

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2022.03.11

引用格式: 杨莉,袁万明,洪树炯,等. 裂变径迹技术及其地质应用[J]. 中国地质调查,2022,9(3): 104-112. (Yang L,Yuan W M,Hong S J,et al. Fission track technology and its geological applications[J]. Geological Survey of China,2022,9(3): 104-112.)

裂变径迹技术及其地质应用

杨莉,袁万明,洪树炯,冯子睿

(中国地质大学(北京),科学研究院,北京 100083)

摘要: 裂变径迹技术以样品用量少、封闭温度低以及测年范围广等优势,被广泛应用于地质学研究中。完全退火或部分退火样品可有效记录岩体的冷却-剥露历史,限制构造活动起始时间,探讨上覆岩石的风化剥蚀历史与矿床保存变化之间的关系,量化矿床隆升剥蚀量,实现找矿预测;锆石裂变径迹封闭温度对应天然气生成温度区间,可运用于油气勘探研究计算中;近年来结合元素含量分析的裂变径迹技术还可进行物源分析,LA-ICP-MS技术的引进为测量低U含量矿物的径迹带来了曙光。系统总结了磷灰石与锆石裂变径迹退火特性的研究成果,以及温度、化学成分、结晶各向异性及 D_{par} 值等因素对磷灰石径迹退火特性数据解释可能产生的影响,锆石径迹热稳定性的降低主要受制于辐射损伤效应。实验室退火特性研究为了解繁杂的径迹退火化学动力机制提供了重要的理论参考,但在实际的数据解释中需结合地质背景,以获得更为清晰的地质热事件演化研究时间格架。结合径迹测年在矿床、山体隆升剥蚀、盆地热史等研究的典型案例分析,以期对裂变径迹应用的相关研究提供参考。

关键词: 裂变径迹;地质应用;地质热历史;地质热事件

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2022)03-0104-09

0 引言

近年来,以裂变径迹(fission track, FT)技术为代表的低温热年代学被越来越多地运用于地球科学的相关研究中,为特提斯边缘重建及还原新生代演化历史提供了新的手段^[1]。由于在正断层错动过程中,下盘相对于上盘滑动,遭受剥露并冷却,因此可以根据下盘岩石的冷却年龄来估计断层滑动的时代。相对传统研究方法,裂变径迹技术可以有效、直接地约束下盘岩石的冷却历史^[2]。在矿床学研究中,裂变径迹技术填补了由于流体中缺乏热液矿物不能进行热液活动的研究空白,提供了成矿期次与热液运移过程的量化分析,尤其是在金矿和斑岩矿床的保存潜力研究中表现出了更大优势;结合区域地热场变

化特征,裂变径迹技术可以构建造山带隆升-剥蚀速率的时空格架,为造山运动的地壳生长及物质循环过程、地形地貌演化提供重要参考^[3]。随着近几年测试技术的完善与退火模型研究的不断深入,结合三维热动力模型对高原地形起伏和变形的反演,裂变径迹热年代学涉及的研究范围更为广泛,为火山喷发、河流下切作用的厘定提供了可靠方法^[4-5]。但是,目前对矿物内部径迹退火机制的认识相对有限,同一矿物或是不同矿物之间的退火动力学机制存在差异,热历史模拟中地温梯度的假设性设定以及活跃造山带中的取样密度等,都会导致数据解释出现不确定性,使裂变径迹技术的应用面临挑战。本文简述了裂变径迹技术的基本原理,在前人研究的基础上分析了矿物退火机制对数据解释的影响,以期合理的数据解释提供参考。

收稿日期: 2021-07-03; 修订日期: 2021-10-26。

基金项目: 国家自然科学基金项目“战略关键金属超常富集成矿动力学(编号: 92062217)”“钼同位素在岩浆热液系统的分馏机制(编号: 41730427)和2021年度中国地质大学(北京)研究生创新资助项目“茶卡北山Li-Be等关键金属成矿带隆升剥蚀研究(编号: YB2021YC021)”联合资助。

第一作者简介: 杨莉(1987—),女,博士研究生,主要从事低温热年代学研究工作。Email: Yangli0211luck@126.com。

1 裂变径迹技术简介

在 20 世纪 30 年代,物理学家发现当受到中子轰击时,U 元素(图 1(a))能自发发生裂变,分裂成

2 种较轻的产物,并释放大量能量使得其向相反方向高速运动(图 1(b))。裂变过程中由于裂变子体带有很强的正电,因此裂变子体可穿过周围介质,在固态探测器上产生一条狭长的“损伤痕迹”,这条辐射损伤痕迹被称为裂变径迹(图 1(c))。

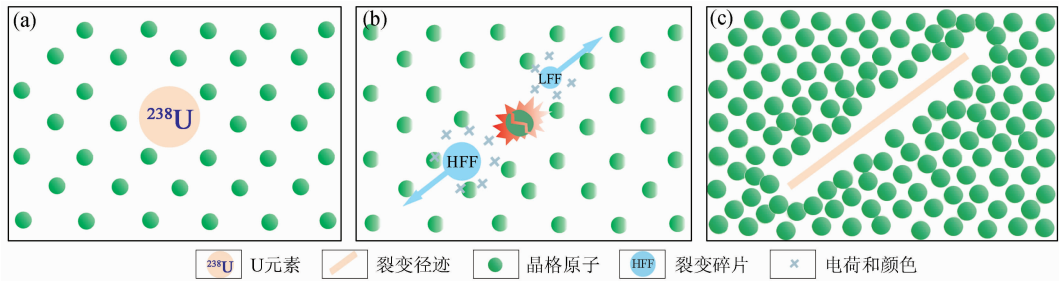


图 1 ²³⁸U 原子发生裂变示意图
Fig.1 Schematic diagram of fission track occurring in ²³⁸U atom

