

doi: 10.16461/j.cnki.1000-4734.2024.44.020

(U-Th)/He热年代学方法研究进展及其应用

胡儒权^{1,2}, 武丽艳^{1*}

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: (U-Th)/He热年代学方法基于矿物中U、Th、Sm发生衰变产生和累积的⁴He进行定年。由于低的封闭温度和对近地表地质过程的敏感性, 因此在定量揭示地壳浅部所经历冷却及剥露事件的时间-空间-温度特征方面具有不可替代的优势。本文简要回顾了(U-Th)/He定年原理并对不同测试方法的优缺点进行评述, 在此基础上总结探讨了(U-Th)/He热年代学在辐射损伤影响机制、退火动力学以及⁴He扩散模型方面取得的进展以及存在的不足, 并对如何完善这些不足进行未来展望。此外本文还综述了(U-Th)/He热年代学方法在约束成矿时代、造山带剥露历史研究、矿床保存性评价方面的应用实例以及部分局限性。

关键词: (U-Th)/He热年代学; 辐射损伤; 退火动力学; ⁴He扩散模型; 地质应用

中图分类号: P597 **文献标志码:** A

第一作者: 胡儒权, 男, 1997年生, 硕士研究生, 地球化学专业. E-mail: huruquan@mail.gyig.ac.cn

Advances of the (U-Th)/He thermochronology and its applications

HU Ruquan^{1,2}, WU Liyan^{1*}

(1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The (U-Th)/He thermochronology is a dating method based on the accumulated ⁴He which was produced by the decay of parent isotopes including ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th, and ¹⁴⁷Sm. It has an irreplaceable advantage in quantitatively revealing the time-space-temperature characteristics of cooling and exhumation events occurred in the shallow level of crust, due to its low closure temperature and good sensitivity to near-surface geological processes. In this paper, we have briefly reviewed the principle of the (U-Th)/He thermochronology, and also reviewed the advantages and disadvantages of different analytical methods of the (U-Th)/He thermochronology. On this basis, we have summarized and discussed advances and shortcomings of (U-Th)/He thermochronology in terms of the mechanism of radiation damage on the diffusion behavior of ⁴He, annealing kinetics and the ⁴He diffusion model, and have prospected how to improve these shortcomings in the future. In addition, we have also reviewed the application examples and some limitations of the (U-Th)/He thermochronology method in the constraint of metallogenic epoch, exhumation history of the orogenic belt, and preservation evaluation of ore deposits.

Keywords: (U-Th)/He thermochronology; radiation damage; annealing kinetics; ⁴He diffusion model; geological application

(U-Th)/He定年体系是低温热年代学的重要组成部分, 该体系利用母体核素衰变产生 α 粒子的原理对矿物进行定年。 α 粒子的保存和丢失与矿物在不同时间所经历的温度(范围)密切相关, 因此(U-Th)/He年龄本质上是矿物热历史(t - T)的综合表现。由于封闭温度较低(表1), (U-Th)/He热年

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 41773048); 中国科学院“西部青年学者”项目A类

*通信作者, E-mail: wuliyan@mail.gyig.ac.cn

表1 常用(U-Th)/He定年体系的封闭温度

Table 1. Closure temperatures for commonly used (U-Th)/He dating systems

矿物	封闭温度/°C	参考文献
磷灰石(AHe)	75	[40]
	75±5	[39]
	80~90	[41]
	60~75	[42]
	62	[32]
锆石(ZHe)	181	[43]
	175~193	[44]
	200~230	[45]
	140~220	[34]
	80	[46]
萤石(FHe)	46±14~169±9	[47]
	90±10	[48]
赤铁矿(HmHe)	25~250	[49]
磁铁矿(MgHe)	250	[50]
牙形石(CHe)	60~70	[51]
	50~90	[52]
榍石(THe)	191~218	[53]
	150~210	[54]
独居石(MHe)	286±13, 230±4, 206±24	[55]
	291~262	[56]
尖晶石(SHe)	180~600	[57]

代学可以定量揭示地壳浅部冷却及剥露事件的时间-空间-温度特征,广泛应用于矿床学、地貌学以及大陆动力学等领域的研究,包括地表景观演化^[1-5]、沉积物源示踪^[6-8]、矿床的保存潜力评价^[9-15]、断层活动^[16-21]、山体隆升/剥露^[22-27]等。但矿物中⁴He的扩散行为不仅取决于温度,还受到辐射损伤影响。辐射损伤可通过捕获和阻塞机制改变⁴He的扩散活化能,其中捕获机制占主导作用并因此提高或降低矿物⁴He的封闭温度。量化辐射损伤累积和退火的净效应对⁴He扩散行为的影响并建立⁴He扩散动力学模型是(U-Th)/He热年代学领域中最重要的发展里程碑之一。为了进一步促进(U-Th)/He热年代学研究在我国的发展,本文在简要介绍基本原理、测试方法的基础上,系统总结了(U-Th)/He热年代学研究在辐射损伤影响机制、退火动力学和⁴He扩散模型方面取得的进展,并就存在的不足进行探讨展望,最后还介绍了部分(U-Th)/He热年代学方法应用的实例以及局限性,供研究同行参考。

1 基本原理

1.1 α 衰变与年龄计算

磷灰石、锆石等含有较高的铀、钍放射性元素,是(U-Th)/He定年的主要矿物。矿物中的⁴He由母体核素²³⁸U、²³⁵U、²³²Th、¹⁴⁷Sm发生 α 衰变产生。由于¹⁴⁷Sm衰变产生的⁴He含量较低,在计算中通常忽略。得到年龄方程^[28]:

$$n(^4\text{He})=8\times n(^{238}\text{U})(e^{\lambda_{238}t}-1)+7\times n(^{235}\text{U})(e^{\lambda_{235}t}-1)+6\times n(^{232}\text{Th})(e^{\lambda_{232}t}-1)$$

式中 $n(^4\text{He})$ 、 $n(^{238}\text{U})$ 、 $n(^{235}\text{U})$ 、 $n(^{232}\text{Th})$ 是现今矿物中母子体的原子数， λ_{238} 、 λ_{235} 、 λ_{232} 分别是母体核素的衰变常数，值分别为 $1.551\times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$ ， $9.849\times 10^{-10}\text{ a}^{-1}$ ， $4.948\times 10^{-11}\text{ a}^{-1}$ 。通过测试矿物中的 ^4He 和母体核素含量根据年龄方程迭代计算矿物的 ^4He 年龄。此外，用户可采用软件HelioPlot^[29]和IsoplotR^[30]对 ^4He 年龄进行直接计算并绘制U-Th-He含量的三元和对数可视化图。

1.2 封闭温度

矿物(U-Th)/He体系从开放行为转变为封闭行为的温度即“封闭温度”。Dodson^[31]将封闭温度(T_c)严格定义为矿物表观年龄所对应的温度。封闭温度受控于辐射损伤^[32-34]、冷却速率^[35]、扩散域^[36]等动力学参数。对于以单一速率冷却的矿物，封闭温度可根据冷却速率、扩散动力学参数(E_a ， D_0/a^2)等计算得到^[37,38]。常用(U-Th)/He定年体系的封闭温度见表1。在实际地质过程中矿物往往经历了复杂的热历史，矿物系统从开放转变为封闭并不是瞬时的，而是存在 ^4He 被部分保留在矿物中的温度区间，Wolf等^[39]将该温度区间定义为 ^4He 的部分保留带(He Partial Retention Zone)，对应10%~90%的放射性成因 ^4He 能够保存在晶体中。部分保留带这一概念更加现实地描述了矿物中 ^4He 的累积过程，体现了(U-Th)/He年龄是矿物低温热历史的综合表现。

