

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.606



热年代学方法、技术手段及其在矿床地质中的研究进展

杨莉,袁万明*,王珂

中国地质大学科学研究院,北京 100083

摘要:同位素地质年代学是一门传统的定年学科,广泛应用于地质各个领域研究中。随着同位素地质年代学理论创新与技术进步,现在逐步发展成为地质热年代学,即将地质年代数据赋予相应封闭温度属性,使之不仅揭示地质事件年龄,而且反映该事件发生的温度条件。不同定年方法以及测试样品的不同,其对应的封闭温度不同,从而可以揭示地质体在更大温度或年龄范围的形成演化过程,定量研究矿区或矿体的隆升与剥露,评价矿床形成后的保存与变化状况,提高找矿预测效果。主要总结和论述诸如 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 、裂变径迹和(U-Th)/He等中-低温热年代学技术方法及其在矿床地质中的应用研究状况,分析热年代学技术与应用发展趋势,以期成矿作用研究提供新的应用技术手段。

关键词:地质热年代学;测试技术;定年方法;矿床。

中图分类号: P597

文章编号: 1000-2383(2018)06-1887-16

收稿日期: 2018-01-21

Research Advances of Thermochronology in Mineral Deposits

Yang Li, Yuan Wanming*, Wang Ke

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

Abstract: Isotopic geochronology, a traditional subject to obtain absolute isotopic ages based on radioactive decay theory, has been widely used to date geological time in various fields. With theoretical innovation and technical developments, the isotopic geochronology gradually develops into the thermochronology that is of closure temperature feature and could not only date geological event, but also ascertain both temperature and thermal history of economic geological event. Since various methods have different closure temperatures, several thermochronology techniques could be synthetically applied to recover whole geological evolution history in a wide range of temperature and/or age. The thermochronology methods are especially used to reveal mineralization ages and epochs, rates of exhumation-erosion of ore deposit or ore district, and ore deposit preservation potential, providing evidences for deep ore prospecting and mineralizing potentiality evaluation. This paper summarizes the middle-low temperature thermochronology methods that have been utilized in mineralization, such as $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, fission track and (U-Th)/He techniques, and then presents research developments. It is expected that this work should provide new research contents and helpful technical methods for ore deposit field.

Key words: geological thermochronology; measure technique; dating method; ore deposits.

同位素地质年代学依据放射性同位素衰变定律进行精确的地质计算,为地球形成以来各个主要地质事件和演化阶段确定了科学时标。所测年龄通常以100万年(Ma)来表示。同位素地质年代学是地质

学、核物理学和放射化学相结合、逐渐发展而成。它的完善与电子计算机技术、超微超纯分析技术特别是质谱分析技术密切相关,这些高技术的进步大大提高了同位素测量的灵敏度和分辨率。同位素热

基金项目:国家自然科学基金项目(Nos.41730427,41172088)。

作者简介:杨莉(1987-),女,硕士,主要从事低温热年代学研究。ORCID: 0000-0001-5168-3591。E-mail: yangli0211luck@126.com

* 通讯作者:袁万明, E-mail: yuanwm@cugb.edu.cn

引用格式:杨莉,袁万明,王珂,2018.热年代学方法、技术手段及其在矿床地质中的研究进展.地球科学,43(6):1887-1902.

年代学(isotope thermochronology)赋予 U-Pb、Rb-Sr、Sm-Nd、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、K-Ar 等同位素测年方法的温度特性,是在同位素年代学基础上引入封闭温度理论后得以扩展的结果,它不仅能够确定地质体时代,而且可以研究地质热历史、地质体冷却与隆升、剥蚀与埋藏,从而广泛应用于地貌演化、断层活动、岩浆作用和盆山耦合等相关地质过程研究,解决地质体长期演化过程中的关键问题,尤其是在研究构造热历史和地质体快速抬升方面已取得显著成效,诸如构造体制转换研究(Stockli, 2005; Avdeev and Niemi, 2011; Duvall *et al.*, 2013)、高原隆升与山体剥蚀(Spotila, 2005; Flowers *et al.*, 2009)等。随着理论发展完善和测试技术进步,热年代学在地形地貌演化(Shuster *et al.*, 2011; Enkelmann *et al.*, 2014)、沉积盆地埋藏历史(Qiu *et al.*, 2009; Bargnesi *et al.*, 2013)、沉积物源分析(Stock *et al.*, 2006)、天体研究(Trieloff *et al.*, 2003; Kleine *et al.*, 2008)和深部壳幔作用研究(Lorencak *et al.*, 2004)等方面具有不可替代作用。

地质体的隆升与剥露是影响矿床保存与变化的关键因素,虽然可以从不同角度刻画隆升作用和剥蚀过程,解决相关问题,但以往研究手段多注重定性地质描述,而对剥露过程和剥蚀程度的定量研究不够。借助热年代学技术开展隆升与剥蚀研究,能够定量提供地质体时间与温度间的演化历史和不同阶段的剥露程度,从而有效地制约不同矿带矿区隆升剥露特征和揭示矿床的保存变化状态。

He 扩散机制的深化,钾长石多重扩散域概念的提出,各种模拟程序的运用,诸如 HeFTy 立足于 MonteCarlo 法,QTQt 采用贝叶斯定律可对磷灰石、锆石裂变径迹(fission track, FT)及(U-Th)/He 和镜质体反射率数据进行正演和反演等,均为热年代学提供强有力理论支撑,使得低温热年代学快速发展,成为地学领域的新型研究手段,被应用于构造演化、山体隆升和盆山耦合等方面。某些矿物的热年代学封闭温度体系与热液成矿作用的温度区间一致,所以有学者认为对于矿床地质相关问题的研究同样可以运用热年代学手段进行解决(袁万明等, 1999, 2000; Chakurian *et al.*, 2003),尤其是中-低温热年代学封闭温度与热液成矿作用相适应,在揭示矿床形成和持续时间、矿床隆升与剥露时间以及矿床保存潜力等方面,具有重要指导意义(袁万明, 2016)。裂变径迹热年代学和(U-Th)/He 热年代学属于新兴技术方法,在矿床隆升与剥露研究中可行性好(Yuan *et al.*, 2009b;

陈文等, 2011)。磷灰石(U-Th)/He 和裂变径迹定年以其低封闭温度(分别为 55~80 °C 和 90~120 °C)、良好的互补性(部分保留带 PRZ(helium partial retention zone)和部分退火带 PAZ(partial annealing zones)部分重合)和彼此测年结果可交叉校正等特点,能有效约束矿床成矿期后抬升和剥露历史,限定低温热液活动的时限和跨度(Ehlers and Farley, 2003)。锆石以副矿物形式广泛存在于各类岩石中,具有良好的抗风化能力,在岩浆作用和变质作用等热动力过程中其性质和结构基本不受影响,是地质年代学和热年代学的理想定年矿物。锆石(U-Th)/He 数据亦广泛应用于成矿系统的热演化研究,矿床及其围岩中锆石和磷灰石等矿物的(U-Th)/He 和 FT 测年,可以获取矿床矿化、围岩蚀变以及后期遭受改造的年龄信息。由此可见,热年代学在矿床地质研究中应用广泛,前景可观。不过,目前国内外相关研究依然较少,研究程度较低。所以,本文拟就矿床中一低温热年代学相关研究的方法和应用,进行总结论述,以期促进深入研究与应用。

1 热年代学发展史

各种岩石普遍含有放射性同位素。在地质事件中,以一定状态存在于地质体(岩石或矿物)的某种放射性同位素,其母体在矿物或岩石形成过程中随时间而不断衰变,所产生的稳定子体同位素便在矿物或岩石中不断积累。如果该岩石和矿物自形成或被改造后一直保持封闭状态,那么岩石和矿物就像天然时钟一样,按照放射性衰变定律,随着时间的推移,母体衰减、子体积累,从而记录所经历的时间,这便是同位素地质年代学测年基本原理。

1906 年英国著名物理学家 Rutherford 首次提出利用岩石及矿物中 U、Th 衰变产生 ^4He 原理可以对矿物年龄进行计算,进而用于测定地质年代。作为地质学分支之一,同位素年代学依据放射性同位素衰变规律,确定地质体形成与地质事件发生时代,以研究地球和行星物质的形成历史和演化规律(陈文等, 2011)。同位素地质年代学(isotopic geochronology)实现了从以往古生物演化法、岩性对比法和地层层序法等定性描述到矿物定量分析的变革。立足放射性元素衰变机理,同位素地质年代学涵盖诸多常规测年方法,如 U-Pb 法、Sm-Nd 法、Ar-Ar 法、Rb-Sr 法、Re-Os 法和(U-Th)/He 法等。这些属于测量母体、子体含量及同位素组成的方法学;此外还有一些不需测定母体、子体含量的测年方法,例如裂变

径迹法,其基于 ^{238}U 自发裂变产生的辐射损伤效应,通过测量矿物裂变径迹累积量而定年。

学者们又发现,同一地质体不同矿物年龄或者同一矿物不同定年方法,年龄数据有不一致现象。20世纪70年代初,Dodson(1973)提出了封闭温度理论,引入了冷却年龄概念,即矿物温度上升到足以使其同位素体系封闭以来的时间,得到的矿物年龄即为冷却年龄(或表观年龄)。封闭温度概念的引入,对不同方法间年龄差异作出合理解释,从而成为根据不同矿物同位素测年技术反演地质体冷却历史与演化过程的理论基础。

同位素地质年代学的前提之一,是岩石及矿物等地质体内同位素体系自形成后处于封闭体系,没有母体与子体的加入或丢失。当然,对于地质体这是理想情况,实际上诸多放射性同位素系统受到干扰,如构造活动破坏、变质作用、盐类的溶解沉淀反应、云母的变形再结晶过程和扩散导致的子体同位素丢失等,都会造成矿物中子体同位素丢失,甚至有的同位素体系重置温度很高,所以从本质上说,所有放射性同位素测年方法都属于热年代学范畴(Harrison,2005)。

