

•方法与应用•

磷灰石(U_{Th})/He 定年技术及应用简介

保增宽^{1,2}, 袁万明¹, 王世成¹, 汤云晖¹, 韩春明¹

(1. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要: 本文阐述了磷灰石(U_{Th})/He 定年技术的基本原理和方法、影响因素以及该技术在地质研究中的应用。磷灰石(U_{Th})/He 定年是近年来发展起来的一种新型低温热年代学技术,能够给出地质体在 40~85 °C 低温范围内的独特信息。同裂变径迹定年技术一样,磷灰石(U_{Th})/He 技术可用于年轻地质体的定年,也可确定时代较老的地质体最后一次热事件发生的时间。由于磷灰石(U_{Th})/He 年龄数据与样品的海拔或埋藏深度密切相关,所以能够很好地约束古地形。结合其他同位素技术如裂变径迹定年技术等还可进行系统的热演化分析,如盆地的热史演化。与其他同位素定年技术相比,磷灰石(U_{Th})/He 定年技术具有测量方便、精度高、所需样品数量少等优点。虽然这种技术目前尚处于不断完善之中,但仍不失为研究地质体低温热年代信息的一种有效方法。

关键词: 定年方法; (U_{Th})/He; 低温热年代学; 磷灰石; 热历史

中图分类号: P597+.3; P578.92+2

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2005)02-0126-07

Apatite (U_{Th})/He dating and its application

BAO Zeng_kuan^{1,2}, YUAN Wan_ming¹, WANG Shi_cheng¹, TANG Yun_hui¹ and HAN Chun_ming¹

(1. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China; 2. Graduate School of Chinese

Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This paper presents an overview of the fundamentals, techniques, influencing factors, and applications of the apatite (U_{Th})/He dating method. (U_{Th})/He dating of apatite is a newly developed low temperature thermochronometry and has been gradually applied to different geological aspects, such as dating, tectonics, geological thermal history and paleotopography. The closure temperature of the apatite (U_{Th})/He age is only about 75 °C, which is lower than that of any other known technique, suggesting that apatite He age provides some information on the final stages of cooling. By combining apatite (U_{Th})/He with other methods such as feldspar multidomain thermochronometry and fission track technique, more detailed and robust cooling histories may be obtained. Compared with other techniques, the attractions of the apatite He method lie in sensitivity to previously inaccessible temperature ranges, high precision and less sample mass. Although this technique remains at the developing stage, it may after all be accepted as a quite effective method for the low temperature thermochronology. It is noted that this field is growing rapidly, and what is presented in this paper is likely to be superseded in the coming years.

Key words: dating method; (U_{Th})/He; low temperature thermochronometry; apatite; thermal history

利用 U、Th 衰变产生的⁴He 进行矿物定年,这一 (U_{Th})/He 定年方法的研究和应用均非常有限。究方法的可能性早已为人们所知,但是在很长时间内,其原因,一是由于人们无法解释偏低的(U_{Th})/He

收稿日期: 2004-07-12; 修订日期: 2004-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40072068, 10175076, 10475093); 国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409804)

作者简介: 保增宽(1978-), 男, 硕士研究生, 从事固体核径迹及其应用研究, Tel: 010-88233198, E-mail: sky_sun_moon@126.com.

年龄值;二是由于天然 He 在矿物中的含量很少超过 $n \times 10^{-4}$, 当时化学测试手段的测试精度限制了这一技术的发展。再加之 U_Pb、Rb_Sr 和 K_Ar 等可靠定年技术快速发展, 使 (U_Th)/He 定年技术实际上处于停滞状态。1963 年 Damon 等提出样品的 (U_Th)/He 年龄比样品实际年龄小的原因是 He 的扩散丢失。1987 年 Zeitler 等研究认为磷灰石 He 年龄可以解释为通过较低温度的冷却年龄, 因而可能提供岩石低温冷却历史的重要信息, 并且指出了 (U_Th)/He 放射性测年具有作为低温温度计的潜力, 因此这项技术又引起了人们的极大兴趣和关注。美国加州理工学院同位素研究室的 Farley 教授自 1990 年起一直致力于磷灰石 (U_Th)/He 定年技术的研究, 并且做了大量的基础工作 (Farley *et al.*, 1996, 2002; Farley, 2000, 2002)。目前磷灰石 (U_Th)/He 定年作为一种严格、定量的技术已经广泛应用于低温热年代学和低温热演化的研究中。这一技术在国外的研究相对较多, 许多相关研究单位都建立了 (U_Th)/He 热年代学实验室, 国内却对此研究较少, 学术界对其关注不够, 更无 (U_Th)/He 热年代学实验室建立, 有关样品的 He 年龄也都是在国外测试。本文拟对磷灰石 (U_Th)/He 定年技术的基本原理和方法、影响因素以及在地质方面的应用做必要的论述, 力求使人们对这种方法有所了解, 并以此引起更多的关注。

