

# U-Pb 同位素定年技术及其地质应用潜力

周红英,李惠民

(天津地质矿产研究所,天津 300170)

**摘要:** 在作者的研究成果基础上,结合近年来文献报道的资料,对U-Pb同位素定年技术的原理、测年矿物、几种测定方法的优点和局限性、针对具体样品选择测年矿物和定年方法的基本原则等问题进行讨论,并对U-Pb同位素定年技术的地质应用潜力进行探讨。结果表明,用于U-Pb同位素年龄测定的不同矿物和不同方法各有不同的特点及局限性。在实际工作中,根据从具体样品中分选得到的U-Pb同位素定年矿物及其数量多少、粒度大小、年龄范围、U-Pb含量、测年精度要求等因素,灵活地选择测年矿物及测年方法,对于获得比较理想的结果是非常重要的。

**关键词:** U-Pb同位素;定年技术;地质应用潜力

**中图分类号:** P597+.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-4135(2011)01-0063-08

U-Pb同位素定年技术是应用最广的重要经典同位素定年技术之一,具有其他许多同位素测年技术无法相比的优点。其最突出的优点是可同时利用两个同位素衰变系列(即 $^{238}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}$ 和 $^{235}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}$ 衰变系列)进行测年,获得三个独立的同位素年龄(即 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄),因而测年结果可以进行内部校正。这一优点源于U-Pb同位素定年的基本原理:矿物中的铀同位素( $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ )经放射性衰变生成稳定同位素( $^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}$ )。根据对试样中母体同位素( $^{238}\text{U}$ 和 $^{235}\text{U}$ )和子体同位素( $^{206}\text{Pb}$ 和 $^{207}\text{Pb}$ )含量及铅同位素比值的测定,即可根据放射性衰变定律计算试样形成封闭体系以来的时间,即矿物形成以来的年龄,包括 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄、 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄。如果这三个年龄在测定误差范围内是一致的,说明矿物形成以来其U-Pb同位素系统是封闭的,其U-Pb同位素年龄是谐和的,这三个年龄中的任何一个都可以代表矿物形成的年龄;否则说明矿物形成以来其U-Pb同位素系统是开放的,其U-Pb同位素年龄是不谐和的,需要进行内部校正才能获得正确的矿物形成年龄。U-Pb同位素定年最常用的矿物是锆石,有时也用斜锆石、金红石、独居石、榍石、磷灰石和锡石等含铀矿物。全岩样品通常不适合进行U-Pb同位素定年。U-Pb同位素定年最常

用的技术方法主要有同位素稀释-热电离质谱法(以下简称ID-TIMS法)、二次离子质谱法(以下简称SIMS法)、激光烧蚀-电感耦合等离子体质谱法(以下简称LA-ICPMS法)。本文主要根据作者的研究成果,结合近年来文献报道的资料,对常用于U-Pb同位素定年的几种含铀矿物以及U-Pb同位素定年的3种方法的优点和局限性及其适用范围进行比较,提出一些针对具体样品选择定年矿物和定年方法的基本原则,希望能对广大地质工作者利用U-Pb同位素定年技术测定各种岩石矿物的同位素地质年龄的工作有所帮助。

## 1 U-Pb同位素定年的几种常用矿物

### 1.1 锆石

锆石是自然界中广泛存在的一种副矿物,出现在各种各样的岩石,包括沉积岩、岩浆岩和各种变质岩中。锆石的化学成分主要是 $\text{ZrSiO}_4$ ,此外还含有U、Th、Pb及稀土等微量元素。锆石以其在自然界中存在的普遍性、化学成分多样性以及经受各种物理化学作用而基本不变的耐久性等特点而成为最适合进行U-Pb同位素定年的矿物之一。锆石包含丰富的地质信息,包括U-Th-Pb、Lu-Hf及Sm-Nd等系统的