20世纪80年代初,Berger and York(1981)首次使用了“热年代学”(thermochronology)一词。此后,Harrison(2005)运用钾长石阶段加热实验进行矿物中Ar扩散行为研究,提出多重扩散域模型(multiple diffusion domain mode, MDD),相比其他热年代学手段提供单一的演化历史来说,由钾长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法进行的氩多重扩散域理论(MDD)模拟,其时间-温度模型在某种意义上来说是热年代学的“法宝”,它可提供持续的热历史,进而使热年代学研究得到广泛应用。该模型是对Dodson(1973)封闭温度模型的扩展,是同位素地质年代学研究中的一次飞跃,它把时间与温度联系起来,衍生出此后一系列热年代学相关研究,即利用同一地质体中不同矿物(分别对应不同的同位素体系),或者不同高程的同种矿物年龄结果及其所对应的封闭温度,可得到该地质体的热演化史(Lovera *et al.*, 1989, 1991; Harrison *et al.*, 1993). Harrison and Clarke(1979)、Harrison *et al.*(1985)则致力于将Ar-Ar年代学方法不断完善并将其运用于热年代学的相关研究中。与此同时,科学家们综合裂变径迹年龄和裂变径迹长度分布,来反演地质体的热演化历史,并提出部分退火带(PAZ)的概念。随着同位素技术的发展与方法创新,可用于同位素测年的矿物种类不断增加,测年精度大幅提高,目前同位素地质年代学已经发展

到较高水平。

地质年代学与热年代学虽然有差异,但热年代学是在地质年代学的基础上结合相关新兴理论而发展完善所形成的。矿物形成时间及其相关时间-温度演化历史,都是热年代学需要解决的核心问题。热年代学除关注地质体形成时代外,还重视不同地质作用引发热事件以及造成地质体保存变化等关键问题。利用热年代学手段确定地质体热演化历史之后,结合实际地质背景与数值模拟结果,能够解释包括矿体在内的地质体构造折返和埋藏剥露等过程。经过长期发展,目前同位素热年代学已经形成较为完整的理论体系,并拥有U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 、FT(裂变径迹)和(U-Th)/He等测年技术作为重要支柱手段,广泛应用于造山带隆升冷却-剥露、沉积盆地热演化历史、矿床剥蚀-保存变化研究中。热年代学的发展,对构造地质、岩浆活动、成矿作用和盆山耦合等,具有巨大推动作用,对矿体等地质体的诸多演变过程提供了量化约束。

地质热年代学比地质年代学含义更加广泛,尤其是低温热年代学技术的出现,使得地质年代学运用于近地表地质过程研究,并随着矿物退火动力学和正、反演方法研究的深入,FT技术亦成为低温热历史演化的分析工具(Yuan *et al.*, 2007, 2009a, 2009b)。

在扩散理论上发展起来的 $^4\text{He}/^3\text{He}$ 热年代学,采用质子照射磷灰石使其内部生成均匀分布的 ^3He ,应用数学方法确定矿物颗粒中 ^4He 空间分布,由此限制样品所经历热历史,目前主要用于限制冰川侵蚀或河流下切时间、速率、反演冷却历史等(Shuster and Farley, 2004)。利用加速器质谱直接探测原子个数的原子阱痕量分析方法(atom trap trace analysis, ATTA),可有效实现地下水寿命测定,特别是对于5~100 Ma水、冰样品的测年效果显著。河流沉积物中宇宙成因 ^{10}Be 含量的测定,能反映较长时间($10^3 \sim 10^7$ a)和较大空间尺度上侵蚀作用大小和过程,已成为目前解决河流侵蚀速率的有效方法(Lupker *et al.*, 2012)。

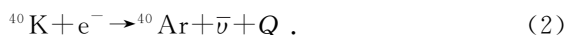
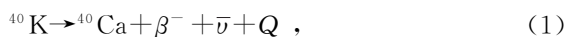
2 热年代学主要技术手段

U-Pb法由于封闭温度较高而通常不能用于中-低温(600℃以下)热过程研究,在高温区间岩体易发生原地冷却,与构造隆升冷却过程难以区分,所以,U-Pb法一般不应用于构造热历史恢复(王非等,2014)。在此主要讨论中-低温氩-氩年代学和

低温裂变径迹与(U-Th)/He 技术.

2.1 氩-氩中一低温热年代学

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法是在传统 K-Ar 定年方法基础上发展而来.自然界中 K 有 ^{39}K 、 ^{40}K 、 ^{41}K 三种同位素,同位素丰度分别为 $^{39}\text{K} = 93.2581\%$, $^{40}\text{K} = 0.01167\%$, $^{41}\text{K} = 6.7302\%$.除 ^{40}K 为放射性同位素外,其他两种同位素均为稳定同位素. ^{40}K 具有双重衰变,其衰变方程如下:



其中, β^- 为 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ 发生放出电子的 β^- 衰变过程; Q 为在 ^{40}K 分支衰变中释放的能量, $\bar{\nu}$ 为反电子中微子; e^- 表示电子.

在衰变过程中,有 89.5% 的 ^{40}K 通过方程(1)衰变成 ^{40}Ca ,有 10.5% 的 ^{40}K 通过方程(2)衰变成 ^{40}Ar ,总的衰变常数 $\lambda = 5.543 \times 10^{-10}$ a.K-Ar 定年方法和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法都以 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ 这一放射性衰变分支为基础.在核反应堆中用快中子照射含钾矿物,使得 ^{39}K 捕获一个中子的同时释放一个质子蜕变为 ^{39}Ar .



其中, n 代表中子, P 代表质子.

年龄计算公式如公式(4):

$$t = 1/\lambda \ln[J(^{40}\text{Ar}^*/^{39}\text{Ar}) + 1], \quad (4)$$

其中 J 为照射参数, λ 为衰变常数, $^{40}\text{Ar}^*$ 为放射性成因 ^{40}Ar , ^{39}Ar 为经快中子照射后由 ^{39}K 转变而成.此后 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法发展了阶段升温法以及激光显微探针技术,尤其是阶段升温 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法获取的多阶段表面年龄、坪年龄、正反等时线年龄等,给出了大量年代学信息,使得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法逐步成为应用最广泛的同位素测年方法之一.

过去几十年间,随着分析测试技术不断进步和完善,加之在成矿作用过程中常伴生有大量含钾矿物产生,为测定成矿事件时限提供了可能,也使得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法成为矿床年代学研究的主要技术手段之一.由于 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测年矿物广泛,这些矿物的封闭温度差异较大,从 600~140 °C,能有效地记录从地表几公里到十几公里的热信息.因此, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法热年代学成为研究矿床保存、抬升和剥露历史的重要工具(陈文等,2011).

白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法通常可用以确认矿床热液活动时限, Snee *et al.* (1988) 对海西期什凯拉钨锡多金属矿床进行白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 测年分析,识别出 3 个主要成矿阶段,即氧化物-硅酸盐阶段、硫化物

阶段和云英岩化阶段.他们认为高精度白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄谱不仅可以研究矿物氩扩散控制机制,还能约束矿床矿化时限、矿化持续时间以及矿化期次等问题. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法能有效揭示矿床演化过程中时间-温度关系,成为矿床热年代学研究的重要支撑技术(Snee *et al.*, 1988).变质岩、过铝质火成岩、伟晶岩中白云母含量较高,高压变质环境下还可形成多硅白云母,白云母的封闭温度介于 270~325 °C (Snee *et al.*, 1988). Chesley *et al.* (1993) 对英国科努比亚包岩体及相关矿床进行热年代学研究,白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学是造山型金矿年代学研究比较可靠的方式.前人曾利用成矿围岩白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄来限定围岩冷却历史,阐明阿拉斯加造山型金矿成矿作用过程 (Miller *et al.*, 1994, 1995).白云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄也可用于前寒武或早古生代金矿热历史研究 (Onstott *et al.*, 1989).

黑云母是进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究最普遍的矿物,在保证黑云母纯度情况下,可以获得比较理想的年龄结果.在矿床相关研究中(尤其是蚀变阶段研究中),黑云母不如白云母更具实际意义,但在热历史演化研究中黑云母和金云母都是比较理想的矿物.角闪石在火成岩和变质岩中广泛分布,角闪石中放射成因氩含量较高,其封闭温度在 550 °C 以上 (Harrison and McDougall, 1981).变质岩中角闪石可用于研究变质过程结束后的冷却过程,如果角闪石形成温度低于其封闭温度,则这种角闪石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄代表其变质时代.矽卡岩和火山岩中角闪石年龄可以代表火山活动时间和接触变质作用发生时间 (Chesley *et al.*, 1993).目前矿床年代学中,角闪石主要用来界定发生矿化前围岩的冷却过程,以此来限定矿化作用时限.

伊利石含硅较多含钾较少,粒度细,一般 $< 2 \mu\text{m}$.沉积岩中的伊利石,一般是由于低级变质作用形成.对低温热液矿床来说,伊利石可能是进行 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究首选的矿物 (Halliday, 1978).低温钾长石、透长石、冰长石都是目前氩-氩年代学研究常用的碱性长石;钾长石的封闭温度不像其他矿物是一个基本确定值,而是一个连续的温度区间,约 350~150 °C (Lovera *et al.*, 1989; McDougall and Harrison, 1999).钾长石氩-氩年代学对于研究浅部地壳冷却-隆升过程极为有效,此外低温钾长石也可用于岩浆系统的冷却过程研究 (Geissman *et al.*, 1992).相比于角闪石、黑云母等含水矿物,钾长石不含水,在高温中结构稳定,逐步释气过程可以反演 Ar 同位素分布特征.因此,钾长石可以

用于反演热历史,并追溯其地质体构造演化过程研究(王非等,2014)。透长石属于中酸性火山岩常见高温钾长石,透长石快速冷却结晶而成,不易蚀变,K含量高,晶体结构稳定,K和Ar分布均一性好,是进行氩-氩年代学研究的理想样品,常用作标准物质。冰长石形成于浅成低温热液矿床中,目前研究表明冰长石可以成功用于成矿年龄的限定(Groff *et al.*,1997),在某些情况下还可以用于沿着断层面流体流动和钾交代作用的时间界定。Brooks and Snee(1996)用冰长石和透长石对内华达州火山岩进行测定,结果与沿着低角度拆离断层面表面流动流体界定的年龄一致。