1 磷灰石 (U_Th)/He 定年技术的原理和方法

磷灰石 (U_Th)/He 定年技术的原理是根据磷灰石颗粒中 U、Th 衰变产生 He 发展而来的。通过测量磷灰石样品中放射性 He、U 和 Th 的含量, 就可以获得 (U_Th)/He 的年龄。

1.1 He 的生成及定年原理

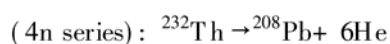
^4He 原子核 (α 粒子) 是由 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 的一系列衰变产生的。具体如下:



$$t_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{ a}$$



$$t_{1/2} = 7.04 \times 10^8 \text{ a}$$



$$t_{1/2} = 1.401 \times 10^{10} \text{ a}$$

实际上所有矿物的绝大部分放射性 He 均来自

铀系元素的衰变。磷灰石中对 He 起主要贡献的是 ^{238}U 、 ^{235}U 和 ^{232}Th 系列, 因此 He 产生的基本方程 (Farley, 2002) 为:

$$^4\text{He} = 8^{238}\text{U} [\exp(\lambda_{238}t) - 1] + 7(^{238}\text{U}/137.88)$$

$$[\exp(\lambda_{235}t) - 1] + 6^{232}\text{Th} [\exp(\lambda_{232}t) - 1] \quad (1)$$

这里 ^4He 、U 和 Th 均指测量的原子数, t 为放射性积累的时间或者 He 的年龄, λ_{238} 、 λ_{235} 、 λ_{232} 是 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{232}Th 的衰变常数。U 和 Th 前面的系数是每个衰变系列释放的 α 粒子数目。(1/137.88) 代表了现今的 ^{235}U 和 ^{238}U 比率 (丰度之比)。这个方程成立的条件是在衰变链中所有的子体都处于永久平衡。对于大多数实际应用来说这个条件成立, 但是在某些情况下, 例如对年轻火山岩定年时, 则必须考虑非永久平衡的影响。

方程 (1) 假定在定年晶体中没有原始 ^4He 的存在, 大多数情况下这个假设也成立。由于大气中 He 的含量非常低 (只有 5×10^{-6} 左右), 因此在运用 (U_Th)/He 定年时可忽略大气中 He 的混入。但在有些情况下, 流体包裹体会带入地壳或地幔中的放射成因 He, 这对于 He 年龄有较大的影响。此外处于岩浆房中的晶体的不完全去气也会对 He 定年产生影响。

1.2 U、Th、He 含量的测量

1.2.1 双样品法

加州理工学院同位素研究室最初就是采用双样品测量 U、Th、He 的含量。通过稀有气体仪器 (MAP 215_50) 上一份样品的峰值来测量 He 的含量, 而采用同位素稀释热离子质谱对另外一份样品中 U、Th 含量进行测量 (Wolf *et al.*, 1996a)。双样品测量方法一个严重的不足是每等份样品的最小质量限制。由于颗粒中 U、Th 含量不均一, 所以每等份样品必须足够大才可以使每个颗粒中 U、Th 的差别达到均衡。对一给定样品如果没有仔细研究, 那么就很难估计多大的样品才能够保证均一, 一般每等份的样品至少需要几毫克。

1.2.2 单样品法

为了克服双样品法的不足而通过分析同一样品中的母体和子体来测量 U、Th、He 的含量。单样品技术的一个好处是不需要称量样品, 把测量的子体/母体比值代入方程 (1) 可以直接得到年龄值。在加州理工学院, 具体的技术细节如下:

(1) 手工挑选大小适合且没有包体的磷灰石晶体。测量 α 辐射校正, 并将样品放进一个不锈钢的

容器中,密封容器使其对颗粒密封但气体可自由交换。

(2) 耐热真空炉经过抽气、排气后会形成一个本底,如果本底值很高就重复上面的操作。当本底值达到要求后,把容器放入炉内中在 950 °C 下加热 20 min。大量的实验表明这一时间-温度组合足以去除小于 200 μm 无包体的磷灰石颗粒中的所有气体。把析出的气体同已知含量为 99% 以上的 ^3He 进行混合,然后采用保持在 16 K 的低温条件下的木炭进行浓集。将提纯后的 He 输入四级质谱仪,在静态模式下对 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 比率进行 2 min 的测量,最后对所有的系统进行抽气。