1.3 α 粒子射出校正

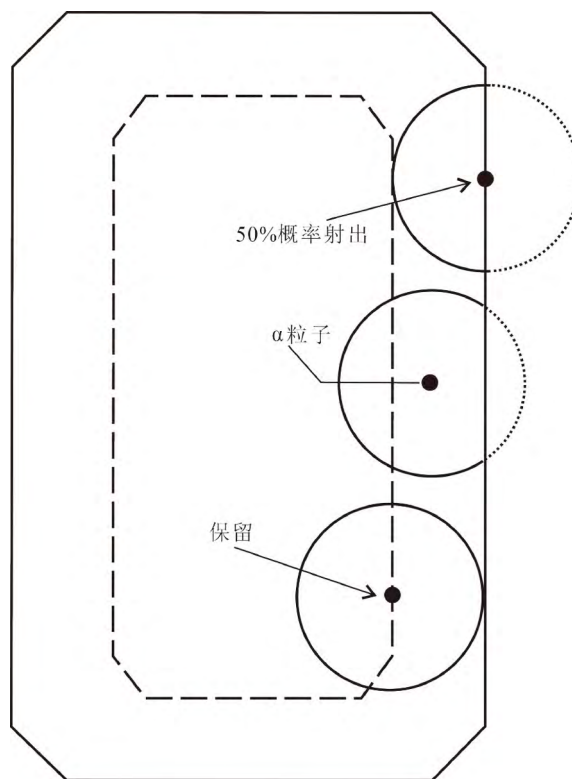
U-Th系列衰变产生的 α 粒子具有约4~8 MeV的初始动能，导致了 α 粒子的长停止距离效应。停止距离的长短取决于 α 粒子的初始动能和晶体密度^[58]。在锆石和磷灰石中 α 粒子的平均停止距离分别约为18 μm 和22 μm 。每个 α 粒子可以沿任意方向发射，这意味着位于晶体边缘一个停止距离以内的U、Th核素具有一定的概率将其产生的部分 ^4He 原子射出晶体(图1)，导致测试的(U-Th)/He年龄偏年轻。因此，需要对测试年龄进行校正。研究者提出了3种 α 射出校正公式：

$$t_{\text{校正}}=t_{\text{测试}}/F_T \quad (1) \quad [58]$$

$$n(^4\text{He})_{\text{校正}}=n(^4\text{He})_{\text{测试}}/F_T \quad (2) \quad [59]$$

$$n(^4\text{He})_{\text{校正}}=8F_T n(^{238}\text{U})(e^{\lambda_{238}t}-1)+7F_T n(^{235}\text{U})(e^{\lambda_{235}t}-1)+6F_T n(^{232}\text{Th})(e^{\lambda_{232}t}-1) \quad (3) \quad [60]$$

式中 F_T 为晶体中 ^4He 的保存比例。可见，准确计算校正参数 F_T 是获得准确(U-Th)/He年龄的前提。最早由Farley等^[58]推导了“均匀球”模型的校正参数 F_T ，此后，多项研究对该工作进行改进和拓展，相继提出了“元素环带”校正模型^[28,61]和“等比表面积”校正模型^[62]，揭示了矿物比表面积和母体同位素空间分布对校正参数 F_T 的影响。在此基础上，Ketc-



圆的半径代表 α 粒子的停止距离；点弧线的长度代表 α 粒子射出的相对概率；虚线表示 ^4He 保留的范围(据文献[63]修改)

图1 α 粒子的射出效应示意图

Fig. 1. Schematic diagram illustrating the emission effect of alpha particles

ham等^[60]开发了 F_T 值计算程序Qt_Ft, 该程序仅能够对具有简单U-Th环带特征的自形矿物进行计算, 而对于U-Th空间分布复杂以及几何不规则的晶体则会产生较大的误差。

近年来, 3D-He方法^[63]、LA-ICP-MS深度分析^[64]和高分辨率X射线显微断层扫描^[65]技术的建立与应用能够更好地了解晶体内U-Th的三维分布并实现对晶体比表面积精确测量, 进一步提高了 F_T 计算的准确度。事实上, 在比表面积的测量精度方面, 3D-He方法并不及X射线显微断层扫描技术, 但由于整合了蒙特卡洛和布朗运动算法, 3D-He方法具有能够模拟重建晶体三维空间内U-Th分布特征的优势。相比之下, LA-ICP-MS深度分析仅能获得晶体一维U-Th分布特征。因此, 在 F_T 的计算过程中应结合应用上述方法, 从而实现对测试年龄的准确校正。

2 测试方法

2.1 单颗粒激光加热法

单颗粒激光加热法通过分析整个晶体的U、Th、⁴He含量获得年龄, 是目前(U-Th)/He定年的主流方法。由于不规则的几何形状导致无法精确地计算校正参数 F_T 并显著增加年龄的不确定性, 因此该方法要求测试晶体具有高的自形程度。富U、Th的固相包裹体的存在是影响年龄结果的另一个重要因素, 特别是对于磷灰石。磷灰石中常见的富U、Th的固相包裹体是锆石和独居石, 但磷灰石的溶样过程难以将这些固相包裹体中的U、Th完全溶解, 导致有过剩的⁴He并造成年龄偏老。相比之下, 锆石的溶解采用氢氟酸, 晶体中的固相包裹体可以被完全溶解, 因此选择含少量固相包裹体的锆石是可以接受的。此外, 流体包裹体也是“过剩⁴He”的一个重要来源^[66]。总之, 测试前应在高倍光学显微镜下对待测晶体进行反复甄别, 尽可能选择不含包裹体的纯净单晶颗粒。满足要求的磷灰石或锆石颗粒被挑选出后需要进行几何尺寸测量以计算 F_T 值并装入铌(或铂)金属管中转移到⁴He同位素质谱仪的激光样品室, 在真空条件下使用激光加热晶体释放⁴He, 释放的⁴He经纯化与已知含量的³He混合后, 进入四极杆质谱仪测试⁴He的含量。铌(铂)金属管可以为晶体创建均匀加热的环境, 防止加热过程中U、Th挥发^[67]。释气的样品进行化学溶解后与U、Th稀释剂混合在ICP-MS上测试²³⁸U、²³²Th的含量。总体而言, 单颗粒加热法定年采用稀释剂法分析U、Th、⁴He含量, 测试精度高, 但存在以下缺点: 1) 仅挑选更适合计算出准确 F_T 值的单颗粒导致对碎屑矿物的选择偏差; 2) 该方法不能有效评估母体同位素的分布特征, 这可能导致高估或低估 F_T 参数而获得无地质意义的年龄; 3) 实验成本高且对于相对大量数据的测试过程较为耗时。

2.2 激光原位剥蚀法

激光原位剥蚀(U-Th)/He定年法的应用并不广泛, 目前主要针对典型锆石^[68,69]、磷灰石^[70,71]、独居石^[72]、榍石^[69]矿物开展。首先将制作好的样品靶置入超高真空池中, 使用激光对选定的矿物微区进行剥蚀提取⁴He, He的测试同样采用³He稀释剂法, 完成He的测试后, 需要精确测量剥蚀坑的体积(通常采用光学轮廓仪、共聚焦显微镜等)以计算⁴He的浓度。最后, 采用LA-ICP-MS或SIMS在相同位置^[68,69]再次剥蚀进行U、Th含量的测定。

这种高空间分辨率的定年方法仅需对矿物微区进行激光剥蚀分析, 其优点包括: 1) 允许用户对远离晶体边界和包裹体的微区进行测试, 无需校正 α 粒子的射出效应, 可有效避免不规则晶形、包裹体对定年结果的影响; 2) 可以同时获取原位微量元素和U-Pb年龄信息, 实现U-Th-Pb-He双定年, 增强年龄数据解释的可靠性; 3) 测试效率高, 耗材成本更低。

