

磷灰石裂变径迹 (AFT) 研究进展

周海¹, 雷川²

(1. 西北大学地质学系, 陕西 西安 710069; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所
兰州油气资源研究中心, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 磷灰石裂变径迹是一种揭示岩石低温热年代学的有力工具。通过对国内外相关文献的广泛阅读, 综述了磷灰石裂变径迹分析方法的原理、研究进展和地质意义及其在相关地质领域的应用。总结了影响磷灰石裂变径迹退火行为的主要影响因素, 包括: ①磷灰石的主要元素及²³⁸U 的富集。② α 衰变亏损。③压力及应力, 以及实验观察时需要注意的问题。简要介绍了关于磷灰石裂变径迹退火过程的多元退火模型的建立及控制因素。对于目前的退火模型应用情况, 结合前人研究总结了目前该方法的独特性及现行退火模型的不足之处。并对磷灰石裂变径迹在关于盆地热演化史、断层研究和造山带隆升分析 (主要针对青藏高原隆升分析) 中的应用做了简单、概要的剖析。

关键词: 裂变径迹; 退火影响因素; 盆地构造热史; 造山带隆升分析

中图分类号: P631.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-6248(2013)01-0168-10

The Study Progress in Apatite Fission Track (AFT)

ZHOU Hai¹, LEI Chuan²

(1. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 2. Lanzhou Center for Oil and Gas Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Apatite Fission Track (AFT) is a useful tool to rebuild the low temperature thermochronological evolution of rocks. Recent research progress on application and methodology of AFT is reviewed in this contribution. We summarized the main factors related to AFT annealing behavior, including: ① enrichment of certain main elements and ²³⁸U in apatites. ② alpha-decay loss. ③ pressure and stress, several problems during experimental observation and the multiple annealing model. Review the previous studies, summarize pros and cons of the current annealing model and its application in analysis of the basin thermal-tectonic evolution history, and orogenic belt uplift (i. e. Tibet Plateau uplift).

Key words: Fission track; annealing factors; thermo-structural history of basin; uplift of mountain

1 磷灰石裂变径迹分析方法原理的提出

磷灰石裂变径迹的研究大约开始于 20 世纪 70

年代。磷灰石裂变径迹分析是一种揭示岩石低温热年代学的有力工具, 它建立在²³⁸U 自发裂变辐射损伤效应, 在实验基础上来观察辐射损伤特征, 并利用数学地质模型模拟岩石所经历的低温热演化史

收稿日期: 2012-07-02; 修回日期: 2012-12-12

基金项目: 自然科学基金资助 (41072147、40602023)

作者简介: 周海(1988-), 男, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩石学方面的研究。E-mail: 466710082@163.com

(Wagner et al., 1992; Gallagher et al., 1998; Gleadow et al., 2002; Price et al., 1962; Fleischer et al., 1965)。

Fleischer 等 (1975) 将裂变径迹的定义为： ^{238}U 自发核裂变会产生具有很高能量的带电重粒子，当高能量带电重粒子 (^{238}U) 穿过绝缘固体材料时，会在固体材料如磷灰石中留下放射性的狭窄痕迹，称之为裂变径迹 (Fleischer et al., 1975)。在上述过程中，Fischer 等 (1988) 发现 ^{238}U 将会分裂成两个大致相同的高能带电粒子向相反方向飞行，每个粒子带电大约在 40~160 MeV (Fischer et al., 1988)。Gleadow 等 (1986)、Green (1988) 和 Donelick (1990) 等均实验并最终证实这些核裂变产生的高能带电粒子能在固体材料上留下大约 16~18 μm 的线性裂缝 (Gleadow et al., 1986; Green, 1988; Donelick et al., 1990)。

这些线性裂变径迹可以通过化学酸蚀处理可视化，进而可被光学显微镜观察。

相对低温下稳定的磷灰石裂变径迹在 60°C 以上会发生退火，而且会不断累计 (Gleadow et al., 1981)。这意味着磷灰石裂变径迹很少代表岩石的形成年龄，主要代表其低温演化的年龄 (Gleadow et al., 1986)。

磷灰石裂变径迹退火行为受温度影响的。Duddy 等 (1988) 在其恒温退火的描述与温度随时间变化吻合的实验过程中，利用“等效时间原理”解释实验现象，印证了该原理。磷灰石的退火行为一旦发生就受温度及时间的因素影响，而且温度是主导因素 (Duddy et al., 1988)。

2 磷灰石裂变径迹的退火行为

2.1 退火行为所受影响因素

2.1.1 磷灰石的主要元素及 ^{238}U 的富集

根据 Barbarand 等 (2003)、Green 等 (1986) 和 Carlson 等 (1999) 的研究，磷灰石的裂变径迹退火率与磷灰石中的主要元素如 Cl, F, Mn, Fe 等富集程度及 ^{238}U 的富集 (含量 10×10^{-6} 以上) 等相关。磷灰石裂变径迹的退火速率可以根据刻蚀坑尺寸来计算，而刻蚀坑尺寸可以通过磷灰石的溶蚀体积来衡量 (Barbarand et al., 2003; Green et al., 1988; W.D. Carlson et al., 1999)。Gleadow 和