**收稿日期:** 2011-02-20

**基金项目:** 国家自然科学基金:华南锡多金属矿床中的锡石U-Pb同位素地质年代学研究(40873041);国土资源部公益性行业科研专项:非锆石类富铀矿物U-Pb同位素定年方法研究(200911043-15)

**作者简介:** 周红英(1966-),女,博士,教授级高工,从事同位素测年工作,E-mail:zhouhy305@163.com。

同位素年代学信息, Pb、Hf、Nd及O等同位素的地球化学信息, 稀土元素和各种稀有元素的地球化学信息, 锆石内部各种包裹体的地学信息等等。正因为锆石中包含有如此丰富的地学信息, 以至于有人认为锆石是一种“全息矿物”, 对锆石的研究可以发展成一门新兴学科, 即“锆石学”。“锆石学”的提法是否有道理, 是一个仁者见仁, 智者见智的问题。但是, 锆石的研究及其应用前景确实是很吸引人的。自二十世纪八十年代以来, 用锆石U-Pb同位素测年法测定我国各种岩石和矿床的地质年代, 取得了许多重要的成果, 受到了地质学家的格外重视<sup>[1-7]</sup>。然而, 在许多变质岩和矿床中, 锆石的成因比较复杂, 往往在同一岩石样品中存在多种成因锆石, 因而获得多种锆石U-Pb同位素年龄信息, 此时对各种锆石U-Pb同位素年龄地质意义的解释, 往往存在很大的争议。即便对于只获得单一锆石U-Pb同位素年龄的变质岩和矿床, 对其锆石U-Pb同位素年龄地质意义的解释, 有时也存在一定的争议。这些问题的产生, 主要与变质岩和矿床中锆石类型和成因的多样性以及锆石U-Pb同位素体系在变质作用和成矿作用过程中变化的复杂性有关。这使得对锆石U-Pb同位素年龄地质意义的解释具有很大的不确定性。要解决这些问题, 除了要利用先进的仪器设备和技術对变质岩和矿床中的锆石作更精确的微区U-Pb同位素年龄测定及锆石成因矿物学的深入研究外, 对这些变质岩和矿床中可能存在的其他含铀矿物, 如榍石、金红石、独居石、磷灰石、斜锆石及锡石等矿物进行精确的U-Pb同位素年龄测定也是非常重要的。相对于锆石而言, 有些含铀矿物成因较为简单, 其U-Pb同位素年龄的地质意义比较明确, 如斜锆石的U-Pb同位素年龄通常可以解释为变质基性岩的原岩生成时代, 锡石的U-Pb同位素年龄通常可以解释为锡多金属矿床的成矿(锡矿化)时代。一些变质岩和矿床中锆石与多种其他含铀矿物共存, 锆石与一些含铀矿物之间以及各种其他含铀矿物之间有一定的成因关系。例如在变质基性岩中, 斜锆石可以转化为锆石。这种转化可能是由斜锆石与含硅的热流体通过如下反应来实现:  $ZrO_2(\text{斜锆石}) + SiO_2(\text{热流体中}) = ZrSiO_4(\text{锆石})$ ; 在一些热液矿床中, 锆石与金红石、锡石等含铀矿物共存, 它们可能都是热液成因的。这些现象为对相关含铀矿物的成因关系进行深入研究, 并对其U-Pb同位素地质年代学特点进行比较提供了机会。精确测

定变质岩和矿床中锆石和其他各种含铀矿物的U-Pb同位素年龄, 根据同一变质岩和矿床中锆石和其他各种含铀矿物的成因关系, 可以合理地解释所获得的锆石和其他各种含铀矿物U-Pb同位素年龄的地质意义, 获得更加全面和准确的地质年代学信息, 进一步全面地认识相关变质岩和矿床的生成和演化历史。因此, 变质岩和矿床中各种含铀矿物的U-Pb同位素测年与锆石的U-Pb同位素测年和利用其他同位素系统的测年方法是相辅相成, 互相补充的。另外, 有些基性—超基性岩石中并不存在锆石, 无法利用锆石的U-Pb同位素测年来确定这些岩石的生成时代, 此时利用这些岩石中可能存在的斜锆石的U-Pb同位素测年来确定这些岩石的生成时代, 会是很好的选择。

## 1.2 斜锆石

斜锆石矿物成分( $ZrO_2$ )单一, 结构简单, 成因明确(岩浆结晶成因), 存在于各种硅不饱和的基性—超基性岩石, 包括碳酸岩, 金伯利岩, 碱性辉长岩, 正长岩和辉长岩等岩石中。斜锆石的U-Pb含量较高而非放射成因的初始普通铅含量却很低, 是非常适合进行U-Pb同位素测年的矿物, 容易得到比较精确而且地质意义明确的U-Pb同位素年龄。有文献<sup>[8]</sup>报道, 斜锆石的U-Pb同位素系统非常稳定, 经过低中级变质作用(绿片岩相到角闪岩相变质作用)仍能保持封闭状态。即使经过麻粒岩相高级变质作用, 斜锆石的U-Pb同位素系统也只是局部开放, 经过校正仍能获得原岩生成年龄的信息。斜锆石U-Pb同位素定年作为测定基性—超基性岩石原岩精确生成年龄的最好方法之一, 早就引起了地质学家的注意<sup>[9]</sup>。近年来我国地质工作者在利用斜锆石U-Pb同位素测年技术测定基性—超基性岩石原岩生成年龄方面也取得了许多重要的成果<sup>[10-12]</sup>。

利用斜锆石U-Pb同位素测年技术测定基性—超基性岩石原岩生成年龄工作的难点在于, 斜锆石粒度很小, 通常小于 $60\mu m$ , 在岩石中的含量很低, 通常在锆含量较高的基性—超基性岩石中, 其含量也仅为每kg岩石约有1~10颗粒。斜锆石的型态与金红石相似, 有时与金红石形成连晶或被金红石包裹, 常被误认为金红石。而且, 正如文献<sup>[8]</sup>报导, 在一些斜锆石与锆石共存的岩石中, 斜锆石有时以细小包裹体或反应残余的形态存在于锆石内部。这都增加了斜锆石矿物分选和U-Pb同位素测年工作的难度, 在