除了上述矿物外,矿床中 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法的适用性不断扩大,表明明矾石族矿物(含钾硫酸盐矿物)亦是较好的测试矿物。明矾石广泛分布于硫化物矿床和斑岩型铜矿氧化带中。Vasconcelos *et al.*(1994)应用激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测定美国西部和西非不同风化剖面中表生明矾石和黄钾铁矾年龄,证实明矾石和黄钾铁矾都是 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 直接测定年龄的理想对象。其他矿物如碱硬锰矿和伊利石都可以用来解决矿床学的相关问题。Landis *et al.*(2005)估算的明矾石封闭温度为200~210℃,锰氧化物常在表生和热液环境中形成,所以可以用来测定风化过程或风化矿床的年龄,笔者总结整理的不同矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 封闭温度列于表1。

综上所述, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学在矿床学研究中彰显出巨大潜力,该方法不仅可以直接提供关于矿床形成时代的信息,也可以用来限定矿化作用时间及其温度特征。年龄谱可以有效地揭示成矿作用发生前后矿物的Ar分布特征。由于年龄谱中能够解读出矿物是否受到矿化作用的影响,所以即使是那些遭受强烈围岩蚀变的矿物,其 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年结果仍然可以提供关于成矿过程的相关信息。绝大部分构造作用发生于中上地壳,涉及温度在~500℃以内,故

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法已经成为研究矿床热演化历史的重要手段和支撑技术。

2.2 裂变径迹和(U-Th)/He低温热年代学

低温热年代学(low-temperature thermochronology)作为热年代学研究的重要分支和前沿领域,目前主要涉及的方法包括裂变径迹法(FT)和(U-Th)/He法。与其他同位素定年方法相比,FT和(U-Th)/He定年体系最大优点是对低温热事件的敏感性,其低封闭温度可给出地质事件最后阶段的热历史信息。不同学者对不同矿物FT和(U-Th)/He体系封闭温度进行了测定,绝大多数温度低于300℃,尤其是磷灰石(U-Th)/He的封闭温度低至70℃,它能提供地质体冷却最晚期的热演化信息。结合锆石U-Pb、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 以及裂变径迹年龄,可以获得地质体从形成、蚀变、抬升到最后剥露较为完整的热历史信息,定量确定地质事件的发生时间、冷却幅度、隆升速率等特征,揭示近地表地质、流体事件时间与温度的定量约束,这是研究上地壳和近地表地质过程的有效工具(表2)。磷灰石裂变径迹法和(U-Th)/He法的联合使用,为地质体演化历史提供了较为精确的时间制约,也是以往热年代学研究范围的延伸(Warnock *et al.*,1997;House *et al.*,2002)。

(U-Th)/He同位素体系中,He扩散行为是影响矿物同位素体系是否能够准确记录年龄的重要因素,He扩散行为研究是合理利用(U-Th)/He技术的关键。FT退火动力学过程研究表明,矿物退火动力学过程主要受控于温度、时间、矿物成分(如磷灰石Cl含量)以及径迹与晶体轴之间的夹角等因素影响。FT退火模型和地质环境的有机结合,是检验矿物退火模型是否很好模拟低温(特别是<60℃)条件下热过程的关键。激光剥蚀ICPMS法的发展,裂变径迹长度测量标准化推广和电气石裂变径迹研究的深化,将为裂变径迹研究拓宽新的领域(高绍凯等,2005)。

表1 不同矿物 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 封闭温度

Table 1 Closure temperatures of different minerals for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ method

矿物	封闭温度及其出处
角闪石	580~480℃(Harrison and McDougall,1981);500±50℃(Reddy <i>et al.</i> ,1997)
白云母	325~270℃(Snee <i>et al.</i> ,1988);380℃(Robbins,1972)
黑云母	340~280℃(McDougall and Harrison,1999);348℃(Grove and Harrison,1996)
长石	150~350℃(McDougall and Harrison,1999)
钾长石	223℃(Foland,1994)

表 2 不同矿物的 (U-Th)/He 体系封闭温度

Table 2 The different mineral closure temperatures for (U-Th)/He systems

矿物	封闭温度区间	参考文献出处
磷灰石	105±30 °C	Wolf <i>et al.</i> , 1998
	~80~120°(1 °C/Ma)	Warnock <i>et al.</i> , 1997
	~95~135 °C (10 °C/Ma)	
	70 °C	Braun, 2002
	65~75 °C	Farley, 2000
	55~80 °C	Flowers <i>et al.</i> , 2009
	80~90 °C	Crowley <i>et al.</i> , 2002
	62 °C	Flowers <i>et al.</i> , 2009
	70 °C	Farley, 2000; Reiners and Farley, 1999, 2001
	60~75 °C	Ehlers and Farley, 2003
锆石	75 °C	Wolf <i>et al.</i> , 1996
	75±5 °C	Wolf <i>et al.</i> , 1998
	183 °C	Reiners <i>et al.</i> , 2004
	140~220 °C	Guenther <i>et al.</i> , 2013
	200~230 °C	Reiners <i>et al.</i> , 2002
	181 °C	Wolf and Stockli, 2010
	180 °C	Reiners <i>et al.</i> , 2002, 2003
	160~210 °C	Reiners <i>et al.</i> , 2002
	200 °C	Farley, 2000; Reiners and Farley, 2001
	190 °C	Ehlers and Farley, 2003
榍石	175~195 °C	Tagami <i>et al.</i> , 2003
	191~218 °C	Reiners and Farley, 1999
磁铁矿	200 °C	Farley, 2000
	~250 °C	Blackburn <i>et al.</i> , 2007
独居石	206±24 °C, 230±4 °C, 286±13 °C	Boyce <i>et al.</i> , 2005

注:采用(U-Th)/He方法.

表 3 不同矿物的 FT 体系封闭温度

Table 3 The different mineral closure temperatures for FT systems

矿物	封闭温度区间	参考文献出处
锆石	~250 °C	Tagami and Shimada, 1996
	205±18 °C	Bernet, 2009
	235~245 °C	Brandon, 1992
	~240 °C	Yamada <i>et al.</i> , 1995
	210±20 °C	Zaun and Wagner, 1985
	~220~235 °C	Liu <i>et al.</i> , 2000
	215~240 °C	Garver <i>et al.</i> , 1998
	240 ± 20 °C	Brandon <i>et al.</i> , 1998
磷灰石	240 ± 50 °C	Hurford, 1986
	~115 °C	Batt and Braun, 1999
	110 ± 10 °C	Gleadow <i>et al.</i> , 1983
	~110~135 °C	Liu <i>et al.</i> , 2000
	100~120 °C	Garver <i>et al.</i> , 1998
榍石	125 °C	Gleadow <i>et al.</i> , 1983
	81~200 °C	Ketcham <i>et al.</i> , 2003
	265~310 °C	Coyle and Wagner, 1998

注:采用 FT 方法.

3 热年代学在矿床地质中的应用

应用锆石与磷灰石 FT 和 (U-Th)/He 等低温

热年代学技术约束岩石或矿床隆升剥露历史的理论与方法,已得到普遍认同和应用.由于低温热年代学对温度的敏感性,在揭示成矿构造活动、成矿时代与

持续时间、矿床隆升剥露和矿床保存潜力等方面,具有重要应用前景。

3.1 成矿构造背景研究

地质热年代学在矿床成因方面的应用,涉及限定矿化时间、矿床剥露速率以及预测矿床储量(Li *et al.*, 2014)。结合其他地质年代学方法(图 1),可获取从早期岩浆侵位—热液蚀变及矿化作用—后期侵蚀出露地表的完整热演化信息。据锆石 U/Pb 测年可以获取岩浆侵位的时限,角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar 和辉钼矿 Re-Os 以及黑云母 K-Ar、锆石 ZFT 等年龄;可以揭示矿化及热液蚀变起止时间,磷灰石、萤石、锆石、榍石(U-Th)/He 年龄和磷灰石 FT 年龄表征后矿化阶段(例如侵蚀和剥露作用)开始时间。

成矿构造研究是热年代学的重要应用领域。郇伟静等(2013)通过甘孜—理塘金矿带的磷灰石和锆石裂变径迹数据厘定该金矿带成矿构造活动时间介于 82~140 Ma,属于白垩纪成矿,与 140 Ma 以来陆内造山运动有关。通过热历史模拟识别出燕山期以来金矿带经历过 3 次构造—岩浆活动事件,并对成矿具有控制作用(郇伟静等, 2013)。新疆东天山地区土屋—延东大型斑岩铜矿形成时代一度认为是海西期, Yuan *et al.* (2007) 选取锆石、磷灰石进行裂变径迹分析,识别出 289~276 Ma、232~200 Ma、165~158 Ma 3 期成矿事件,证明区内印支期和燕山期成矿作用的存在,其中 289~276 Ma 和 232~200 Ma 2 期成矿作用亦代表早期挤压推覆剪切作用和晚期右行走滑剪切变形作用。

Li *et al.* (2014) 应用锆石 U-Pb、黑云母 Ar-Ar 及锆石和磷灰石(U-Th)/He 构建新疆包古图斑岩型铜矿床具有 5 个阶段冷却历史,不同冷却阶段主要是受制于欧亚大陆—羌塘地块以及羌塘地块与拉萨地块的碰撞拼合影响。锆石与磷灰石裂变径迹研究表明,西藏甲马多金属矿区存在 3 阶段热演化历史,以 20~18 Ma 和 5~4 Ma 为转折点,“两头”快速冷却,中间段降温缓慢,而 20~18 Ma 系冈底斯逆冲带活动期,5~4 Ma 区域快速抬升(Yuan *et al.*, 2001; Li *et al.*, 2014)。马士委(2017)亦获得甲马矿床在 18~13 Ma 期间发生快速冷却,认为矿床成矿事件与冈底斯快速隆升相伴生。东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史主要经历升温 and 降温过程各 2 次,多期次成矿作用相互叠加,使得整体成矿时间延长,加大矿化强度(袁万明等, 2000)。