(3) 对该样品在 950 °C 下再加热 20 min,然后重复上面的测量步骤。实际测量中有一定包体气体的析出,如果含有 He 那么将会干扰分析的结果。

(4) He 分析完后,把容器从炉子中取出并打开,检查容器以确保所有的颗粒都在上面(偶尔会由于盖子没有焊接好或容器的变形而导致颗粒的丢失)。颗粒丢失会影响年龄值,因为测量母体含量的样品小于子体而导致年龄值偏高。之后将颗粒移入聚四氟乙烯槽中。

(5) 将磷灰石溶解于浓硝酸中,与已知含量的 ^{230}Th 和 ^{235}U 混合,用水稀释到预期的体积(通常为 2 mL)。将溶液在 90 °C 下加热 1 h 以上以确保完全溶解和样品混合均匀。然后用等离子质谱直接测量 Th 和 U 的比率。

1.2.3 激光法

目前由于采用了激光技术,所以测量样品中 He 含量非常方便迅速。具体的技术细节与单样品法类似,不同的是采用激光加热样品来提取 He。将单颗粒或者多颗粒样品放入金属箔容器中用 CO_2 激光加热,条件是 1 200~ 1 500 °C, 2~ 3 min。然后用四极质谱计对收集的 He 进行测量(Stuart, 1999)。U、Th 的含量可通过 ICP-MS 仪器对 ^{229}Th 和 ^{233}U 进行同位素稀释测量。采用激光加热样品的一个潜在问题是可能会造成 U、Th 的蒸发丢失,所以在实验时必须注意这一问题。

1.3 数据的解释

首先要明确磷灰石 He 年龄是样品在较低温度(40~ 85 °C)的冷却年龄,而不是结晶年龄(极快速冷却的火山岩样品除外)。解释 He 年龄的最简单方法是给出样品的 $t-T$ 轨迹。Wolf 等(1998)提出了一个可以给出任意 $t-T$ 轨迹和测量扩散率参数的数值导

向模型。Farley 教授提供的软件可以对任何输入的热历史以及任何半径的颗粒进行磷灰石(U-Th)/He 年龄模拟(Farley, 2002)。通过对不同热历史的模拟年龄与实际测量的 He 年龄的比较,能够给出样品可能经历的热历史。由于磷灰石(U-Th)/He 定年方法还未成熟,所以在对获得的 He 年龄进行地质解释时,最好与其他定年方法如裂变径迹或 Ar/Ar 等测年相结合,并考虑实际的地质情况。

2 磷灰石(U-Th)/He 定年技术的影响因素

磷灰石(U-Th)/He 定年体系是一个封闭体系,理想情况下矿物晶体中的 He 全部来自 U、Th 放射性同位素的衰变,既无继承 He 也无 He 的丢失。任何破坏(U-Th)/He 定年封闭体系的因素均会影响该年龄值的准确性。破坏(U-Th)/He 定年封闭体系的外因主要有构造活动、岩浆作用、热作用等,而 α 粒子的运移距离、He 的扩散行为、粒径和矿物包体等为其主要内因。本文主要就其内部影响因素进行讨论。

2.1 α 辐射运移及其校正

磷灰石矿物颗粒中 U、Th 衰变释放的 α 粒子具有很大的动能,这种动能使 α 粒子在晶体中的运移距离可达数十微米,结果导致母体和子体在空间上相对分离。矿物中母体含量分布不均匀必然会导致不均一的 He 年龄。人们定义 α 粒子从母体开始运移点到运移停止并重新定位点的直线距离为 α 停止距离(吴堃虹等, 2002),这种停止距离一般为 12~ 34 μm (Farley *et al.*, 1996)。由此可见, α 停止距离和矿物的粒径与 He 的丢失关系密切,所以在挑选矿物时必须考虑矿物的粒径(Reiners *et al.*, 2001)。

