

磷灰石裂变径迹退火影响因素研究进展

程璐瑶¹, 唐晓音², 李 毅¹
CHENG Luyao¹, TANG Xiaoyin², LI Yi¹

1. 西安交通大学人居环境与建筑工程学院, 陕西 西安 710049;
2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081
1. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shannxi, China;
2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

CHENG L Y, TANG X Y, LI Y, 2021. Research progress of factors affecting apatite fission track annealing [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 127-134. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.013

Abstract: Apatite fission track annealing is a complicated chemical kinetic process. It is crucial for the application of fission track thermochronology to clearly understand the factors affecting annealing. In the article, the development of apatite fission track annealing model is summarized, and the research progress on factors influencing annealing is reviewed. Generally, the factors can be divided into internal and external ones. The internal factors include chemical composition, crystal structure, track length and radius, and crystallographic orientation, among which, chemical composition plays a leading role. Among the external factors, temperature is the dominant one, and pressure and etching conditions can also affect annealing. The research results are conducive to improving the apatite fission track annealing model and increase its accuracy as a thermal history recorder.

Key words: apatite fission track; annealing model; factors affecting annealing

摘 要: 磷灰石裂变径迹退火是一个繁杂的化学动力学过程, 清楚地了解其退火的影响因素对于该技术的应用十分重要。文章概述了磷灰石裂变径迹退火动力学模型的发展史, 并结合以往对其退火影响因素的研究, 将磷灰石裂变径迹退火影响因素分为自身和外部环境两方面: 自身影响因素包括化学成分、晶体结构、径迹长度与半径、径迹与结晶轴的方位关系, 其中化学成分对退火起到主导作用; 外部环境影响中, 温度是主导因素, 压力和蚀刻条件的改变也会影响退火。研究成果有利于完善磷灰石裂变径迹的实验室退火模型, 提高其作为热历史记录器的精度。

关键词: 磷灰石裂变径迹; 退火模型; 退火影响因素

中图分类号: P619.14 **文献标识码:** A

0 引言

磷灰石裂变径迹 (AFT) 热年代学是 20 世纪 60 年代开始应用于地质学领域的一种同位素定年技术, 它能有效重塑地壳浅部约 3~5 km 内数百万

年以来的热演化历史 (Kohn and Green, 2002; 周海, 2010)。随着定年方法的不断完善, AFT 已发展成为比较成熟的低温热年代学技术, 在盆地构造热演化史分析、沉积物源恢复及造山带剥露历史等领域取得了良好的应用效果 (Yan et al., 2003; 杨农和张岳桥, 2010; Chew and Donelick,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41602251); 中国博士后基金项目 (2015M582636)

第一作者简介: 程璐瑶 (1996-), 女, 在读硕士, 从事低温热年代学、地热资源开发研究。E-mail: chengluyao2018@stu.xjtu.edu.cn

通讯作者: 唐晓音 (1987-), 女, 副研究员, 从事低温热年代学、盆地热史恢复研究。E-mail: xytang2015@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-05-29; 责任编辑: 范二平

引用格式: 程璐瑶, 唐晓音, 李毅, 2021. 磷灰石裂变径迹退火影响因素研究进展 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 127-134. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.013

2012; 丁波等, 2019; Tang et al., 2019)。

磷灰石裂变径迹是 ^{238}U 自发裂变产生的高能带电粒子穿过绝缘固体材料时, 由于辐射损伤所留下的狭窄痕迹 (Fleisher et al., 1981; Nadzri et al., 2017)。裂变径迹仅在某一温度范围 (约 $90\sim 120\text{ }^{\circ}\text{C}$) 以下才能保存, 并且具有随温度升高和受热时间增长, 径迹长度减小、密度降低直至完全消失的特征, 这一特性称之为退火 (付明希, 2003; 田云涛等, 2009)。了解退火过程是理解裂变径迹定年原理的关键 (Kohn et al., 2003), 因而十分重要。退火过程通常被理解为动力学过程。一般认为, AFT 的退火动力学过程受温度、化学成分、径迹与结晶轴的方位关系等多种因素控制。但是随着分析技术的进步, 压力、径迹半径、晶胞参数等因素也越来越受关注并取得了不错的研究进展 (Barbarand et al., 2003; Donelick et al., 2003; Liu et al., 2008; Schmidt et al., 2014; Nadzri et al., 2017)。文中通过回顾 AFT 退火动力学模型, 总结近年来有关退火动力学影响因素研究的新进展及尚存的争议, 以期完善实验室内退火动力学模型、提高 AFT 作为热历史记录器的精度提供参考。

1 退火动力学模型

研究 AFT 的退火行为是利用其进行热史模拟的基础。AFT 退火行为研究是在实验室内研究裂变径迹参数 (密度、长度等) 随温度和时间变化的规律, 建立符合这些规律的退火动力学模型, 然后外推到地质时间尺度, 用于实际样品的热史分析。