胶东地区新城金矿黄铁矿 Rb-Sr 和锆石裂变径迹分析表明,96~75 Ma 及 66~52 Ma 的两组年龄

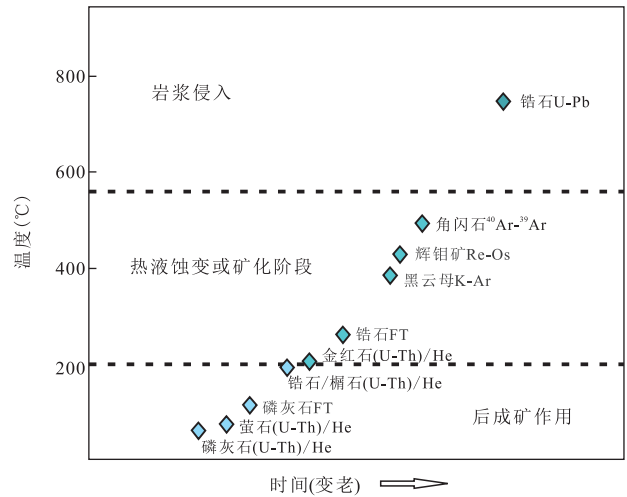


图 1 不同的同位素体系和地质过程之间的时间—温度关系

Fig.1 Schematic diagram of the time-temperature relationship between various chronometers and geological processes

是由后期构造活动所引起退火作用造成,约束的是成矿后区域构造活动时间,其中 96~75 Ma 对应于焦家断裂带在晚白垩世正断层活动时间,66~52 Ma 对应于焦家断裂带在始新世—渐新世右旋运动时间(Wang *et al.*, 2015)。胶东作为中国最重要的金矿集区, Deng *et al.* (2015) 在焦家金矿获得磷灰石裂变径迹年龄为 55~21 Ma,认为约 55 Ma 时焦家断裂带发生了右旋活动,大规模矿化作用与早白垩纪正断层左旋运动有关。

3.2 成矿时代及期次研究

矿床成矿时代的确定和成矿期次的划分,是热年代学在矿床地质上的重要应用。锆石 U/Pb 测年获取岩浆侵位的时限,角闪石⁴⁰Ar/³⁹Ar、辉钼矿 Re-Os、黑云母 K-Ar 和锆石 ZFT 等年龄,可以揭示矿化及热液蚀变起止时间。锆石矿物一般不属于热液矿物,但只要其遭受热液成矿作用的改造,裂变径迹发生退火作用,锆石 FT 年龄便可反映热液成矿作用时代。磷灰石、萤石、锆石、榍石(U-Th)/He 年龄和磷灰石 FT 年龄表征矿化后阶段(例如侵蚀和剥露作用)。综合矿区封闭温度不同矿物进行裂变径迹分析,可揭示不同热状态下的年龄,裂变径迹年龄反映的是热事件时代,包括成矿时代。低温热年代学技术的发展为成矿时代的确定带来新的契机和发展。以往成矿时代的确定是在区域地质构造演化、成矿条件、控矿因素、矿床特征等基础上,结合同位素年代学进行厘定。新兴中—低温热年代学技术在矿床年代学研究中前景可观,在直接定年、矿床后期改造时代、矿床揭顶时代等方面,都

具有应用潜力(陈文等,2006).不过,国内(U-Th)/He 实验室发展还处于起步阶段,应用(U-Th)/He 进行矿床地质的研究亦少,目前主要是将 FT 技术用于成矿时代及期次研究.

Snee *et al.* (1988) 选取葡萄牙什凯拉钨锡典型矿床不同矿化阶段白云母定年研究,认为成矿作用大约发生在 300 Ma.河北峪耳崖金矿经历多次的热液活动,成矿时代介于 82~200 Ma,其中 115~190 Ma 是主成矿期(汤云晖等,2003).新疆沙泉子铜铁矿锆石 FT 年龄分析证实具有多期次性,存在印支期和燕山期 2 期成矿作用(徐晓彤等,2010).拉萨地块南缘热液金铜矿床磷灰石和锆石裂变径迹年龄显示有 30~40 Ma,16~28 Ma 和 11~14 Ma 3 个成矿期,第 1 期对应陆壳强烈挤压缩短时期,后 2 期是区内快速抬升期(Yuan *et al.*, 2002).新疆阿尔泰克朗盆地多个中-低温热液矿床,锆石 FT 年龄介于 134~312 Ma,磷灰石 FT 年龄介于 30~130 Ma,年龄值涵盖了海西期、印支期、燕山期和喜山期,是不同时期构造-岩浆-成矿事件的综合反映,证实区内曾发生燕山期成矿,甚至有喜山期成矿的可能性(袁万明等,2007).东昆仑五龙沟金矿锆石裂变径迹年龄同样揭示出成矿过程的多期性(Yuan *et al.*, 2013).

对有效保存 He 同位素的磁铁矿、赤铁矿等金属矿物直接定年以及含萤石、橄榄石、辉石等矿物的非金属矿床定年,均可确定矿床成矿时代.同时,鉴于成矿期后热事件扰动,可用以进行成矿期后隆升、剥蚀、揭顶等地质事件研究.目前对于不同矿物 He 扩散方式研究较少,用于(U-Th)/He 定年矿物以磷灰石和锆石居多,然而这两种矿物的封闭温度较低,不适宜成矿时代限定,但可以进行成矿后地质过程研究.将不同封闭温度矿物或同位素体系联合应用,能够获得矿床形成后较完整热演化过程.

总之,同时考虑封闭温度与成矿温度,则锆石裂变径迹(FT)年龄能够较好地揭示中-低温热液矿床的成矿时代,磷灰石裂变径迹年龄可以反映低温热液矿床低温段的时代,而(U-Th)/He 分析是揭示成矿后或近地表热事件的有效技术方法.

3.3 矿床隆升与剥蚀研究

同位素热年代学方法已被广泛应用于矿床隆升-剥蚀的定量研究.近年来测试技术快速发展,同位素理论日趋完善,众多学者开始关注低温热年代学方法对成矿期次、矿化持续时间、矿床隆升剥蚀定量研究的重要性(Yuan, 2009b; 袁万明, 2016).

西藏甲马多金属矿区计算剥蚀量约为 2.7 km,区内剥蚀速率远大于抬升速率,矿体可能已部分被剥蚀(袁万明等,2000).冈底斯地块尼木地区磷灰石裂变径迹分析显示,大于 12~8 Ma 处于相对稳定阶段,对应碰撞后伸展环境;8~4 Ma 的快速冷却对应区内主要隆升期,该阶段为区内快速沉积和黄土高原风成土堆积期,平均隆升速率为 1.41 mm/a,累计隆升量达 5 940 m(袁万明等,2008).孙非非等(2016)认为该区经历不同构造隆升剥蚀作用,磷灰石裂变径迹年龄 120~93 Ma 和 66~60 Ma 分别代表冈底斯地体和喜马拉雅地体先后于早白垩世和晚白垩世时期向北俯冲并与北侧地块碰撞-汇聚的过程,78 Ma 反映青藏高原及周缘新生代重大隆升期,3 个阶段隆升量分别为 0.28 km、1.40 km 和 1.00 km,总隆升量为 2.68 km,是印度板块与欧亚板块碰撞后整体强烈隆升的结果.Zhao *et al.* (2015)对冈底斯成矿带驱龙斑岩铜钼矿床进行 U-Pb、Re-Os、⁴⁰Ar/³⁹Ar、(U-Th)/He 热年代学综合分析,构建矿区岩体侵入时间-热液活动-隆升剥蚀较完整过程,估计成矿花岗闪长岩形成深度在地表之下 3.0~4.5 km,矿床形成深度约为 3.0 km,提出驱龙矿床在~13 Ma 发生剥蚀,与藏南~15 Ma 构造隆升事件相对应,暗示驱龙成矿事件与高原隆升相伴生.

3.4 矿床保存与变化研究

近几年热年代学研究开始关注矿床保存与变化过程.矿床作为复杂地质系统的一部分,是各种有利成矿条件耦合作用的结果,其形成后会经历不同形式和不同程度变化(柳振江等,2010;冯云磊等,2015a;袁万明,2016).矿床学研究不仅要重视矿床起源与形成,而且应兼顾矿床形成后保存与变化.Groves *et al.* (2005)对浅成低温热液矿床、斑岩铜矿和造山型金矿床之间的剥露速率差异进行分析,强调剥露作用在矿床形成后对其保存的影响,认为矿床在地质历史上的分布规律,很大程度上是由于剥露作用,即埋藏、抬升和侵蚀共同作用结果(Wilkinson and Kesler, 2007).矿床形成以后受到区域沉降、地壳抬升、风化剥蚀、岩浆活动和区域变质作用等因素影响,其中区域隆升剥蚀是最为关键的因素之一(Kesler and Wilkinson, 2006).

冯云磊等(2015b)应用裂变径迹年代学方法,获得吉林夹皮沟金矿立山矿区和下戏台矿区平均剥露厚度均为 4.1 km,立山矿区与下戏台矿区金成矿深度分别介于 4.4~4.7 km 和 2.8~4.6 km,立山矿区矿体尚未遭受大规模剥露,保存状态较为理想,深部勘探潜力较大;下戏台矿体已有部分遭受剥蚀,但

下部仍有保存,深部找矿远景预测仍较好。张宁(2016)依据新城金矿床裂变径迹测年及热历史模拟,将金矿床热历史演化过程划分为“快速降温—较快降温—缓慢降温—较快降温”4个阶段,计算其自120 Ma来总剥蚀厚度约6 117 m,对比新城金矿床6.51~8.28 km的成矿深度,认为深部找矿潜力较大,剥蚀厚度大致等于最小成矿深度,矿床保存非常好。马关宇等(2014)认为金川铜镍矿床含矿岩体自形成后经历复杂热演化乃至破坏过程,即两次明显增温改造和三次抬升冷却过程;磷灰石和锆石裂变径迹分析表明,至少在晚白垩纪早期遭受快速抬升冷却、剥蚀事件,这与中国范围内燕山构造事件完全匹配,也与新生代以来因印度板块向欧亚大陆下俯冲导致青藏高原及其周边地区发生快速地形地貌改观一致,断裂东、西侧体现出抬升速率差异性,对找矿预测具有借鉴意义。通过磷灰石裂变径迹热年代学研究,得到胶东金矿距今110 Ma以来岩体剥蚀速率很小,金矿形成后区域热—构造运动趋于平静,这对矿床的保存非常有利。成矿深度范围集中于4~10 km,玲珑花岗岩剥蚀量介于2.0~4.2 km,远未达到金矿最大成矿深度,深部找矿前景广阔。陈宣华等(2012)对巴尔喀什成矿带西部典型石英脉—云英岩型钨钼矿床成矿时代和剥露过程,进行热年代学研究,提出晚白垩世该地区才开始剥露到2 km, AFT年龄反映巴尔喀什成矿带西部的整体隆升事件处在我国新疆准噶尔盆地周缘构造抬升—剥露作用的时限之内。