裂变径迹按形成机制分为 2 种类型:一种称为自发裂变径迹,是 U 原子核按一定速率自发地发生裂变,并由含 U 矿物本身或在周围矿物中记录下来的辐射损伤痕迹;另一种称为诱发裂变径迹,是 U 原子核在外来中子照射下发生裂变而在矿物本身和外加探测器中产生的辐射损伤痕迹^[6]。由表 1 可知,由于其他同位素在自然界的丰度太低或半衰期太长,因此无法产生足够的径迹,一般在矿物中观察到的径迹几乎全部是²³⁸U 裂变的产物。径迹会随时间不断积累,这就是裂变径迹测年的理论基础。统计和测量径迹可确定地质样品的年龄,这属于放射性同位素测年的范畴,是地质年代学的重要组成部分。

法将热中子辐照诱发的²³⁵U 裂变径迹的径迹密度作为替代,直接分析母体的²³⁸U 裂变径迹,其分析速度快,随着 LA – ICP – MS 技术的逐步改进和成本降低,该技术成为了裂变径迹测试的主流方法。随着技术的进步,目前裂变径迹测年已不仅局限于地球样品,也可用于研究分析月球及陨石样品^[10-12]。

矿物内部裂变径迹的退火过程是复杂的非线性动力学过程,即径迹并不总是稳定存在的,随着温度的升高,径迹长度会逐渐减少甚至消失,退火程度通常用径迹长度与未退火长度的比值,或径迹密度与未退火径迹密度的比值表示,这为裂变径迹测年技术在地质学领域的应用提供了新的手段。矿物的径迹记录了地质样品经历的低于封闭温度的热历史信息,反映了样品经历的温度变化过程(图 2)。

表 1 形成自发径迹的天然同位素丰度及半衰期^[7]

Tab.1 Natural isotope abundance and half – life of spontaneous track^[7]

天然同位素	相对丰度 (相对于 ²³⁸ U)	总半衰期/a	自发径迹 半衰期/a
²³⁸ U	1	4.47 × 10 ⁹	8.2 × 10 ¹⁵
²³² Th	4	1.40 × 10 ¹⁰	1.0 × 10 ²¹
²³⁴ U	5.44 × 10 ⁻⁵	2.46 × 10 ⁵	1.5 × 10 ¹⁶
²³⁵ U	7.25 × 10 ⁻³	7.04 × 10 ⁸	1.0 × 10 ¹⁹

在裂变径迹技术的发展过程中,出现了多种测量²³⁸U 自发裂变径迹密度的实验方法^[8-9]。裂变径迹非常狭长,锆石和磷灰石的初始径迹宽度分别为 11 μm 和 16 μm,因此需要一定手段增大径迹的宽度,使其可在显微镜下被观察和统计。多数情况下,由于直接测量相关参数的难度较大,外探测器

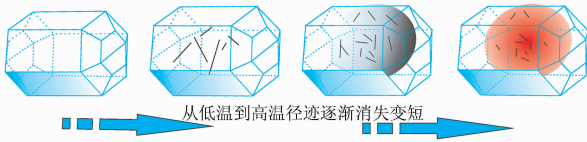


图 2 矿物晶体中径迹从形成到消失示意图
Fig.2 Schematic diagram of track formation from occurrence to disappearance in mineral crystals

2 矿物径迹退火特性及数据解释

多数矿物由于 U 含量过低无法有效识别径迹,且在 U、Th 衰变的反冲损伤效应下其晶体结构被破

坏,径迹识别难度大。目前裂变径迹分析以磷灰石、锆石、榍石等副矿物为主。磷灰石与榍石的径迹蚀刻和样品处理相对简单,由于处理工艺复杂,目前对于锆石裂变径迹的研究还较少^[13-14]。磷灰石是地壳中常见的含磷矿物,对其裂变径迹的使用最为普遍,在断层^[15]、沉积盆地^[16]、克拉通内部、裂谷边缘^[17]、矿床^[18]等不同环境中都有很多成功应用。目前对于磷灰石裂变径迹技术的争议主要集中在数据解释以及数据质量的判别,以及如何结合热历史进行合理的地质解释等。天然磷灰石中 U 含量约为 1~200 ppm,其中 U 含量对磷灰石裂变径迹的影响较大,磷灰石中的自发裂变径迹由²³⁸U 核裂变产生,由于²³⁸U/²³⁵U 在大多数天然矿物中为固定值,因此²³⁵U 则经常被用来测量磷灰石颗粒中的²³⁸U 含量,并用于矿物内诱发径迹的研究。

矿物中的径迹并非长期稳定地保存在矿物内部,随着温度升高径迹密度会逐渐减小,径迹长度变短甚至消失,即矿物的退火特性。径迹退火特性受多种因素影响,目前研究表明温度和时间是引起矿物退火的主要因素,其中温度对径迹退火的影响最先被研究者们认识到,并被成功地运用于热年代学的研究中^[19]。此外,磷灰石的矿物成分对其退火特性也有影响,如富 Cl 磷灰石比富 OH 和富 F 磷灰石具有更强的抗退火性,即退火速率较慢,封闭温度相对更高^[14];结晶各向异性与磷灰石的 D_{Par} 值都是影响磷灰石退火的重要机制。磷灰石退火模型的研究相对成熟,而锆石的径迹退火机制由于还没形成统一的模型,在应用上受到了一定的制约。

矿物晶体受到高温效应影响后,其原有径迹会缩短,而此时新的未退火径迹不断形成,因此径迹长度变化可以为热历史提供有价值的热史信息。径迹的长度分布可以从未退火的单峰式分布到双峰式的短径迹分布模式;快速冷却到低温并长期滞留在低温阶段的样品径迹长度接近 14.5 μm ,为磷灰石的最大裂变径迹长度,呈现出独特的长径迹分布模式,而具有复杂再加热历史的样品可能出现混合、歪斜或双峰式的径迹分布模式,具体的长度分布模式取决于样品经历的热历史^[20]。