通过大量的退火实验研究, 不同学者先后提出了不同的退火模型。由于极少有理论模型可以做到形象描述裂变径迹的生成及其在原子尺度的退火过程, 因此大多数模型都属于经验模型 (Ketcham, 2005a)。早期的研究认为裂变径迹退火主要与温度和时间有关, 并基于等温退火实验建立了不同的磷灰石退火模型, 主要有: 平行模型 (Green et al., 1986), 平行线状、扇形退火模型 (Laslett et al., 1987), 扇形直线模型 (Crowley et al., 1991) 以及统计模型 (Laslett and Galbraith, 1996)。然而这些模型最大的缺陷是, 他们都是基于单一组分的磷灰石退火实验结果提出的, 如 Durango 磷灰石或富氟磷灰石, 均假定磷灰石具有

相似的退火行为。实际上, 大量研究表明, 不同地区的磷灰石因为成分的差异, 往往具有不同的动力学特征 (Carlson et al., 1999; Barbarand et al., 2003; Ketcham, 2003; Tello et al., 2006; Powell et al., 2017)。因此, Ketcham et al. (1999, 2007a) 基于扇形退火模型建立了多元动力学退火模型。该模型按照成分 (Cl 含量) 和 D_{par} (平行结晶 c 轴的裂变径迹与抛光面相交的蚀刻象长度) 的不同, 将同一样品各个磷灰石颗粒的径迹分成多个具有不同动力学性质的系列, 然后对这些不同的系列分别进行模拟。该模型代表了现今 AFT 退火动力学研究的主流, 由于其适用于具有复杂化学动力学成分的磷灰石而被广泛应用 (田云涛等, 2009; Ketcham, 2018)。

可以看出, 随着对 AFT 退火特征研究的深入, 退火模型也在不断地完善与优化。为了建立更合理的退火模型, 需要全面了解影响退火的各项因素, 逐步地将更多因素纳入退火模型的建立。实际上, 磷灰石裂变径迹退火是一个多元动力学行为, 除了受化学成分、晶体结构等自身因素影响以外, 还受到压力、温度等外部因素的影响。下面详细介绍 AFT 退火的影响因素及相关研究进展。

2 退火影响因素

2.1 自身影响因素

2.1.1 化学成分

磷灰石化学式为 $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH}, \text{Cl})$, 也可以表示为 $\text{X}_{10}\text{Y}\text{O}_4\text{Z}_2$, 其中 X =主要是 Ca ; Y = P ; Z = F , Cl 或者 OH (Ravenhurst, 2003; McDannell et al., 2019)。AFT 退火实质上是一个受活化能控制的扩散过程, 不同化学成分的活化能不同, 即磷灰石化学成分差异最终导致了不同的扩散结果。因此, 自身影响因素中, 化学成分是 AFT 退火最主导的因素 (Laslett et al., 1987; Carlson et al., 1999)。

相关学者针对 Z 和 X 位点分别开展了众多化学成分对 AFT 退火速率产生影响的研究。卤素位点 Z (F , Cl , OH) 上, 单纯的 Cl 含量增加或 OH 含量增加均可减缓 AFT 退火速率 (更耐退火) (Gleadow et al., 1986; Green et al., 1986; 张向涛等, 2012)。分析 Cl , F 两种元素含量变化与裂变径迹退火难易程度之间的规律发现, 富 Cl 磷灰石比富 F 磷灰石更耐退火, Cl 与 F 含量比值与 AFT

耐退火能力呈正相关关系 (付明希, 2003; Ketcham, 2005b; Nadzri et al., 2017)。此外磷灰石卤素位点上 F, Cl 和 OH 的链阵排布次序也关系到退火难易程度 (Ketcham, 2018), 按一定次序排列的 F-Cl-OH 磷灰石会比 Cl 磷灰石更耐退火 (Carlson, 1990)。X 位点上, Ca^{2+} 可被 Fe^{2+} , Mn^{2+} , Sr^{+} , REE (稀土元素) 等取代, 从而使 AFT 退火速率减缓 (Barbarand et al., 2003); 而 X 位点上 REE 含量增加会加速退火 (Carlson, 1990; Barbarand et al., 2003; Afra et al., 2014)。

通过对比研究发现, 不同位点 (X, Y, Z) 上的化学元素成分差异可能会表现出相似的退火行为。比如, 富 Sr 的磷灰石表现出与 F 磷灰石相似的退火行为 (Crowley et al., 1991), 富 REE 的 F 磷灰石与 Cl 磷灰石退火速率相近 (Donelick, 1991), 富 Mn 的氟磷灰石的退火行为与 Cl 磷灰石相似 (Ravenhurst et al., 2003)。此外, 单个位点上会发生连锁取代, 如 Y 位点上的 P 被 Si 取代后, Si 可能还会被其他元素取代 (Ketcham, 2018)。总之, 元素的替换类型、数量及替换位置都会影响退火, 最终对退火的影响是多个取代离子综合作用的结果。今后的研究中应依靠新技术对磷灰石颗粒成分进行更加系统的测定, 进一步深入研究阴阳离子取代反应机制及取代后对退火产生的影响效应, 以便清楚描述各位点化学成分与其退火动力学的响应关系。