造山带矿体的保存研究则更为复杂, Feng *et al.* (2017)对东昆仑哈日扎—哈陇体玛矿区进行锆石、磷灰石裂变径迹分析发现,早中生代区内经历3期冷却阶段:(1)快速冷却阶段175~(100±10) Ma,剥蚀厚度4.3±1.7 km;(2)相对平稳冷却阶段100~40 Ma,剥蚀厚度0.5±0.2 km;(3)40 Ma至今的快速冷却阶段,剥蚀厚度1.4 km,成矿以来矿体总共剥蚀量7.6±3.2 km,表明哈日扎—哈陇体玛矿区尚有部分矿体保存下来。刘文浩等(2012)利用磷灰石裂变径迹法分别计算罗河铁矿、泥河铁矿、东山铁矿的矿体形成深度均为1.7 km左右,梅山铁矿成矿深度为1.8 km,并讨论了矿床剥蚀程度。

当前矿床剥蚀保存研究,已经实现量化计算,上述成果为笔者研究差异隆升和矿床的保存潜力等提供了很好的借鉴,目前我国低温热年代学研究仍以FT为主,对于完整认识矿床构造—热历史、矿床剥蚀抬升过程有一定的局限性,随着FT分析技术

的完善和(U-Th)/He测年技术的快速发展,结合其他中—高温热年代学方法,可得到更为详细和准确的矿床剥露冷却历史,为矿床地质相关研究提供更长时间尺度更低温度的约束。

4 展望与小结

矿床形成是一个极为复杂的过程,即使同一矿床不同矿体之间亦随着构造活动而发生差异化隆升和剥露,所以矿床研究应结合不同构造单元、不同高程和不同矿区进行探讨。封闭温度受冷却速率、压力、扩散模型、矿物成分等因素影响,其选取差异亦导致结果不同。在同位素年代学测定中,样品采集与分选、测年矿物时代估计、测年方法适应性和精度等,都是获得高质量年龄结果重要因素,这些问题亦是热年代学技术有效揭示成矿时代、成矿期次、演化历史、成矿后矿床保存变化规律和隐伏矿床预测等关键问题的前提和基础。矿床成矿过程中,各种伴生矿物理论上都是矿床热年代学的研究对象。目前应用极少的萤石(CaF₂)矿物,具有较好研究前景。有学者应用Sm/Nd法对萤石直接测年,但很少看到有相关应用,主要限制在于Sm/Nd方法对于年轻样品同位素测年精度不高,还会受到多种矿床Sm/Nd比值和初始同位素异质性对年龄结果的干扰等。萤石一般存在于矽卡岩和低温热液矿床中,其U含量较高,相比于其他的矿物,萤石中的U含量高达100 μg/g(Pi *et al.*, 2005)。在某些矿床中不易挑选磷灰石等矿物的情况之下,萤石(CaF₂)可以作为替代样品,用来揭示热液矿床经历的时间—温度历史。

萤石的(U-Th)/He年代学研究尚处于初始阶段。Evans *et al.* (2005)研究指出,萤石的(U-Th)/He体系的封闭温度在90±10 °C。内华达尤卡山地区萤石样品的封闭温度已经测得介于80~100 °C(冷却速率:10 °C/Ma;直径:200~300 μm),可代表最后一次热事件发生的时间,限定热液矿床的低温热历史(Evans *et al.*, 2005)。挪威晚期热液脉中萤石矿化已经被用来限定晚白垩纪/第三纪早期热液活动(Grønlie *et al.*, 1990)。

铁氧化物(U-Th)/He结果近年来亦有报导,如褐铁矿和热液赤铁矿(Wernicke and Lippolt, 1993), Heim *et al.* (2006)将针铁矿(U-Th)/He技术成功应用于河道型铁矿床(channel iron deposit, CID)沉积机制研究中。榍石是另一种较为常见的含U副矿物,与锆石类似,以高封闭温度(>700 °C)作

为 U-Pb 定年的主要矿物,为高温热事件提供重要的信息.Reiners and Farley(1999)发现,榴石还可以用于低温热年代学研究中,其(U-Th)/He 部分保留区间位于 150~200 °C,裂变径迹部分退火带介于 265~310 °C (Coyle and Wagner, 1998),与磷灰石和锆石相比,可以揭示更深(5~10 km)地壳演化过程中的热事件信息.今后对这些矿物的深入研究,势将有力扩展(U-Th)/He 和裂变径迹测试矿物的范围,为矿床学研究提供更为便利而丰富的研究手段.

地质样品中不同程度含有固体径迹,每条核径迹对应一定的能量淀积,当样品受热退火时便能释放出显著的热量,释放出的热量与所含固体径迹密度密切相关.这样,通过热分析法测量地质样品中单位质量放出退火热量(固体径迹沉积能量),便可得出矿物单位质量的核径迹数,从而获得地质年代和地质热历史.这种定年方法的优势在于不需反应堆辐照,直接通过测量矿物中相应核径迹的热能而获得年龄,虽然现在还远不够完善,但发展前景值得期待.杨铜锁(2007)通过实验证实矿物中 α 粒子核径迹在退火时会放出显著的热量,并经测量地质样品中 α 粒子径迹密度,间接得到 ^4He 同位素含量;继之研究磷灰石样品中 α 粒子的径迹密度与其退火热量的关系,通过测量其退火热量而得到磷灰石中 α 粒子径迹密度(杨铜锁等, 2009).张建祥和杨铜锁(2017)最近将热分析法应用于地质定年,成功地计算了安徽马鞍山磷灰石的地质年代.

总之,地质年代学无论技术方法还是各种地质应用,不仅已经取得举世瞩目的成就,而且新方法新技术层出不穷,前景辉煌.本文重点对当今常用几种年代学方法与应用作了分析探究,指出其具体优势与存在的问题,并简要论述几种今后颇有前景发展壮大的技术手段,以期进一步促进地质年代学的深入发展.

致谢:本文图件绘制得到云南省地震局田鹏工程师的帮助,匿名审稿人提出宝贵修改意见,本文编辑对论文修改、完善付出诸多努力,谨此致谢!

References

Avdeev, B., Niemi, N. A., 2011. Rapid Pliocene Exhumation of the Central Greater Caucasus Constrained by Low-Temperature Thermochronometry. *Tectonics*, 30 (2). <https://doi.org/10.1029/2010tc002808>

Bargnesi, E. A., Stockli, D. F., Mancktelow, N., et al., 2013. Miocene Core Complex Development and Coeval Supra-

detachment Basin Evolution of Paros, Greece, Insights from (U-Th)/He Thermochronometry. *Tectonophysics*, 595–596:165–182. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.07.015>

- Batt, G. E., Braun, J., 1999. The Tectonic Evolution of the Southern Alps, New Zealand: Insights from Fully Thermally Coupled Dynamical Modelling. *Geophysical Journal International*, 136 (2): 403–420. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00730.x>
- Berger, G. W., York, D., 1981. Geothermometry from Dating Experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45 (6): 795–811. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(81\)90109-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(81)90109-5)
- Bernet, M., 2009. A Field-Based Estimate of the Zircon Fission-Track Closure Temperature. *Chemical Geology*, 259 (3–4): 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.10.043>
- Blackburn, T. J., Stockli, D. F., Walker, J. D., 2007. Magnetite (U-Th)/He Dating and Its Application to the Geochronology of Intermediate to Mafic Volcanic Rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 259 (3–4): 360–371. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2007.04.044>
- Boyce, J. W., Hodges, K. V., Olszewski, W. J., et al., 2005. He Diffusion in Monazite: Implications for (U-Th)/He Thermochronometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 6 (12): Q12004. <https://doi.org/10.1029/2005gc001058>
- Brandon, M. T., 1992. Decomposition of Fission-Track Grain-Age Distributions. *American Journal of Science*, 292 (8): 535–564. <https://doi.org/10.2475/ajs.292.8.535>
- Brandon, M. T., Roden-Tice, M. K., Garver, J. I., 1998. Late Cenozoic Exhumation of the Cascadia Accretionary Wedge in the Olympic Mountains, Northwest Washington State. *Geological Society of America Bulletin*, 110 (8): 985–1009. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<0985:lceotc>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<0985:lceotc>2.3.co;2)
- Braun, J., 2002. Quantifying the Effect of Recent Relief Changes on Age-Elevation Relationships. *Earth and Planetary Science Letters*, 200 (3–4): 331–343. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)00638-6](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)00638-6)
- Brooks, W. E., Snee, L. W., 1996. Timing and Effect of Detachment-Related Potassium Metasomatism on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ages from the Windous Butte Formation, Grant Range, Nevada. *Social Change*, 34 (1): 57–65.
- Chakurian, A. M., Arehart, G. B., Donelick, R. A., et al., 2003. Timing Constraints of Gold Mineralization along the Carlin Trend Utilizing Apatite Fission-Track, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, and Apatite (U-Th)/He Methods. *Economic*