Duddy 等认为磷灰石的成分组成对磷灰石的退火行为起着主要的控制作用 (Gleadow et al., 1981)。

2.1.2 α 衰变

Carlson 等学者 (1999) 提出物理因素，例如结构应力、 α 衰变亏损等也有可能会影响磷灰石裂变径迹的退火率 (Carlson et al., 1999)。Ritter 等 (1986) 利用核废料对磷灰石进行退火行为研究，发现 α 衰变可以促进退火行为 (Ritter et al., 1986)。Weber 等 (1997) 进一步的研究证明， α 衰变使得锆石由晶体形态向无序形态变化 (Weber et al., 1997)。Rahn (2004) 等在对锆石的裂变径迹研究中证明了 α 衰变亏损对锆石的裂变径迹退火率的影响 (Rahn et al., 2004)。Hendriks 等 (2005) 在利用磷灰石裂变径迹方法研究克拉通盆地的沉积-剥蚀演化时提出，应该注意辐射加强效应引起的径迹退火，特别是由锕系元素 (如 ^{238}U) 引起的 α 发射，辐射加强效应会导致磷灰石裂变径迹年龄变小 (Hendriks et al., 2005)。但是由于一般情况下，辐射效应难以在磷灰石的退火行为中得到观察，退火模型中一般都不考虑 α 衰变的影响。

2.1.3 压力及应力

Wendt 等 (2003) 实验研究发现，压力及应力也可以影响裂变径迹的退火行为。其实验发现持续的增压会减慢退火速率，而在较大的应力下，退火甚至表现的与温度无关；并建议将压力、应力、温度等因素的影响纳入退火模型的建立 (Wendt, 2003)。

综合以上前人研究，退火行为除了受磷灰石所受温度和时间影响外，影响磷灰石裂变径迹退火的因素主要有磷灰石中主要元素 (如 Cl, F, Mn, Fe 等) 的富集程度，磷灰石所受物理因素如应力、压力及 ^{238}U 所造成的 α 发射等因素的影响。

2.2 退火行为的实验观察

在测定径迹密度、径迹长度等裂变径迹数据时，目前存在着一定的困难。裂变径迹分为两种，包括自发裂变径迹和诱发裂变径迹。 ^{238}U 的裂变辐射损伤是真正在地质历史过程中导致自发裂变径迹的积累 (Flerov et al., 1940)。而 ^{235}U 的裂变损伤是由中子诱发来测定矿物的 U 含量的 (Meitner et al., 1939)。在磷灰石裂变径迹分析中，需要统

计 ^{238}U 自发产生的裂变径迹及中子诱发 ^{235}U 裂变造成诱发径迹。 ^{238}U 自发产生的裂变径迹在地质过程中产生。然而,在实验室诱发过程中, ^{232}Th 及 ^{238}U 等不可避免的也被诱发,影响诱发径迹的实验观察。Iunes 等人(2002)提出一种测量中子对裂变径迹分析影响的方法,通过该方法可以测出磷灰石中的 Th/U 值,从而校正诱发裂变径迹测量时对数据的影响(Iunes et al., 2002)。

2.2.1 观察裂变径迹的局限

为了获得并解释磷灰石裂变径迹数据,通常会测定样品中被限定做分析的裂变径迹的长度分布用来描述其低温热演化史(Gleadow et al., 1986)。被限定分析的裂变径迹将被完全刻蚀,径迹末端也可观察。为了测定长度分布,只有那些水平的裂变径迹其所在面平行于结晶 C 轴的会被测量(Laslett et al., 1982),所以才带来了一些误差。这些得到的长度分布能被用来模拟样品的低温演化(Laslett et al., 1987; Ketcham et al., 2007)。

2.2.2 退火行为的各向异性

未退火或者轻微退火的裂变径迹显示比较小的各向异性,这很有可能是刻蚀的影响。在退火过程中,裂变径迹在与 C 轴高角度相交的方位会比低角度与 C 轴相交的方位更易退火(Green et al., 1977; Green et al., 1986; Crowley et al., 1991; Donelick, 1991; Donelick et al., 1999; Ketcham, 2003)(图 1)。

磷灰石的刻蚀是各向异性的,沿 C 轴方向裂变径迹会更易刻蚀,且会加宽。Ketcham 在总结前人研究基础上,提出用 C 轴投影法会为消除结晶角的影响提供一种可能性的思路,从而能够得到更多的裂变径迹长度数据,并能够更多的反映地质信息(Ketcham, 2005)。

3 多元退火模型的建立

以 Duddy 等人(1988)的“等效时间原理”作为指导,原理上,只要测出单位面积上的径迹的数量即径迹密度,在知道 U 的含量和衰变速率的情况下,就可以计算出磷灰石在达到径迹保留温度至今的年龄,所谓径迹保留温度指裂变径迹开始保存时的临界温度。在得到径迹密度、径迹长度等裂变径迹数据的情况下,需要建立一个退火模型,能

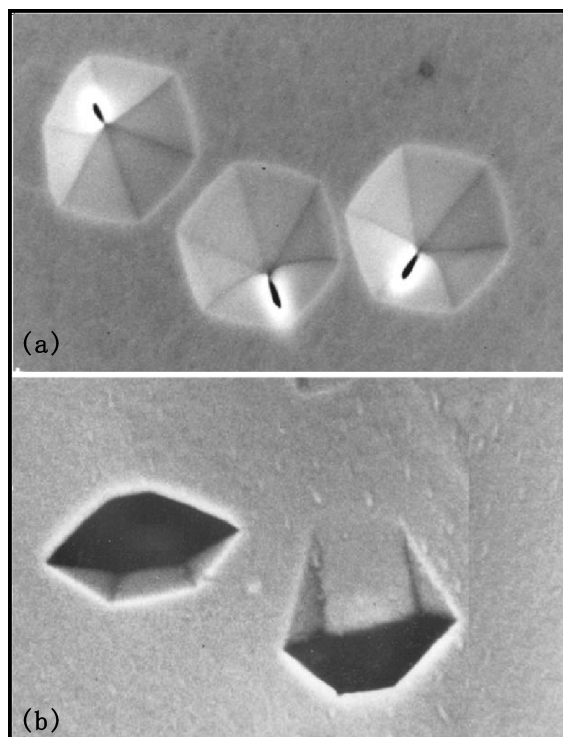


图 1 扫描电镜下刻蚀裂变径迹的底端特征 (a) 及刻蚀的裂变径迹展示的各向异性 (b)