2.1.2 晶体结构

磷灰石晶体属于六方晶系, 其晶体结构实际上由其成分控制。位点 (X, Y, Z) 的元素取代会产生晶格缺陷, 元素含量变化会导致磷灰石原始晶格结构发生改变 (刘羽和胥焕岩, 2001; Barbarand et al., 2003; 刘飏等, 2006; Carpena and Lacout, 2010; Kinoshita et al., 2010; McDannell et al., 2019)。比如, 当 X 位点上的 Ca^{2+} 被一些微量元素 (Mn^{2+} , Sr^{2+} , Zn^{2+}) 取代后, 会造成 OH 磷灰石晶胞减小、晶粒细化 (刘飏等, 2006)。

磷灰石六面柱体状晶胞的形状和大小常用晶胞参数 (三组棱长 a , b , c 及棱间交角 α , β , γ) 来表征。晶胞参数受到磷灰石构造中 Ca 多面体、 $[\text{PO}_4]$ 四面体及构造孔道位置上的离子类质同象替换的影响 (刘羽等, 2001)。Carlson et al. (1999) 通过实验研究发现, 当组分一定时, 晶胞参数 a 值越大、 c 值越小, 退火速度越慢。Barbarand

et al. (2003) 的观点与其一致, 并进一步发现晶胞参数 a 对平均径迹长度 (MTL) 变化的响应程度比 c 要高。

总体来说, 化学成分是导致晶体结构影响 AFT 退火的主要原因, 而正确理解晶体结构对退火的影响, 为解释化学成分所起作用开辟了另一种渠道。例如, Liu and Comodi (1993)、刘羽和胥焕岩 (2001) 通过实验研究晶胞参数与离子含量关系时发现, 随着 Cl 含量的增加, 晶胞参数 a 值变大、 c 值明显变小、 c/a 比值急剧变小, 从晶体结构的角度印证了 Cl 含量增加可增强抗退火性。

2.1.3 径迹长度与半径

热史模拟过程中, 样品的裂变径迹长度是重要的约束参数之一 (Gleadow et al., 1986)。径迹长度是指磷灰石受 ^{238}U 裂变的碎片损伤区经蚀刻后的“痕迹”的长度 (Gleadow and Seiler, 2015)。AFT 初始长度为 $16.0 \sim 16.5 \mu\text{m}$, 单个径迹在退火早期径迹长度缩短缓慢, 随着退火进行, 当长度缩短至 $10.5 \mu\text{m}$ 以下时缩短速度加快 (退火程度明显加重; Donelick et al., 1999; Ketcham, 2018)。而对于多个化学成分相同的径迹来说, 一般短的径迹比长的径迹更耐退火 (Wendt et al., 2002; Kohn et al., 2003)。裂变径迹按照生成条件可分为自发和诱发两种, 由于自发裂变径迹经历过一定程度的退火, 一般比诱发裂变径迹要短 $4\% \sim 11\%$, 长度分布也比诱发裂变径迹分散。因此, 为了尽量减小径迹长度对退火过程的影响, 实验室退火实验时通常采用长度一致且分布集中的诱发裂变径迹作为测量对象 (Spiegel et al., 2007; Ketcham, 2018)。

裂变径迹形态常呈圆柱形, 其纵横比超过 $1000:1$, 横向半径虽然没有长度变化那么明显, 但退火时也在不断缩短并对退火速率产生影响。整体上, AFT 半径越小, 退火速率越快 (Glaeser, 2001; Li et al., 2011)。随着小角度 X 射线散射法 (SAXS) 和透射电子显微镜 (TEM) 等新技术的应用, 径迹半径成为判断退火程度的又一新的约束参量。Nadzri et al. (2017) 利用 SAXS 技术发现, 平行于结晶 c 轴的初始径迹半径比垂直于 c 轴的要大一些。另外, 当温度小于 300°C 时, 径迹半径随温度的变化不大; 温度高于 300°C 时, 随着温度升高, 径迹半径显著减小; 温度高于 400°C , 大部分径迹消失 (图 1)。

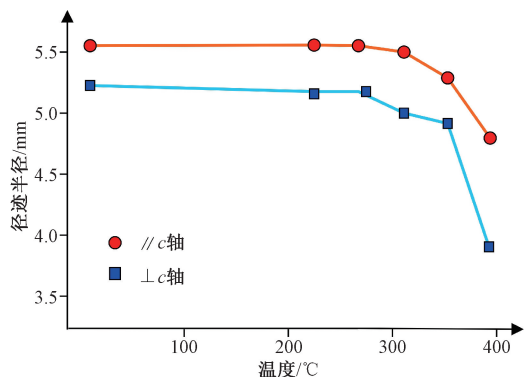


图1 Durango 磷灰石退火实验 (30 min) 中径迹半径与温度变化图 (Nadzri et al., 2017)