目前而言, 原位(U-Th)/He定年法在技术层面临⁴He的测试精度低、难以精确测量剥蚀坑的体积

的难题, 尽管田云涛和Vermeesch^[73]建立了⁴He/³He激光微区定年方法, 避免了对剥蚀坑体积的测量, 但需要对样品进行质子辐照, 过程繁琐; 此外, 缺少标样的问题也亟待解决。总之, 原位剥蚀(U-Th)/He定年法仍需要进一步发展完善。

2.3 ⁴He/³He法

⁴He/³He法是由Shuster等^[74,75]提出的一种基于磷灰石晶体中⁴He的空间分布约束低温热历史的技术, 即采用高能质子束辐照诱发裂反应在晶体中产生均匀分布的³He原子, 然后通过逐步加热脱气实验获得⁴He/³He释放谱图, 并结合磷灰石(U-Th)/He年龄和⁴He扩散参数模拟获取样品连续的热历史^[76-78]。该方法中, ³He原子起到间接获取⁴He空间分布的作用。最近, Danišik等^[79]建立了激光原位⁴He面扫描技术, 可以直接量化矿物中⁴He的空间分布, 避免了复杂耗时的质子辐照和加热脱气过程。

相比于(U-Th)/He定年, 该方法对热历史具有更高的灵敏性, 且具有应用单个样品就可获得区域热历史信息的优势, 但⁴He的空间分布不仅受控于样品的热历史还受到流体包裹体、U-Th的空间分布、 α 粒子射出效应的影响, 极易增加⁴He/³He法恢复热历史的不确定性。近年来, 锆石⁴He/³He方法的研究也取得长足进展, Brennan等^[80]建立了基于LA-ICP-MS深度分析和比例-积分-微分(PID)温度控制的锆石⁴He/³He方法, 克服了U-Th分布不均一和加热脱气过程中不准确的温度控制因素对锆石⁴He/³He法应用的制约。

3 辐射损伤的影响机制及退火动力学

放射性元素U、Th、Sm衰变产生空位、间隙原子、非晶质轨迹等改变晶体结构的现象被称为辐射损伤, α 反冲核是辐射损伤的主要贡献源。矿物晶体中累积的辐射损伤通常采用 α 剂量表征, 其取决于有效铀的含量(eU ; $eU=U+0.235\times Th+0.0046\times Sm$ ^[81])和累积时间。研究表明, 辐射损伤可以通过“捕获”和“阻塞”机制改变⁴He的扩散活化能进而影响⁴He的扩散行为。

3.1 捕获效应

辐射损伤对⁴He年龄的影响很早就被注意, 但众多研究均不能完全合理地解释辐射损伤对⁴He扩散行为的影响机制, 直到Shuster^[82]等提出“捕获模型”并认为矿物晶体中辐射损伤可以捕获⁴He, 提高矿物在相同条件下对⁴He的保存能力, 从而间接提高矿物⁴He的封闭温度。最近, 量子化学模拟计算进一步证实了该机制^[33,83]。随着 α 剂量提高, 空位损伤数量增加以及拓扑结构改变形成空位簇、大损伤区, 辐射损伤捕获效率增强, 矿物⁴He封闭温度增加, 但 α 剂量达到阈值后, 则表现为完全相反的情况, 损伤区域会叠加连通与晶体表面连接形成渗流通道为⁴He的快速扩散提供路径导致⁴He的扩散系数急剧增加, 封闭温度也随之降低(图2)。由此可见, 较低或较

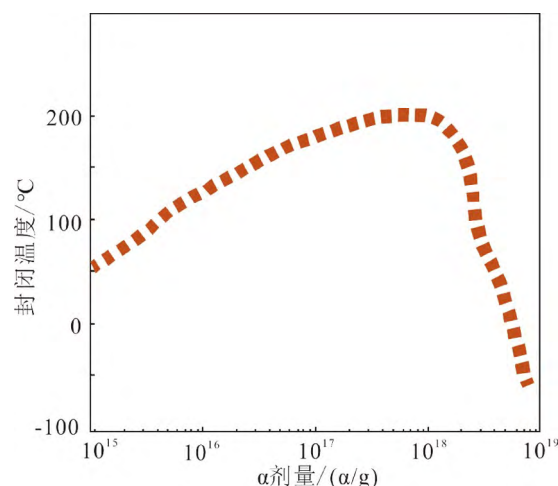


图2 锆石⁴He封闭温度与 α 剂量的协同演化关系(据文献[46]修改)

Fig. 2. Co-evolution of the zircon ⁴He closure temperature and the dosage of α particles

高的 α 剂量均会导致低的捕获效率, 进而不利于矿物晶体保留 ^4He , 例如, 研究发现 α 剂量较低的锆石的 ^4He 封闭温度仅 $80\text{ }^\circ\text{C}$ [46], α 剂量较高的锆石的 ^4He 封闭温度可低于 $50\text{ }^\circ\text{C}$ [84]。目前研究认为锆石、磷灰石和榍石 α 反冲核损伤的阈值剂量分别约为 $2\times 10^{17}\sim 5\times 10^{17}\text{ } \alpha/\text{g}$ [33]、 $6\times 10^{16}\text{ } \alpha/\text{g}$ [85]和 $5\times 10^{17}\text{ } \alpha/\text{g}$ [54]。因此, 对于一组经历了相同热历史并涉及部分 ^4He 丢失的锆石或磷灰石或榍石晶体而言, 若它们的 α 剂量低于阈值, 它们将显示 He 年龄与 eU 之间的正相关; 若它们的 α 剂量高于阈值, 它们将呈现出 He 年龄与 eU 之间的负相关。

3.2 通道阻塞

Guenther等[34]在对不同 α 剂量的锆石进行热扩散实验时, 发现随着损伤剂量增加, ^4He 沿 c 轴扩散的活化能与正交方向的活化能接近, 但对这一现象并没有进行深入探究。实际上, 这是辐射损伤对沿 c 轴通道阻塞的结果。Gautheron等[33]通过动力学蒙特卡罗法计算表明, 当沿锆石 c 轴通道的阻塞程度超过1%, ^4He 沿 c 轴的扩散系数 D_c 将受到强烈的影响, 特别是在低温下扩散行为的斜率发生显著变化, 随着阻塞程度的提高, D_c 接近 ^4He 沿 a/b 轴的扩散系数 $D_{a/b}$ (图3)。因此, 通道阻塞机制可有效降低 ^4He 沿 c 轴扩散的各向异性。值得注意的是, 尽管阻塞机制同样能够对 ^4He 的扩散起阻碍作用, 但并不是提高锆石中 ^4He 保存率的主要机制[33]。

3.3 辐射损伤退火动力学

理解辐射损伤的退火行为是量化矿物中辐射损伤累积与退火净效应的关键。但由于这一方面工作的缺乏使得人们错误地认为辐射损伤与裂变径迹的退火行为相同。早期的研究曾对锆石中辐射损伤的退火行为进行了定性描述[86-89]。最近, Ginster等[90]通过对斯里兰卡锆石进行退火实验, 建立了低 ($<4.60\times 10^{17}\text{ } \alpha/\text{g}$)、中等 ($4.60\times 10^{17}\sim 9.50\times 10^{17}\text{ } \alpha/\text{g}$)、高 α 剂量 ($9.50\times 10^{17}\sim 2.20\times 10^{18}\text{ } \alpha/\text{g}$) 锆石的辐射损伤退火模型 (式(4); 式中 φ 代表部分退火程度), 并且证实辐射损伤退火速率慢于裂变径迹。值得注意的是, 数值模拟研究也显示磷灰石中辐射损伤的退火速率慢于裂变径迹[85,91]。这进一步说明, 辐射损伤与裂变径迹的退火行为并不相同。

$$\varphi(t, T) = \left\{ C_0 + C_1 \frac{\ln(t) - C_2}{\frac{1}{T_1} - C_3} \right\}^{\frac{1}{v}} \quad (4)$$