- Geology*, 98(6): 1159–1171. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.98.6.1159>
- Chen, W., Wan, Y. S., Li, H. Q., et al., 2011. Isotope Geochronology: Technique and Application. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1917–1947 (in Chinese with English abstract).
- Chen, W., Zhan, Y., Zhang, Y. Q., et al., 2006. Late Cenozoic Episodic Uplifting in Southeastern Part of the Tibetan Plateau—Evidence from Ar-Ar Thermochronology. *Acta Petrologica Sinica*, 22(4): 867–872 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. H., Chen, Z. L., Han, S. Q., et al., 2012. Geothermochronology of Mo-W Deposits in Balkhash Metallogenic Belt, Kazakhstan, Central Asia. *Earth Science*, 37(5): 878–892 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.097>
- Chesley, J. T., Halliday, A. N., Snee, L. W., et al., 1993. Thermochronology of the Cornubian Batholith in Southwest England: Implications for Pluton Emplacement and Protracted Hydrothermal Mineralization. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(8): 1817–1835. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90115-d](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90115-d)
- Coyle, D. A., Wagner, G. A., 1998. Positioning the Titanite Fission-Track Partial Annealing Zone. *Chemical Geology*, 149(1–2): 117–125. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00041-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00041-2)
- Crowley, P. D., Reiners, P. W., Reuter, J. M., et al., 2002. Laramide Exhumation of the Bighorn Mountains, Wyoming: An Apatite (U-Th)/He Thermochronology Study. *Geology*, 30(1): 27–30. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0027:leotbm>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0027:leotbm>2.0.co;2)
- Deng, J., Wang, C. M., Bagas, L., et al., 2015. Cretaceous-Cenozoic Tectonic History of the Jiaojia Fault and Gold Mineralization in the Jiaodong Peninsula, China: Constraints from Zircon U-Pb, Illite K-Ar, and Apatite Fission Track Thermochronometry. *Mineralium Deposita*, 50(8): 987–1006. <https://doi.org/10.1007/s00126-015-0584-1>
- Dodson, M. H., 1973. Closure Temperature in Cooling Geochronological and Petrological Systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3): 259–274. <https://doi.org/10.1007/bf00373790>
- Duvall, A. R., Clark, M. K., Kirby, E., et al., 2013. Low-Temperature Thermochronometry along the Kunlun and Haiyuan Faults, NE Tibetan Plateau: Evidence for Kinematic Change during Late-Stage Orogenesis. *Tectonics*, 32(5): 1190–1211. <https://doi.org/10.1002/tect.20072>
- Ehlers, T. A., Farley, K. A., 2003. Apatite (U-Th)/He Thermochronometry: Methods and Applications to Problems in Tectonic and Surface Processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 206(1–2): 1–14. [https://doi.org/10.1016/s0012-821x\(02\)01069-5](https://doi.org/10.1016/s0012-821x(02)01069-5)
- Enkelmann, E., Ridgway, K. D., Carignano, C., et al., 2014. A Thermochronometric View into an Ancient Landscape: Tectonic Setting, Development, and Inversion of the Paleozoic Eastern Paganzo Basin, Argentina. *Lithosphere*, 6(2): 93–107. <https://doi.org/10.1130/l309.1>
- Evans, N. J., Byrne, J. P., Keegan, J. T., et al., 2005. Determination of Uranium and Thorium in Zircon, Apatite, and Fluorite: Application to Laser (U-Th)/He Thermochronology. *Journal of Analytical Chemistry*, 60(12): 1159–1165. <https://doi.org/10.1007/s10809-005-0260-1>
- Farley, K. A., 2000. Helium Diffusion from Apatite: General Behavior as Illustrated by Durango Fluorapatite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105(B2): 2903–2914. <https://doi.org/10.1029/1999jb900348>
- Feng, Y. L., Yuan, W. M., Cao, J. H., et al., 2015a. Minerogenic Age of Local Gold-Deposit District in Jiapiyou Glod Belt, Northeastern China Based on Zircon Fission Track Dating. *Atomic Energy Science and Technology*, 49(2): 379–384 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Yuan, W. M., Hao, N. N., et al., 2015b. Denudation and Conservation History of Local District in Jiapiyou Glod Deposit, Huadian County, Jilin Province—Evidence from Apatite Fission Track Thermochronology. *Geological Review*, 61(1): 109–120 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y. L., Yuan, W. M., Tian, Y. T., et al., 2017. Preservation and Exhumation History of the Harizha-Halongxiuma Mining Area in the East Kunlun Range, Northeastern Tibetan Plateau, China. *Ore Geology Reviews*, 90: 1018–1031. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.12.029>
- Flowers, R. M., Ketcham, R. A., Shuster, D. L., et al., 2009. Apatite (U-Th)/He Thermochronometry Using a Radiation Damage Accumulation and Annealing Model. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 73(8): 2347–2365. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.01.015>
- Foland, K. A., 1994. Argon Diffusion in Feldspars. In: Parsons, I., ed., *Feldspars and Their Reactions*. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences). Springer, Dordrecht, 421. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1106-5>
- Gao, S. K., Yuan, W. M., Dong, J. Q., et al., 2005. A New Method of Nuclear Analysis: Alpha-Recoil Track Ther-

- mochronology. *Geological Bulletin of China*, 24 (10): 1032—1038 (in Chinese with English abstract).
- Garver, J. I., Brandon, M. T., Roden-Tice, M., et al., 1998. Exhumation History of Orogenic Highlands Determined by Detrital Fission-Track Thermochronology. *Geological Society, London, Special Publication*, 154 (1): 283—304. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.154.01.13>
- Geissman, J. W., Snee, L. W., Graaskamp, G. W., et al., 1992. Deformation and Age of the Red Mountain Intrusive System (Urad-Henderson Molybdenum Deposits), Colorado: Evidence from Paleomagnetic and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Data. *Geological Society of America Bulletin*, 104 (8): 1031—1047. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1992\)104<1031:daaotr>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1992)104<1031:daaotr>2.3.co;2)
- Gleadow, A. J. W., Duddy, I. R., Lovering, J. F., 1983. Fission Track Analysis: A New Tool for the Evaluation of Thermal Histories and Hydrocarbon Potential. *The AAPG Journal*, 23 (1): 93. <https://doi.org/10.1071/aj82009>
- Groff, J. A., Heizler, M. T., McIntosh, W. C., et al., 1997. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating and Mineral Paragenesis for Carlin-Type Gold Deposits along the Getchell Trend, Nevada; Evidence for Cretaceous and Tertiary Gold Mineralization. *Economic Geology*, 92 (5): 601—622. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.92.5.601>
- Grønlie, A. R. N. E., Harder, V. I. C. K. I., Roberts, D. A. V. I. D., 1990. Preliminary Fission-Track Ages of Fluorite Mineralisation along Fracture Zones, Inner Trondheimsfjord, Central Norway. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 70 (3): 173—178.
- Grove, M., Harrison, T. M., 1996. $^{40}\text{Ar}^*$ Diffusion in Fe-Rich Biotite. *American Mineralogist*, 81 (7—8): 940—951. <https://doi.org/10.2138/am-1996-7-816>
- Groves, D. I., Condie, K. C., Goldfarb, R. J., et al., 2005. 100th Anniversary Special Paper: Secular Changes in Global Tectonic Processes and Their Influence on the Temporal Distribution of Gold-Bearing Mineral Deposits. *Economic Geology*, 100 (2): 203—224. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.100.2.203>
- Guenther, W. R., Reiners, P. W., Ketchum, R. A., et al., 2013. Helium Diffusion in Natural Zircon: Radiation Damage, Anisotropy, and the Interpretation of Zircon (U-Th)/He Thermochronology. *American Journal of Science*, 313 (3): 145—198. <https://doi.org/10.2475/03.2013.01>
- Halliday, A. N., 1978. $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ Stepheating Studies of Clay Concentrates from Irish Orebodies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 42 (12): 1851—1858. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(78\)90240-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(78)90240-5)
- Harrison, T. M., 2005. Fundamentals of Noble Gas Thermochronometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 123—149. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.5>
- Harrison, T. M., Clarke, G. K. C., 1979. A Model of the Thermal Effects of Igneous Intrusion and Uplift as Applied to Quottoon Pluton, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16 (3): 411—420. <https://doi.org/10.1139/e79-039>
- Harrison, T. M., Duncan, I., McDougall, I., 1985. Diffusion of ^{40}Ar in Biotite: Temperature, Pressure and Compositional Effects. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 49 (11): 2461—2468. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(85\)90246-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(85)90246-7)
- Harrison, T. M., Heizler, M. T., Lovera, O. M., 1993. In Vacuo Crushing Experiments and K-Feldspar Thermochronometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 117 (1—2): 169—180. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(93\)90124-r](https://doi.org/10.1016/0012-821x(93)90124-r)
- Harrison, T. M., McDougall, I., 1981. Excess ^{40}Ar in Metamorphic Rocks from Broken Hill, New South Wales: Implications for $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Spectra and the Thermal History of the Region. *Earth and Planetary Science Letters*, 55 (1): 123—149. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(81\)90092-3](https://doi.org/10.1016/0012-821x(81)90092-3)
- Heim, J. A., Vasconcelos, P. M., Shuster, D. L., et al., 2006. Dating Paleochannel Iron Ore by (U-Th)/He Analysis of Supergene Goethite, Hamersley Province, Australia. *Geology*, 34 (3): 173. <https://doi.org/10.1130/g22003.1>
- House, M. A., Kohn, B. P., Farley, K. A., et al., 2002. Evaluating Thermal History Models for the Otway Basin, Southeastern Australia, Using (U-Th)/He and Fission-Track Data from Borehole Apatites. *Tectonophysics*, 349 (1—4): 277—295. [https://doi.org/10.1016/s0040-1951\(02\)00057-4](https://doi.org/10.1016/s0040-1951(02)00057-4)
- Huan, W. J., Li, N., Yuan, W. M., et al., 2013. Fission Track Constrain on Mineralization Time and Tectonic Events in Ganzi-Litang Gold Belt, Tibet Plateau. *Acta Petrologica Sinica*, 29 (4): 1338—1346 (in Chinese with English abstract).
- Hurford, A. J., 1986. Cooling and Uplift Patterns in the Lepontine Alps South Central Switzerland and an Age of Vertical Movement on the Insubric Fault Line. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 92 (4): 413—427. <https://doi.org/10.1007/bf00374424>
- Kesler, S. E., Wilkinson, B. H., 2006. The Role of Exhumation in the Temporal Distribution of Ore Deposits. *Economic Geology*, 101 (5): 919—922. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.101.5.919>