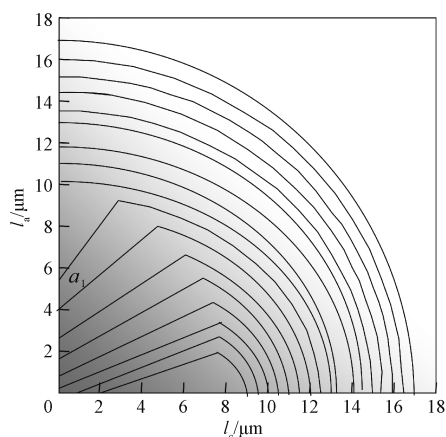
Fig. 1 Track radius as a function of annealing temperature for 30 min for Durango apatite (Nadzri et al., 2017)

2.1.4 径迹与结晶轴的方位关系

径迹与磷灰石结晶 c 轴的夹角 θ 关乎 AFT 退火的难易程度。AFT 退火具有各向异性, 即与结晶 c 轴夹角不同的径迹退火表现不同。其中, 与 c 轴夹角大的径迹对退火敏感性更高, 比与 c 轴夹角小的径迹退火速率大, 并且随着退火程度增加, 这种差异更加明显 (Green et al., 1986; Doneck et al., 1999; Ketcham, 2003; Guedes et al., 2007)。退火程度通常采用退火率 ($r=l_0/l$, 其中 l 和 l_0 分别表示退火和未退火裂变径迹长度) 来表示。受主观因素影响, 实验中与 c 轴呈 $65^\circ \sim 75^\circ$ 夹角的径迹最可能被观察和测量, 与 c 轴呈低角度的一些细小径迹难以识别, 因此夹角会影响封闭径迹长度的测定从而影响退火程度的判断 (Doneck et al., 1999; Ketcham et al., 2009; 焦亚先等, 2013)。此外, 受各向异性影响, 不同方位的径迹蚀刻速率会存在差异 (与结晶 c 轴平行的径迹优先被蚀刻), 从而可能影响对径迹长度的测量结果, 最终影响热史模拟结果 (Doneck et al., 2005; Ketcham, 2019)。

目前, 发展较为成熟的可以去除径迹方位 (各向异性) 对退火造成影响的模型是 c 轴投影模型 (Doneck et al., 1999; Ketcham, 2003; Ketcham et al., 2007b)。该模型将 AFT 的退火行为划分为两部分进行探讨, 即符合椭圆分布模型的部分和长度加速缩短的部分 (图 2)。当平均径迹长度 $l_m > 11 \mu\text{m}$ 时, AFT 退火程度较轻, 径迹长度呈现椭圆分布; 当 $l_m < 11 \mu\text{m}$ 后, AFT 经历较高度度的退火。由于与结晶 c 轴呈高角度的径迹会经历快速的长度缩短, 径迹长度不再呈椭圆分布, 而是分为

两种情况: $\theta \leq \theta_{\text{alr}}$ (θ_{alr} 为长度加速缩短时, 与结晶 c 轴的临界角) 的径迹符合椭圆分布; $\theta > \theta_{\text{alr}}$ 的径迹长度加速缩短, 径迹长度分布呈直线型, 其垂直结晶 c 轴的截距为 a_1 , 与相应的径迹分布椭圆相交于 θ_{alr} 处 (Doneck et al., 1999; 付明希, 2003)。基于该模型, 焦亚先等 (2013) 探讨了实际测量长度相同而分布方位不同的径迹模拟的热历史之间的差异, 发现磷灰石裂变径迹与结晶 c 轴夹角不同, 揭示的最高古地温之间最大差异为 15°C , 用来研究剥蚀量和年轻造山带冷却抬升速率引起的最大差异可分别达到 430 m 及 $1.5^\circ\text{C}/\text{Ma}$, 揭示构造抬升事件的初始抬升时间最大可相差 2 Ma 。



l_a —椭圆面上平行结晶 c 轴的径迹长度; l_c —椭圆面上垂直结晶 c 轴的径迹长度 (椭圆的长短半轴)

图 2 不同退火程度下 AFT 退火的各向异性 (Doneck et al., 1999)

Fig. 2 Anisotropy of AFT annealing at different levels of annealing (Doneck et al., 1999)

2.2 外部环境影响因素

2.2.1 温度与时间

AFT 的退火行为一旦开始就受到温度及时间的影响, 而且温度是主导因素, 在较高的温度下退火速度更快 (Fleischer and Price, 1964; Duddy et al., 1988; Hurford, 2018)。Fleischer and Price (1964) 采用阿累尼乌斯 (Arrhenius) 线性趋势描述了径迹退火与温度、时间的关系, 为建立恒温退火模型奠定了基础。而实际上, AFT 退火时温度是随时间不断发生变化的, 将恒温退火模型公式扩展应用于变温过程的关键是等效时间原理 (Duddy, 1988; 周成礼等, 1994)。等效时间原理指出, 退火率为 r 的径迹在以后的退火过程中, 其