假设 α 粒子停留在以母体为中心、半径等于停止距离的球面上,则图 1a 表示了磷灰石晶体上 α 衰变的 3 种结果。若母体所处的位置离晶体边缘的距离大于停止距离,那么无论 α 粒子的方向如何它都会保留在晶体的内部。当母体距离边缘的距离在一个停止距离以内,那么 α 粒子就有可能射出晶体。如果母体临近颗粒的边缘,则 α 粒子射出的几率会增加(图 1b)。晶体外部发生的衰变,也可能使一部分 α 粒子从外部进入所研究的晶体中从而影响 He 的测定。这种现象一般只发生在距晶体最外层表面约 20 μm 左右的地方,所以一个简单的解决方法是

用化学方法或机械方法除去定年颗粒的最外层。因为颗粒的边缘是 He 扩散丢失的位置, 因此扩散运移的结果使得颗粒边缘的 He 浓度比内部的低。对于一些实际应用, 例如对快速冷却矿物(来自火山碎屑)的定年, 或者对扩散梯度大于 α 射出或加入的距离的大颗粒来说, 这种方法也许很适合, 但是当扩散和 α 射出的边界重合时, 去除最外层的表面一般会导致错误的年龄。

Farley 等(1996)在测量颗粒大小和形状的基础

上提出了一个定量模型来校正由于较长的 α 停止距离导致的 He 年龄偏差。在这个模型中用 F_T 参数来校正 α 射出效应。 F_T 参数是晶体表面与体积比(设为 β)和 α 粒子停止距离的函数($F_T = 1 + a_1\beta + a_2\beta^2$), 其校正值介于 0.65~ 0.85 之间, 磷灰石典型的六方棱柱的 F_T 值为 0.75(Farley *et al.*, 2000)。对于尺寸较小的颗粒, F_T 随着颗粒的减小而急剧变化, F_T 的误差也随之增大。这种校正 α 射出效应模型的最大问题在于假设母体具有均一的分布, 带状晶体就打破了这种假设。矿物中 U、Th 分带对 He 定年的影响程度还未彻底查明。

2.2 He 的扩散行为

磷灰石颗粒中 He 的保留特性对热年代学和一定程度上的绝对定年都是非常重要的。众所周知, He 不能保存在石英、砂岩和云母中, 所以这些岩石没有明显的潜力进行任何形式的 He 定年研究。但是, He 可以保留在磷灰石、橄榄岩、辉石、闪石、石榴石、未变质锆石、未变质榍石、磁铁矿、赤铁矿和可能的玄武玻璃中。因此磷灰石矿物颗粒中 He 的扩散行为对 (U_Th)/He 定年也有重要的影响。人们可通过稳定加热法和分步升温法, 并采用限定阿仑尼乌斯关系式的参数来研究磷灰石中 He 的扩散行为 (Farley, 2002):

$$D/a^2 = D_0/a^2 e^{-E_a/RT} \quad (2)$$

这里, D 为扩散率, D_0 是温度无限高时的扩散率, E_a 是活化能, R 为气体常数, T 为开氏温度, a 为扩散区域的半径。杜兰戈(Durango)磷灰石(一种普通的“标准”磷灰石, Young *et al.*, 1969)以及其他类型磷灰石中的 He 扩散均服从阿仑尼乌斯关系式(方程 2), 说明磷灰石中 He 的扩散至少在温度小于 300 °C 时具有单一的热活性体积扩散过程。高精度的实验表明, 磷灰石 He 扩散的活化能介于 32~ 38 kcal/mol 之间。在杜兰戈磷灰石中, 扩散区域就是颗粒本身, 扩散率 D 随颗粒半径的大小而变化。由于杜兰戈磷灰石中 He 的扩散是各向同性的, 因此扩散的相关尺寸就是棱柱的半径即 He 扩散丢失的最短路径。精确的观察表明, 半径为 80~ 90 μm 的磷灰石其封闭温度为 70 °C。如上所述, α 粒子射出效应影响 He 的浓度特征从而使封闭温度有些偏高(Farley, 2002)。

Wolf 等(1996b)、Warnock 等(1997)以及 House 等(1999)的研究工作证实了 He 部分保留区(Helium Partial Retention Zone, HePRZ)的存在。He 部分保留区的位置取决于地壳的热历史, 但是一般位于 40