过去相当长一段时期直接影响了对斜锆石U-Pb同位素地质年代学的研究及其U-Pb同位素测年技术的推广应用。其实,斜锆石在基性-超基性岩石中的存在,往往比人们想象的更为普遍。只要加强并做好斜锆石的仔细分选和准确鉴定工作,利用斜锆石U-Pb同位素测年技术测定基性-超基性岩石原岩生成年龄工作的应用潜力是很大的。

### 1.3 金红石

金红石矿物成分( $\text{TiO}_2$ )单一,结构简单,稳定而不易受后期地质事件的影响,广泛存在于火成岩和变质岩中。金红石的U-Pb同位素体系封闭温度较低( $420 \sim 380 \text{ }^\circ\text{C}$ ),因此被成功应用于高级变质地体冷却史的研究<sup>[13-15]</sup>。近年来,我国地质工作者利用金红石的U-Pb同位素定年研究大别-苏鲁超高压变质岩石冷却史和折返速率,以及利用SIMS法测定中国天山低温榴辉岩中金红石U-Pb同位素年龄,都取得了重要的成果<sup>[16-18]</sup>。

金红石U-Pb同位素定年技术的局限性之一是许多较年轻(寒武纪以后)的金红石铀的含量较低,因此放射成因铅的含量也较低,非放射成因铅的含量相对较高,这对其U-Pb年龄的准确测定造成困难,特别是对于金红石的微区原位U-Pb同位素定年造成很大的困难,影响了金红石U-Pb同位素定年技术的推广应用。

### 1.4 磷灰石

磷灰石是一种分布广泛的副矿物,存在于多种不同类型的岩石中。与锆石相比,磷灰石的U-Pb同位素体系封闭温度较低( $600 \sim 500 \text{ }^\circ\text{C}$ )。对于有复杂演化历史的变质地体,磷灰石的U-Pb同位素定年可以为其PTt轨迹研究提供相对低温阶段的年龄信息。文献<sup>[19]</sup>报道了我国鞍山地区变质石英闪长岩中磷灰石的U-Pb同位素定年结果,并对其地质意义进行了讨论。

磷灰石U-Pb同位素定年技术的局限性之一是许多磷灰石铀的含量较低,因此放射成因铅的含量也较低,非放射成因铅的含量相对较高,这对其U-Pb年龄的准确测定造成困难,特别是对于磷灰石的微区原位U-Pb同位素定年造成很大的困难,影响了磷灰石U-Pb同位素定年技术的推广应用。

### 1.5 锡石

锡石是锡多金属矿床中重要的矿石矿物,属于金红石族,当其有较高的铀-钍含量时,可以作为

U-Th-Pb和Pb-Pb同位素测年的对象。因此,利用锡石U-Pb同位素测年直接测定锡多金属矿床的成矿(锡矿化)时代,是非常有潜力的一种直接测定矿床成矿时代的技术方法。早在1992年便已有人尝试利用热电离质谱(TIMs)法进行锡石U-Pb同位素年龄测定,以确定锡多金属矿床的成矿(锡矿化)时代<sup>[20]</sup>。近年来我国地质工作者在利用锡石U-Pb同位素测年技术测定我国华南地区锡多金属矿床的成矿(锡矿化)时代方面也取得了重要的成果<sup>[21-22]</sup>。

各种成因不同的含铀矿物,其U-Pb同位素年龄的地质意义是不同的。许多地质学家早就注意到分别利用榍石、金红石、独居石、磷灰石、褐帘石、斜锆石及锡石等除了锆石之外的其他含铀矿物的U-Pb同位素测年法去解决不同的特定地质年代学问题,并取得了许多重要的成果<sup>[23-28]</sup>。但是对变质岩和矿床中含铀矿物的成因联系及其U-Pb同位素地质年代学的比较进行深入和系统的研究较为少见。文献<sup>[8]</sup>报导了加拿大一变质辉长岩中以冠状体共存的斜锆石与锆石的U-Pb同位素年龄结果,并研究了其中锆石与斜锆石的成因关系,认为冠状体中部的斜锆石U-Pb同位素年龄(1 170 Ma)是变质辉长岩的原岩生成年龄,而冠状体边部的锆石是在变质作用过程中由中部的斜锆石转化而来的,其U-Pb同位素年龄(1 045 Ma)是变质辉长岩的变质年龄。文献<sup>[24]</sup>报导了对大别超高压变质带的锆石与独居石U-Pb同位素年龄的比较。近年来作者对华北地区一些基性变质岩中锆石与斜锆石的成因关系及其U-Pb同位素地质年代学特点进行了比较研究<sup>[10]</sup>,对蓟县中新元古代地层下伏的变质岩中锆石与磷灰石的成因关系及其U-Pb同位素地质年代学进行了比较研究,对我国华南地区一些锡多金属矿床的锡石与锆石的U-Pb同位素地质年代学进行了比较研究,也获得一些初步成果。