(引自 Jonckheere, 2003)

Fig. 1 The etched characteristics fission tracks in bottom Under the scanning electron microscope (a) and anisotropic showed about etched the fission track (b)

(From Jonckheere, 2003)

够更好的展示裂变径迹的退火行为,从而得出地质体的低温演化史。

为了模拟磷灰石裂变径迹的退火行为,需要更好地将退火行为的影响因素引入退火模型中,周祖翼等(2001)将其中磷灰石径迹与 C 轴的夹角等因素归纳为 D_{par} ,指的是与结晶 C 轴平行的、与抛光面相交的裂变径迹蚀刻象的最大直径(周祖翼等, 2001)。在综合考虑磷灰石裂变径迹退火因素的基础上,就可以建立退火模型。

Ketcham 在于其他学者合作的基础上(1999, 2003, 2005, 2006)建立基于扇形退火模型的多元退火模型(Ketcham et al., 1999, 2003b, 2006, 2007; Ketcham, 2005),其思路为依据同一样品各个磷灰石颗粒的径迹依据裂变径迹的方位及磷灰石自身特点分别统计,对每个部分采用扇形退火模型计算各自的平均径迹长度及其标准方差,再据此综

合得出所有组分的径迹长度分布函数。田云涛等(2009)详细介绍并探讨了该多元动力退火模型。

然而在实际应用中,Barbarand 等(2003)提出,人们不可能对每个单颗粒的磷灰石进行成分的测定,进而决定退火模型的参数实际上,经常需要利用裂变径迹的刻蚀几何特征与磷灰石成分之间相关性来确定这些退火模型的参数(Barbarand et al., 2003)。

Jonckheere (2003)指出在实践中,实验所获得的裂变径迹模拟的意义大小取决于获得数据的精确程度及研究目的所需的数据精度,因为这些数据的地质解释对于数据的微小差异非常敏感(Jonckheere, 2003)。

4 磷灰石裂变径迹在地质学中的应用

4.1 磷灰石裂变径迹年龄及退火数据的地质含义

刚刚喷发到地表的火山岩或浅成的侵入岩体来说,矿物中的裂变径迹在高温下不能保存下来。但随着岩体的缓慢冷却,当冷却到某一临界温度之下时,裂变径迹开始保存和积累,即同位素时钟开始记录其演化史,理论上,其矿物的径迹裂变年龄是

其从径迹保留温度开始所经历的年龄。

对于沉积及副变质地层而言,地层在经历埋藏、成岩甚至变质等地质过程中,作为副矿物的磷灰石在超过径迹保留温度的埋藏条件下,这些磷灰石会完全退火,即裂变径迹年龄的重置。当地温下降到低于径迹保留温度以下以后,裂变径迹又开始保存并计时。

由于各种矿物裂变径迹退火的活化能不同,所以其保留温度也不相同。当岩体处于缓慢冷却的地质环境中,岩体内裂变径迹保留温度高的矿物(如榍石、石榴子石等),首先开始累积裂变径迹,即时钟开始启动计时;而裂变径迹保留温度低的矿物(如磷灰石等),要在岩体内冷却到较低温度时,才开始累积裂变径迹。因此,同一岩体内裂变径迹保留温度不同的矿物,测出的裂变径迹年龄是不同的。

然而,局部的热扰动,如岩浆活动、断层活动,有可能会使裂变径迹超过径迹保留温度从而使裂变径迹年龄重置(图 2)。

裂变径迹密度与温度的关系极为密切,并随温度的增高而减少。因而如已知裂变径迹密度减少的量,就可以推算出古温度。磷灰石中 $w(U)$ 约 0.000 1%~0.010 0%,是铀含量较高的绝缘矿物。

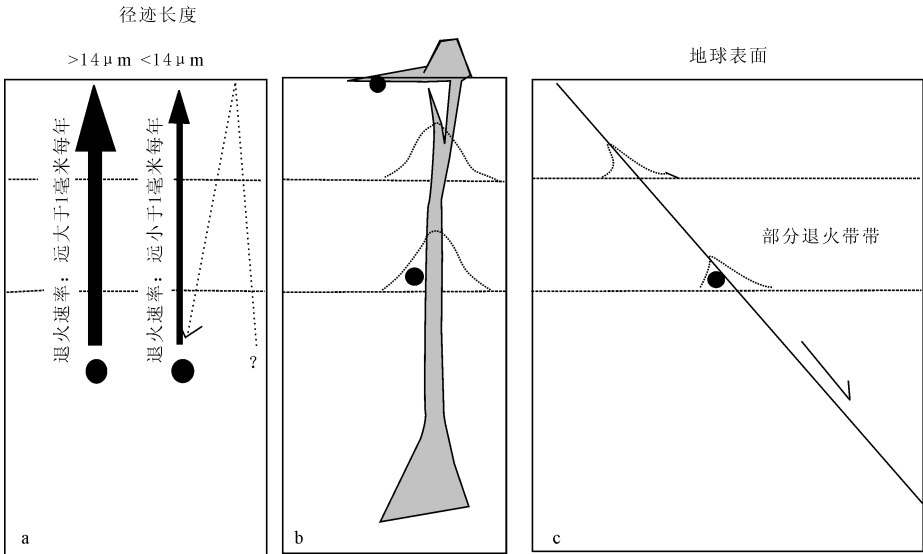


图 2 可能的岩石热历史与部分退火带之间的关系 (Fayon et al., 2007)

