和北大别片麻岩相类似的问题。尽管绝大多数资料和大多数人相信超高压变质作用发生在 220~240Ma 左右的三叠纪,但仍有一部分人认为超高压变质作用主要发生在晋宁期(程裕淇等,2000),而印支期年龄只是退变质和重结晶年龄。实际上,不同作者所获得的榴辉岩锆石 U-Pb 年龄资料基本上是相同的,分歧点只是对这些年龄的地质解释,亦即对锆石成因的不同看法。事实上,程裕淇等(2000)所获得的深色榴辉岩锆石 U-Pb 年龄在 569~757Ma 的各点测定中,其 Th/U 比为 0.64~1.89,而年龄在 214~231Ma 的锆石区域中,12 点分析中有 10 点 Th/U 比为 0.1~0.05,其余 2 点为 0.30 和 0.16。根据下一节将要提到的大别地区岩浆锆石和变质锆石的大致 Th/U 比关系,我们

更倾向于认为晋宁期的锆石区域中 Th/U 比更象岩浆成因锆石,而印支期的锆石区域年龄更象变质成因锆石。我们把北大别片麻岩中一部分 130Ma 左右的年龄记录不看作是侵入时代,而把它看作是受热扰动的(变质)时间,也是基于其中很低的 Th/U 比这一点的。当然,非常准确的判定是岩浆成因锆石还是变质成因锆石尚须从矿物内部结构、化学组成和宏观地质综合考虑,其中 CL 和 BSE 的内部结构研究是至关重要的。这一点目前还没有被广大的地质年代学工作者和岩矿工作者给予充分深入的考虑。

4.2 锆石内部结构和化学组成研究

为了获得一个有意义的锆石年龄,必须对锆石成因特别是锆石内部结构进行研究,国内外在这方面已进行了相当多的工作(如 Schertl & Schreyer, 1996; Tabata *et al.*, 1998; Vavra *et al.*, 1996, 1999; 汪相等, 1993),但把锆石内部结构研究和锆石年龄相联系,特别是对同一样品直接进行结构和年龄的同步观察,则还相当不够,特别是国内关于大别造山带的研究中。因此要特别强调这项工作。在锆石内部结构研究中, BSE 和 CL 成像是最常用的研究方法,用 HF 化学蚀刻也是一种行之有效的办法(Pidgeon 1992)。现已知道岩浆锆石通常具有振荡/韵律结构,这种韵律的宽度只有几个 μm ,它反映了结晶环境的规律变化(Vavra 1994)。岩浆锆石有相对较高和稳定的 Th/U 比;变质锆石一般不存在分带结构,有低而分散的 Th/U 比,但并不永远是这样。大别山地区目前所获得的锆石 U-Th 含量资料大部分也符合岩浆锆石 Th/U 比高(0.5~1.5),变质锆石 Th/U 比低(<0.1~0.2)的特征(Harcker *et al.*, 1998; Xue *et al.*, 1997; Rowley *et al.*, 1997)。锆石荧光的强度、颜色和微量元素组成之间也有密切的关系(Belousova *et al.*, 1998)。不同锆石有不同的谱学特征。喇曼光谱是另一种锆石内部结构研究的重要手段。它能够区分结晶状态好的锆石和蜕晶化锆石,因而能对锆石是否适合年龄测定提供重要依据。Nasdala *et al.* (1995, 1996, 1998)对锆石喇曼光谱进行了详细的研究,他们发现锆石的蜕晶化程度和特征喇曼谱峰有确定的关系:结晶完好的天然锆石和人造锆石有尖锐、显著的特征峰,而不同程度蜕晶化锆石的特征谱峰则向低波数移动,且峰形变钝、半高宽加大(图 1)。因此在锆石 U-Pb 年龄测定之前或后,对锆石进行喇曼光谱研究,可以判定年龄的可靠程度。

4.3 普通铅的扣除

正确的扣除普通铅是获得一个可靠的锆石 U-Pb 年龄的基础,在常规的 TIMS 分析中,普通铅是根据质谱分析时测得的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 或 $^{205}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ (^{205}Pb 是作为稀释剂加入的),或 $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值,然后再依据样品大致年龄和地壳中铅的演化模式(如 Stacey & Kramers 1975)来扣除的,还可以用测定同一岩石中共生的钾长石、硫化物中的铅作为普通