退火行为仅取决于当前的退火率、温度和时间,而与以前的温度、时间无关。根据该原理,变温过程可以拆分为有限个恒温时间小段 (Δt) 集合,然后依次分析各个时间小段 (Δt) 内的退火行为。目前,该原理仍是实验室研究 AFT 的退火行为以及应用退火模型研究样品热史路径的主要基础。

2.2.2 压力

早期有关压力对 AFT 影响的研究认为,相比于温度,压力对 AFT 退火的影响微不足道 (Naeser and Faul, 1969; Ahrens et al., 1970; Lakatos and Miller, 1970; Fleisher et al., 1981)。但是随着研究深入,越来越多的学者开始重视压力的影响 (Wendt et al., 2002, 2003; Vidal et al., 2003; 卓鱼周, 2010; Schmidt et al., 2014)。相同温度和时间条件下,退火速率随压力的增强而加快 (Schmidt et al., 2014)。值得注意的是,压力只有在特定范围内 (2~4 GPa) 才会显著影响 AFT 退火,当压力小于 150 MPa 时,其影响相当微小 (Donelick et al., 2003; Schmidt et al., 2014)。另外,压力对晶体性质也会造成影响:压力能够提高晶格抗辐照稳定性,从而增强径迹的抗退火性 (Liu et al., 2008)。

以上探究有助于更全面地理解压力对退火的影响效应,但由于自发和诱发裂变径迹对于压力敏感性不同、实验室内压力设定与实际地质背景压力环境存在较大差异等原因,使得目前压力对 AFT 退火的影响效应尚无统一论。

2.2.3 蚀刻条件

化学蚀刻是 AFT 实验中获取径迹长度与密度、 D_{par} 值等退火参数的前提条件 (Moreira et al., 2008; Murrell et al., 2009)。蚀刻变量 (包括溶剂配比、蚀刻时间和温度等) 会影响 AFT 退火观测效果 (汤云晖等, 2004a; Ketcham, 2018)。蚀刻液中 HNO_3 浓度越高,达到目标蚀刻长度所需时间越短 (Moreira et al., 2010)。蚀刻是一个原始径迹形态不断呈现的过程,蚀刻径迹长度在特定范围内随蚀刻时间延长呈幂函数增长,但蚀刻时间过长会出现径迹展宽、密度过高等问题,通常高温短时间的蚀刻效果优于低温长时间 (翟鹏济, 1991; 汤云晖等, 2004b; Moreira et al., 2010)。为了减少由于蚀刻条件不同产生的差异,建议不同的实验室测试的时候尽量采用相同的蚀刻方案 (Ketcham, 2018)。目前常用的蚀刻方案有两种:

5 N HNO_3 , (20 ± 1) $^\circ\text{C}$, 20 s (Gleadow and Lovering, 1978); 5.5 N HNO_3 , (21 ± 1) $^\circ\text{C}$, (20 ± 0.5) s (Carlson et al., 1999; Donelick, 2005)。实验过程中,应注意对蚀刻条件的把控,以减小实验误差。

3 结论

AFT 热史模拟的依据是其退火模型,为顺应 AFT 广泛应用,需完善磷灰石裂变径迹的实验室退火模型,提高其作为热历史记录器的精度。而建立退火模型的基础是研究其退火影响因素。通过文章研究综述主要获得以下认识:

(1) 自身影响因素包括化学成分、晶体结构、径迹长度与半径、晶体与结晶 c 轴的夹角,其中化学成分起主导作用;

(2) 外部环境因素除温度与时间外,压力、蚀刻条件也是重要的影响因素;

(3) 退火影响因素间存在着相互作用,自身和外部影响因素也存在交叉干扰,应全面了解各因素影响 AFT 退火的原理和约束条件,以便完善退火模型的设计,获得更加标准化的 AFT 分析技术。

致谢: 感谢西安交通大学地热与环境课题组老师和同学们的帮助,感谢编辑和审稿专家给出的宝贵意见。

References

- AFRA B, LANG M, BIERSCHEK T, et al., 2014. Annealing behaviour of ion tracks in olivine, apatite and britholite [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 326: 126-130.
- AHRENS T J, FLEISCHER R L, PRICE P B, et al., 1970. Erasure of fission tracks in glasses and silicates by shock waves [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 8 (6): 420-426.
- BARBARAND J, CARTER A, WOOD I, et al., 2003. Compositional and structural control of fission-track annealing in apatite [J]. *Chemical Geology*, 198 (1-2): 107-137.
- CARLSON W D, 1990. Mechanisms and kinetics of apatite fission-track annealing [J]. *American Mineralogist*, 75 (9-10): 1120-1139.
- CARLSON W D, DONELICK R A, KETCHAM R A, 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: I. Experimental results [J]. *American Mineralogist*, 84 (9): 1213-1223.
- CARPENA J, LACOUT J L, 2010. Thermal annealing of fission tracks in synthetic apatites [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268 (19): 3191-3194.