Fig. 2 Sketch map showing relationship between possible thermal history and partial annealing zone (From Fayon, 2007)

a. 表示快速或者慢速的冷却通过部分退火带,可能暗示了一次简单的折返或者复杂的历史; b. 之前温度在部分退火带之下或者之间的岩石可能会被岩浆活动再次加热导致其裂变径迹的重置; c. 断层活动带来的热扰动也有可能影响裂变径迹。

Fitzgerald 等 (1995) 的研究证明, 磷灰石的部分退火带温度变化通常在 $60^{\circ}\text{C} \sim 110^{\circ}\text{C} \sim 120^{\circ}\text{C}$ (Fitzgerald et al., 1995)。在退火的实验过程中, 当温度超过退火带温度下限时, 裂变径迹数量变少且长度也缩短; 当温度超过退火带上限时, 裂变径迹全部消失, 这时候裂变径迹年龄计时为零 (Bellemans et al., 1994)。Green 等 (1989) 根据磷灰石中裂变径迹长度的分布, 也可以获得许多有关岩石热史的重要信息, 在温度未超过退火带上限的情况下, 裂变径迹不断积累, 老一点的裂变径迹总是比新生成的裂变径迹多经历一些退火事件。从而, 裂变径迹分布特征可提供一个研究热史的依据 (Green et al., 1989)。

Naeser 等 (1989) 依据地层埋深与温度之间的关系划分了在连续沉积, 对目前正处在最大埋藏地温状况下磷灰石裂变径迹年龄-深度 (或温度) 的地层及在达到最大埋藏低温后又抬升剥蚀冷却下来依据磷灰石裂变径迹的退火行为的特征划分了不同的带 (Naeser et al., 1989)。这就为盆地的地层的沉积埋藏-古地温史提供了一种可选的方法。

4.2 磷灰石裂变径迹的 T-t path

实验室的退火实验是针对诱发径迹而进行的, 诱发径迹与自发径迹有一定的函数关系。在实验前, 应当了解研究区的地质背景及研究状况, 了解其岩相古地理古地热等基础地质资料, 在了解采样区的区域基本情况的基础上, 设定退火实验的地质背景条件; 利用退火模型、裂变径迹年龄数据和长度数据通过数学方法最终就可以获得最佳的温度时间曲线 (T-t path)。

裂变径迹提供了地质事件关于温度和时间的信息。裂变径迹 T (t) -path 就是为了将这些地质事件记录形象的展示出来。在原理上, T (t) -path 可以展示大量丰富的不同时间尺度上的关于地质事件的信息。因此可以对区域地质的了解起到很重要的推动作用。

5 磷灰石裂变径迹的独特性

磷灰石裂变径迹作为一种有效的测年工具, 具有其不可替代性: ①磷灰石是一种广泛分布的常见副矿物, 可以研究不同类型的地质体。②磷灰石的裂变径迹保留温度相对较低, 这使其能很好的限定

地质体的低温热年代学。

但是, 目前该方法还存在一些不完善的地方: ①目前的退火模型无法非常好的限定磷灰石裂变径迹退火行为的影响因素。②温度、压力、应力等因素在纳入退火模型准确模拟其影响还比较困难, 这在上文已有阐述。③由于往往没有其他地质证据的对比和约束, 磷灰石的裂变径迹信息难以验证。值得一提的是, 有的学者做出了有益的尝试, 如 Resak 等利用镜质体获得的地热数据来校正及对比磷灰石裂变径迹数据, 更加有说服力地揭示了中波兰凹陷的地温演化史 (Resak et al., 2010); Qiu 等综合磷灰石锆石的 (U-Th) /He 年龄数据和磷灰石的裂变径迹数据及镜质体反射率数据, 模拟了柴达木盆地的巴楚隆起的构造热演化。也使得该构造热演化史的结论更有说服力 (Qiu et al., 2011)。

Jonckheere (2003) 指出了该方法目前的不完善之处: 实际上, 在地质时间尺度上, 周围环境的温度影响对磷灰石的裂变径迹有修补作用; 然而, 我们是很难在相对高温的实验室条件下观察到这些修补作用。这就会导致裂变径迹数据不够准确。而且, 现代的模拟程序限制了解决问题的范围并且倾向于一些具体的模拟温度时间曲线的方法。并指出了裂变径迹退火模型的存在缺陷: 现行的模拟方法过于简单, 而且裂变径迹的结果中的那些温度峰值或者复合峰值被磷灰石晶体径迹中的无损晶格和无定形的核之间的原子重排给重新修正了。事实上一些较大的晶体缺陷会对刻蚀过程有影响, 把刻蚀径迹看成独立的晶体损伤过于简单 (Jonckheere, 2003)。

在实验方法上, 对磷灰石晶体的裂变径迹分析很大程度上决定于它的表面和径迹刻蚀特征。传统方法中这个过程是靠人工统计完成的。而 M. Peternell 等 (2009) 通过研究尝试用电脑量化磷灰石晶体的几何特征辅助人工的磷灰石裂变径迹的统计分析方法来代替传统方法。这是使裂变径迹统计方法迈向自动分析的有意义的尝试 (Peternell et al., 2009)。