Ginster等[90]的辐射损伤退火模型包含3个退火程度区间: 低退火程度区间 (low- φ)、过渡 (transition) 以及高退火程度区间 (high- φ), 不同退火程度区间的动力学参数见表2, 其中低程度退火区间适用于低温和短时间加热, 主要是相对容易退火的点缺陷的退火或杂质间隙原子 (He) 的损失, 而高程度退火区间适用于高温和持续加热, 对应晶体残余外延生长的重结晶过程和孤立稳定

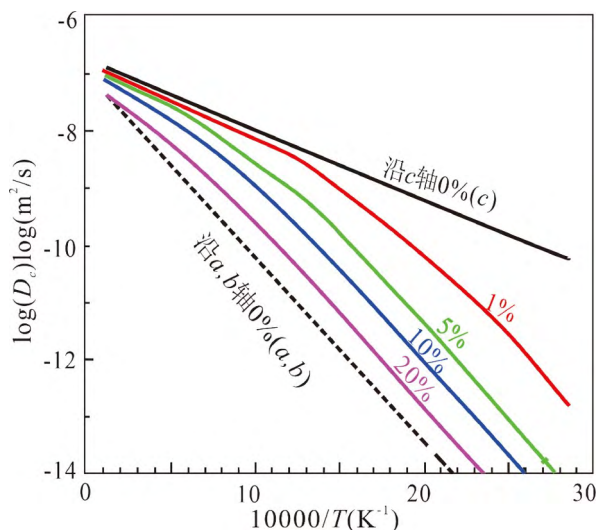


图3 1%~20% 阻塞程度下, 锆石中 ^4He 沿 c 轴的扩散系数 (D_c) 随开氏温度 (T) 的变化 (据文献[33])

Fig. 3. Variation of the diffusion coefficients (D_c values) of ^4He with Kelvin temperatures along the c -axis of zircon crystal for values of obstructed pathways from 1% to 20%

表2 不同退火程度区间的动力学参数

Table 2. Kinetic parameters for different annealing degrees (ϕ)

α 剂量/(α /g)	ϕ	C_0	C_1	C_2	C_3	γ
<4.60 $\times 10^{17}$	>0.6	0.3156	1.06 $\times 10^{-5}$	-30	0	0.3319
	0.3~0.6	0	1.46 $\times 10^{-5}$	-11.4	3.72 $\times 10^{-4}$	0.6233
	<0.3	-0.2886	1.32 $\times 10^{-5}$	-20.2	1 $\times 10^{-4}$	1.6396
4.60 $\times 10^{17}$ ~9.50 $\times 10^{17}$	>0.4	0.1675	1.27 $\times 10^{-5}$	-29.8	0	0.4539
	0.3~0.4	0	1.64 $\times 10^{-5}$	-23.0	1.75 $\times 10^{-4}$	0.4922
	<0.3	-0.1604	6.42 $\times 10^{-6}$	-10.0	5.60 $\times 10^{-4}$	2.4010
9.50 $\times 10^{17}$ ~2.20 $\times 10^{18}$	>0.5	-0.2153	1.75 $\times 10^{-5}$	-30.2	1.0 $\times 10^{-4}$	0.9165
	0.4~0.5	0	1.84 $\times 10^{-5}$	-66.4	-8.46 $\times 10^{-4}$	0.3500
	<0.4	-0.0963	6.66 $\times 10^{-6}$	0	8.39 $\times 10^{-4}$	1.9597

的点缺陷的退火。实际上, 通过类比裂变径迹的退火行为, 可以预见辐射损伤的退火是一个多元动力学过程, 因此还需要将更多影响辐射损伤退火行为的因素逐步纳入模型的建立。

4 ^4He 扩散动力学模型

^4He 扩散动力学模型能够量化 t - T 路径中辐射损伤累积与退火的净效应对 ^4He 扩散行为的影响并预测磷灰石和锆石中 ^4He 的保留程度, 从而为通过 ^4He 年龄正演或反演样品的热历史提供数值基础。

4.1 磷灰石 ^4He 扩散动力学模型

RDAAM是目前磷灰石(U-Th)/He热年代学研究中最为常用的数值模型, 该模型的两个版本分别由Flowers等^[32]和Gautheron等^[92]建立。二者对辐射损伤净效应以及 ^4He 扩散过程的计算采用了不同的数值方法, 但实际上, 都基于辐射损伤与裂变径迹退火行为相同的假设。然而, 正如3.3节所述, 辐射损伤的退火速率慢于裂变径迹。两款模型均高估了辐射损伤的退火速率导致对 ^4He 保留性的错误预测。Willett等^[93]意识到这一缺陷, 采用经验拟合的方法开发了 α 损伤退火模型ADAM。模型更直接、独立地量化辐射损伤净效应对 ^4He 扩散行为的影响, 不依赖上述假设, 但局限性也很明显, 一是模型拟合的扩散参数 E_a 、 $\ln(D_0/a^2)$ 均通过氟磷灰石测定, 对于氢氧或氯磷灰石模型并不适用; 二是模型实施需要将实验获得的 E_a 、 $\ln(D_0/a^2)$ 外推到地质时间尺度可能导致对辐射损伤净效应的错误量化。总体而言, ADAM不仅没有很好弥补这一缺陷, 反而为数值模拟过程引入了更多不确定性。可喜的是, Fox和Shuster^[91]提出降低RDAAM中参数 $r_{\text{mr}0}$ (裂变径迹退火参数)值, 该方法不仅解决了高估辐射损伤退火速率的问题, 而且允许研究者探索不同的辐射损伤退火速率对 ^4He 扩散行为的影响, 有利于在正演或反演过程中搜索最佳热史路径。

RDAAM的另一个缺陷是将所有矿物晶体中 ^4He 的扩散活化能(E_a)都视为一常数。但由于 α 剂量和拓扑结构的差异, 不同晶体中捕获能 ΔE_a 以及 E_a 并不相同($E_a = E_a' + \Delta E_a$; E_a' 为 ^4He 在正常间隙点位迁移所需的能量)。针对这一问题, Gerin等^[83]提出通过修改 ΔE_a 来调整晶体活化能的方法。Recanatì等^[85]成功实践了该方法。总之, 通过调节参数 $r_{\text{mr}0}$ 和 ΔE_a 的方法可以很好地弥补上述两个重要缺陷, 提高数值模拟结果的准确性。未来如果能够建立磷灰石辐射损伤退火模型并且合并到RDAAM中, 不仅能够降低人为修改 $r_{\text{mr}0}$ 带入的主观性, 无疑RDAAM的数值模拟能力将更加出色。

4.2 锆石⁴He扩散动力学模型

Guenther等^[34]将锆石中⁴He的有效扩散系数描述为损伤区域与非损伤区域中⁴He扩散系数的加权调和平均值,并建立了锆石⁴He扩散动力学模型ZRDAAM。这也是目前唯一可用于锆石⁴He年龄模拟的数值模型。然而该模型最大的缺陷同样在于采用裂变径迹的退火速率来计算辐射损伤的净效应。最近,Guenther^[94]将Ginster等^[90]的锆石辐射损伤退火模型植入了ZRDAAM,弥补了这一缺陷。值得注意的是,在正演或反演过程中需要将实验室建立的退火模型外推到地质时间尺度,可能导致错误的模拟结果,例如,Jonckheere等^[95]发现在实际地质过程中辐射损伤可以在相对较低的温度(100~160℃)下发生退火,与Ginster等^[90]的辐射损伤模型预测结果不一致。此外,ZRDAAM基于辐射损伤均匀分布条件下的单一调和平均关系建立,没有充分考虑辐射损伤拓扑结构和能量学对⁴He扩散行为的控制,以及锆石三维空间内辐射损伤分布不均对⁴He扩散行为的差异影响。总而言之,还需针对上述方面对模型进行完善,对于辐射损伤分布显著不均一的样品,慎用该模型。