铅组来进行扣除。在离子探针分析中,普通铅也可以根据测定的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 按上面的方式校正,或者用 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 校正。无论是 TIMS 分析还是离子探针(SIMS)微区分析,可供测定的 ^{204}Pb 数量很少,一般不易精确测量。因而 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 校正方法的精度比 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 校正正好得多。这种校正的前提是锆石形成后 U、Th 保持封闭体系(Compston *et al.* 1992)。即锆石后来没有获得 U 和 Th,也无 U 和 Th 的相对分异作用发生。其检验方法是将实验测定的 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值和 Th/U 比值作图,如实验点偏离线性,则说明 U、Th 的封闭体系不成立。如果用 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 作普通铅校正,则 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值可用来计算 $^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$ 年龄。当 U-Th 体系封闭被破坏时,还可用 Terra-Wasserburg (1972)图解来处理数据,该图解用测定的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 和 $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$ 关系作图而不需要事先扣除普通铅,实验点线性回归的直线在纵坐标 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 轴上的交点便是该样品普通铅 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的组成。Terra-Wasserburg 图解可用于测定 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 较低、 ^{204}Pb 信号很小、普通铅组成不稳定的样品。该图解的另一特点是对年轻样品,一致曲线有较大的弯度。Zheng (1992)曾用三维图解法讨论了 U-Pb 二阶段体系中普通铅的同位素组成,三维图解法不需要事先知道普通铅的同位素组成,只要假定所研究的一组样品具有同种普通铅同位素组成,即可计算年龄。他讨论了矿物岩石中扣除普通铅的一些理论问题,指出常规不一致线对普通铅的扣除要求其年龄对应于 t_1 而不是 t_2 ,因此无论对变质岩还是岩浆岩,采用共生不含铀矿物的 Pb 同位素来扣除在理论上都是不正确的。当测定的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比较高时,上述扣除方法在计算年龄时是反映不出来的,对 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值小于 100 时,必须采用三维模式进行计算才能得到准确的年龄。

目前国内的普通铅校正方法,绝大多数都使用 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 方法。这里应该强调指出,测定的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值不能过低,至少应该在 300~500 以上,这样才不至于因为普通铅扣除不当而引入误差,国内发表的数据有一定数量在 100~200 甚至 100 以下,这时,如果普通铅组成扣除不合适,其年龄的可靠性明显受到影响;国外发表的数据多在 1000 以上,甚至数千、上万。这时由于普通铅含量很低,不管采用什么方法扣除,普通铅对年龄误差的影响都是可以忽略不计的。我们应该强调尽量做到这一点,在实验中降低本底,减少污染,使测定的 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 比值尽可能的高。

表 2 给出了一个计算实例,它表明由于 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 测定值过低,单单由普通铅扣除不合适会带来多大误差。因此,当我们分析锆石年龄的可信度时, ^{204}Pb 的测定精度和普通铅的扣除是一个需要认真检查的内容。

4.4 TIMS 和 SIMS 计时比较

一直以来,同位素稀释法是锆石 U-Pb 年代学中应用最广泛的方法,随着实验室 U、Pb 本底的下降,使用单一颗粒锆石已能获得精度较高的年龄。如果在实验前使用气流磨削

表 2 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 测定值对年龄偏差的影响

(假定被测样品的年龄为 240Ma)

Table 2 Affect of measured $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ to age deviation

$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 测定值	年龄偏差 (Ma) ^a	年龄偏差 (Ma) ^b
50	14.7	7.4
100	5.7	2.8
300	1.7	0.8
500	1.0	0.5
1000	0.5	0.2

a 和 b 分别表示普通铅同位素组成 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 值由 18:00 变化至 16:00 和 17:00 时年龄的偏差情况