如何从微区原位的角度去了解各种含铀矿物之间的成因联系,并进行这些含铀矿物的微区原位U-Pb同位素年龄测定,以及如何提高某些非放射成因初始普通铅含量较高,而放射成因铅含量相对较低的含铀矿物U-Pb同位素年龄的测定精度,以提高各种含铀矿物U-Pb同位素年龄的可比性,是做好变质岩和矿床中含铀矿物的成因联系及其U-Pb同位素地质年代学的比较研究工作的关键。近年来,随着高清晰度阴极发光和背散射图像技术<sup>[29]</sup>、激光拉曼光谱技术<sup>[30]</sup>、高精度电子探针测定技术、高灵敏度高

分辨率离子探针质谱技术、激光烧蚀等离子体质谱技术<sup>[31]</sup>以及结合分步提取Pb-Pb同位素的高精度热电离质谱法测年技术<sup>[32]</sup>等先进的仪器设备和技术的发展 and 推广应用,对各种含铀矿物进行U-Pb同位素年龄测定的灵敏度和精度以及空间分辨率越来越高,对极少量矿物,甚至对存在于锆石和其他矿物内部的细小含铀矿物包裹体进行准确鉴别和精确的U-Pb同位素年龄测定,也已成为可能。合理地利用各种含铀矿物的组合进行U-Pb同位素测年,对于全面认识相关的变质岩及矿床的生成和演化历史,从而更准确地构建其年代构造格架,建立新的成岩成矿模式具有重要的科学意义,对于寻找新的矿床和矿产资源也有一定的实际应用价值。

## 2 U-Pb同位素定年的三种方法

### 2.1 ID-TIMS法

ID-TIMS法是对锆石、斜锆石、金红石、榍石、钨石、独居石等各种含铀矿物进行U-Pb同位素年龄测定的经典方法,自加拿大地质学家在1973年<sup>[33]</sup>对这一方法作了重要改进后,便被应用于微克量锆石和斜锆石的U-Pb同位素年龄测定。自二十世纪八十年代以后,这一方法陆续被应用于金红石、榍石、独居石及钨石等各种含铀矿物的U-Pb同位素年龄测定。该方法要点是:用化学方法(通常用氢氟酸、盐酸和硝酸等化学试剂)将待测矿物在适当的温压条件下溶解。溶解前通常需加入定量的同位素稀释剂(spike)。矿物溶解后,需用离子交换色谱将U和Pb分别从样品溶液中分离出来,然后在热电离质谱仪上进行U和Pb的有关测定,经计算得到矿物的U-Pb同位素年龄。这种方法所用的同位素稀释剂,通常为<sup>205</sup>Pb-<sup>235</sup>U混合稀释剂或<sup>208</sup>Pb-<sup>235</sup>U混合稀释剂。<sup>205</sup>Pb是一种人工合成的Pb同位素,自然界中并不存在。用它作为Pb的稀释剂,可以在同一分析样中,既测定Pb的元素含量,又测定Pb的同位素组成,这对减少用于分析的样品量和提高分析精确度具有重要意义。

利用ID-TIMS法进行矿物U-Pb同位素年龄测定的优点是单次测定的精度较高,可测定的矿物年龄范围较广(从中生代到太古宙),而且不需要相应的标准矿物作校正,避免了寻找和制备标准矿物的困难。因此, ID-TIMS法被称为矿物U-Pb同位素年龄测定的“标准方法”。近年来随着低实验本底的

ID-TIMS技术的发展和用,用ID-TIMS法测定矿物U-Pb同位素年龄的精度越来越高,单次测定所需的矿物样品量越来越少。在许多条件较好的实验室,用ID-TIMS法对极少量矿物(单次测定所需的样品量可少至1 μg)进行精确的U-Pb同位素年龄测定,已经成为可能。

ID-TIMS法的局限性主要是无法进行矿物的微区原位U-Pb同位素年龄测定。但是,与在许多情况下具有复杂生成历史的锆石不同,许多岩石样品中的斜锆石、金红石、榍石、锡石及独居石等含铀矿物通常具有单一的U-Pb同位素年龄。因为这些矿物的成因比较单一,并无复杂的生成历史。因此,对于这些矿物样品而言,用ID-TIMS法进行多颗粒或单颗粒矿物U-Pb同位素年龄测定,亦可以得到准确可靠的结果,并不会出现在锆石测年时可能出现的获得无地质意义的混合年龄的情况。当然,正如前文提到的,在一些斜锆石与锆石共存的岩石中,斜锆石有时以细小包裹体或反应残余的形态存在于锆石内部。为了分别准确测定这些以细小包裹体或反应残余的形态存在的斜锆石及与其共存的锆石的U-Pb同位素年龄,就必须进行这些锆石和斜锆石的微区原位U-Pb同位素年龄测定。这时ID-TIMS法就无能为力了,必须利用SIMS法或LA-ICPMS法才能达到目的。