锆石裂变径迹常用于构造活动期次的限定与演化研究^[21-22],恢复物源区沉积历史,合理的数据解释可以进一步阐明锆石的退火机制。Fleischer 等^[23]在 1965 年首次发表了锆石径迹退火数据,但

当时仅识别出完全退火、部分退火和未退火 3 种径迹类型,结合地质推测,他们预测部分退火带的温度下限高于 350 $^{\circ}\text{C}$,退火时间为 1 Ma; Krishnaswami 等^[24]对实验结果使用了相似的分类,并估计退火带边界温度低于 310 $^{\circ}\text{C}$,但是这个结果存在争议。基于目前有限的退火数据,锆石的部分退火带温度范围较宽,如 170~390 $^{\circ}\text{C}$ ^[25]、200~300 $^{\circ}\text{C}$ ^[26]等。

除了构造反转引起的部分退火带抬升^[27],采用岩心样品的锆石退火机制研究几乎没有发现能够引起完全退火的温度(>300 $^{\circ}\text{C}$)。Rahn 等^[28]提出应考虑 U、Th 衰变累积损伤对裂变径迹稳定性的影响,通过比较其他造山带矿物的同位素年龄,为锆石径迹稳定性提供约束。在碎屑锆石中,由于锆石来源的差别以及辐射损伤的影响,碎屑锆石的径迹长度测量较为复杂,而²⁵²Cf 辐照无法很好地在密度较大的锆石中植入长径迹。Yamada 等^[29]提出可以采用重核辐照和人工压裂的方式增加可测量的封闭径迹数量。在锆石中,非裂变晶格损伤的某些成分被认为是导致颜色变化的原因,这种变化在地质时间尺度上持续的温度高于裂变径迹^[30],可提高蚀刻速率或降低对裂变径迹退火的抵抗力^[26]。在实验室环境下,发生退火的最初阶段中辐射损伤较轻的锆石的蚀刻速率大幅降低,研究者们将这归因于 α -反冲损伤效应的消除,同时大部分的 α -反冲损伤在锆石径迹形成之前就已经退火,但最后的残余损伤会持续到更高的温度^[31]。锆石的蚀刻比磷灰石难度大,通常需要在 210~250 $^{\circ}\text{C}$ 下用 KOH-NaOH 混合液蚀刻数小时甚至数天,需要多次蚀刻对锆石退火机制的研究造成了一定的困难。

综合目前的研究来看,对于磷灰石退火机制的研究较为完善,对于锆石退火机制的研究相对有限,但锆石在蚀刻和退火行为的各向异性上和磷灰石具有相似性,而两者的退火机制则存在很大差异。磷灰石中存在很多“空位”或“孔隙”,锆石中则充填有非晶物质,磷灰石在远高于蚀刻温度并不再显示径迹的退火条件下(700 $^{\circ}\text{C}$ 下 2 h),仍存在明显的辐射损伤,而锆石的退火温度与其蚀刻显示径迹的温度是一致的,推测锆石退火可能是通过消除晶格缺陷来完成,而磷灰石退火是在高表面能及高扩散率联合驱动下实现的^[32-33]。

锆石裂变径迹的封闭温度约(240 $\pm$ 50) $^{\circ}\text{C}$,冷

却速率为 15 ℃/Ma,可用来约束温度较高的热年代学事件^[34]。锆石的退火效应需要比磷灰石更高的温度及钻孔深度,在维也纳盆地沟的岩心样品中,在温度高达 197 ℃的环境下,径迹平均长度为 10.5 μm,仅观测到轻微的径迹长度缩短^[27]; Hasebe 等^[35]报道了日本南部及中部岩心样品的锆石退火情况,发现在 1 Ma 的时间尺度下,只有少数锆石径迹发生退火,其中一个岩心样品的锆石在 205 ℃下裂变径迹略微缩短(平均长度为 9.8 μm),另一个钻孔样品中的锆石在 200 ℃下径迹缩短(平均长度为 10.5 μm)。对 Durango 磷灰石与 Fish Canyon 磷灰石来说,其平均自发径迹的长度要短于诱发径迹, Fish Canyon 磷灰石平均自发径迹长度比诱发径迹长度短 6%,而 Durango 磷灰石则短了约 11%。由于在地球温度下的退火长度对锆石来说可以忽略不计,因此难以区分锆石近地表自发径迹的长度与诱发径迹的长度(表 2)。

表 2 磷灰石与锆石典型自发径迹和诱导径迹长度

Tab.2 Typical spontaneous and induced track lengths of apatite and zircon

矿物	平均自发径迹 长度 Spon./μm	平均诱发径迹 长度 Ind./μm	数据来源
Durango 磷灰石	14.24	15.91	Green ^[36]
Durango 磷灰石	14.47	16.21	Ketcham 等 ^[19] Carlson 等 ^[37]
Durango 磷灰石	14.58	16.24	Gleadow 等 ^[38]
Durango 磷灰石	14.68	16.49	
Durango 磷灰石	14.20	16.30	Jonckheere 等 ^[39]
Fish Canyon 磷 灰石	15.35	16.38	Ketcham 等 ^[19] Carlson 等 ^[37]
Fish Canyon 磷 灰石	15.60	16.27	Gleadow 等 ^[38]
Fish Canyon 磷 灰石	15.00	16.16	
Mt. Dromedary 磷灰石	14.57	15.89	
Otway 磷灰石	14.58	16.17	Green ^[36]
Koto Rhyolite 锆石	10.89	10.94	Tagami 等 ^[40]
Nisatai Dacite 锆石	11.05	11.03	Yamada 等 ^[25]
Bulk Member Tuff 锆石	10.48	10.78	Hasebe 等 ^[41]
Fish Canyon 锆 石	10.67	10.61	
Mt. Dromedary 锆石	10.45	10.65	