(abrasion)、化学淋滤等技术可有效的除去锆石中发生蜕晶化的区域和表面遭受污染的区域,从而使数据接近和达到一致年龄(Krogh,1982)。因而 TIMS 定年在相当长一段时间内将仍然是一种主要的计时手段。但是对于具有复杂历史的变质岩中锆石,由于单一颗粒锆石本身有可能就是由不同年龄不同成因锆石组成,它们在光学显微镜下无法分辨,也无法用其它手段将它们分离,因而用 TIMS 得到的只能是不同同位素组成的各部分年龄的混合,如果这种混合只是两个具有一致年龄组分不同比例混合,尚可落在不一致线上。而对于三元组分或二组分又遭受一定量的 Pb 丢失,或锆石中含有古老锆石核,则它们不能落在一致线上,亦不能落在不一致线上。就这层意义上说,锆石微区离子探针(SHRIMP 和 SIMS)分析就显得尤为重要和突出了。我们要强调尽可能多的使用锆石微区年龄测试技术,尽可能多的获得一致年龄。目前,SHRIMP 离子探针在探讨阿尔卑斯造山带变质岩年代学的研究中已取得重要进展(如 Gebauer,1996; Gebauer *et al.*, 1997; Vavra *et al.*, 1996, 1999; Rabatto *et al.*, 1999)。在大别山研究中也已开始使用离子探针定年技术(Hacker *et al.*, 1998; 程裕淇等, 2000; 简平等, 2000; 陈道公等, 2000),我国即将引进 SHRIMP II 离子探针,相信很快就会在研究大别山造山带年代学中给出新的成果。

5 结语

本文论述了在岩浆-变质岩体系中锆石所可能经历的各种作用,包括铅扩散,蜕晶化,重结晶和混合增生,以及它们对于锆石计时的影响。提出在判断一个 U-Pb 年龄数据的质量时应考虑它们 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 的测量值、如何扣除普通铅及注意 ^{204}Pb 信号的大小。分析了锆石 U-Pb 计时在解决大别山地质演化和地质年代学中的重要性。这里我们需要指出,由于锆石 U-Pb 计时的复杂性,即使所测得的年龄数据完全相同,不同的研究者对其数据意义的解释可以完全不同。因此,我们呼吁地质年代学工作者和岩矿地质工作者密切合作,把锆石定年和锆石结构成因矿物学有机联系起来,在对锆石进行 U-Pb 定年前或后,通过研究锆石内部结构和化学

组成了解锆石的成因过程,使年龄、化学成分、结构互相制约,以便对锆石 U-Pb 年龄数据有一个更加符合事实、具有确切地质意义的解释。我们强调,开展离子探针、阴极荧光、电子背散射、喇曼光谱等微区分析技术,尽可能的获得 U-Pb 一致年龄是解决这一问题的关键,这也是写作本文的初衷。

致谢: 本文成文过程中郑永飞教授、李曙光教授提出许多宝贵意见,特此致谢。

References

- Ames L, Zhou GZ and Xiong BC. 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
- Belousova EA, Griffin WL and Pearson NJ. 1998. Trace element composition and cathodoluminescence properties of southern African kimberlitic zircons, *Mineralogical Magazine*, 62(3), 355-366
- Black LP. 1987. Recent Pb loss in zircon: a natural or laboratory-induced phenomenon?. *Chemical Geology*, 65, 25-33
- Black LP and Hoskin P. 1997. Metamorphic zircon formation by solid-state recrystallization of protolith igneous zircon. ANU RSES Annual Report, 124-125
- Carswell DA, Wilson RA and Zhai MG. 2000. Metamorphic evolution, mineral chemistry and thermobarometry of schists and orthogneisses hosting ultra-high pressure eclogites in the Dabieshan of central China. *Lithos*, 52:121-155
- Cherniak DJ, Hanchar JM and Watton EB. 1997. Diffusion of tetravalent cations in zircon. *Contrib. Mineral Petrol.*, 127: 383-390
- Chen D, Isachsen C, Zhi X *et al.* 2000. Zircon U-Pb ages for gneiss from Qianshan, Anhui. *Chinese Sciences Bulletin*, 45(8): 764-767
- Chen D, E Deloule, Xia Q *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)
- Chen N, You Z, Suo S *et al.* 1996. The U-Pb zircon ages of acid granulite and deformed granite from Dabie. *Chinese Sciences Bulletin*, 41(11): 1009-1012(in chinese)
- Cheng Y, Liu D, Williams IS *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)
- Claoue-Long JC, Sobolev NN and Sobolev AV. 1991. Zircon response to diamond-pressure metamorphism in the Kokchetav Massif, USSR. *Geology*, 19: 710-713
- Compton W, Willms LS, Kirschvink JL *et al.* 1992. Zircon U-Pb ages for the Early Cambrian time scale. *J Geol. Soc. London* 149: 171-184
- Cong B, Zhai M, Carswell D *et al.* 1995. Petrogenesis of the ultrahigh-pressure rocks and their country rocks at Shanghe in Dabieshan, central China. *European J. Mineralogy*, 7: 119-138
- Cong B, Zhang R, Liu J *et al.* 1998. Metamorphic evolution of UHP