ID-TIMS法的另一局限性是样品的溶解及其中的U-Pb分离等前处理程序较繁杂,费时费力,而且要求很低的实验本底,只有条件较好的实验室才能做得到。

### 2.2 SIMS法

SIMS法最典型的仪器是高灵敏度高分辨率离子探针质谱(又称SHRIMP法)和CAMECA仪器。SHRIMP是20世纪80年代初期,澳大利亚科学家专为进行锆石微区原位U-Pb同位素年龄测定而开发的大型仪器,自投入使用以来在锆石微区原位U-Pb同位素年龄测定工作中发挥了巨大的作用。中国地质科学院地质研究所北京离子探针中心在2001年从澳大利亚引进了一台型号为SHRIMP II的大型仪器,对同位素地质年代学工作作出了重大贡献。据中国地质科学院报道,北京离子探针中心刘敦一研究员团队在科技部创新方法专项资助下,改善了SHRIMP II定年流程,建立了月岩锆石测年技术方法,与美国华盛顿大学合作对Appollo12和Appollo14登月获得的毫米级撞击熔融岩屑,进行了高精度的原位锆石离子探

针测年,厘定了月球早期历史几次重要事件的时代,精确测定雨海纪月球遭受强烈撞击事件年龄为39.2亿年。首次获得Apollo14熔融岩屑中磷灰石和陨磷钙钠石的离子探针U-Pb同位素年龄,对月球陨石SaU169样品中的锆石进行了离子探针测年,改写了国际普遍接受的月球雨海纪强烈撞击事件年龄为38.5亿年的传统认识,对月球早期演化历史研究做出了重要贡献,为我国探月工程未来采集月岩样品的年代学研究积累了宝贵经验。中国科学院地质与地球物理研究所近年从法国引进了CAMECA IMS-1280仪器,在锆石和斜锆石、金红石等含铀矿物的微区原位U-Pb同位素年龄测定工作中取得了许多重要的成果。

用SIMS法进行矿物的U-Pb同位素年龄测定不需要将矿物溶解,也不需要化学方法将U和Pb从矿物中分离出来,只需将待测矿物制作成样品靶,经抛光、镀金等制样处理,便可直接进行矿物的微区原位U-Pb同位素年龄测定。测定时仪器产生的一次离子(氧离子)轰击所选定的矿物微区,矿物的被轰击部分溅射出二次离子,经加速电压的作用和电磁场的分离,二次离子分别被离子计数器检测。根据被测矿物与相应标准矿物的二次离子中U-Pb同位素的强度关系,便可计算出被测矿物微区的U-Pb含量和U-Pb同位素年龄。更详细的测定原理和测定方法可见参考文献[34]。随着仪器性能和技术方法的改进,人们已越来越多地应用SIMS法对锆石、斜锆石、金红石、榍石、锡石及独居石等各种含铀矿物进行U-Pb同位素年龄测定。

用SIMS法进行各种含铀矿物U-Pb同位素年龄测定的优点是,可以进行矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定。特别是当被测矿物以细小包裹体或反应残余的形态存在于另一些矿物内部,需要对这些矿物分别进行U-Pb同位素年龄测定,以了解它们的年龄差异及成因关系时,矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定就显得特别重要。用SIMS法进行矿物微区U-Pb同位素年龄测定,不需要将矿物溶解,也无需化学分离,节省了人力物力。由于仪器的一次离子(氧离子)束可以聚焦得很小(10~30 μm),仪器有很高的空间分辨率,可以对一些珍稀岩石中发现的极少量矿物进行U-Pb同位素年龄测定,例如月岩的U-Pb同位素年龄测定。

目前用SIMS法进行矿物U-Pb同位素年龄测定

的局限性是,寻找和制备合适的矿物标准比较困难,而测定时如果不用相应的矿物标准来校正仪器,则不能完全排除不同矿物的基体效应所导致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄的误差。此外,根据文献<sup>[35]</sup>的研究,用SHRIMP法进行斜锆石U-Pb同位素年龄测定时,即使用标准斜锆石来校正仪器,也可能由于斜锆石在样品靶中放置的位置和角度不同而产生 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄的偏差。也就是有相同 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄的斜锆石,由于在样品靶中放置的位置和角度不同,会给出不同的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄。产生这种年龄偏差的机理还不是很清楚。这种年龄偏差有时会高达10%。因此,用SHRIMP法测定的斜锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 表面年龄的误差稍大,这对较年轻的寒武纪之后的基性岩中的斜锆石年龄测定不利。因为较年轻的寒武纪之后的斜锆石中,由 $^{235}\text{U}$ 衰变产生的 $^{207}\text{Pb}$ 含量极低,对 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值很难测准, $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄的误差通常较大,需要利用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄。而由于上述原因导致 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄误差也很大,因此很难获得这些斜锆石的准确U-Pb同位素年龄。在前寒武纪的斜锆石中,由 $^{235}\text{U}$ 衰变产生的 $^{207}\text{Pb}$ 含量相对较高,对 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值容易测准,可以获得比较准确的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄。而对于前寒武纪的斜锆石来说, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄是最有用的同位素年龄。因此,SIMS法比较适合用于前寒武纪的斜锆石U-Pb同位素年龄测定。