由于锆石径迹蚀刻受到 α - 粒子反冲损伤效

应的影响,锆石径迹长度的测量相对复杂。Kasuya 等^[42]对自发径迹密度不同的多个锆石样品的自发裂变径迹进行了 1 h 的退火实验,发现其退火速率间不存在明显差异。但也有研究指出,锆石中的 U 含量和径迹年龄之间存在明显的负相关,表明随着辐射损伤的增强,锆石退火能力随之降低^[43]。近年来,对锆石退火特性的研究成果相继发表,但鉴于现有的实验数据,尽管可以结合拉曼光谱对辐射损伤效应进行量化,考虑不同损伤类型以不同的速率退火,实验室数据的退火模型在实际的地质运用中未必有效,因此锆石裂变径迹的数据解释需要根据具体的地质背景考虑其退火特性。

磷灰石相对于锆石更易退火,特别是在地壳上部数千米的温度下。因此,裂变径迹年龄往往与样品的形成时代无关,而与其后期演化历史有关。值得引起注意的是,实验室退火实验可以消除由 U、Th 衰变造成的晶格中累积的 α - 粒子反冲损伤效应,这对磷灰石几乎没有影响(可能是因为 α - 粒子反冲损伤效应未在磷灰石中保存下来),但对锆石和榍石来说,其蚀刻特性可能会发生重大改变,使多晶粒策略的主要优势之一失效。

3 裂变径迹技术的地质应用

3.1 约束成矿时代: 以哈日扎—哈龙休玛矿区为例

如何确定热液矿床的成矿年龄和成矿时代,是当今世界找矿研究的前沿问题。成矿时代的不确定性严重制约了成矿规律、矿床成因、远景预测以及成矿与构造热事件关系的研究。裂变径迹热年代学作为一种新的技术方法,在确定矿化年龄和时代方面具有一定的优势,将裂变径迹技术应用于热液矿化是一项新的尝试。由于裂变径迹在晶格中进行退火,径迹的稳定性除温度外不受其他因素影响,因此裂变径迹热年代学非常适合记录矿床形成的开放系统或封闭系统中发生的热事件。重建热事件历史,反映热事件温度和时间的变化关系是裂变径迹方法的优势^[44]。

Feng 等^[45]采用锆石、磷灰石裂变径迹分析和磷灰石 (U - Th)/He 定年法约束了青藏高原北部东昆仑哈日扎—哈龙休玛矿区矿体的剥蚀历史,揭示该地区自中生代初以来经历了 3 个冷却阶段,厘定了各阶段的冷却速率和剥蚀量,对矿区的剥蚀历史进行了定量研究(图 3)。

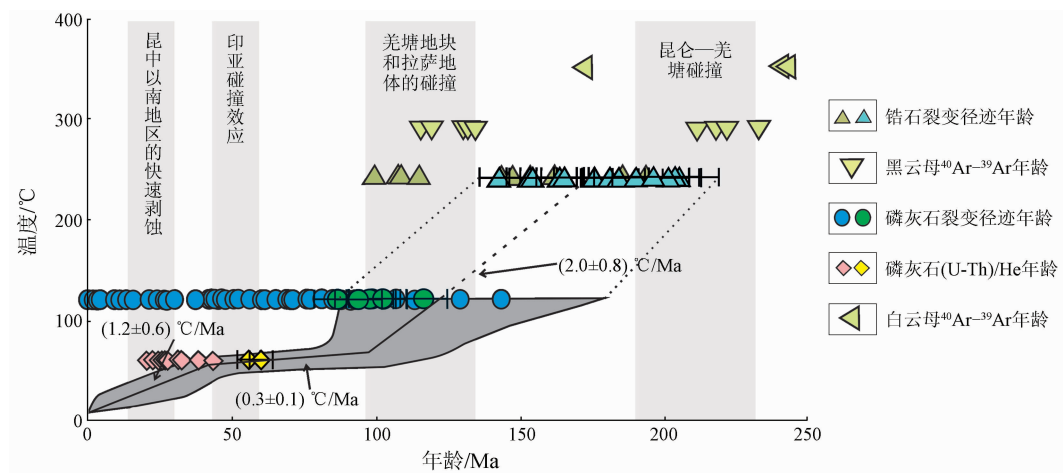


图3 哈日扎—哈龙玛矿区的矿床热历史重建^[45]

Fig.3 Reconstruction of thermal history in the Hariza – Halongxuma deposit^[45]

3.2 剥蚀隆升研究：以黄山与阿尔泰山为例

隆升剥蚀速率是大陆动力学研究的重要内容,其理论基础之一为:在稳定大陆地壳内部,温度随深度的增加而上升,因此通过样品的 $T-t$ 轨迹可以反演地质体相对于地表的运动情况。当隆升剥蚀由构造运动引起时,热年代学数据可以约束地壳运动的动力学过程;当隆升剥蚀由正常的风化作用引起时,热年代学数据则可以揭示造山带中的沉积过程。裂变径迹技术在造山带、地貌演化和盆山耦合等研究领域发挥了重要作用,尤其是在造山带增生、隆升冷却-剥露演化历史研究中,通过有效反演造山带增生造山期间的岩浆热作用过程,以及陆内演化期间地壳岩石的 $T-t$ 轨迹与隆升剥蚀历史,对构造热事件的时限、期次、山脉的隆升剥蚀速率乃至造山作用对气候、环境的影响都可以作出量化的约束,就单个样品而言,计算隆升剥蚀历史主要依靠冷却速率(dT/dt)与假设的地温梯度(γ),即剥蚀速率 $dz/dt \approx (1/\gamma)(dT/dt)$,冷却速率可由同一样品中不同矿物、不同同位素体系之间的封闭温度差和年龄差求得。对于地质过程中匀速单调冷却的样品,同位素体系所记录的年龄值代表其温度下降至有效封闭温度以下后至今的时间。因此,在已知矿物同位素年龄值和有效封闭温度的前提下,假定研究区古地温梯度为一定值,结合冷却速率即可对地质体隆升剥蚀过程进行量化约束。年龄-高程法要求在同一地质体的不同高程处采集系列样品,选