6 磷灰石裂变径迹的应用进展

6.1 磷灰石裂变径迹在盆地分析中的应用

总的说来, 磷灰石裂变径迹分析是研究沉积盆

地古地温与烃类演化的一种很好的方法。它不仅了解沉积盆地的最高古地温,而且可以了解不同地质时期古地温的变化,进而可以确定生油窗及成油期(滕殿波等,1996)。磷灰石裂变径迹分析适用于多种类型的地层,包括强氧化环境、有机质组分贫乏的红层。这种方法除提供热信息外,还可以研究沉积盆地的抬升速度、侵蚀厚度、物质来源、地层的形成年龄(李善鹏,2003)。值得注意的是,单颗粒磷灰石裂变径迹的年龄代表的是磷灰石进入径迹保留温度后所经历的时间,而在对一个样品的磷灰石裂变径迹进行统计研究时,必须谨慎使用地层形成年龄及简单的地质体冷却抬升来描述磷灰石裂变径迹年龄。例如朱文斌等(2004)对吐鲁番-哈密盆地中部连木沁剖面和南北山前带的9个样品进行磷灰石裂变径迹测年,得出了在晚白垩世120~100 Ma,吐哈盆地发生构造抬升,地层快速冷却剥露,岩层在新生代二次埋藏加热,至10~8 Ma又再次剥露的构造热史的结论(朱文斌等,2004)。

磷灰石裂变径迹在盆地分析中显得越来越重要,如前所述,在结合了同位素分析,镜质体反射率分析等其他分析方法,磷灰石裂变径迹可以很好地模拟了盆地的低温构造热演化史。而且,这种结合其他分析方法的综合性分析是对更好的模拟盆地构造热史的必然要求。

裂变径迹(包括磷灰石,锆石等)也完全可以对老的地层甚至是前寒武的地层、岩体或火山岩进行分析测试,进而了解其低温构造演化史,如Zhang等(2009)对新疆阿克苏的前寒武的蓝片岩地层进行了裂变径迹分析,在基于区域地层及同位素年代学研究资料的基础上,将塔里木基底的温度构造演化史分为4个阶段并予以详细解释(Zhang et al., 2009)。

磷灰石裂变径迹分析应用于断裂作用研究是近些年才兴起的研究新热点,断层的形成年龄与裂变径迹有着密切的关系(李松峰等,2009)。当断裂活动时,温度较高,超过了磷灰石的径迹退火温度,由于断裂发生在较短的时间里,因此当断裂停止,温度快速下降后,磷灰石裂变径迹就记录了断裂的冷却年龄,可以近似的看作是断裂的活动时代。刘建辉(2009)对海原断裂带的大沟门、香山-天景山断裂带的红谷梁及小洪沟横跨断层采集了

包括断层主滑动面上的断层泥、碎裂岩及断层围岩13个样品,进行了磷灰石裂变径迹分析,裂变径迹分析结果并没有获得断层摩擦生热的证据,表明这些断层在地震滑动过程中的摩擦增温非常有限,没有达到磷灰石裂变径迹热年代计年体系可加载热信息的温度-时间要求。并指出只有震级大、断层滑动距离和速率大、摩擦强度强的断层,或者位于一定深度有大量摩擦热生成的断层,才能使断层附近增温达到磷灰石裂变径迹退火温度(刘建辉,2009)。至于何种程度的断层活动才能被磷灰石裂变径迹记录下来目前还了解的不够充分。

在有关盆地沉积与盆缘隆升剥蚀之间耦合关系,基本上停留在定性的描述方面,对盆缘山体剥蚀量及其对原形盆地改造研究很少有报道。而盆山耦合关系和后期的发展演化对盆地沉积相带的展布及改造具有重要的控制作用(韩效忠等,2008)。盆缘的隆升多与造山带的隆升及其大陆动力背景有关,磷灰石裂变径迹作为一种能够了解地质体低温演化的很好的方法,能够使得关于盆山关系的工作得到进一步加强。

6.2 在青藏高原的隆升研究中的应用

目前,研究青藏高原隆升过程的研究手段总的来说主要有综合古地理研究和同位素分析、裂变径迹分析(柏道远等,2004),隆升机制的研究方法主要为数值模拟。钟大赉等(1996)在结合前人研究基础上利用磷灰石裂变径迹资料研究青藏高原隆升时提出青藏高原多阶段的隆升模式(钟大赉等,1996)。傅容珊等(2000)利用数值模拟提出青藏高原隆升的三阶段模式,即断离隆升—挤压隆升—对流隆升(傅容珊等,2000)。后经李祖宁等人(2002)修正,更好的模拟了其隆升过程(李祖宁等,2002)。

磷灰石裂变径迹分析正越来越多地应用于造山带的隆升研究。尤其是青藏高原的隆升。青藏高原持续强烈的隆升主要集中在新生代,其隆升过程、大陆动力机制一直是国内外学者的研究热点。喜马拉雅的折返是青藏高原隆升研究的重要内容。Koons(1995)、Koons et al(2002)、Thiede et al(2005)、Patel et al(2007)等先后提出喜马拉雅的折返与陆陆碰撞的热、构造改造和后期的剥蚀改造共同作用有关(Koons, 1995; Koons et al., 2002; Thiede et al., 2005; Patel et al., 2007)。

因此陆陆碰撞的热、构造改造和后期的剥蚀改造二者之间的相互作用及二者对喜马拉雅的折返作用的研究非常重要, 磷灰石裂变径迹方法有助于这一内容的研究 (Fitzgerald et al., 1995; Johnson, 1997; Patel et al., 2007)。Johnson (1997) 提出了基础构造数据如变形数据等结合磷灰石裂变径迹数据的方法来了解造山带的低温演化史进而了解造山带折返动力机制的方法 (Weber WJ et al., 1997)。也有学者结合同位素的分析数据, 利用磷灰石裂变径迹, 做了桐柏-大别造山带中超高压带的白垩和新生代的构造演化史的工作 (Hu et al., 2006)。