此外,用SIMS法进行矿物U-Pb同位素年龄测定的单次测定误差通常大于ID-TIMS法,因此,对于同一样品要进行更多次的测定,以求得较好的统计精确度。

### 2.3 LA-ICPMS法

LA-ICPMS法是自电感耦合等离子体质谱分析法,1985年首次得到应用以后,在20世纪90年代迅速发展起来的分析技术,现在已成为地球科学中重要的分析工具。其方法要点是:用激光束对所测定的矿物选定微区进行烧蚀,被烧蚀出来的物质在Ar等离子体中发生电离,然后用质谱仪对被电离物质进行同位素比值的测量,根据被测矿物与相应标准矿物的同位素比值测量结果进行有关元素含量及被测矿物同位素年龄的计算。所需设备是激光系统、等离子体(ICP)系统和质谱仪系统等。更详细的测

定原理和测定方法可见参考文献[36]。

用LA-ICPMS法进行矿物U-Pb同位素年龄测定的优点是,可以像SIMS法一样,进行矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定,测定过程更加简便快速,而LA-ICPMS法所需的仪器设备比SIMS法要简单、便宜得多,其运行成本也低得多。如果应用线扫描技术<sup>[37]</sup>和内部校正方法<sup>[31]</sup>以及多接收器质谱仪系统,用LA-ICPMS法不但可以得到精确的<sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb表面年龄,也可以得到较精确的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U表面年龄,这有利于扩大可以测定的矿物的年龄范围。

用LA-ICPMS法进行矿物U-Pb同位素年龄测定的局限性之一是,与SIMS法相比,目前其测定灵敏度较低,测定过程中消耗(烧蚀)掉的样品量比SIMS法要多,因此,只有对粒度较大(大于60 μm),U-Pb含量较高的矿物才能进行测定并获得合理的测定结果。这就限制了这一方法在矿物U-Pb同位素年龄测定中的更广泛应用,因为在一些样品中,粒度较大(大于60 μm)而U-Pb含量较高的含铀矿物较少见。

其另一局限性是,必须寻找和制备合适的矿物标准,因为测定时如果不用相应的矿物标准来校正仪器,则不能完全排除不同矿物的基体效应所导致的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U表面年龄的误差。随着LA-ICPMS测定灵敏度的提高,其应用潜力将是很大的。

### 3 选择U-Pb同位素定年矿物和定年方法的一些原则

在实际工作中,为了解决特定的地质年代学问题,需要进行U-Pb同位素定年时,最好根据从具体样品中分选得到的适合定年的含铀矿物的种类、数量、粒度大小、年龄范围、U-Pb含量、测年精度要求等因素,结合需要解决的地质年代学问题的目标要求,灵活地选择测定的矿物和测年技术方法。如果从样品中分选得到的适合测定的含铀矿物的种类和数量较多,粒度较大,U-Pb含量较高,则可以考虑用LA-ICPMS法进行多种矿物的U-Pb同位素年龄测定,这样可以简便快速地获得样品中多种含铀矿物的U-Pb同位素年龄,有利于合理地解释所获得的锆石和其他各种含铀矿物U-Pb同位素年龄的地质意义,获得更加全面和准确的地质年代学信息,进一步全

面地认识相关岩石或矿床的生成和演化历史。如果要求更高的测年精度,则可以考虑用ID-TIMS法进行测定。而如果从样品中分选得到的某些含铀矿物的数量较多,但是粒度较小,U-Pb含量较低,则最好采用ID-TIMS法进行测定。如果从样品中分选得到的某些含铀矿物的数量较少,粒度也较小,例如当斜锆石以细小包体或反应残余的形态存在于锆石内部,需要对这样的锆石及其内部的斜锆石分别进行U-Pb同位素年龄测定,以了解它们的年龄差异及成因关系时,SIMS法可能就是最好的选择了。对于较年轻的寒武纪之后的含铀矿物,如果从样品中分选得到的矿物的数量足够,则最好采用ID-TIMS法进行测定。或者在先用LA-ICPMS法进行测定的基础上,再选择性地采用ID-TIMS法进行补充测定,以提高测定的准确度和可靠性。总之,需要根据从具体样品中分选得到的含铀矿物的种类和数量、粒度大小、年龄范围、U-Pb含量、测年精度要求等因素,结合测年的目的要求,灵活地选择测年的矿物和测年技术方法,这对于获得比较理想的结果是非常重要的。