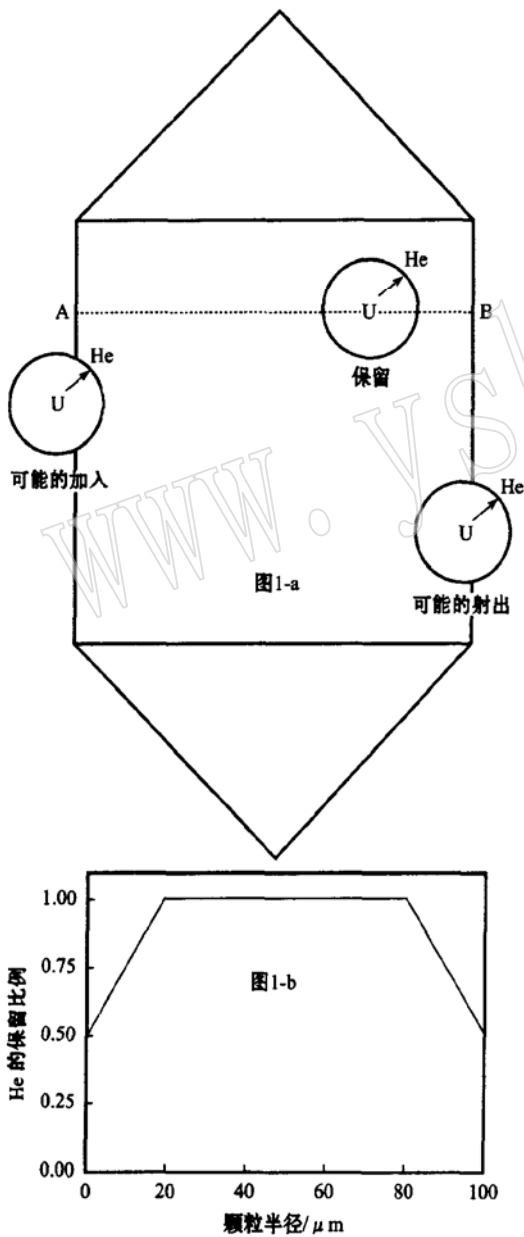


图 1 α 停止距离对 He 保留特性的影响(Farley, 2002)
Fig. 1 The effects of α stopping distance on He retention
(after Farley, 2002)

~ 80 °C, 对应的地表深度为 1~ 3 km (Wolf *et al.*, 1998; 图 2)。Stockli 等 (2000) 证实了外推实验数据的正确性, 他们在加州白山一个快速剥蚀的地块中发现了—个界限十分明显的 He 的部分保留区, 位于同样界限明显的磷灰石裂变径迹部分退火带之上。He 的部分保留区预示了在这种地温梯度下, 用实验数据外推的结果与观察的结果相当一致。这些研究有力地证明, 对目前研究的大多数磷灰石来说实验数据足以描述 He 的扩散特征。然而确立这些数据的普遍性和化学替代以及缺陷对扩散率产生的可能效应, 需要做进一步的工作, 所以在将实验数据外推时还应十分小心。

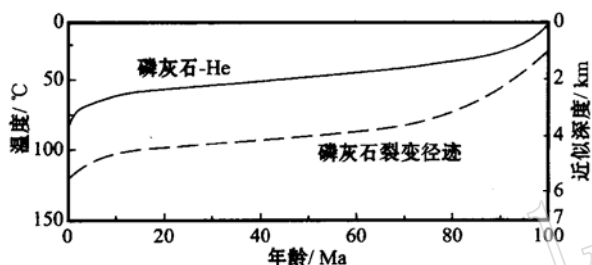


图 2 磷灰石 He 部分保留区和磷灰石裂变径迹退火带 (Wolf 等, 1998)

Fig. 2 The helium partial retention zone for apatite and the apatite fission track annealing zone (Wolf *et al.*, 1998)

2.3 矿物包体

磷灰石 He 定年的另一个困难是定年矿物中往往有许多 U、Th 含量很高的小包体, 造成颗粒中 He 过剩从而使年龄值偏大。这个问题是 Lippolt 等 (1994) 首先提出来的, House 等 (1997) 对此做了进一步的阐述。大多数包体为锆石或磷灰石, 也有独居石、磷钇矿、金红石等其他矿物包体, 但当这些包体所含的 U、Th 含量较低时不会造成很大的影响。

许多情况下磷灰石中的包体在挑选过程中可以被发现和排除掉。在加州理工学院同位素实验室, 磷灰石颗粒是在 120 倍的双目显微镜下采用透射光和正交偏光挑选的。当磷灰石消光时即使是很小的矿物包体如锆石也很明显, 在某些情况下整个颗粒几乎全是包体, 这些颗粒在分析之前是很容易被排除的。只有当包体方向与 *c* 轴平行, 并且与磷灰石主矿物同时消光时, 这些包体就很难被发现和排除。因为 He 的含量对 (U、Th)/He 定年技术的影响很大, 因此在挑选矿物颗粒时尽可能避免矿物包体。