柏道远等 (2004) 提出了绝对隆升量对于研究青藏高原隆升及其大陆动力机制研究的重要意义, 并进一步阐述了绝对隆升量与视隆升量之间的关系及计算方法 (柏道远等, 2004)。如拜永山等 (2008) 利用采于祁漫塔格西沟地区不同高度的早二叠世的似斑状二长花岗岩侵入体的 9 个样品对其进行磷灰石裂变径迹测试分析 (拜永山等, 2008)。拜永山等根据“年龄-地形高差法”对同一山体进行了上升速率的计算, 计算得出了祁漫塔格造山带在中新世早中期的早期隆升速率为 111 m/Ma, 晚期隆升速率为 98 m/Ma, 总体隆升速率为 100 m/Ma。笔者认为其所谓隆升速率为视隆升速率, 隆升速率的算法应采取柏道远等提出的径迹年龄-海拔高程法来计算。

7 结论

笔者认为, 目前磷灰石的退火影响因素仍然需要进一步加强研究, 从而更好的将退火的影响因素引入退火模型。在实验观察中, 需要更好及更快地观察裂变径迹, 由于观察裂变径迹的方法及仪器的限制, 实验观察裂变径迹及提取的数据仍然比较有限。

磷灰石作为一种广泛分布于各种地质体的矿物, 其裂变径迹能够展示地质体的低温热演化史。在此基础上, 前人的研究主要集中在盆地构造热史的分析及造山带的构造热演化及其隆升时代, 隆升速率等方面。笔者认为, 在未来的工作中应该加强在盆山关系上统一的裂变径迹的分析工作, 对比盆山的低温演化, 分析并逐步了解盆山耦合关系。

参考文献 (References):

- 拜永山, 任二峰, 范桂兰, 等. 青藏高原西北缘祁曼塔格山中新世快速抬升的磷灰石裂变径迹的证据[J]. 地质通报, 2008, 027 (07): 1044-1048.
- Bai Yongshan, Ren Erfeng, Fan Guilan, et al. Apatite fission track evidence for the Miocene rapid uplift of the Qimantag Mountains on the northwestern margin of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27 (7): 1044-1048.
- 柏道远, 贾宝华, 王先辉. 青藏高原隆升过程的磷灰石裂变径迹分析方法[J]. 沉积与特提斯, 2004, 024 (01): 35-40.
- Bai Dao yuan, Jia Baohua, Wang Xianhui. The apatite fission track analysis applied to the exploration of the uplifting of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2004, 024 (01): 35-40.
- 傅容珊, 徐耀民, 黄建华, 等. 青藏高原挤压隆升过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2000, 43 (3): 364-355.
- Fu Rongshan, Xu Yaomin, Huang Jianhua, et al. Numerical simulation of the compression uplift of the Qinghai-Xizang Plateau [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2000, 43 (3): 364-355.
- 李善鹏, 邱楠生. 应用磷灰石裂变径迹分析 (AFTA) 研究沉积盆地古地温[J]. 新疆石油学院学报, 2003, 15 (02): 13-18.
- Li Shanpeng, Qiu Nansheng. Studying the Paleo-Geotemperature of sedimentary basin by the use of apatite fission track analysis [J]. Journal of Xinjiang Petroleum Institute (Edition of Natural Science), 2003, 15 (02): 13-18.
- 李松峰, 徐思煌. 磷灰石裂变径迹研究进展[J]. 重庆科技学院学报, 2009, 011 (01): 61-64.
- LI Songfeng XU Sihuang. Study on Progress of Apatite Fission Track [J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2009, 011 (01): 61-64.
- 李祖宁, 傅蓉珊, 黄建华. 剥蚀及地幔作用下青藏高原的隆升过程的数值模拟[J]. 地球物理学报, 2002, 45 (04): 516-524.
- Li Zuning, Fu Rongshan, Huang Jianhua. Numerical simulation of the Qinghai-Xizang Plateau uplift under the effect of denudation and mantle convection [J].

- Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45 (04) : 516-524.
- 韩效忠, 李胜祥, 蔡煜琦, 等. 伊犁盆地南缘隆升剥蚀纪盆地南部的沉积响应[J]. 岩石学报, 2008, 024 (10): 2447-2455.
- Han Xiaozhong, Li Shengxiang, Cai Yuqi et al. Uplift-denudation in the south margin and its sedimentary response in the southern Yili basin: Analysis apatite fission track method [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 024 (10) : 2447-2455.
- 田云涛, 袁玉松, 胡圣标. 磷灰石裂变径迹分析新进展[J]. 地球物理学进展, 2009, 24 (03) : 909-920.
- Tian Yuntao, Yuan Yusong, Hu Shengbiao. New progresses in apatite fission track analysis [J]. Progress in Geophysics, 2009, 24 (03) : 909-920.
- 滕殿波, 刘招君, 单玄龙. 磷灰石裂变径迹分析(AFTA)——一种研究含油气盆地古热构造史的新方法[J]. 世界地质, 1996, 15 (01) : 28-34.
- Tang Dianbo; Liu Zhaojun; Shan Xuanlong. Apatite Fission Track Analysis: A New Tool for the Research of Thermal and Tectonic History in Petroliferous Basin [J]. World Geology, 1996, 15 (01) : 28-34.
- 周祖翼, Donelick R. 基于磷灰石裂变径迹分析数据的时间-温度历史的多元动力学模拟[J]. 石油实验地质, 2001, 23 (01) : 97-102.
- Zhou Zuyi, Donelick R. Multi-kinetic modelling for time-temperature history based on Apatite Fission Track Data [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23 (01) : 97-102.
- 朱文斌, 万景林, 舒良树, 等. 吐鲁番-哈密盆地中生代热历史: 磷灰石裂变径迹证据[J]. 自然科学进展, 2004, 14 (20): 1194-1198.
- Zhu Wenbing, Wan Jinglin, Shu Liangshu et al. The Mesozoic and Cenozoic thermal history of Tulufan-Hami Basin: evidence from Apatite Fission Track [J]. Progress in Natural Science, 2004, 14 (20) : 1194-1198.
- 刘建辉. 贺兰山、秦岭山脉新生代伸展隆升及断层摩擦生热磷灰石裂变径迹分析[D]. 博士论文. 中国地震局地质研究所, 2009.
- Liu Jian hui. Apatite Fission Track (AFT) Analysis of Extensional Exhumation and Uplift of the Helan Shan and the Qinling Mountains, and Frictional Heating along Active Faults [D]. Institute of Geology, China Earthquake Administration. 2009.
- 钟大赉, 丁林. 青藏高原隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学 D 辑, 1996, 26 (04): 289-2956.
- Zhong Da lai, Ding lin. The exploration in The uplift and its mechanism of QingHai-XiZang Plateau [J]. Science in China (Series D). 1996, 26 (04) : 289-295.
- Barbarand J, Carter A, Wood I, Hurford T. Compositional and structural control of fission-track annealing in apatite [J]. Chem. Geol. 2003, 198: 107-137.
- Bellmans F, Corter D F, Van Der Haunt P. Composition of SRM and CN U-doped glasses: Significance for their use as thermal neutral fluence monitors in fission track dating [J]. Radiation measurements. 1994. 24 (2): 153-160.
- Carlson W D, Donelick R A, Ketcham R A. Variability of apatite fission-track annealing kinetics; I Experimental results [J]. Am. Mineral, 1999, 84: 1213-1223.
- Crowley K D, Cameron M, Schaefer R L. Experimental studies of annealing etched fission tracks in fluorapatite [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1991, 55: 1449-1465.
- Donelick R A. Crystallographic orientation dependence of mean etchable fission track length in apatite: an empirical model and experimental observations [J]. Am. Mineral, 1991, 76: 83-91.
- Donelick R A, Ketcham R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics II: crystallographic orientation effects [J]. Am. Mineral, 1999, 84: 1224-1234.
- Donelick R A, Roden M K, Mooers J D, Carpenter B S, Miller D S. Etchable length reduction of induced fission tracks in apatite at room temperature (23 ? C): crystallographic orientation effects and “initial” mean lengths [J]. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1990, 17 (3): 261-265.
- Duddy I R, Green P F, Laslett G M. Thermal annealing of fission tracks in apatite 3. Variable temperature behavior [J]. Chemical Geology: Isotope Geoscience section, 1988, 73 (01): 25-38.
- Fayon A K, Whitney D L. Interpretation of tectonic versus magmatic processes for resetting apatite fission track ages in the Ni? de Massif, Turkey [J]. Tectonophysics, 2007, 434: 1-13.
- Fitzgerald P G, Sorkhabi R B, Redfield T F, Stump E. uplift and denudation of the central Alaska Range: a case study in the use of apatite fission track thermochronology to absolute uplift parameters [J]. J Geophys. Res, 1995, 100: 20175-20191.

- Flerov G N, Petrzhak K A. Spontaneous fission of uranium [J]. J. Phys., 1940, 3: 275-280.
- Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Effects of temperature, pressure, and ionization of the formation and stability of fission tracks in minerals and glasses [J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70 (6), 1497-1502.
- Fleischer R L, Price P B, Walker R M. Nuclear tracks in solids [M]. University of California Press, Berkeley, 1975, 605 pp.
- Fischer B E, Spohr R. Ion tracks and microstructure technology. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation [J]. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1988, 15 (1-4): 75-79.
- Gallagher K, Brown R, Johnson C. Fission track analysis and its applications to geological problems [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1998, 26: 519-572.
- Gleadow A J W, Belton D X, Kohn B P, Brown R W. Fission track dating of phosphate minerals and the thermochronology of apatite [G]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry. 2002. 48, 579-630.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, Lovering J F. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1986, 94 (4), 405-415.
- Gleadow A J W, Duddy I R. A natural long-term track annealing experiment for apatite [J]. Nuclear Tracks, 1981, 5 (1-2): 169-174.
- Green P F. The relationship between track shortening and fission track age reduction in apatite: combined influences of inherent instability, annealing anisotropy, length bias and system calibration [J]. Earth and Planetary Science Letters. 1988, 89 (3-4), 335-352.
- Green P F, Duddy I R, Laslett G M, Hegarty K A, Gleadow A J W and Lovering J F. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4: Qualitative modeling techniques and extensions to geology time scales [J]. Isotope Geosciences, 1989, 79: 155-182.
- Green P F, Duddy I R y, Gleadow A J W, Tingate P R, Laslett G M. Thermal annealing of fission tracks in apatite 1 [J]. A Qualitative description, Chem. Geol. 1986, 59: 237-253.
- Hu Shengbiao, Kohn B P, Asaf Raza, Wang Jiyang, Gleadow A J W. Cretaceous and Cenozoic cooling history across the ultrahigh pressure Tongbai-Dabie belt, central China, from apatite fission-track thermochronology [J]. Tectonophysics, 2006, 420: 409-429.
- Hendriks B W H, Redfield T F. Apatite fission track and (U-Th) /He data from Fennoscandia: An example of underestimation of fission track annealing in apatite [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 236: 443-458.
- Iunes P J, Hadler J C N, Bigazzi G, Tello C A S, Guedes S O, Paulo S R. Durango apatite fission-track dating using length-based age corrections and neutron fluence measurements by natural thorium thin films and natural U-doped glasses calibrated through natural uranium thin films [J]. Chemical Geology, 2002, 187: 201-211.
- Johnson C. Resolving denudational histories in orogenic belts with apatite fission-track thermochronology and structural data: an example from southern Spain [J]. Geology, 1997, 25: 623-626.
- Jonckheere R. On methodical problems in estimating geological temperature and time from measurements of fission tracks in apatite [J]. Radiation Measurements, 2003, 36: 43-55.
- Ketcham R A, Carter A, Donelick R A. Improved modeling of fission track annealing in apatite [J]. American Mineralogist, 2007, 92 (5-6): 799-810.
- Green P F, Durrani S A. Annealing studies of tracks in crystals [J]. Nucl. Tracks 1977, 1: 33-39.
- Ketcham R A. Observations on the relationship between crystallographic orientation and biasing in apatite fission-track measurements [J]. Am. Mineral, 2003, 88: 817-829.
- Ketcham R A. The role of crystallographic angle in characterizing and modeling apatite fission-track length data [J]. Radiation Measurements, 2005, 39: 595-601.
- Ketcham R A, Donelick R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: III. Extrapolation to geological time scales [J]. Am. Mineral, 1999, 84: 1235-1255.
- Ketcham R A, Donelick R A, Donelick M B. AFT Solve: A program for multi kinetic modeling of apatite fission track data [J]. American Mineralogist, 2003b, 88 (5-6): 929-929.
- Ketcham R A. Forward and inverse modeling of low temperature thermochronometry data [J]. reviews in