- rocks, In: Cong (ed.). Ultra-high pressure metamorphic rocks in Dable-Sulu region of China. Beijing: Science Press, 128—160
- Dickin AP. 1995. Radiogenic isotope Geology, Cambridge University Press. Cambridge
- Fraser G. 1997. Zircon ages in metamorphic rocks: Towards a more rigorous interpretation. In: Geochronology and isotope Geochemistry, ANU RSES Annual Report, 122—124
- Ge N, Wu W, Liu B *et al.*, 1998. U-Pb zircon ages of Tianzhusan granites in eastern Dabie orogen and their implications. *Scientia Geologica Sinica*, 7(4): 521—525
- Ge N, Hou Z, Li H *et al.* 1999. Zircon U-Pb ages of mafic-ultramafic rocks from Shacun, Yuexi Dabie. *Chinese Science Bulletin*, 44(19): 2110—2114(in Chinese)
- Gebauer D and Grunfelder M, 1976. U-Pb zircon and Rb-Sr whole rock dating of low-grade metasediments, example: Montagne Noir (Southern France). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 59: 13—32
- 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: Alpe Arami, Central Swiss Alps, In: *Earth Processes: Reading the Isotopic Code Geophysical Monograph* 95, 305—329
- Gebauer D, Schertl HP, Brix W *et al.* 1997. 35Ma old ultrahigh-pressure metamorphism and evidence of very rapid exhumation in the Dora Maira Massif, Western Alps. *Lithos*, 41: 5—24
- Hacker BR *et al.* 1998. U/Pb zircon ages constrain the architecture of the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie Orogen, China. *Earth and Planetary Science Letters*, 161: 215—230
- Harrison TM, Aleinikoff JN and Compston W. 1987. Observations and controls on the occurrence of inherited zircon in concordant-type granitoids, New Hampshire. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52: 2549—2558
- Jian P, Liu D, Yang W *et al.* 2000. Zircon micro ion-probe dating of Caledonian eclogite from Xiongdi western Dabie. *Chinese Science Bulletin*, 45(19): 2090—2093(in Chinese)
- Katayama I, Zayachkovskaya A and Maruyama S. 1998. A window to prograde metamorphism of the Kokchetav Massif, northern Kazakhstan. The second Stanford UHP workshop, Stanford, A91—96
- Krogh TE. 1982. Improved accuracy of U-Pb zircon dating by creation of more concordant systems using an air abrasion technique. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46: 637—649
- Lanyon R, Black RP and Seitz HM. 1993. U-Pb zircon dating of mafic dykes and its application to the Proterozoic geological history of the Vestford Hills, East Antarctica. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 115: 84—203
- 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, Hong J, Li H *et al.* 1999. Zircon U-Pb ages of pyroxenite-gabbro intrusion in Dabie mountains and their geological implications. *Geological J. of China Universities*, 5(3): 351—355(in Chinese)
- Li S, Chen Y, Jagoutz E *et al.* 1998. Geochemical and geochronological constraint on the tectonic outline of the Dabie Mountains, Central China; A continent-microcontinent-continent collision model. *Continental Dynamics*, 3: 14—31
- Liu 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)
- Liu Y, Li S, Xu S *et al.* 2000. U-Pb zircon ages of the eclogite and tonalitic gneiss from the northern Dabie mountains, China and multi-overgrowths of metamorphic zircons. *Geological J. of China Universities*, 6(3): 417—423 (in Chinese)
- Liu X, Li H, Zuo Y *et al.* 1996. U-Pb zircon ages of UHP garnet phengite gneiss from Dabie. *The Bulletin of Min. Petro. Geochem.*, 15(1): 10—13 (in Chinese)
- Mezger K. and Krogstad EJ. 1997. Interpretation of discordant U-Pb zircon ages: An evaluation. *J. Metamorphic Geol.*, 15: 127—140
- Nasdala L, Irmer G, Wolf D *et al.* 1995. The degree of metamictization in zircon: a Raman spectroscopic study. *European J. Mineral.*, 7: 471—478
- Nasdala L, Pidgeon RT, Wolf D. 1996. Heterogeneous metamictization of zircon on a microscale. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 60(6): 1091—1097
- Nasdala L, Gotze J, Pidgeon RT *et al.* 1998. Constraining a SHRIMP U-Pb age: micro-scale characterization of zircons from Saxonian rotliegend rhyolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132: 300—306
- Okay AI, Sengor AM, Muharrem S *et al.* 1993. Tectonics of an ultrahigh-pressure Metamorphic Terrane: The Dabie Shan/ Tongbai Shan Orogen, China. *Tectonics*, 12(6): 1320—1334
- Peucat JJ *et al.* 1985. Resistance of zircon to U-Pb resetting in a prograde metamorphic sequence of Caledonian age in East Greenland. *Canadian Earth Sciences*, 22: 330—338
- Pidgeon RT. 1992. Recrystallization of oscillatory-zoned zircon: some geochronological and petrological implications. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 110: 463—472
- Pidgeon RT, Nemchin AA, Hitchen. 1998. Internal structures of zircon from Archaean granites from the Darling Range batholith: implications for zircon stability and the interpretation of zircon U-Pb ages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 132: 288—299
- Rowley DB, Xue F, Tucker RD *et al.* 1997. Ages of ultra pressure metamorphic and protolith orthogneisses from the eastern Dabie Shan; U/Pb zircon geochronology. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 151: 191—203
- 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
- Scharer U, Corfu F and Demaiff D. 1992. Heterogeneity of the subcontinental mantle; U-Pb and Lu-Hf isotopes in megacrysts of baddeleyite and zircon from the Mbuji-Mayi kimberlite. *EOS*, 73: 339
- Schertl HP, Schreyer W. 1996. Mineral inclusions in heavy minerals of ultrahigh-pressure metamorphic rocks of Dora-Maira Massif and their bearing on the relative timing of the petrological