3 磷灰石 (U、Th)/He 定年技术在地质上的应用

磷灰石 (U、Th)/He 定年技术有效地记录了样品经历较低温度范围 (40~ 85 °C) 的时代与温度信息, 即地质热历史。同其他技术, 例如裂变径迹方法相比, 磷灰石 He 年龄与海拔的关系特征能够更严格地限定冷却历史 (Wolf *et al.*, 1998)。将磷灰石 He 年龄同其他方法, 例如长石 Ar/Ar 多微区热年代法 (Lovera *et al.*, 1989) 和裂变径迹技术 (Gallagher, 1995) 相结合, 可得到比以前更为详细和准确的冷却历史, 如上地壳的低温热历史、地质事件发生的时代以及地壳的运动速率。

3.1 地质体定年

磷灰石 (U、Th)/He 定年技术既可以反映时代很新的地质体, 也可以约束时代较老的地质体最后一次热事件发生的时间, 结合其他封闭温度较高的同位素定年体系, 还可以进行系统的热演化分析。Reiners 等 (2003) 测得大别山脉核部的磷灰石 (U、Th)/He 年龄为 33~ 38 Ma, 并推测该区新生代的剥蚀作用可能是 35~ 40 Ma 印度-亚洲板块碰撞的远场效应。Spotila 等 (2001) 从加州南部 San Geronio Pass 的圣安第斯断裂带两盘之间快速剥蚀的地壳碎裂物中, 得到精度为 100 ka (2 σ) 的 He 年龄为 1.5 Ma 左右。在 1 km 垂直断面上, 8 个样品的 He 年龄值为 1.39 \pm 0.10 Ma (2 σ) 到 1.64 \pm 0.11 Ma。这些高精度年龄值不仅约束了碎裂物快速剥蚀发生的时代, 而且也相对严格地限定了剥蚀的速率。Stockli 等 (2000) 在加州东部的白山地区测得深成岩中无包体磷灰石 (U、Th)/He 年龄为 50~ 55 Ma 左右, 并且 He 年龄随着构造古深度增加从 55 Ma 下降到几个 Ma, 这正好与 He 部分保留区的剥蚀深度相对应。这种对应模式证明了快速剥蚀发生的时间是 11 Ma 左右。

3.2 盆地热史研究

Green 等 (2003) 对奥特威 (Otway) 盆地 7 个测井地区晚中新世抬升和 He 有效扩散机制进行 (U、Th)/He 研究, 并结合 AFTA 和镜质体反射率的新资料, 认为 7 个测井的详细热史恢复为研究区提供了一个更为严格的热史框架, 其预测和实测年龄一致性非常高。这同时说明在实验条件下 He 的扩散行为可以明确地外推到地质条件下, 这些外推结果证实 Otway 盆地的绝大部分都经历了从 10 Ma 左右开

始的晚第三纪沉积。这与晚中新世通过澳大利亚东南部不一致沉积的认识高度一致,最近的同位素地质证据表明它代表了一个主要的剥蚀期。磷灰石 (U_Th)/He 方法提高了定年的精确性和古热史量级,这对确定构造形成后石油生成的时代以及更加有效的勘探均有很重要的意义。

3.3 地质构造研究

Reiners 等 (2003) 对我国大别山构造带的演化进行了磷灰石和锆石的 (U_Th)/He 定年研究。大别山构造带在三叠纪发生了中朝克拉通的碰撞,早中白垩纪又经历了扩张和岩浆活动。新生代的剥蚀到底是由什么原因造成的, Reiners 等通过对该地区磷灰石和锆石的 He 年龄研究得出: 锆石年龄 (封闭温度为 200 °C 左右) 记录了早白垩世 (外侧)、中白垩世 (核部) 时期通过 200 °C 的冷却历史,这与钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 的模式年龄一致。在山脉的核部,磷灰石 He 年龄 (封闭温度为 70 °C) 为 33~ 38 Ma,明显反映了与之不同并且非常晚的冷却事件。这也许是 35~ 40 Ma 左右印度克拉通和亚洲克拉通碰撞的场效应的结果。这些数据表明这种碰撞能够对地壳剥蚀产生远程效应,但只有像磷灰石 He 这样低的热年代计时器才能记录到这种效应,因为发生碰撞的地体下插地壳的深度可能没有超过 3~ 4 km。