5 (U-Th)/He热年代学的应用

测试方法的进步和⁴He扩散动力学模型的建立极大促进了(U-Th)/He热年代学在地质学领域的应用,诸如在约束成矿时代、造山带剥露历史研究以及矿床保存性评价等方面。

5.1 约束成矿时代

成矿时代的确定是建立矿床时空演化关系的关键要素之一。然而,对于低温热液金、锑矿床,由于缺少适合传统放射性同位素定年的矿物,难以确定其成矿时代。但如果成矿热液事件温度足够高、持续时间足够长则能够重置矿床围岩中已存在的锆石、磷灰石等矿物的(U-Th)/He体系。成矿结束后,由于快速冷却作用,这些矿物的(U-Th)/He体系重新开始计时。若后期未遭受明显热扰动,通过测定这些矿物的He年龄可以间接获得成矿年龄。例如,右江盆地卡林型金矿的成矿温度为200~270℃,高于锆石(U-Th)/He体系的封闭温度160~200℃,Gao等^[96]对该地区八渡、金牙等5个金矿中围岩内的碎屑锆石开展(U-Th)/He定年,结果显示锆石(U-Th)/He年龄主要分布在146~131 Ma,该年龄与热液金红石原位U-Pb年龄(141.7±5.8) Ma和热液锡石原位U-Pb年龄(143.5±1.4) Ma一致,且后期无热扰动,因此认为该年龄代表金矿的实际成矿年龄或成矿年龄下限。基于相同的原理,湘中板溪锑矿的成矿温度达330℃,高于锆石(U-Th)/He的封闭温度,Li^[97]等测得湘中板溪锑矿床围岩中锆石的平均He年龄为(123.8±3.8) Ma,该年龄不仅与热液硫化物Rb-Sr和Sm-Nd等时线确定的成矿年龄(130 Ma^[98])接近,而且在误差范围内与锡矿山锑矿床的成矿晚阶段((124.1±3.7) Ma^[99])以及半坡锑矿床的主成矿阶段年龄一致((130.5±3.0) Ma^[100]),据此提出早白垩世(130~120 Ma)是华南锑矿的重要成矿时期。

此外,可以通过测定金属和非金属矿石矿物的(U-Th)/He年龄对矿床进行直接定年。Yakubovich等对南乌拉尔Uzelga VMS矿床开展黄铁矿(U-Th)/He年代学研究获得年龄为(382±12) Ma^[101]与生物地层学方法估计的成矿年龄(389~380 Ma)一致。Bafti等^[102]对伊朗马赞德兰萤石矿集区中的萤石进行(U-Th)/He定年,年龄结果呈现在85~20 Ma范围内,其中晚白垩世年龄((84.5±3.6)、(78.8±4.4)和(72.3±3.5) Ma)与萤石Sm-Nd等时线年龄((90±23) Ma)吻合代表萤石形成年龄。van den Kerkhof等^[103]对南非沃特伯格热液铂族矿床中的赤铁矿进行U-Pb和(U-Th)/He定年,结果显示赤铁矿的形成年龄为1 Ga,同时指示矿床形成后未经历明显的热改造。因此,采用含U、Th矿石矿物的(U-Th)/He定年方法对矿床进行直接定年的同时还能够揭示矿床形成后的热历史信息。

5.2 造山带剥露历史研究

(U-Th)/He定年体系对地壳浅部的运动和冷却过程具有较高的灵敏度, 通过数值模拟法、年龄-高程法、年龄-封闭温度法以及矿物对法等^[104]可以对造山带剥露作用的速率和时限予以有效约束。这里仅介绍常用的数值模拟法和年龄-高程法。数值模拟方法基于⁴He扩散模型、⁴He/³He谱图和⁴He年龄等参数以及地质边界条件反演样品的 t - T 路径, 根据假设的古地温梯度可以计算样品在各时间步长内的剥露速率。(U-Th)/He年龄-高程法是在稳态地温场的假设基础上, 通过计算垂向剖面上不同样品的⁴He年龄与高程关系的斜率获得岩体的剥露速率。采用裂变径迹和(U-Th)/He定年技术相结合的策略, 可以揭示更为详尽、可靠的山体剥露历史信息。

喻顺等^[105]对中天山南缘科克苏河地区开展AHe年龄数值模拟研究, 相对于前人对天山地区开展的AFT年代学研究, 揭示了中天山南缘最近的一期隆升剥露事件, 起始时间为5 Ma, 剥露速率为0.47 mm/a, 剥露量为2300 m, 并得到天山两侧沉积盆地古地磁学、生长地层及地层不整合等研究^[106,107]的证实。Lin等^[108]采用AFT和AHe热年代学研究了青海南山东部的剥露历史, AFT和AHe年龄-高程关系显示青海南山东部在早-中侏罗世发生了缓慢的剥露, 速率为15 m/Ma, 而在早白垩世—早新生代发生了较为快速的剥露, 与AFT和AHe年龄数值模拟的结果一致, 并且区域上两期剥露事件也具有广泛的可比性。Shorten和Fitzgerald^[24]采用同样的方法揭示了中新世阿巴拉契亚造山带卡茨基尔山的快速剥露过程, 速率为34~75 m/Ma, 地貌以及近海沉积学的研究^[109,110]也佐证了阿巴拉契亚造山带中新世发生隆升剥露, 从而结束了对该地区中新世快速剥露事件真实性的长期争论。

事实上, 上述恢复造山带的剥露历史的方法存在一些局限性。

对于数值模拟法: 1) (U-Th)/He定年误差通常较大增加了模拟结果的不确定性; 2) 模拟依赖于⁴He扩散模型, 模型本身的缺陷导致模拟结果具有较大误差; 3) 计算剥露速率需要采用假设的古地温梯度, 可能获得不合理的结果。

对于年龄-高程法: 1) (U-Th)/He的定年误差会传递给剥露速率; 2) 采样地形的起伏会影响地温场的形态, 可能导致错误的剥露速率。

这些局限对恢复造山带剥露历史的可信度带来挑战。

5.3 矿床的保存潜力评价

矿床形成后在构造抬升和地表侵蚀作用下逐渐向地表剥露, (U-Th)/He (或结合裂变径迹) 热年代学的数值模拟和年龄-高程法同样可以计算矿床的剥露速率和剥露量, 为定量评价矿床的保存潜力提供重要参数, 应用时需要结合矿床形成深度、延深垂幅进行如下讨论:

1) 剥露(蚀)量小于成矿深度时, 表明深部具有较大找矿潜力。Sun等^[11]对长江铀矿田进行AFT/AHe、ZHe年龄数据的联合数值模拟, 结果表明矿田形成(约75~60 Ma)至今经历了约50 °C的冷却, 结合该地区新生代的的地温梯度为(24±10) °C/km, 估算矿田形成后剥露1.5~3.6 km, 小于根据H₂O-CO₂包裹体压力(80~140 MPa)和静岩压力梯度(25 MPa/km)计算的成矿深度3.2~5.6 km, 表明仍有大量铀矿体保存在深部。

2) 剥露(蚀)量大于成矿深度时, 需要考虑矿床垂直延伸幅度与剥露程度的关系。在西天山卡特巴阿苏金矿区, Zhao等^[11]对地表的二长花岗岩(容矿岩石)进行AHe和ZHe年龄数值模拟, 结果表明该矿床经历了显著的剥露作用, 提取 t - T 路径中294~263 Ma、193~66 Ma对应的温度, 假定古地温梯度为25 °C/km, 地表温度为(20±10) °C, 求出岩体的平均深度为6、1.8 km, 根据AHe和ZHe年龄-封闭温度法计算自193~66 Ma以来岩体的平均剥露速率为0.024 km/Ma, 剥露厚度为