- CHEW D M, DONELICK R A, 2012. Combined apatite fission track and U-Pb dating by LA-ICP-MS and its application in apatite provenance analysis [M] //Quantitative mineralogy and microanalysis of sediments and sedimentary rocks. Mineralogical Association of Canada Short Course, 42: 219-247.
- CROWLEY K D, CAMERON M, SCHAEFER R L, 1991. Experimental studies of annealing of etched fission tracks in fluorapatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55 (5): 1449-1465.
- DING B, LIU H X, LI P, et al., 2019. The tectonic activity in the southern margin of the ili basin and its constraint on sandstone-type uranium deposits: evidence from apatite fission track and U-Pb dating [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (S1): 84-89. (in Chinese with English abstract)
- DONELICK R A, 1991. Crystallographic orientation dependence of mean etchable fission track length in apatite: An empirical model and experimental observations [J]. *American Mineralogist*, 76 (1-2): 83-91.
- DONELICK R A, KETCHAM R A, CARLSON W D, 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics; II. Crystallographic orientation effects [J]. *American Mineralogist*, 84 (9): 1224-1234.
- DONELICK R A, FARLEY K, ASIMOW P D, et al., 2003. Pressure dependence of He diffusion and fission-track annealing kinetics in apatite?: Experimental results [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67 (18): A82.
- DONELICK R A, O'SULLIVAN P B, KETCHAM R A, 2005. Apatite fission-track analysis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 49-94.
- DUDDY I R, GREEN P F, LASLET G M, 1988. Thermal annealing of fission tracks in apatite 3. Variable temperature behaviour [M]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 73 (1): 25-38.
- FLEISCHER R L, PRICE P B, 1964. Glass dating by fission fragment tracks [J]. *Journal of Geophysical Research*, 69 (2): 331-339.
- FLEISHER R L, PRICE P B, WALKER R M, 1981. Nuclear tracks in solids (principles & applications) [J]. *Nuclear Technology*, 54 (1): 126.
- FU M X, 2003. Review on the model of the apatite fission track annealing kinetics [J]. *Progress in Geophysics*, 18 (4): 650-655. (in Chinese with English abstract)
- GLAESER A M, 2001. Model studies of rayleigh instabilities via microdesigned interfaces [J]. *Interface Science*, 9 (1-2): 65-82.
- GLEADOW A J W, DUDDY I R, GREEN P F, et al., 1986. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 94 (4): 405-415.
- GLEADOW A J W, LOVERING J F, 1978. Thermal history of granitic rocks from western Victoria: A fission-track dating study [J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 25 (5-6): 323-340.
- GLEADOW A J W, SEILER C, 2015. Fission track dating and thermochronology [M] //JACK R W, THOMPSON J W. *Encyclopedia of scientific dating methods*. Encyclopedia of earth sciences series. Dordrecht: Springer: 286-295.
- GREEN P F, DUDDY I R, GLEADOW A J W, et al., 1986. Thermal annealing of fission tracks in apatite: 1. A qualitative description [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 59: 237-253.
- GUEDES S, CURVO E A C, TELLO C A et al., 2007. On the annealing of fission tracks in randomly oriented grains of apatite [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 256 (2): 683-692.
- HURFORD A J, 2018. An historical perspective on fission-track thermochronology [M] //MALUSÀ M G, FITZGERALD P G. *Fission-track thermochronology and its application to geology*. Berlin: Springer: 3-23.
- JIAO Y X, QIU N S, QUE Y Q, 2013. Effects of fission-track angle to crystallographic C axis in apatite on thermal history [J]. *Geoscience*, 27 (5): 1131-1136. (in Chinese with English abstract)
- KETCHAM R A, DONELICK R A, CARLSON W D, 1999. Variability of apatite fission-track annealing kinetics; III: extrapolation to geological time scales [J]. *American Mineralogist*, 84 (9): 1235-1255.
- KETCHAM R A, 2003. Observations on the relationship between crystallographic orientation and biasing in apatite fission-track measurements [J]. *American Mineralogist*, 88 (5-6): 817-829.
- KETCHAM R A, 2005a. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 58 (1): 275-314.
- KETCHAM R A, 2005b. The role of crystallographic angle in characterizing and modeling apatite fission-track length data [J]. *Radiation Measurements*, 39 (6): 595-601.
- KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al., 2007a. Improved modeling of fission-track annealing in apatite [J]. *American Mineralogist*, 92 (5-6): 799-810.
- KETCHAM R A, CARTER A, DONELICK R A, et al., 2007b. Improved measurement of fission-track annealing in apatite using c-axis projection [J]. *American Mineralogist*, 92 (5-6): 789-798.
- KETCHAM R A, DONELICK R A, BALESTRIERI M L, et al., 2009. Reproducibility of apatite fission-track length data and thermal history reconstruction [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 284 (3-4): 504-515.
- KETCHAM R A, 2019. Fission-track annealing: from geologic observations to thermal history modeling [M] //MALUSÀ M, FITZGERALD P. *Fission-track thermochronology and its application to geology*. Berlin: Springer: 49-75.
- KINOSHITA T, IWATA T, BÉCHADE E, et al., 2010. Effect of Mg substitution on crystal structure and oxide-ion conductivity of apatite-type lanthanum silicates [J]. *Solid State Ionics*, 181 (21-22): 1024-1032.
- KOHN B P, BELTON D X, BROWN R W, et al., 2003. Comment on: "Experimental evidence for the pressure dependence of fission track annealing in apatite" by A. S. Wendt et al. [Earth Planet. Sci. Lett. 201 (2002) 593-607] [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 215 (1-2): 299-306.
- KOHN B P, GREEN P F, 2002. Low temperature thermochronology: from tectonics to landscape evolution [J]. *Tectonophysics*, 349 (1-4): 1-4.