3.4 古地形研究

磷灰石 He 年龄对地壳深度在 1~ 3 km 的区域比较灵敏。在这些区域,地壳的温度强烈地受冷却面位置的影响,其等温线反映了上部地形特征。House 等 (1998) 从内华达山脉南部和中部得到的 2 000 m 长水平剖面的结果表明,接近圣华金 (San Joaquin) 和凯因河 (Kings river) 的磷灰石 He 年龄比位于山脊样品的 He 年龄几乎大 20 Ma。因为海拔高度相同时,河谷处样品的冷却早于山脊处的冷却,所以河谷处样品的 (U_Th)/He 年龄值较山脊处的大。这说明了 San Joaquin、Kings 河流的下切始于 60~ 80 Ma 以前。House 等 (1998) 建立的模型表明 He 年龄的变化幅度为 26.7 Ma/km,与峡谷-山脊的起伏变化是一致的。

4 结语

近年来磷灰石 (U_Th)/He 定年技术发展迅速,国外一些研究单位相继建立了专门实验室。与其他技术相比,磷灰石 (U_Th)/He 方法有两个明显特点,

一是对以往不可及的温度范围比较灵敏,二是精度较高。将磷灰石 He 年龄方法同其他方法相结合,会得到比以前更为详细和准确的冷却历史,其作用和意义也更大。因此,这种定年技术在低温热年代学研究中有着独特的优势,前景广阔,现已在资源环境等方面得到应用,获得了诸多引人注目的成果。但是作为一种新的定年方法,磷灰石 (U_Th)/He 定年技术还存在一些问题,如磷灰石样品的标准问题、He 的复合扩散机理问题、各实验室数据的可比性以及定年矿物内小包体对年龄的影响等。另外将磷灰石 (U_Th)/He 定年技术同其他同位素定年技术相互联系起来之前,建立各种技术之间的相互校正仍需进行深入的工作。

References

- Damon P E and Green W D. 1963. Investigations of the Helium Age Dating Method by Stable Isotope Dilution Technique, Radioactive Dating [M]. Vienna: IAEA, 55~ 69.
- Farley K A. 2000. Helium diffusion from apatite: general behaviour as illustrated by Durango fluorapatite [J]. *Journal of Geophysical Research*, 105: 2 903~ 2 914.
- Farley K A. 2002. (U_Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications [A]. Porcelli P D, Ballentine C J, Wieler R. Noble Gas Geochemistry, Reviews in Mineralogy and Geochemistry [C], 47: 819~ 843.
- Farley K A, Kohn B and Pillans B. 2002. (U_Th)/He dating of Pleistocene zircon and apatite: A test case from the Rangitawa tephra, North Island, New Zealand [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 201: 117~ 125.
- Farley K A, Wolf R A and Silver L T. 1996. The effects of long alpha-stopping distances on (U_Th)/He ages [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 4 223~ 4 229.
- Gallagher K. 1995. Evolving temperature histories from apatite fission-track data [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 136: 421~ 435.
- Green Paul F, Ian R Duddy and Peter V Crowhurst. 2003. Integrated (U_Th)/He Dating, AFTA and Vitrinite Reflectance Results in Seven Otway Basin Wells Confirm Regional Late Miocene Exhumation and Validate Helium Diffusion Systematics [M]. AAPG Annual Convention, Salt Lake City, Utah.
- House M, Farley K and Kohn B. 1999. An empirical test of helium diffusion in apatite: borehole data from the Otway basin, Australia [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 170: 463~ 474.
- House M, Wernicke B and Farley K. 1998. Dating topography of the Sierra Nevada, California, using apatite (U_Th)/He ages [J]. *Nature*, 396: 66~ 69.
- House M, Wernicke B, Farley K, et al. 1997. Cenozoic thermal evolu-