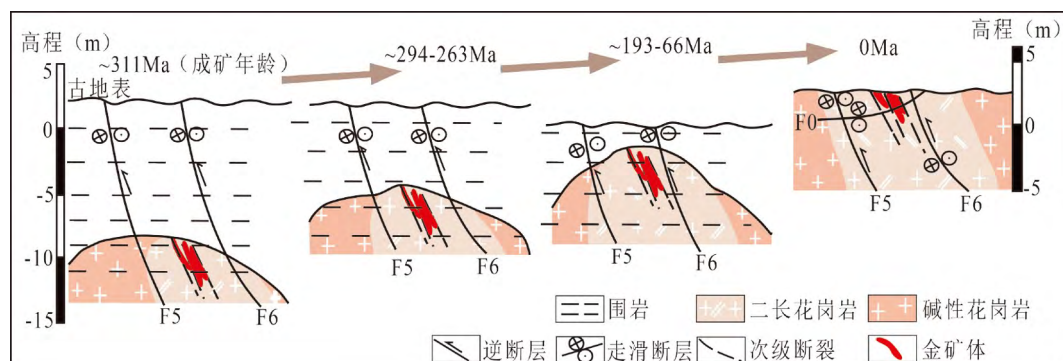


图4 卡特巴阿苏金矿床的隆升剥露过程 (据文献[111])

Fig. 4. The uplift and exhumation processes of the Katebasu gold deposit

2.6 km, 表明卡特巴阿苏矿床出露地表后, 容矿岩体的平均剥蚀厚度为0.8 km (图4), 考虑到矿体控制最大斜深达1085 m并且仍然向下延伸不尖灭, 因此在深部找矿仍具有巨大潜力。

此外, 对于矿集区内的两个矿床可以通过对比剥露量的大小来评价二者的保存潜力。如孙华山等^[112]测定了焦家和玲珑矿田的系列样品的ZHe年龄, 结果显示玲珑矿田锆石(U-Th)/He年龄主要为100~80 Ma, 而焦家矿田锆石(U-Th)/He年龄主要为105~90 Ma。玲珑矿田ZHe年龄总体比焦家矿田年轻15~10 Ma, 根据ZHe年龄-封闭温度法计算自100 Ma来焦家矿田剥露速率为60 m/Ma, 玲珑矿田比焦家矿田多剥露了600~900 m, 因此, 焦家矿田深部应比玲珑矿田有更大的找矿潜力, 钻孔揭露佐证了该结论。综上所述, 矿床的剥蚀消亡程度取决于剥露量、成矿深度、延深垂幅等要素。目前对于各要素的确定还存在根本性的问题, 难以对矿床的保存性和深部找矿潜力做出准确评价: 一是基于(U-Th)/He (或结合裂变径迹) 年龄数据数值模拟和年龄-高程法计算剥露量面临5.2节所述的局限; 二是各种估算深度方法 (静岩压力、静水压力等) 的结果相差较大, 难以获得符合地质实际的成矿深度; 三是主要矿床类型的矿化体系最大延伸幅度的理论依据和判断标志目前尚不清楚, 仍待研究。

6 研究展望

综上所述, (U-Th)/He热年代学研究在测试方法、辐射损伤退火行为以及⁴He扩散动力学模型等方面取得了长足进展, 促进了人们对低温地质过程的定量理解。然而目前存在的问题和局限性表明以下两方面的研究还存在明显不足:

1) 辐射损伤退火行为。过去由于缺乏辐射损伤退火行为的研究导致对⁴He扩散动力学的错误认识, 尽管Ginster等^[90]的锆石扇形线性模型与实验退火数据很好地拟合, 但与实际地质过程中锆石辐射损伤的退火行为存在明显的不一致。因此, 辐射损伤退火行为的研究是今后需深耕的方向, 一是对化学成分和 α 剂量不同的磷灰石开展实验退火研究, 建立磷灰石辐射损伤退火模型, 二是对锆石辐射损伤退火模型进行优化。此外, 开展实际地质条件下损伤退火过程的研究十分必要, 通过对深钻孔岩芯锆石、磷灰石样品进行拉曼 ($\nu_3(\text{SiO}_4)$) 分析, 可以为实验退火模型的建立和优化提供地质事实依据。

2) ⁴He扩散动力学模型。⁴He扩散动力学模型是重建热历史的数值基础, 对于锆石⁴He扩散动力学模型, 今后需要进一步研究晶体三维空间内辐射损伤分布不均对⁴He扩散行为的差异影响, 以及辐射损伤网络拓扑结构和能量学对⁴He扩散行为的控制, 并将这种控制关系参数化, 植入到模型中以提高数值模拟结果的质量。

完善辐射损伤理论研究的不足之处将助力研究者从(U-Th)/He年龄数据中挖掘出准确合理的热史信息, 改进原位测试方法是今后的重点工作方向, 包括提高剥蚀坑体积测量的精确度、研发标样等。目前, 国内(U-Th)/He热年代学正迎来蓬勃发展期, 中国科学院地球化学研究所、中国地质科学院地质研究所、中国地震局地质研究所以及中国科学院地质与地球物理研究所等多个单位已成功建立了(U-Th)/He定年实验室。这些实验设施为国内研究者探索解决上述问题提供有利条件。

参考文献:

- [1] Wang E, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(9): 640–645.
- [2] Jing L Z, Zhang J, McPhillips D, et al. Multiple episodes of fast exhumation since Cretaceous in southeast Tibet, revealed by low-temperature thermochronology [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 490: 62–76.
- [3] Riffel S B, Vasconcelos P M, Carmo I O, et al. Combined $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He geochronological constraints on long-term landscape evolution of the Second Paraná Plateau and its ruiniform surface features, Paraná, Brazil [J]. *Geomorphology*, 2015, 233: 52–63.
- [4] Monteiro H S, Vasconcelos P M P, Farley K A, et al. Age and evolution of diachronous erosion surfaces in the Amazon: Combining (U-Th)/He and cosmogenic ^3He records [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2018, 229: 162–183.
- [5] 刘静, 张金玉, 葛玉魁, 等. 构造地貌学: 构造-气候-地表过程相互作用的交叉研究[J]. *科学通报*, 2018, 63(30): 3070–3088.
- [6] Xu J, Stockli D F, Snedden J W. Enhanced provenance interpretation using combined U-Pb and (U-Th)/He double dating of detrital zircon grains from lower Miocene strata, proximal Gulf of Mexico Basin, North America[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 475: 44–57.
- [7] Zawacki E E, van Soest M C, Hodges K V, et al. Sediment provenance and silicic volcano-tectonic evolution of the northern East African Rift System from U/Pb and (U-Th)/He laser ablation double dating of detrital zircons[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2022, 580: 117375.
- [8] 徐杰, 姜在兴. 碎屑岩物源研究进展与展望[J]. *古地理学报*, 2019, 21(3): 379–396.
- [9] Wang Y, Wang F, Wu L, et al. (U-Th)/He thermochronology of metallic ore deposits in the Liaodong Peninsula: Implications for orefield evolution in northeast China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2018, 92: 348–365.
- [10] Yang F, Jepson G, Liu C, et al. Uplift-exhumation and preservation of the Yumugou Mo-W deposit, East Qinling, China: Insights from multiple apatite low-temperature thermochronology [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141: 104670.
- [11] Sun Y, Chen Z, Boone S C, et al. Exhumation history and preservation of the Changjiang uranium ore field, South China, revealed by (U-Th)/He and fission track thermochronology[J]. *Ore Geology Reviews*, 2021, 133: 104101.
- [12] 刘玄, 范宏瑞, Evans N J, 等. 江西德兴地区中侏罗世斑岩铜成矿系统、冷却、剥蚀历史: 来自同位素年代学和低温热年代学的制约[J]. *矿物学报*, 2013, 33(S2): 597–598.
- [13] 袁万明. 矿床保存变化研究的热年代学技术方法[J]. *岩石学报*, 2016, 32(8): 2571–2578.
- [14] 张雄, 赵晓燕, 杨竹森. 念扎金矿床热历史: 锆石U-Pb、(U-Th)/He及磷灰石裂变径迹年代学的制约[J]. *地球科学*, 2019, 44(6): 2039–2051.
- [15] 王雅美, 尹继元, 袁超, 等. 新疆西准噶尔苏云河斑岩型钼矿的剥蚀和保存条件: 来自裂变径迹和 (U-Th)/He 热年代学的约束[J]. *岩石学报*, 2021, 37(8):2547–2561.
- [16] Ault A K. Hematite fault rock thermochronometry and textures inform fault zone processes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 133: 104002.
- [17] Berger A, Egli D, Glotzbach C, et al. Apatite low-temperature chronometry and microstructures across a hydrothermally active fault zone [J]. *Chemical geology*, 2022, 588: 120633.
- [18] Ortiz G, Goddard A L S, Fosdick J C, et al. Fault reactivation in the Sierras Pampeanas resolved across Andean extensional and compressional regimes using thermochronologic modeling [J]. *Journal of South American Earth Sciences*, 2021, 112: 103533.
- [19] Calzolari G, Rossetti F, Ault A K, et al. Hematite (U-Th)/He thermochronometry constrains intraplate strike-slip faulting on the Kuh-e-Faghan Fault, central Iran [J]. *Tectonophysics*, 2018, 728: 41–54.
- [20] 王洋, 王岳军, 张培震, 等. 青藏高原东南缘断裂体系新生代构造演化[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(5): 777–802.
- [21] 陶亚玲, 张会平, 葛玉魁, 等. 青藏高原东南缘新生代隆升剥蚀与断裂活动的低温热年代学约束[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(11): 4154–4167.
- [22] Chang J, Qiu N, Liu S, et al. Post-Triassic multiple exhumation of the Taihang Mountains revealed via low-T thermochronology: Implications for the paleo-geomorphologic reconstruction of the North China Craton [J]. *Gondwana Research*, 2019, 68: 34–49.
- [23] Wu L, Wang F, Yang J, et al. Meso-Cenozoic uplift of the Taihang Mountains, North China: evidence from zircon and apatite thermochronology [J]. *Geological Magazine*, 2020, 157(7): 1097–1111.
- [24] Shorten C M, Fitzgerald P G. Episodic exhumation of the Appalachian orogen in the Catskill Mountains (New York State, USA) [J]. *Geology*, 2021, 49(5): 571–575.
- [25] Yu J, Zheng D, Zhang H, et al. Initial Cenozoic Exhumation of the Northern Chinese Tian Shan Deduced from Apatite (U-Th)/He Thermochronological Data [J]. *Lithosphere*, 2022, 2022(1): 8099539.
- [26] 常远, 许长海, Peter W. Reiners, 等. 米仓山—汉南隆起白垩纪以来的剥蚀作用: 磷灰石(U-Th)/He年龄记录[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(4): 912–919.