- LAKATOS S, MILLER D S, 1970. Water-pressure effect on fission-track annealing in an Alpine muscovite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 9 (1): 77-81.
- LASLETT G M, GREEN P F, DUDDY I R, et al., 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis [J]. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 65 (1): 1-13.
- LASLETT G M, GALBRAITH R F, 1996. Statistical modelling of thermal annealing of fission tracks in apatite [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (24): 5117-5131.
- LI W X, WANG L M, LANG M, et al., 2011. Thermal annealing mechanisms of latent fission tracks: Apatite vs. zircon [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 302 (1-2): 227-235.
- LIU J, GLASMACHER U A, LANG M, et al., 2008. Raman spectroscopy of apatite irradiated with swift heavy ions with and without simultaneous exertion of high pressure [J]. *Applied Physics A*, 91 (1): 17-22.
- LIU B, LI S Q, ZHANG N, et al., 2006. Effect of trace elements on crystal structure of hydroxyapatite [J]. *Journal of Jinan University (Science & Technology)*, 20 (3): 193-194. (in Chinese with English abstract)
- LIU Y, Comodi P, 1993. Some aspects of the crystal-chemistry of apatites [J]. *Mineralogical Magazine*, 57 (389): 709-719.
- LIU Y, XU H Y, 2001. The effects of structural channel inos of apatite on their lattice parameters [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 21 (1): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- MCDANNELL K T, ISSLER D R, O'SULLIVAN P B, 2019. Radiation-enhanced fission track annealing revisited and consequences for apatite thermochronometry [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 252: 213-239.
- MOREIRA P A F P, IUNES P J, GUEDES S, et al., 2008. Comparison between thorium and uranium fission track diameters in glass [J]. *Radiation Measurements*, 43: S329-S333.
- MOREIRA P A F P, GUEDES S, IUNES P J, et al., 2010. Fission track chemical etching kinetic model [J]. *Radiation Measurements*, 45 (2): 157-162.
- MURRELL G R, SOBEL E R, CARRAPA B, et al., 2009. Calibration and comparison of etching techniques for apatite fission-track thermochronology [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 324 (1): 73-85.
- NADZRI A, SCHAURIES D, MOTA-SANTIAGO P, et al., 2017. Composition and orientation dependent annealing of ion tracks in apatite: Implications for fission track thermochronology [J]. *Chemical Geology*, 451: 9-16.
- NAESER C W, FAUL H, 1969. Fission track annealing in apatite and sphene [J]. *Journal of Geophysical Research*, 74 (2): 705-710.
- POWELL J W, SCHNEIDER D A, ISSLER D R. 2017. Application of multi - kinetic apatite fission track and (U - Th) /He thermochronology to source rock thermal history: a case study from the Mackenzie Plain, NWT, Canada [J]. *Basin Research*.
- RAVENHURST C E, RODEN M K, MILLER D S, 2003. Thermal annealing of fission tracks in fluorapatite, chlorapatite, manganoapatite, and Durango apatite: experimental results [J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40 (7): 995-1007.
- SCHMIDT J S, LELARGE M L M V, CONCEICAO R V, et al., 2014. Experimental evidence regarding the pressure dependence of fission track annealing in apatite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 390: 1-7.
- SPIEGEL C, KOHN B, RAZA A, et al., 2007. The effect of long-term low-temperature exposure on apatite fission track stability: A natural annealing experiment in the deep ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 71 (18): 4512-4537.
- TANG X Y, ZUO Y H, KOHN B, et al., 2019. Cenozoic thermal history reconstruction of the Dongpu Sag, Bohai Bay Basin: insights from apatite fission-track thermochronology [J]. *Terra Nova*, 31 (3): 159-168.
- TANG Y H, YUAN W M, ZHANG B H, et al., 2004a. Standardization study on confined fission-track length measurement: study on etching standard of zircon [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 23 (4): 251-255. (in Chinese with English abstract)
- TANG Y H, YUAN W M, HAN C M, et al., 2004b. The standardization of length measurement of fission track [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23 (4): 346-350. (in Chinese with English abstract)
- TELLO C A, PALISSARI R, HADLER J C, et al., 2006. Annealing experiments on induced fission tracks in apatite: Measurements of horizontal-confined track lengths and track densities in basal sections and randomly oriented grains [J]. *American Mineralogist*, 91 (2-3): 252-260.
- TIAN Y T, YUAN Y S, Hu S B, 2009. New progresses in apatite fission track analysis [J]. *Progress in Geophysics*, 24 (3): 909-920. (in Chinese)
- VIDAL O, WENDT A S, CHADDERTON L T, 2003. Further discussion on the pressure dependence of fission track annealing in apatite: reply to the critical comment of Kohn et al. [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 215 (1-2): 307-316.
- WENDT A S, VIDAL O, CHADDERTON L T, 2002. Experimental evidence for the pressure dependence of fission track annealing in apatite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 201 (3-4): 593-607.
- WENDT A S, VIDAL O, CHADDERTON L T, 2003. The effect of simultaneous temperature, pressure and stress on the experimental annealing of spontaneous fission tracks in apatite: a brief overview [J]. *Radiation Measurements*, 36 (1-6): 339-342.
- YAN Y, LIN G, WANG Y J, et al., 2003. Apatite fission track age of Mesozoic sandstones from Beipiao basin, eastern China: Implications for basin provenance and tectonic evolution [J]. *Geochemical Journal*, 37 (3): 377-389.
- YANG N, ZHANG Y Q, 2010. Fission-track dating for activity of the Longmenshan fault zone and uplifting of the western Sichuan Plateau [J]. *Journal of Geomechanics*, 16 (4): 359-371. (in Chinese with English abstract)
- ZHAI P J, 1991. The comparison of revealing fission tracks in zircon using different mixed acid systems [J]. *Nuclear Techniques*, 14 (7): 416-418. (in Chinese with English abstract)