- Ketcham, R. A., Donelick, R. A., Donelick, M. B., 2003. AFT-Solve: A Program for Multi-Kinetic Modeling of Apatite Fission-Track Data. *American Mineralogist*, 88(5): 929.
- Kleine, T., Touboul, M., van Orman, J. A., et al., 2008. Hf-W Thermochemistry: Closure Temperature and Constraints on the Accretion and Cooling History of the H Chondrite Parent Body. *Earth and Planetary Science Letters*, 270(1-2): 106-118. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.013>
- Landis, G. P., Snee, L. W., Juliani, C., 2005. Evaluation of Argon Ages and Integrity of Fluid-Inclusion Compositions: Stepwise Noble Gas Heating Experiments on 1.87 Ga Alunite from Tapajós Province, Brazil. *Chemical Geology*, 215(1-4): 127-153. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2004.06.036>
- Li, G. M., Cao, M. J., Qin, K. Z., et al., 2014. Thermal-Tectonic History of the Baogutu Porphyry Cu Deposit, West Junggar as Constrained from Zircon U-Pb, Biotite Ar/Ar and Zircon/Apatite (U-Th)/He Dating. *Journal of Asian Earth Sciences*, 79: 741-758. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.05.026>
- Liu, T. K., Chen, Y. G., Chen, W. S., et al., 2000. Rates of Cooling and Denudation of the Early Penglai Orogeny, Taiwan, as Assessed by Fission-Track Constraints. *Tectonophysics*, 320(1): 69-82. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00028-7)
- Liu, W. H., Zhang, J., Li, W. T., et al., 2012. Metallogenic Depth, Post-Mineralization Uplift and Denudation of Porphyry-Like Type Iron Deposits in Ningwu, Luzong Basins: Evidences from Apatite Fission Track. *Earth Science*, 37(5): 966-980 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.105>
- Liu, Z. J., Wang, J. P., Zheng, D. W., et al., 2010. Exploration Prospect and Post-Ore Denudation in the Northwestern Jiaodong Gold Province, China: Evidence from Apatite Fission Track Thermochemistry. *Acta Petrologica Sinica*, 26(12): 3597-3611 (in Chinese with English abstract).
- Lorenz, M., Kohn, B. P., Osadetz, K. G., et al., 2004. Combined Apatite Fission Track and (U-Th)/He Thermochemistry in a Slowly Cooled Terrane: Results from a 3 440 m-Deep Drill Hole in the Southern Canadian Shield. *Earth and Planetary Science Letters*, 227(1-2): 87-104. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.08.015>
- Lovera, O. M., Richter, F. M., Harrison, T. M., 1989. The $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochemistry for Slowly Cooled Samples Having a Distribution of Diffusion Domain Sizes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B12): 17917-17935. <https://doi.org/10.1029/jb094ib12p17917>
- Lovera, O. M., Richter, F. M., Harrison, T. M., 1991. Diffusion Domains Determined by ^{39}Ar Released during Step Heating. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B2): 2057-2069. <https://doi.org/10.1029/90jb02217>
- Lupker, M., Blard, P. H., Lavé, J., et al., 2012. ^{10}Be -Derived Himalayan Denudation Rates and Sediment Budgets in the Ganga Basin. *Earth and Planetary Science Letters*, 333-334(6): 146-156. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.04.020>
- Ma, G. Y., Gao, J. P., Du, D. D., et al., 2014. Uplift Destruction after Mineralization in Jinchuan Copper-Nickel Deposit: Evidences from Thermochemistry. *Global Geology*, 33(3): 581-590 (in Chinese with English abstract).
- Ma, S. W., 2017. Structural Framework and the Relationship with Mineralization of Jiama Copper-Polymetallic Deposit, Southern Tibet (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- McDougall, I., Harrison, T. M., 1999. Geochronology and Thermochemistry by the $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Method. Oxford University Press, New York.
- Miller, L. D., Goldfarb, R. J., Gehrels, G. E., et al., 1994. Genetic Links among Fluid Cycling, Vein Formation, Regional Deformation, and Plutonism in the Juneau Gold Belt, Southeastern Alaska. *Geology*, 22(3): 203. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1994\)022<0203:glafcv>2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1994)022<0203:glafcv>2.3.co;2)
- Miller, L. J., Goldfarb, R. J., Snee, L. W., et al., 1995. Structural Geology, Age, and Mechanisms of Gold Vein Formation at the Kensington and Jualin Deposits, Berners Bay District, Southeast Alaska. *Economic Geology*, 90(2): 343-368. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.2.343>
- Onstott, T., Hall, C., York, D., 1989. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Thermochemistry of the Imataca Complex, Venezuela. *Precambrian Research*, 42(3-4): 255-291. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(89\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0301-9268(89)90014-4)
- Pi, T., Solé, J., Taran, Y., 2005. (U-Th)/He Dating of Fluorite: Application to the La Azul Fluorspar Deposit in the Taxco Mining District, Mexico. *Mineralium Deposita*, 39(8): 976-982. <https://doi.org/10.1007/s00126-004-0443-y>
- Qiu, N. S., Reiners, P., Mei, Q. H., et al., 2009. Application of the (U-Th)/He Thermochemistry to the Tectono-Thermal Evolution of Sedimentary Basin—A Case History of Well KQ1 in the Tarim Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 52(4): 803-813. <https://doi.org/10.1002/cjg2.1403>
- Reddy, S. M., Kelley, S. P., Magennis, L., 1997. A Microstruc-

- tural and Argon Laserprobe Study of Shear Zone Development at the Western Margin of the Nanga Parbat-Haramosh Massif, Western Himalaya. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 128 (1): 16 – 29. <https://doi.org/10.1007/s004100050290>
- Reiners, P. W., Farley, K. A., 1999. Helium Diffusion and (U-Th)/He Thermochronometry of Titanite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63 (22): 3845 – 3859. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00170-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00170-2)
- Reiners, P. W., Farley, K. A., 2001. Influence of Crystal Size on Apatite (U-Th)/He Thermochronology: An Example from the Bighorn Mountains, Wyoming. *Earth and Planetary Science Letters*, 188 (3 – 4): 413 – 420. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00341-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00341-7)
- Reiners, P. W., Farley, K. A., Hickes, H. J., 2002. He Diffusion and (U-Th)/He Thermochronometry of Zircon: Initial Results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte. *Tectonophysics*, 349 (1 – 4): 297 – 308. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(02\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(02)00058-6)
- Reiners, P. W., Spell, T. L., Nicolescu, S., et al., 2004. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry: He Diffusion and Comparisons with $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Dating. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68 (8): 1857 – 1887. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2003.10.021>
- Reiners, P. W., Zhou, Z., Ehlers, T. A., et al., 2003. Post-Orogenic Evolution of the Dabie Shan, Eastern China, from (U-Th)/He and Fission-Track Thermochronology. *American Journal of Science*, 303 (6): 489 – 518. <https://doi.org/10.2475/ajs.303.6.489>
- Robbins, G. A., 1972. Radiogenic Argon Diffusion in Muscovite under Hydrothermal Conditions. Brown University, Providence, U.S.A..
- Shuster, D. L., Cuffey, K. M., Sanders, J. W., et al., 2011. Thermochronometry Reveals Headward Propagation of Erosion in an Alpine Landscape. *Science*, 332 (6025): 84 – 88. <https://doi.org/10.1126/science.1203399>
- Shuster, D. L., Farley, K. A., 2004. $^4\text{He}/^3\text{He}$ Thermochronometry. *Earth and Planetary Science Letters*, 217 (1 – 2): 1 – 17. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(03\)00595-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(03)00595-8)
- Snee, L. W., Sutter, J. F., Kelly, W. C., 1988. Thermochronology of Economic Mineral Deposits; Dating the Stages of Mineralization at Panasqueira, Portugal, by High-Precision $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Age Spectrum Techniques on Muscovite. *Economic Geology*, 83 (2): 335 – 354. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.2.335>
- Spotila, J. A., 2005. Applications of Low-Temperature Thermochronometry to Quantification of Recent Exhumation in Mountain Belts. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 449 – 466. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.17>
- Stockli, D. F., 2005. Application of Low-Temperature Thermochronometry to Extensional Tectonic Settings. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58 (1): 411 – 448. <https://doi.org/10.2138/rmg.2005.58.16>
- Stock, G. M., Ehlers, T. A., Farley, K. A., 2006. Where does Sediment Come from? Quantifying Catchment Erosion with Detrital Apatite (U-Th)/He Thermochronometry. *Geology*, 34 (9): 725 – 728. <https://doi.org/10.1130/G22592.1>
- Sun, F. F., Zhu, C. B., Yuan, W. M., et al., 2016. Apatite Fission Track Analysis of Tectonic Activity in Harizha Polymetallic Ore District, Dulan County, Qinghai Province. *Nuclear Techniques*, 39 (12): 37 – 44 (in Chinese with English abstract).
- Tagami, T., Farley, K. A., Stockli, D. F., 2003. (U-Th)/He Geochronology of Single Zircon Grains of Known Tertiary Eruption Age. *Earth and Planetary Science Letters*, 207 (1 – 4): 57 – 67. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01144-5](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01144-5)
- Tagami, T., Shimada, C., 1996. Natural Long-Term Annealing of the Zircon Fission Track System around a Granitic Pluton. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 101 (B4): 8245 – 8255. <https://doi.org/10.1029/95jb02885>
- Tang, Y. H., Yuan, W. M., Han, C. M., et al., 2003. Fission Track Age of the Yuerya Gold Deposit. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (6): 573 – 578 (in Chinese with English abstract).
- Trieloff, M., Jessberger, E. K., Herrwerth, I., et al., 2003. Structure and Thermal History of the H-Chondrite Parent Asteroid Revealed by Thermochronometry. *Nature*, 422 (6931): 502 – 506. <https://doi.org/10.1038/nature01499>
- Vasconcelos, P. M., Brimhall, G. H., Becker, T. A., et al., 1994. Analysis of Supergene Jarosite and Alunite: Implications to the Paleoweathering History of the Western USA and West Africa. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58 (1): 401 – 420. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90473-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90473-1)
- Wang, C. M., Deng, J., Santosh, M., et al., 2015. Timing, Tectonic Implications and Genesis of Gold Mineralization in the Xincheng Gold Deposit, China: C-H-O Isotopes, Pyrite Rb-Sr and Zircon Fission Track Thermochronometry. *Ore Geology Reviews*, 65: 659 – 673. <https://doi.org/10.1039/501100001809>