- events, in Reading Isotopic Code. Geophysical Monograph, 95: 331—342
- Sobolev NN and Shatsky VC. 1990. Diamond inclusion garnets from metamorphic rocks: a new environment for diamond formation. *Nature*, 343: 742—746
- Stacey JS and Kramers JD. 1975. Approximation of terrestrial lead isotope evolution by a two-stage model. *Earth and Planetary Science Letters*, 26: 207—221
- Stern TW, Goldich SS and Newel MF. 1966. Effect of weathering on the U-Pb zircon ages from the Morton gneiss, Minnesota. *Earth and Planetary Science Letters*, 1: 369—378
- Tabata H, Yamauchi K, Maruyama S *et al.* 1998. Tracing the extent of a UHP metamorphic terrane; mineral-inclusions study of zircons in genesis from the Dabie Shan, When Continents Collide; Geodynamics and Geochemistry of ultrahigh-pressure rocks, 261—273
- Tera F, Wasserburg GJ. 1972. U-Th-Pb systematics in three Apollo 14 basalts and the problem of initial Pb in lunar rocks. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 14:281—304
- Vavra G. 1994. Systematics of internal zircon morphology in major Variscan granitoid types. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 117:331—344
- 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 JI. 1993. Systematics of internal zircon morphology major. Variscan granitoid types. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 117: 331—334
- Vavra G, Schmid R, Gebauer D *et al.* 1999. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon; geochronology of the Ivren Zone (Southern Alps). *Contrib. Mineral. Petrol.*, 134:380—404
- Wang X and Wang R. 1993. Oscillatory zoning in zircon crystals from granitic rocks. *Acta Mineralogica Sinica*, 13(2): 124—129(in Chinese)
- Wasserburg DJ. 1963. Diffusion processes in lead-uranium systems. *J. Geophys. Res.*, 68: 4823—4846
- Wetherill GS. 1956. Discordant uranium-lead ages. I. *Trans. Ame. Geophys. Union*, 37: 320—326
- Whitehouse MJ, Moorbath S, Kamber BS *et al.* 1998. Interpretation of ion-probe U-Pb data from early Archean zircon — implications for the ages of the earliest life on Earth, Goldschmidt Conference Toulouse. *Mineralogical Magazine*, 62A: 1649—1650
- Williams IS. 1992. Some observations on the use of zircon U-Pb geochronology on the study of granitic rocks. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 83: 447—458
- Woodhead JA, Rossman G and Silver L. 1991. The metamictization of zircon; Radiation dose-dependent structural characteristics. *American Mineralogist*, 76:74—82
- Xie Z, Chen J, Zhou T *et al.* 1998. U-Pb Zircon ages of the Rocks in the North Dabie Terrain, China. *Scientia Geologica Sinica*, 7(4): 501—512
- Xie Z, Chen J, Zhou T *et al.* 1999. U-Pb zircon ages for metamorphic rocks from southern Dabie. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(4): 335—340(in Chinese)
- Xie Z, Chen J, Zhang X *et al.* 2001. Zircon U-Pb dating of gneiss from Shizhuhe in North Dabie Mountain and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 17(1):139—144 (in Chinese with English abstract)
- Xu S, Liu Yican, Jiang Laili *et al.* 1994. Tectonic regime and evolution of Dabie Mountain. Beijing: Science Press, 175 (in Chinese)
- Xue F, Rowly DB, Turker RD *et al.* 1997. U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the North Dabie Complex, Eastern Dabieshan, China. *J. Geol.*, 105: 744—753
- Zhai M, Cong B, Zhang Q *et al.* 1994. The northern Dabieshan Terrain: A possible Andean-type arc. *International Geology Review*, V36, 867—883
- Zhang R *et al.* 1996. Petrogenesis of a high-temperature metamorphic terrain: a new tectonic interpretation for the North Dabieshan, central China. *J. Metamor. Geol.*, 14: 319—333
- Zheng Yong-Fei. 1992. The three-dimensional U-Pb method: Generalized models and implication for U-Pb two-stage systematics. *Chemical Geol.*, 100: 3—18