- [27] 李晓蓉, 张波, 张进江, 等. 喜马拉雅造山带亚东地区晚新生代剥露历史及其构造意义: 来自磷灰石和锆石(U-Th)/He数据的约束[J]. 地质学报, 2022, 96(4): 1143–1162.
- [28] Farley K A. (U-Th)/He dating: Techniques, calibrations, and applications [J]. Review in Mineralogy and Geochemistry, 2002, 47: 819–844.
- [29] Vermeesch P. HelioPlot, and the treatment of overdispersed (U-Th-Sm)/He data[J]. Chemical Geology, 2010, 271(3–4): 108–111.
- [30] Vermeesch P. IsoplotR: A free and open toolbox for geochronology [J]. Geoscience Frontiers, 2018, 9(5): 1479–1493.
- [31] Dodson M H. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1973, 40(3): 259–274.
- [32] Flowers R M, Ketcham R A, Shuster D L, et al. Apatite (U-Th)/He thermochronometry using a radiation damage accumulation and annealing model [J]. Geochimica et Cosmochimica acta, 2009, 73(8): 2347–2365.
- [33] Gautheron C, Djimbi D M, Roques J, et al. A multi-method, multi-scale theoretical study of He and Ne diffusion in zircon[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2020, 268: 348–367.
- [34] Guenther W R, Reiners P W, Ketcham R A, et al. Helium diffusion in natural zircon: Radiation damage, anisotropy, and the interpretation of zircon (U-Th)/He thermochronology [J]. American Journal of Science, 2013, 313(3): 145–198.
- [35] Reiners P W, Brandon M T. Using thermochronology to understand orogenic erosion [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2006, 34(1): 419–466.
- [36] Reiners P W, Farley K A. Influence of crystal size on apatite (U-Th)/He thermochronology: an example from the Bighorn Mountains, Wyoming [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2001, 188(3–4): 413–420.
- [37] 张彦, 陈文, 刘新宇. 磷灰石中氦扩散参数的确定方法及求解过程[J]. 高校地质学报, 2010, 16(2): 213.
- [38] 喻顺, 陈文, 孙敬博, 等. 锆石 He 扩散行为: FCT 锆石扩散实验的制约[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(4): 656–670.
- [39] Wolf R A, Farley K A, Kass D M. Modeling of the temperature sensitivity of the apatite (U-Th)/He thermochronometer [J]. Chemical Geology, 1998, 148(1–2): 105–114.
- [40] Wolf R A, Farley K A, Silver L T. Helium diffusion and low-temperature thermochronometry of apatite [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1996, 60(21): 4231–4240.
- [41] Crowley P D, Reiners P W, Reuter J M, et al. Laramide exhumation of the Bighorn Mountains, Wyoming: an apatite (U-Th)/He thermochronology study. Geology, 2002, 30(1): 27–30.
- [42] Ehlers T A, Farley K A. Apatite (U-Th)/He thermochronometry: methods and applications to problems in tectonic and surface processes[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 206(1–2): 1–14.
- [43] Wolfe M R, Stockli D F. Zircon (U-Th)/He thermochronometry in the KTB drill hole, Germany, and its implications for bulk He diffusion kinetics in zircon[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2010, 295(1–2): 69–82.
- [44] Reiners P W. Zircon (U-Th)/He thermochronometry [J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2005, 58(1): 151–179.
- [45] Reiners P W, Farley K A, Hickes H J. He diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of zircon: initial results from Fish Canyon Tuff and Gold Butte[J]. Tectonophysics, 2002, 349(1–4): 297–308.
- [46] Gérard B, Robert X, Grujic D, et al. Zircon (U-Th)/He closure temperature lower than apatite thermochronometric systems: reconciliation of a paradox [J]. Minerals, 2022, 12(2): 145
- [47] Wolff R, Dunkl I, Kempe U, et al. Variable helium diffusion characteristics in fluorite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2016, 188: 21–34.
- [48] Evans N J, Wilson N S F, Cline J S, et al. Fluorite (U-Th)/He thermochronology: Constraints on the low temperature history of Yucca Mountain, Nevada[J]. Applied Geochemistry, 2005, 20(6): 1099–1105.
- [49] Farley K A, Flowers R M. (U-Th)/Ne and multidomain (U-Th)/He systematics of a hydrothermal hematite from eastern Grand Canyon[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2012, 359: 131–140.
- [50] Blackburn T J, Stockli D F, Walker J D. Magnetite (U-Th)/He dating and its application to the geochronology of intermediate to mafic volcanic rocks[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 259(3–4): 360–371.
- [51] Peppe D J, Reiners P W. Conodont (U-Th)/He thermochronology: initial results, potential, and problems[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 258(3–4): 569–580.
- [52] Bidgoli T S, Tyrrell J P, Möller A, et al. Conodont thermochronology of exhumed footwalls of low-angle normal faults: A pilot study in the Mormon Mountains, Tule Springs Hills, and Beaver Dam Mountains, southeastern Nevada and southwestern Utah[J]. Chemical Geology, 2018, 495: 1–17.
- [53] Reiners P W, Farley K A. Helium diffusion and (U-Th)/He thermochronometry of titanite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(22): 3845–3859.
- [54] Baughman J S, Flowers R M, Metcalf J R, et al. Influence of radiation damage on titanite He diffusion kinetics[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2017, 205: 50–64.
- [55] Boyce J W, Hodges K V, Olszewski W J, et al. He diffusion in monazite: Implications for (U - Th)/He thermochronometry[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2005, 6(12): Q12004.
- [56] Peterman E M, Hourigan J K, Grove M. Experimental and geologic evaluation of monazite (U-Th)/He thermochronometry: Catnip Sill, Catalina Core Complex, Tucson, AZ[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 403: 48–55.
- [57] Cooperdock E H G, Stockli D F. Dating exhumed peridotite with spinel (U-Th)/He chronometry[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2018, 489: 219–227.