择相同矿物与相同测年方法,将高程差作为剥露差,以获得年龄和高程之间的关系。该方法巧妙地回避了古地温梯度,但要求样品间的水平距离要尽可能小,以消除地形对地下等温面形状的影响。袁万明等^[46]应用裂变径迹技术研究黄山地质公园景区的隆升与剥露历史,揭示其演变机理,获得的磷灰石裂变径迹结果与区内形成的多级古剥蚀面的构造隆升剥蚀作用有关,且不同地段差异隆升明显(图4)。

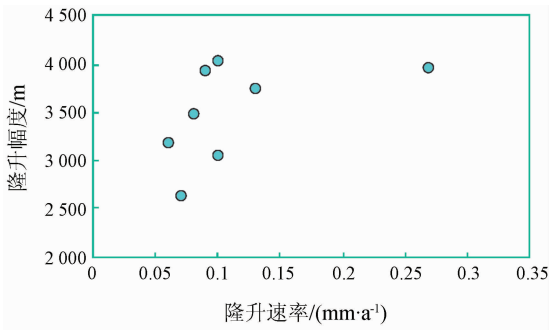


图4 黄山岩体剥蚀隆升研究实例^[46]

Fig.4 Research examples of denudation and uplift in Huangshan intrusion^[46]

Yuan 等^[47]运用磷灰石裂变径迹对中国新疆北部阿尔泰山的剥蚀历史进行分析,厘定了从中生代到新生代的冷却事件,认为自北向南开始隆升的时间渐早,这可能与隆升剥蚀主要受西伯利亚板块向南西挤压作用的控制有关,用裂变径迹技术限定的阿尔泰山的隆升剥蚀历史和准格尔盆地的沉积历史之间具备良好的对应关系(图5)。

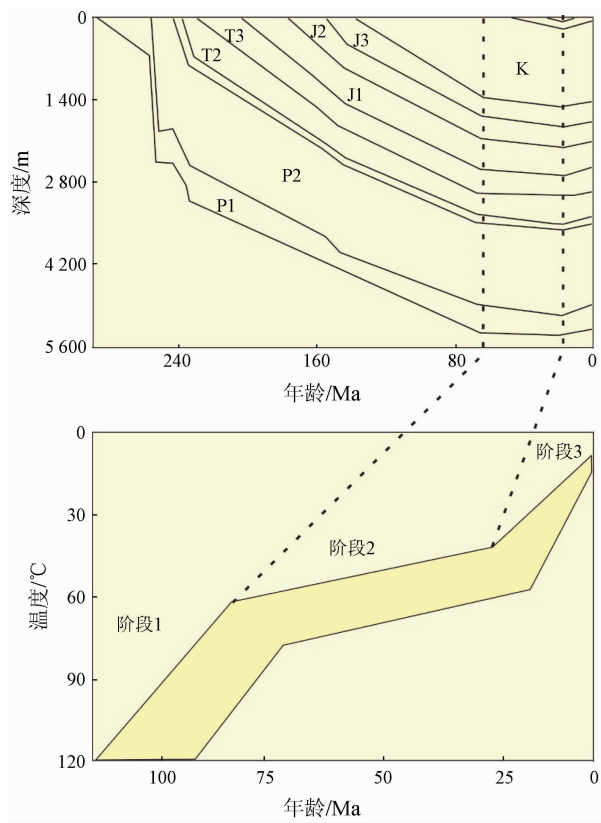


图 5 阿尔泰山与准噶尔盆地热历史与埋藏史对比^[47]

Fig. 5 Comparison of thermal history and burial history between Altai Mountains and Junggar Basin^[47]

3.3 沉积盆地热史恢复：以准噶尔盆地为例

沉积盆地周缘基岩矿物所保留的继承性裂变径迹可用来追溯物源信息,结合盆地中地层序列、镜质体反射率等古温标,重建构造-热演化历史。盆地热史分析是研究盆岭形成演化过程中不同时期古地温场和岩石热历史的有效手段,可为盆地形成演化的深部过程研究提供重要信息。磷灰石裂变径迹分析在盆地分析及油气资源评价方面具有重要地位,其退火温度(60~120℃)几乎与生油窗温度一致,因此被广泛应用于盆地古地温场与成油研究^[48]。值得注意的是,富 Cl 磷灰石的退火速率往往比富 F 磷灰石慢,故其完全退火温度较富 F 磷灰石略高,这一特性对识别沉积盆地中不同来源的磷灰石至关重要。在实际热史模拟中,往往结合多项低温热年代学参数和等效镜质体反射率进行多参数耦合模拟,可以相互约束和验证。邱楠生等^[49]利用镜质体反射率、磷灰石裂变径迹古温标等参数,对多个单井进行耦合模拟,得到准噶尔盆

地各构造单元的平均地温梯度演化结果,表明盆地 6 个主要构造单元的地温梯度演化存在差异:盆地南缘地温梯度最低而东部隆起区的地温梯度最高。不同的热演化历史导致了烃源岩演化生烃的差异,造就了盆地不同的油气勘探前景(图 6)。