- Wang, F., Shi, W. B., Zhu, R. X., 2014. Problems of Modern $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Geochronology: Reviews. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 326—340 (in Chinese with English abstract).
- Warnock, A. C., Zeitler, P. K., Wolf, R. A., et al., 1997. An Evaluation of Low-Temperature Apatite U-Th/He Thermochronometry. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(24): 5371—5377. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(97\)00302-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(97)00302-5)
- Wernicke, R. S., Lippolt, H. J., 1993. Botryoidal Hematite from the Schwarzwald (Germany); Heterogeneous Uranium Distributions and Their Bearing on the Helium Dating Method. *Earth and Planetary Science Letters*, 114(2—3): 287—300. [https://doi.org/10.1016/0012-821x\(93\)90031-4](https://doi.org/10.1016/0012-821x(93)90031-4)
- Wilkinson, B. H., Kesler, S. E., 2007. Tectonism and Exhumation in Convergent Margin Orogens: Insights from Ore Deposits. *The Journal of Geology*, 115(6): 611—627. <https://doi.org/10.1086/521606>
- Wolf, R. A., Farley, K. A., Kass, D. M., 1998. Modeling of the Temperature Sensitivity of the Apatite (U-Th)/He Thermochronometer. *Chemical Geology*, 148(1—2): 105—114. [https://doi.org/10.1016/s0009-2541\(98\)00024-2](https://doi.org/10.1016/s0009-2541(98)00024-2)
- Wolf, R. A., Farley, K. A., Silver, L. T., 1996. Helium Diffusion and Low-Temperature Thermochronometry of Apatite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4231—4240. [https://doi.org/10.1016/s0016-7037\(96\)00192-5](https://doi.org/10.1016/s0016-7037(96)00192-5)
- Wolfe, M. R., Stockli, D. F., 2010. Zircon (U-Th)/He Thermochronometry in the KTB Drill Hole, Germany, and Its Implications for Bulk He Diffusion Kinetics in Zircon. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(1—2): 69—82. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.03.025>
- Xu, X. T., Yuan, W. M., Gong, Q. J., et al., 2010. The Analysis of Zircon Fission Track's Ore-Forming Epoch in Shaquanzi Copper-Iron Deposits, Xinjiang. *China Mining Magazine*, 19(4): 105—108 (in Chinese with English abstract).
- Yamada, R., Tagami, T., Nishimura, S., et al., 1995. Annealing Kinetics of Fission Tracks in Zircon: An Experimental Study. *Chemical Geology*, 122(1—4): 249—258. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00006-8](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00006-8)
- Yang, T. S., 2007. Feasibility of Probing Solid State Nuclear Tracks by Thermal Analysis Method. *Chinese Science Bulletin*, 52(4): 380—383 (in Chinese).
- Yang, T. S., He, S. R., Li, T. X., et al., 2009. Measurement of Solid State Nuclear Tracks in Apatite by Thermal Analysis Method. *Chinese Science Bulletin*, 54(17): 2495—2499 (in Chinese).
- Yuan, W. M., 2016. Thermochronological Method of Revealing Conservation and Changes of Mineral Deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2571—2578 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Bao, Z. K., Dong, J. Q., et al., 2007. Fission Track Thermochronology Application to Mineralization Ages of Hydrothermal Deposits in Kelang Basin, Northern Xinjiang, China. *World Sci-Tech R & D*, 29(2): 8—14 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Bao, Z. K., Dong, J. Q., et al., 2007. Zircon and Apatite Fission Track Analyses on Mineralization Ages and Tectonic Activities of Tuwu-Yandong Porphyry Copper Deposit in Northern Xinjiang, China. *Science China: Earth Sciences*, 50(12): 1787—1795. <https://doi.org/10.1007/s11430-007-0130-9>
- Yuan, W. M., Dong, J. Q., Bao, Z. K., et al., 2008. Apatite Fission Track Evidences for Neogene Tectono-Thermal History in Nimu Area, Southern Gangdese Terrane, Tibet Plateau. *Atomic Energy Science and Technology*, 42(6): 570—573 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Hou, Z. Q., Li, S. R., et al., 2001. Fission Track Evidence on Thermal History of Jiama Polymetallic Ore District, Tibet. *Science in China (Series D)*, 44(Suppl.): 139—145. <https://doi.org/10.1007/bf02911981>
- Yuan, W. M., Mo, X. X., Zhang, A. K., et al., 2013. Fission Track Thermochronology Evidence for Multiple Periods of Mineralization in the Wulonggou Gold Deposits, Eastern Kunlun Mountains, Qinghai Province. *Journal of Earth Science*, 24(4): 471—478. <https://doi.org/10.1007/s12583-013-0362-x>
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Li, S. R., 2002. Apatite Fission Track Dating Evidence on the Tectonization of Gangdese Block, South Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 47(3): 240—244. <https://doi.org/10.1360/02tb9057>
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Wang, L. F., 1999. Fission Track Study on the Metallogenic Age of Xiayingfang Gold Deposit in Eastern Hebei. *Nuclear Techniques*, 22(7): 411—413 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Wang, L. F., 2000. Metallogenic Thermal History of the Wulonggou Gold Deposits in East Kunlun Mountains in the Light of Fission Track Thermochronology. *Acta Geoscientia Sinica*, 21(4): 389—395 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Deng, J., Zheng, Q. G., et al., 2009a. Apatite Fission Track Constraints on the Neogene Tectono-Thermal History of Nimu Area, Southern Gangdese

- Terrane, Tibet Plateau. *Island Arc*, 18(3): 488—495. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00669.x>
- Yuan, W.M., Zheng, Q.G., Bao, Z.K., et al., 2009b. Zircon Fission Track Thermochronology Constraints on Mineralization Epochs in Altai Mountains, Northern Xinjiang, China. *Radiation Measurements*, 44(9—10): 950—954. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.10.094>
- Zaun, P. E., Wagner, G. A., 1985. Fission-Track Stability in Zircons under Geological Conditions. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements* (1982), 10(3): 303—307. [https://doi.org/10.1016/0735-245x\(85\)90119-x](https://doi.org/10.1016/0735-245x(85)90119-x)
- Zhang, J.X., Yang, T.S., 2017. Determination of α Particle Nuclear Track Density by a Thermal Analysis Method and Its Application in Geological Dating. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 30(2): 274—278 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, N., 2016. Fission Track Thermochronology of the Xincheng Gold Deposit, Northwest of Jiaodong Peninsula (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.X., Qin, K.Z., Li, G.M., et al., 2015. The Exhumation History of Collision-Related Mineralizing Systems in Tibet: Insights from Thermal Studies of the Sharang and Yaguila Deposits, Central Lhasa. *Ore Geology Reviews*, 65: 1043—1061. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.09.026>
- 附中中文参考文献**
- 陈文, 万渝生, 李华芹, 等, 2011. 同位素地质年龄测定技术及应用. *地质学报*, 85(11): 1917—1947.
- 陈文, 张彦, 张岳桥, 等, 2006. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的 Ar-Ar 热年代学证据. *岩石学报*, 22(4): 867—872.
- 陈宣华, 陈正乐, 韩淑琴, 等, 2012. 中亚巴尔喀什成矿带钨—钨矿床的地质热年代学. *地球科学*, 37(5): 878—892. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.097>
- 冯云磊, 袁万明, 曹建辉, 等, 2015a. 应用锆石裂变径迹方法研究夹皮沟本区金矿成矿时代. *原子能科学技术*, 49(2): 379—384.
- 冯云磊, 袁万明, 郝娜娜, 等, 2015b. 吉林桦甸市夹皮沟本区金矿剥露历史和矿床保存变化——来自磷灰石裂变径迹年代学证据. *地质论评*, 61(1): 109—120.
- 高绍凯, 袁万明, 董金泉, 等, 2005. 核分析新技术: Alpha 反冲径迹热年代学. *地质通报*, 24(10): 1032—1038.
- 郇伟静, 李娜, 袁万明, 等, 2013. 四川甘孜—理塘金成矿带成矿时代与构造活动的裂变径迹研究. *岩石学报*, 29(4): 1338—1346.
- 刘文浩, 张均, 李婉婷, 等, 2012. 宁芜—庐枞盆地玢岩铁矿成矿深度及成矿后抬升、剥蚀情况: 来自磷灰石裂变径迹的证据. *地球科学*, 37(5): 966—980. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2012.105>
- 柳振江, 王建平, 郑德文, 等, 2010. 胶东西北部金矿剥蚀程度及找矿潜力和方向——来自磷灰石裂变径迹热年代学的证据. *岩石学报*, 26(12): 3597—3611.
- 马关宇, 高军平, 杜丁丁, 等, 2014. 金川铜镍矿床成矿后的抬升破坏: 来自热年代学的证据. *世界地质*, 33(3): 581—590.
- 马士委, 2017. 藏南甲玛铜多金属矿床构造格架与成矿的关系 (博士论文). 北京: 中国地质科学院.
- 孙非非, 朱传宝, 袁万明, 等, 2016. 青海都兰县哈日扎多金属矿区构造活动的磷灰石裂变径迹分析. *核技术*, 39(12): 37—44.
- 汤云晖, 袁万明, 韩春明, 等, 2003. 崮耳崖金矿的成矿时代裂变径迹研究. *地球学报*, 24(6): 573—578.
- 王非, 师文贝, 朱日祥, 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学中几个重要问题的讨论. *岩石学报*, 30(2): 326—340.
- 徐晓彤, 袁万明, 龚庆杰, 等, 2010. 利用裂变径迹定年分析新疆沙泉子铜铁矿成矿时代. *中国矿业*, 19(4): 105—108.
- 杨铜锁, 2007. 热分析法探测固体核径迹的可行性论证. *科学通报*, 52(4): 380—383.
- 杨铜锁, 何少蓉, 李天祥, 等, 2009. 热分析法测量磷灰石中固体核径迹. *科学通报*, 54(17): 2495—2499.
- 袁万明, 2016. 矿床保存变化研究的热年代学技术方法. *岩石学报*, 32(8): 2571—2578.
- 袁万明, 保增宽, 董金泉, 等, 2007. 新疆阿尔泰克朗盆地热液成矿时代的裂变径迹分析. *世界科技研究与发展*, 29(2): 8—14.
- 袁万明, 董金泉, 保增宽, 等, 2008. 西藏冈底斯地块尼木地区新第三纪构造热史的磷灰石裂变径迹约束. *原子能科学技术*, 42(6): 570—573.
- 袁万明, 王世成, 王兰芳, 1999. 河北下营坊金矿成矿时代的裂变径迹研究. *核技术*, 22(7): 411—413.
- 袁万明, 王世成, 王兰芳, 2000. 东昆仑五龙沟金矿床成矿热历史的裂变径迹热年代学证据. *地球学报*, 21(4): 389—395.
- 张建祥, 杨铜锁, 2017. 热分析方法测定 α 粒子径迹密度及其在地质定年中的应用. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 30(2): 274—278.
- 张宁, 2016. 胶西北新城金矿床裂变径迹热年代学 (学位论文). 北京: 中国地质大学.