### 4 结论

作者的研究成果及近年来文献报道的资料均表明,常用于U-Pb同位素定年的各种含铀矿物和各种定年方法各有不同的特点和局限性及适用范围。锆石目前仍然是应用最广泛的U-Pb同位素定年矿物。ID-TIMS法目前仍是最精确可靠,适用年龄范围最广的方法,其局限性主要是无法进行矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定,但是对于大多数非锆石类矿物样品,这并不影响其测定的精确度和可靠性;SIMS法可以进行矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定,其局限性主要是对斜锆石等某些非锆石类含铀矿物的<sup>206</sup>Pb/<sup>238</sup>U和<sup>207</sup>Pb/<sup>235</sup>U表面年龄的测定精度稍差,因而,对寒武纪之后的这些矿物进行U-Pb同位素年龄测定的精度稍差;LA-ICPMS法可以进行矿物微区的原位U-Pb同位素年龄测定,而且适用的年龄范围也较广,其局限性是目前只有对粒度较大(大于60 μm),U-Pb含量较高的矿物才能进行测定并获得合理的测定结果。在实际工作中,根据从具体样品中分选得到的矿物种类和数量、粒度大小、年龄范围、U-Pb含量、测年精度要求等因素,灵活地选择U-Pb同位素测年技术方法,对于获得比较理想的结果是非常重要的。

## 参考文献:

- [1] 孙敏, 关鸿. 阜平杂岩年龄及其地质意义: 兼论前寒武纪高级变质地体的定年问题[J]. 岩石学报, 2001, 17(1): 145-156.
- [2] 毛德宝, 钟长汀, 陈志宏, 等. 承德北部高压基性麻粒岩的同位素年龄及其地质意义[J]. 岩石学报, 1999, 15(4): 524-531.
- [3] 王凯怡, 郝杰, Wilde S A, 等. 山西五台山—恒山地区晚太古—早元古代若干关键地质问题的再认识: 单颗粒锆石离子探针质谱年龄提出的地质制约[J]. 地质科学, 2000, 35(2): 175-184.
- [4] 李惠民, 李怀坤, 陆松年, 等. 用矿脉中热液锆石的 U-Pb 定年确定东坪金矿的成矿时代[J]. 地球学报, 1998, 15(增刊): 57-60.
- [5] 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1209-1211.
- [6] 吴昌华, 孙敏, 李惠民, 等. 乌拉山—集宁孔兹岩锆石激光探针等离子质谱(LA-ICP-MS) 年龄—孔兹岩沉积时限的年代学研究[J]. 岩石学报, 2006, 22(11): 2639-2654.
- [7] Wan Yusheng, Song Biao, Liu Dunyi, et al. SHRIMP U-Pb zircon geochronology of Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the North China Craton: Evidence for a major late Palaeoproterozoic tectonothermal event[J]. Precambrian Research, 2006, 149(3-4): 249-271.
- [8] Davidson A and van Breemen O. Baddeleyite-zircon relationships in coronitic metagabbro, Grenville Province, Ontario: implications for geochronology[J]. Contrib Mineral Petrol, 1988, 100: 291-299.
- [9] Kamo S L, Gower C F and Krogh T E. Birthdate for the Iapetus Ocean? A precise U-Pb zircon and baddeleyite age for the Long dikes, Southeast Labrador[J]. Geology, 1989, 17: 602-605.
- [10] 李惠民, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭造山带商南—西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石 U-Pb 同位素年龄的差异[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 653-659.
- [11] Zhang Chuan-Lin, Li Xian-Hua, Li Zheng-Xiang, et al. Neoproterozoic ultramafic-mafic-carbonatite complex and granitoids in Quruqtagh of northeastern Tarim Block, western China: Geochronology, geochemistry and tectonic implication [J]. Precambrian Research, 2007, 152(3-4): 149-169.
- [12] 李怀坤, 陆松年, 李惠民, 等. 侵入下马岭组的基性岩床的锆石和斜锆石 U-Pb 精确定年—对华北中元古界地层划分方案的制约[J]. 地质通报, 2009, 28(10): 1396-1404.
- [13] Mezger K, Hanson G N and Bohlen S R. High-precision U-Pb ages of metamorphic rutile: application to the cooling history of high-grade terranes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1989, 96: 106-118.
- [14] Kooijman E, Mezger K and Berndt J. Constraints on the U-Pb systematics of metamorphic rutile from in situ LA-ICP-MS analysis[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 293: 321-330.
- [15] 吴昌华, 李惠民, 钟长汀, 等. 内蒙古黄土窑孔兹岩系的锆石与金红石年龄研究[J]. 地质论评, 1998, 44(6): 618-626.
- [16] Li Qiuli, Lin Wei, Su Wen, et al. SIMS U-Pb rutile age of low-temperature eclogites from southwestern Chinese Tianshan, NW China. Lithos, 2011, 122: 76-86.
- [17] 李秋立, 李曙光, 周红英, 等. 超高压榴辉岩中金红石 U-Pb 年龄: 快速冷却的证据[J]. 科学通报, 2001, 46(19): 1655-1658.
- [18] Li Qiuli, Li Shuguang, Zhou Hongying, et al. Rutile U-Pb age for the ultrahigh pressure eclogite from the Dabie Mountains, central China: Evidence for rapid cooling[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(1): 62-65.
- [19] 周红英, 刘敦一, Nemchik A, 等. 鞍山地区 3.8 Ga 变质石英闪长岩遭受 3.0 Ga 构造事件叠加—来自磷灰石 SHRIMP U-Th-Pb 定年证据[J]. 地质论评, 2007, 53(1): 120-125.
- [20] Brian L G and Melyvn T J. Cassiterite: Potential for direct dating of mineral deposits and a precise age for the Bushveld Complex granites[J]. Geology, 1992, 20: 355-358.
- [21] 刘玉平, 李正祥, 李惠民, 等. 都龙锡铋矿床锡石和锆石 U-Pb 年代学: 滇东南白垩纪大规模花岗岩成岩—成矿事件[J]. 岩石学报, 2007, 23(5): 967-976.
- [22] Yuan Shunda, Peng Jiantang, Hu Ruizhong, et al. A precise U-Pb age on cassiterite from the Xianghualing tin-polymetallic deposit (Hunan, South China). Miner Deposita, DOI 10.1007/s00126-007-0166-y, Springer-Verlag 2007.
- [23] Sano Y, Oyama T, Terada K, et al. Ion microprobe U-Pb dating of apatite[J]. Chemical Geology, 1999, 153: 249-258.
- [24] Sano Y, Terada K, Hidaka H, et al. Paleoproterozoic thermal events recorded in the ~ 4.0 Ga Acasta gneiss, Canada: Evidence from SHRIMP U-Pb dating of apatite and zircon [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, 63(6): 899-905.
- [25] Cihan M, Evins P, Lisowiec N, et al. Time constraints on deformation and metamorphism from EPMA dating of monazite in the Proterozoic Robertson River Metamorphics, NE Australia[J]. Precambrian Research, 2006, 145(1-2): 1-23.
- [26] Wan Yusheng, Li Renwei, Wilde S A, et al. UHP metamorphism and exhumation of the Dabie Orogen: Evidence from SHRIMP dating of zircon and monazite from a UHP granitic gneiss cobble from the Hefei Basin[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(17): 4333-4348.
- [27] Liu Shuwen, Zhao Guochun, Wilde S A, et al. Th-U-Pb monazite geochronology of the Lvliang and Wutai Complexes: Constraints on the tectonothermal evolution of the Trans-North China Orogen[J]. Precambrian Research, 2006, 148(3-4): 205-224.
- [28] 刘玉龙, 陈江峰, 李惠民, 等. 白云鄂博矿床白云石型矿石中独居石单颗粒 U-Th-Pb-Sm-Nd 定年[J]. 岩石学报, 2005, 21(3): 881-888.
- [29] 陈莉, 徐军, 苏犁, 场发射环境扫描电子显微镜上阴极荧光谱仪特点及其在锆石研究中的应用[J]. 自然科学进展, 2005, 5(11): 1403-1408.