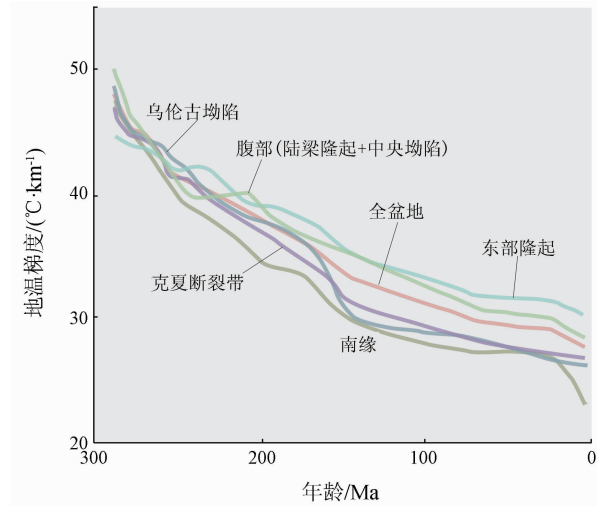


图 6 准噶尔盆地不同构造单元地温梯度演化模拟^[49]
Fig. 6 Evolution of thermal gradients in varied tectonic units in the Junggar Basin^[49]

3.4 裂变径迹技术的其他地质应用

Green 等^[50]对格陵兰东部詹姆森岛侏罗纪岩心样品中的磷灰石开展了裂变径迹测年,认为这些现代处于海拔 200 m 附近的沉积物,在裂谷期后的热沉降期间,自最大埋藏以来至少抬升了 3 km。Tagami^[51]提出断层运动时的摩擦作用使得岩石存在“再加热”过程,因此必定产生温度的变化,可以反映构造应力状态的时空变化,这对评价活动断层系统相关的地震活动起着关键作用。将裂变径迹分析与其他低温热年代学相结合,可以揭示地壳上层深成岩和变质岩的热演化过程。相关研究被应用于大别-苏鲁超高压-高压变质带^[52]以及阿尔卑斯超高压-高压变质带的研究中^[53]。沉积盆地内保存的碎屑矿物是解读盆地相关地质信息最有效的工具,裂变径迹分析可用来限制沉积年龄,并根据盆地的位置、年代学信息、碎屑矿物的物质成分与组成等信息,构建沉积物的来源与演化过程。碎屑矿物的裂变径迹研究在我国松辽盆地、柴达木盆地以及兰州盆地等均取得了良好进展^[54-56]。此外,以往的裂变径迹研究主要注重地质热历史和隆升作用过程,而缺乏对剥露作用和剥蚀程度的定量研究,研究矿床的隆升剥露,以及成矿后矿体保存

变化的特点和分布规律,是近年来裂变径迹技术应用的另一个方向^[57],在我国胶西北新城金矿床,甘孜—理塘金成矿带以及土屋—延东矿区都有良好的示范成果。

4 结 论

(1)目前磷灰石的退火机制研究相对成熟,而锆石退火的相关影响因素及机制研究仍需要进一步加强,基于实验室研究得到的退火特性为理想条件下的模型,数据解释中应参照地质背景。

(2)近年来裂变径迹技术的应用研究主要集中在造山带隆升剥蚀的定量化约束上,对矿床后期改造及沉积盆地的相关研究较为薄弱,加强该方面的相关研究将是未来裂变径迹技术的重要发展方向。

(3)目前裂变径迹研究与应用主要集中于磷灰石和锆石 2 种矿物,今后应重视其他矿物的相关研究,进一步深化和发挥裂变径迹年代学的作用。

参考文献 (References):

- [1] Boztuğ D, Jonckheere R C. Apatite fission track data from central Anatolian granitoids (Turkey): Constraints on Neo-Tethyan closure[J]. *Tectonics*, 2007, 26(3): TC3011.
- [2] Zheng D W, Zhang P Z, Wan J L, et al. Rapid exhumation at ~ 8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248(1-2): 198-208.
- [3] Grimmer J C, Jonckheere R, Enkelmann E, et al. Cretaceous? Cenozoic history of the southern Tan-Lu fault zone: apatite fission-track and structural constraints from the Dabie Shan (eastern China)[J]. *Tectonophysics*, 2002, 359(3/4): 225-253.
- [4] Yu J X, Zheng D W, Pang J Z, et al. Miocene range growth along the Altyn Tagh Fault: Insights from apatite fission track and (U-Th)/He thermochronometry in the western Danghenan Shan, China[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124(8): 9433-9453.
- [5] Pang J Z, Yu J X, Zheng D W, et al. Constraints of new apatite fission-track ages on the tectonic pattern and geomorphic development of the northern margin of the Tibetan Plateau[J]. *J Asian Earth Sci*, 2019, 181: 103909.
- [6] Gallagher K, Brown R, Johnson C. Fission track analysis and its applications to geological problems[J]. *Ann Rev Earth Planet Sci*, 1998, 26: 519-572.
- [7] 周祖翼. 低温年代学: 原理与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhou Z Y. Low Temperature Thermochronology: Principles & Applications[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [8] Donelick R A, Miller D S. Enhanced tint fission track densities in low spontaneous track density apatites using ²⁵²Cf-derived fission fragment tracks: A model and experimental observations[J]. *Int J Radiat Applicat Instrumentat Part D Nucl Tracks Radiat Meas*, 1991, 18(3): 301-307.
- [9] Wagner G A, Reimer G M, Carpenter B S, et al. The spontaneous fission rate of U-238 and fission track dating[J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1975, 39(9): 1279-1286.
- [10] 庞建章. 基于 LA-ICP-MS 的磷灰石裂变径迹年龄测试方法及祁连山新生代扩展研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2019.
Pang J Z. Apatite Fission-Track Dating by LA-ICP-MS and Neogene Expansion of the Qilian Shan, North Tibetan Plateau[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration.
- [11] Cogné N, Chew D M, Donelick R A, et al. LA-ICP-MS apatite fission track dating: A practical zeta-based approach[J]. *Chem Geol*, 2020, 531: 119302.
- [12] Vermeesch P. Statistics for LA-ICP-MS based fission track dating[J]. *Chem Geol*, 2017, 456: 19-27.
- [13] Naeser C W, Faul H. Fission track annealing in apatite and sphene[J]. *J Geophys Res*, 1969, 74(2): 705-710.
- [14] Gleadow A J W, Hurford A J, Quaipe R D. Fission track dating of zircon: Improved etching techniques[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1976, 33(2): 273-276.
- [15] Yu J X, Zheng D W, Pang J Z, et al. Miocene range growth along the Altyn Tagh Fault: Insights from apatite fission track and (U-Th)/He thermochronometry in the western Danghenan Shan, China[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2019, 124(8): 9433-9453.
- [16] He P J, Song C H, Wang Y D, et al. Cenozoic exhumation in the Qilian Shan, northeastern Tibetan Plateau: Evidence from detrital fission track thermochronology in the Jiuquan Basin[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122(8): 6910-6927.
- [17] Wildman M, Brown R, Persano C, et al. Contrasting Mesozoic evolution across the boundary between on and off craton regions of the South African plateau inferred from apatite fission track and (U-Th-Sm)/He thermochronology[J]. *J Geophys Res Solid Earth*, 2017, 122(2): 1517-1547.
- [18] Sun M, Lin S Y, Zhang F F, et al. Post-ore change and preservation of the late Paleozoic Tuwu porphyry Cu deposit in Eastern Tianshan, NW China: Constraints from geology and apatite fission track thermochronology[J]. *Ore Geol Rev*, 2021, 137: 104297.
- [19] 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(9): 1235-1255.
- [20] Barbarand J, Carter A, Wood I, et al. Compositional and structural control of fission-track annealing in apatite[J]. *Chem Geol*, 2003, 198(1/2): 107-137.
- [21] Yuan W M, Qiugen Z, Bao Z K, et al. Zircon fission track thermochronology constraints on mineralization epochs in Altai Mountains, northern Xinjiang, China[J]. *Radiat Meas*, 2009,