ZHANG X T, ZHANG Q L, WANG X C, et al. , 2012. A constraining thermal history of basin fission-track technology [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, 28 (2): 93-99. (in Chinese with English abstract)

ZHOU C L, FENG S, WANG S C. 1994. Numerical modelling on the length distributions of apatite fission-tracks and its applications in geology [J]. *Experimental Petroleum Geology*, 16 (4): 409-416. (in Chinese with English abstract)

ZHOU H, LEI C, 2013. The study progress in apatite fission track (AFT) [J]. *Northwestern Geology*, 46 (1): 168-177. (in Chinese with English abstract)

ZHUO Y Z, ZHAO H G, LI M, et al. , 2015. Preliminary discussion on the impact of pressure on fission track annealing of apatite [J]. *Geology and Resources*, 24 (2): 141-145. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

丁波, 刘红旭, 李平, 等, 2019. 伊犁盆地南缘构造活动及对砂岩型铀矿的制约: 来自磷灰石裂变径与 U-Pb 定年的证据 [J]. *地质力学学报*, 25 (S1): 84-89.

付明希, 2003. 磷灰石裂变径迹退火动力学模型研究进展综述 [J]. *地球物理学进展*, 18 (4): 650-655.

焦亚先, 邱楠生, 阙永泉, 2013. 磷灰石裂变径迹与结晶 C 轴的夹角对模拟热历史的影响 [J]. *现代地质*, 27 (5): 1131-1136.

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

可扫码直接下载文章电子版，也有可能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

刘飏, 李仕群, 张宁, 等, 2006. 微量元素对羟基磷灰石晶体结构的影响 [J]. *济南大学学报（自然科学版）*, 20 (3): 193-194.

刘羽, 胥焕岩, 2001. 磷灰石结构通道离子对晶胞参数的影响 [J]. *矿物岩石*, 21 (1): 1-4.

汤云晖, 袁万明, 张本宏, 等, 2004a. 裂变径迹长度测量标准化研究: 锆石蚀刻标准探讨 [J]. *岩矿测试*, 23 (4): 251-255.

汤云晖, 袁万明, 韩春明, 等, 2004b. 裂变径迹长度测量的标准化研究 [J]. *岩石矿物学杂志*, 23 (4): 346-350.

田云涛, 袁玉松, 胡圣标, 2009. 磷灰石裂变径迹分析新进展 [J]. *地球物理学进展*, 24 (3): 909-920.

杨农, 张岳桥, 2010. 龙门山断裂活动和川西高原隆升历史的裂变径迹测年 [J]. *地质力学学报*, 16 (4): 359-371.

翟鹏济, 1991. 不同混合酸蚀刻体系揭示锆石中裂变径迹之比较 [J]. *核技术*, 14 (7): 416-418.

张向涛, 张青林, 王绪诚, 等, 2012. 一种约束盆地低温热历史的裂变径迹技术 [J]. *华南地质与矿产*, 28 (2): 93-99.

周成礼, 冯石, 王世成, 1994. 磷灰石裂变径迹长度分布数值模拟及地质应用 [J]. *石油实验地质*, 16 (4): 409-416.

周海, 雷川, 2013. 磷灰石裂变径迹（AFT）研究进展 [J]. *西北地质*, 46 (1): 168-177.

卓鱼周, 赵红格, 李蒙, 等, 2015. 压力对磷灰石裂变径迹退火的影响初步探讨 [J]. *地质与资源*, 24 (2): 141-145.