- tion of the central Sierra Nevada from (U_Th)/He thermochronometry[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 151: 167~ 179.
- Lippolt H J, Leitz M, Wernicke R S, *et al.* 1994. (U_Th)/He dating of apatite: experience with samples from different geochemical environments[J]. *Chemical Geology*, 112: 179~ 191.
- Lovera O, Richter F and Harrison T. 1989. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronometry for slowly cooled samples having a distribution of diffusion domain sizes[J]. *Journal of Geophysical Research*, 94: 17917~ 17935.
- Reiners P W and Farley K A. 2001. Influence of crystal size on apatite (U_Th)/He thermochronology: an example from the Bighorn mountains, Wyoming[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 188: 413~ 420.
- Reiners P W, Zhou Zuyi, Ehlers T A, *et al.* 2003. Post-orogenic evolution of the Dabie Shan, Eastern China, from (U_Th)/He and fission-track thermochronology [J]. *American Journal of Science*, 303: 489~ 518.
- Spotila J A, Farley K A, Yule J D, *et al.* 2001. Near-field convergence along the San Andreas fault zone in southern California. based on exhumation constrained by (U_Th)/He dating[J]. *Journal of Geophysical Research*, 106(B12): 30909~ 30922.
- Stockli D, Farley K and Dumitri T A. 2000. Calibration of the (U_Th)/He thermochronometer on an exhumed fault block, White Mountains, California[J]. *Geology*, 28: 983~ 986.
- Stuart F. 1999. Laser melting of apatite for (U_Th)/He chronology. *Progress to date*[J]. *Eos*, 80(F): 169.
- Warnock A C, Zeitler P K, Wolf R A, *et al.* 1997. An evaluation of low-temperature apatite U_Th/He thermochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61: 5371~ 5377.
- Wolf R A, Farley K A and Kass D M. 1998. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U_Th)/He thermochronometer[J]. *Chemical Geology*, 148: 105~ 114.
- Wolf R A, Farley K A and Silver L T. 1996a. Assessment of (U_Th)/He thermochronometry: the low-temperature history of the San Jacinto Mountains, California[J]. *Geology*, 25: 65~ 68.
- Wolf R A, Farley K A and Silver L T. 1996b. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 4231~ 4240.
- WU Qian_hong and LIU Hou_chang. 2002. (U_Th)/He dating—A new method of low-temperature thermochronometry [J]. *Advance in Earth Sciences*, 17(1): 126~ 131 (in Chinese with English abstract).
- Young E, Myers A, Munson E, *et al.* 1969. Mineralogy and geochemistry of fluorapatite from Cerro de Mercado, Durango, Mexico [M]. United States Geological Survey, Professional Paper, 650 (D): 84~ 93.
- Zeitler P K, Herczig A L, McDougall I, *et al.* 1987. U_Th/He dating of apatite: A potential thermochronometer [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 51: 2865~ 2868.

附中文参考文献

- 吴玺虹,刘厚昌. 2002. (U_Th)/He 定年——低温热年代学研究的一种新技术[J]. *地球科学进展*, 17(1): 126~ 131.

•新书介绍•

《中国火山岩地区金矿床》

李兆鼐 等著 2004年 北京:地质出版社 350千字 234页 定价:38元

该书是原国家科委科研课题“火山岩、次火山岩地区金矿的主要类型、控矿条件、矿床模式和找矿方向”的系统总结。全书共分七章,分别介绍了中国火山岩地区金矿床成矿背景,金矿床主要特点和类型,近地表-热流体系统金矿床,与侵入体有关的金矿床,金矿成矿的物质、能量背景场及控矿系统,金矿的局部富集模式和成矿机制及中国火山岩地区金矿的地质分布和远景区。该书作者(1)通过大量实际资料的概括理论分析,论证了火山岩地区金矿不同成矿区域的地质环境和成矿地质背景,其中包括大陆活动带和复活造山带的各5种类型,并注意到了前寒武纪结晶基底上古火山作用中金的成矿作用特点;(2)对火山岩地区金矿床进行了成因类型和工业类型的详细划分,强调两种类型划分是一个互相匹配的分类系统,建立了矿床的地质找矿模式和矿床成因模式;(3)分析了不同地质环境中各类金矿成矿作用的物理化学条件、制约因素以及不同物化条件下Au的迁移、活化的形式和沉淀机制,详细论述了区域性控矿条件、富集因素、形成机制,系统划分出与火山作用有关的6个金矿控矿系统,认为火山岩地区金矿在空间上主要受多块体拼合结合边界的控制,注意到不同成矿时间对成矿作用的影响,提出了“多因素匹配-四维成矿理论”的新的找矿思路;(4)总结了我国古生代造山带和东部中生代活动带火山岩地区金矿特点和成矿规律,指出它们与国外新生代岛弧地区的浅成热液型金矿成矿特征相比有其特殊性。本书在一定程度上反映了当代中国火山岩地区金矿地质概貌和研究水平。

有需要此书者,可直接与《岩石矿物学杂志》编辑部联系。