- [30] 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等. 中国苏北预先导孔 CC-SD-PP2 片麻岩中锆石的矿物包裹体及其超高压变质作用的证据[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 241-246.
- [31] Ingo H, Roberta L R, William F M. Precise elemental and isotope determination by simultaneous solution nebulization and laser ablation-ICP-MS: application to U-Pb geochronology[J]. *Chemical Geology*, 2000, 167: 405-425.
- [32] Frei R, Villa I M, Nagler Th F, Kramers J D, et al. Single mineral dating by the Pb-Pb step-leaching method: Assessing the mechanisms[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1997, 61(2): 393-414.
- [33] Krogh T E. A low contamination method for hydrothermal decomposition of zircon and extraction of U and Pb for isotopic age determinations[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 37: 485-494.
- [34] 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[J]. 地质论评, 2002, 48(增刊): 26-30.
- [35] Wingate M T D and Compston W. Crystal orientation effects during ion microprobe U-Pb analysis of baddeleyite[J]. *Chemical Geology*, 2000, 168: 75-97.
- [36] 西尔维斯特编, 林守麟, 胡圣虹, 刘勇胜, 等译. 地球科学中的激光剥蚀-ICPMS 原理和应用[M]. 北京: 地质出版社, 2003.
- [37] Li Xianhua, Liang Xirong, Sun Min, et al. Precise  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  age determination on zircons by laser ablation microprobe-inductively coupled plasma-mass spectrometry using continuous linear ablation[J]. *Chemical Geology*, 2001, 175: 209-219.

## U-Pb Isotope Dating Technique and Potential Prospects for Applying in Geology

ZHOU Hong-ying, LI Hui-min

(Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

**Abstract:** The principles of U-Pb isotope dating, the advantages and limitations of minerals for dating, several dating methods and the basic principles of selection for minerals and methods of U-Pb dating are discussed based mainly on our studies, combined with references recently reported. The potential prospects are discussed for applying in geology. The studies show that the different minerals for dating and different methods of U-Pb dating have different characteristics and limitations. It is very important to select minerals for dating and methods of U-Pb dating according to the mineral content, grain size, age range, U-Pb content and dating precision requirement of the samples to get relatively ideal results.

**Keywords:** U-Pb isotope; dating technique; potential prospects