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
- 陈能松, 游振东, 索书田等. 1996. 大别山区中酸性麻粒岩和变形花岗岩的锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 41(11): 1009—1012
- 程裕淇, 刘敦一, IS Williams 等. 2000. 大别山碧溪岭深色榴辉岩和片麻状花岗岩岩石 SHRIMP 分析. *地质学报*, 74(3):193—205
- 葛宁洁, 侯振辉, 李惠民等. 1999. 大别造山带岳西沙村镁铁-超镁铁岩体锆石 U-Pb 年龄. *科学通报*, 44(19): 2110—2114
- 简平, 刘敦一, 扬巍然等. 2000. 大别山西部熊店加里东期榴辉岩锆石离子探针测年. *科学通报*, 45(19): 2090—2093
- 李曙光, 洪吉安, 李惠民等. 1999. 大别山辉石岩-辉长岩体的锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *高校地质学报*, 5(3): 351—355
- 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)*, 27(3): 200—206
- 刘若新, 樊洪诚, 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的年代学研究. *科学通报*, 40(14): 1304—1307
- 刘晓春, 李惠民, 左义成等. 1996. 大别山超高压石榴多硅白云母片麻岩中锆石 U-Pb 年龄. *矿物岩石地球化学通报*, 15(1): 10—13
- 刘贻灿, 李曙光, 徐树桐等. 2000. 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*, 6(3): 417—423
- 汪相, 王汝成. 1993. 花岗岩中锆石的韵律环带结构研究. *矿物学报*, 13(2): 124—129
- 谢智, 陈江峰, 周泰禧等. 1999. 大别造山带南部浅变质岩的锆石 U-Pb 年龄. *地球学报*, 20(4): 335—340
- 谢智, 陈江峰, 张巽等. 2001. 大别山北部石竹河片麻岩的锆石 U-Pb 比例及其地质意义. *岩石学报*, 17(1):139—144
- 徐树桐, 刘贻灿, 江来利等. 1994. 大别山构造格局和演化. 北京: 科学出版社, 175