- 44(9/10):950–954.
- [22] Yang L, Yuan W M, Zhu X Y, et al. Late Triassic – cenozoic thermochronology in the Southern Sanjiang Tethys, SW China, new insights from zircon fission track analysis[J]. *J Earth Sci*, 2019, 30(5):996–1004.
- [23] 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]. *J Geophys Res*, 1965, 70(6):1497–1502.
- [24] Krishnaswami S, Lal D, Prabhu N, et al. Characteristics of fission tracks in zircon: Applications to geochronology and cosmology[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 1974, 22(1):51–59.
- [25] Yamada R, Tagami T, Nishimura S. Confined fission – track length measurement of zircon: Assessment of factors affecting the paleotemperature estimate[J]. *Chem Geol*, 1995, 119(1/2/3/4):293–306.
- [26] Tagami T. Zircon fission – track thermochronology and applications to fault studies[J]. *Rev Mineral Geochem*, 2005, 58(1):95–122.
- [27] Tagami T, Carter A, Hurford A J. Natural long – term annealing of the zircon fission – track system in Vienna Basin deep borehole samples: Constraints upon the partial annealing zone and closure temperature[J]. *Chem Geol*, 1996, 130(1/2):147–157.
- [28] Rahn M K, Brandon M T, Batt G E, et al. A zero – damage model for fission – track annealing in zircon[J]. *Am Mineral*, 2004, 89(4):473–484.
- [29] Yamada R, Yoshioka T, Watanabe K, et al. Comparison of experimental techniques to increase the number of measurable confined fission tracks in zircon[J]. *Chem Geol*, 1998, 149(1/2):99–107.
- [30] Garver J I, Kamp P J J. Integration of zircon color and zircon fission – track zonation patterns in orogenic belts: Application to the Southern Alps, New Zealand[J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1–4):203–219.
- [31] Yamada R, Tagami T, Nishimura S, et al. Annealing kinetics of fission tracks in zircon: An experimental study[J]. *Chem Geol*, 1995, 122(1–4):249–258.
- [32] Li W X, Wang L M, Sun K, et al. Porous fission fragment tracks in fluorapatite[J]. *Phys Rev B*, 2010, 82(14):144109.
- [33] Li W X, Wang L M, Lang M, et al. Thermal annealing mechanisms of latent fission tracks: Apatite vs. zircon[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2011, 302(1/2):227–235.
- [34] Bernet M. A field – based estimate of the zircon fission – track closure temperature[J]. *Chem Geol*, 2009, 259(3/4):181–189.
- [35] Hasebe N, Mori S, Tagami T, et al. Geological partial annealing zone of zircon fission – track system: Additional constraints from the deep drilling MITI – Nishikubiki and MITI – Mishima[J]. *Chem Geol*, 2003, 199(1/2):45–52.
- [36] 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 Planet Sci Lett*, 1988, 89(3/4):335–352.
- [37] Carlson W D, Donelick R A, Ketcham R A. Variability of apatite fission – track annealing kinetics: I. Experimental results[J]. *Am Mineral*, 1999, 84(9):1213–1223.
- [38] Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, et al. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis[J]. *Contr Mineral Petrol*, 1986, 94(4):405–415.
- [39] Jonckheere R, Enkelmann E, Min M Y, et al. Confined fission tracks in ion – irradiated and step – etched prismatic sections of Durango apatite[J]. *Chem Geol*, 2007, 242(1/2):202–217.
- [40] Tagami T, Ito H, Nishimura S. Thermal annealing characteristics of spontaneous fission tracks in zircon[J]. *Chem Geol Isotope Geosci Sect*, 1990, 80(2):159–169.
- [41] Hasebe N, Tagami T, Nishimura S. Towards zircon fission – track thermochronology: Reference framework for confined track length measurements[J]. *Chem Geol*, 1994, 112(1/2):169–178.
- [42] Kasuya M, Naeser C W. The effect of α – damage on fission – track annealing in zircon[J]. *Int J Radiat Applat Instrumentat Part D Nucl Tracks Radiat Meas*, 1988, 14(4):477–480.
- [43] Garver J I, Kamp P J J. Integration of zircon color and zircon fission – track zonation patterns in orogenic belts: Application to the Southern Alps, New Zealand[J]. *Tectonophysics*, 2002, 349(1/2/3/4):203–219.
- [44] Yuan W M, Mo X X, Zhang A K, et al. Fission track thermochronology evidence for multiple periods of mineralization in the Wulonggou gold deposits, eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province[J]. *J Earth Sci*, 2013, 24(4):471–478.
- [45] Feng Y L, Yuan W M, Tian Y T, et al. Preservation and exhumation history of the harizha – halongxiuima mining area in the East Kunlun Range, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Ore Geol Rev*, 2017, 90:1018–1031.
- [46] 袁万明, 杨志强, 张招崇, 等. 安徽省黄山山体的隆升与剥露[J]. *中国科学:地球科学*, 2011, 41(10):1435–1443.
- Yuan W M, Yang Z Q, Zhang Z C, et al. The uplifting and denudation of main Huangshan Mountains, Anhui Province, China[J]. *Sci China Earth Sci*, 2011, 41(10):1435–1443.
- [47] Yuan W M, Carter A, Dong J Q, et al. Mesozoic – Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China: New constraints from apatite fission track data[J]. *Tectonophysics*, 2006, 412(3/4):183–193.
- [48] Yang P, Wu G H, Ren Z L, et al. Tectono – thermal evolution of Cambrian – Ordovician source rocks and implications for hydrocarbon generation in the eastern Tarim Basin, NW China[J]. *J Asian Earth Sci*, 2020, 194:104267.
- [49] 邱楠生, 杨海波, 王绪龙. 准噶尔盆地构造 – 热演化特征[J]. *地质科学*, 2002, 37(4):423–429.
- Qiu N S, Yang H B, Wang X L, et al. Tectono – thermal evolution in the Junggar Basin[J]. *Chin J Geol*, 2002, 37(4):423–429.
- [50] Green P F, Japsen P. Burial and exhumation history of the Jameson Land Basin, East Greenland, estimated from thermochronologi-