- Mineralogy and geochemistry, 2005, 58: 275-314.
- Ketcham R A, Carter A, Donelick R A. Improved measurement and modeling of fission tracks in apatite [A] . In: Goldschmidt Conference Abstract 2006 [C] . Geochemica Et Cosmochimica Acta, 2006, 70 (18): A316-A316.
- Koons P O. Modelling the topographic evolution of collisional belts [J] . Annual Review of Earth Planetary Science, 1995, 23: 375-408.
- Koons P O, Zeitler P K, Chamberlain C P, Craw D, Meltzer A S. Mechanical links between erosion and metamorphism in Nanga Parbat, Pakistan Himalaya [J] . American Journal of Science, 2002, 302: 749-773.
- Lastte G M, Kendall W S, Gleadow A J W, Duddy I R. Bias in measurement of fission-track length distributions [J] . Nuclear Tracks and Radiation Measurements 1982, 6 (2-3): 79-85.
- Lastte G M, Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W. Thermal annealing of fission tracks in apatite [J] . A Quantitative Analysis, Chem. Geol, 1987, 65: 1-13.
- Meitner L, Frisch O. Disintegration of atoms by neutrons; a new type of nuclear reaction [J] . Nature, 1939, 143: 239-240.
- Naeser N D, Mcculloh T H. Thermal History of Sedimentary Basin-methods and Case Histories [M] . Berlin: Springer, 1989, 157-180.
- Peternell M, Kohlmann Fabian, Wilson C J L, Seiler Christian, Gleadow A J W. A new approach to crystallographic orientation measurement for apatite fission track analysis: Effects of crystal morphology and implications for automation [J] . Chemical Geology, 2009, 265: 527-539.
- Price P B, Walker R M. Observation of fossil particle tracks in natural micas [J] . Nature, 1962, 196 (4856), 732-734.
- Patel R C, Kumar Y, Nand Lal , Ashok Kumar. Thermotectonic history of the Chiplakot Crystalline Belt in the Lesser Himalaya, Kumaon, India: Constraints from apatite fission-track thermochronology [J] . Journal of Asian Earth Sciences, 2007, 29: 430-439.
- Qiu Nansheng, Jiang Guang, Mei Qinghua, Chang Jian, Wang Shengjun, Wang Jiyang. The Paleozoic tectonothermal evolution of the Bachu Uplift of the Tarim Basin, NW China: Constraints from (U-Th) / He ages, apatite fission track and vitrinite reflectance data [J] . Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 551-563.
- Resak M, Glasmacher u a, Narkiewicz M , Littke R. Maturity modelling integrated with apatite fission-track dating: Implications for the thermal history of the Mid-Polish Trough (Poland) [J] . Marine and Petroleum Geology, 2010, 27: 108-115.
- Rahn M K, Brandon M T , Batt G E, Garver J I. A zero damage model for fission-track annealing in zircon [J] . Am. Mineral, 2004, 89: 473-484.
- Ritter W, Ma'rk T D. Radiation damage and its annealing in apatite, Nucl. Instrum [J] . Methods, 1986, 14: 314-322.
- Thiede R C, Bookhagen B, Arrowsmith J R, Sobel E R, Strecker M R. Climatic control on areas of rapid exhumation along the Southern Himalayan Front [J] . Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222: 791-806.
- Wagner G, Van den haute P. Fission-track dating [M] . Kluwer, Stuttgart. 1992-285.
- Weber W J, Ewing R C , Meldrum A. The kinetics of alpha decay-induced amorphization in zircon and apatite containing weapons-grade plutonium or other actinides [J] . J. Nucl. Mater, 1997, 250: 147-155.
- Wendt A S, Vidal O, Chadderton L T. The effect of simultaneous temperature, pressure and stress on the experimental annealing of spontaneous fission tracks in apatite: a brief overview [J] . Radiation Measurements, 2003, 36 (1-6): 339-342.
- Zhang Zhiyong, Zhu Wenbin, Shu Liangshu, Wan Jinglin, Yang Wei, Su Jinbao, Zheng Bihai. Apatite fission track thermochronology of the Precambrian Aksu blueschist, NW China: Implications for thermo-tectonic evolution of the north Tarim basement [J] . Gondwana Research, 2009, 16: 182-188.