- cal data from the Blokelyv – 1 core [J]. Geol Survey Denmark Greenland Bull, 2018, 42: 133 – 147.
- [51] Tagami T. Application of fission – track thermochronology to understand fault zones [M] // Malusà M, Fitzgerald P. Fission – Track Thermochronology and its Application to Geology. Cham: Springer, 2019: 221 – 233.
- [52] Liu L P, Li Z X, Danišák M, et al. Thermochronology of the Sulu ultrahigh – pressure metamorphic terrane: Implications for continental collision and lithospheric thinning [J]. Tectonophysics, 2017, 712/713: 10 – 29.
- [53] Schwartz S, Gautheron C, Audin L, et al. Foreland exhumation controlled by crustal thickening in the Western Alps [J]. Geology, 2017, 45(2): 139 – 142.
- [54] Song Y, Ren J Y, Liu K Y, et al. Post – rift anomalous thermal flux in the Songliao Basin, NE China, as revealed from fission track thermochronology and tectonic analysis [J]. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2018, 508: 148 – 165.
- [55] Jian X, Guan P, Zhang W, et al. Late Cretaceous to early Eocene deformation in the northern Tibetan Plateau: Detrital apatite fission track evidence from northern Qaidam basin [J]. Gondwana Res, 2018, 60: 94 – 104.
- [56] Wang X X, Deng L Z, Zattin M, et al. Palaeogene growth of the northeastern Tibetan Plateau: Detrital fission track and sedimentary analysis of the Lanzhou basin, NW China [J]. J Asian Earth Sci, 2017, 147: 322 – 331.
- [57] 陈夷, 杜治利, 康志宏, 等. 阿尔金山前下 – 中侏罗统页岩气成藏地质条件分析 [J]. 中国地质调查, 2019, 6(4): 40 – 50.
- Chen Y, Du Z L, Kang Z H, et al. Analysis on geological conditions of shale gas accumulation in Lower – Middle Jurassic strata of Southern Altyn Tagh [J]. Geol Survey China, 2019, 6(4): 40 – 50.

Fission track technology and its geological applications

YANG Li, YUAN Wanming, HONG Shujiong, FENG Zirui

(Institute of Earth Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The fission track technology has been applied to many geological applications with advantages of less sample consumption, lower closure temperature and wider dating range. For example, fully or partially annealed samples can effectively record the cooling – exhumation history and constrain the onset of thrust fault activity. The relationship between the weathering and denudation history of the overlying rocks and the preservation of the deposit can be used to quantify the amount of denudation and uplift in the deposit and to predict the mineralization. The fission track closure temperature of zircon is corresponding to the temperature interval of gas production, which can also be applied to oil and gas exploration studies. Recently, the combination of elemental content analysis with fission track techniques was also allowed for provenance analysis, and the implementation of LA – ICP – MS technology has brought the dawning for low U content mineral track measurements. The authors in this paper briefly summarize the results of fission annealing studies of apatite and zircon and the possible implications for data interpretation. The apatite annealing is affected by temperature, chemical composition, crystallographic anisotropy, and D_{par} value, while zircon track thermal stability is reduced mainly due to radiation damage effects. Laboratory annealing characterization provides an important theoretical reference for understanding the complex chemical dynamics of fission track annealing, but actual data interpretation must be combined with geological facts to obtain a clearer temporal framework for studying the evolution of geothermal events. The typical case studies of track dating on mineral deposits, mountain uplift denudation and basin thermal history were briefly analyzed in this paper, which would provide guidelines for relevant application studies of fission track.

Keywords: fission track; geological application; geological thermal history; geological thermal events

(责任编辑: 魏昊明)