- [58] Farley K A, Wolf R A, Silver L T. The effects of long alpha-stopping distances on (U - Th)/He ages[J]. *Geochimica et cosmochimica acta*, 1996, 60(21): 4223–4229.
- [59] Min K, Farley K A, Renne P R, et al. Single grain (U-Th)/He ages from phosphates in Acapulco meteorite and implications for thermal history[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209(3–4): 323–336.
- [60] Ketcham R A, Gautheron C, Tassan-Got L. Accounting for long alpha-particle stopping distances in (U-Th-Sm)/He geochronology: Refinement of the baseline case[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, 75(24): 7779–7791.
- [61] Wolf R A. The development of the (U-Th)/He thermochronometer[D]. California: California Institute of Technology, 1997.
- [62] Meesters A, Dunai T J. Solving the production-diffusion equation for finite diffusion domains of various shapes: Part II. Application to cases with α -ejection and nonhomogeneous distribution of the source [J]. *Chemical Geology*, 2002, 186(1–2): 57–73.
- [63] Glotzbach C, Lang K A, Advievitch N N, et al. Increasing the accuracy of (U-Th (-Sm))/He dating with 3D grain modelling[J]. *Chemical Geology*, 2019, 506: 113–125.
- [64] Bargnesi E A, Stockli D F, Hourigan J K, et al. Improved accuracy of zircon (U-Th)/He ages by rectifying parent nuclide zonation with practical methods[J]. *Chemical Geology*, 2016, 426: 158–169.
- [65] Huber C, Guenther W, Karani H. A new correction for He loss applied to (U - Th)/He dating of grains with complex shapes and polymineralic aggregates [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2019, 20(12): 5744–5764.
- [66] Ballentine C J, Burgess R, Marty B. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust[J]. *Reviews of Mineral and Geochemistry*, 2002, 47(1): 539–614.
- [67] House M A, Farley K A, Stockli D. Helium chronometry of apatite and titanite using Nd-YAG laser heating[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 183(3–4): 365–368.
- [68] Evans N J, McInnes B I A, McDonald B, et al. An in situ technique for (U-Th-Sm)/He and U-Pb double dating [J]. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 2015, 30(7): 1636–1645.
- [69] Horne A M, van Soest M C, Hodges K V, et al. Integrated single crystal laser ablation U/Pb and (U-Th)/He dating of detrital accessory minerals—Proof-of-concept studies of titanites and zircons from the Fish Canyon tuff[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2016, 178: 106–123.
- [70] Horne A M, van Soest M C, Hodges K V. U/Pb and (U-Th-Sm)/He “double” dating of detrital apatite by laser ablation: A critical evaluation [J]. *Chemical Geology*, 2019, 506: 40–50.
- [71] Pickering J, Matthews W, Enkelmann E, et al. Laser ablation (U-Th-Sm)/He dating of detrital apatite[J]. *Chemical Geology*, 2020, 548: 119683.
- [72] Boyce J W, Hodges K V, Olszewski W J, et al. He diffusion in monazite: Implications for (U - Th)/He thermochronometry[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2005, 6(12): Q12004.
- [73] 田云涛, Pieter Vermeesch. 原位 U-Th-He 定年新方法: $^4\text{He}/^3\text{He}$ 激光微区分析[C]//北京: 2017 中国地球科学联合学术年会论文集 (十八)——专题38: 地球内部挥发分的迁移与作用、专题 39: 同位素热年代学理论、方法与应用. 北京: 中国和平音像电子出版社: 中国地球物理学会, 2017: 1.
- [74] Shuster D L, Farley K A. $^4\text{He}/^3\text{He}$ thermochronometry [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2004, 217(1–2): 1–17.
- [75] Shuster D L, Farley K A. $^4\text{He}/^3\text{He}$ thermochronometry: Theory, practice, and potential complications[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2005, 58(1): 181–203.
- [76] Valla P G, Shuster D L, Van Der Beek P A. Significant increase in relief of the European Alps during mid-Pleistocene glaciations [J]. *Nature geoscience*, 2011, 4(10): 688–692.
- [77] Gourbet L, Mahéo G, Shuster D L, et al. River network evolution as a major control for orogenic exhumation: Case study from the western Tibetan plateau [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 456: 168–181.
- [78] Schmidt J L, Zeitler P K, Pazzaglia F J, et al. Knickpoint evolution on the Yarlung river: Evidence for late Cenozoic uplift of the southeastern Tibetan plateau margin [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 430: 448–457.
- [79] Danišik M, McInnes B I A, Kirkland C L, et al. Seeing is believing: Visualization of He distribution in zircon and implications for thermal history reconstruction on single crystals [J]. *Science advances*, 2017, 3(2): e1601121.
- [80] Brennan C J, Stockli D F, Patterson D B. Zircon $^4\text{He}/^3\text{He}$ fractional loss step-heating and characterization of parent nuclide distribution[J]. *Chemical Geology*, 2020, 549: 119692.
- [81] Gordon Gastil R, DeLisle M, Morgan J R. Some effects of progressive metamorphism on zircons[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1967, 78(7): 879–906.
- [82] Shuster D L, Flowers R M, Farley K A. The influence of natural radiation damage on helium diffusion kinetics in apatite[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 249(3–4): 148–161.
- [83] Gerin C, Gautheron C, Oliviero E, et al. Influence of vacancy damage on He diffusion in apatite, investigated at atomic to mineralogical scales[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2017, 197: 87–103.
- [84] Johnson J E, Flowers R M, Baird G B, et al. “Inverted” zircon and apatite (U-Th)/He dates from the Front Range, Colorado: high-damage zircon as a low-temperature ($< 50\text{ }^\circ\text{C}$) thermochronometer[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 466: 80–90.
- [85] Recanati A, Gautheron C, Barbarand J, et al. Helium trapping in apatite damage: Insights from (U-Th-Sm)/He dating of different granitoid lithologies [J]. *Chemical Geology*, 2017, 470: 116–131.
- [86] Geisler T, Pidgeon R T, Van Bronswijk W, et al. Kinetics of thermal recovery and recrystallization of partially metamict zircon a Raman

- spectroscopic study[J]. *European Journal of Mineralogy*, 2001, 13(6): 1163–1176.
- [87] Geisler T. Isothermal annealing of partially metamict zircon: evidence for a three-stage recovery process[J]. *Physics and Chemistry of Minerals*, 2002, 29(6): 420–429.
- [88] Zhang M, Salje E K H, Capitani G C, et al. Annealing of decay damage in zircon: a Raman spectroscopic study[J]. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2000, 12(13): 3131.
- [89] Pidgeon R T, Chapman P G, Danišik M, et al. Dry annealing of metamict zircon: A differential scanning calorimetry study [J]. *American Mineralogist*, 2017, 102(5): 1066–1072.
- [90] Ginster U, Reiners P W, Nasdala L, et al. Annealing kinetics of radiation damage in zircon[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2019, 249: 225–246.
- [91] Fox M, Shuster D L. 2014. The influence of burial heating on the (U-Th)/He system in apatite: Grand Canyon case study. *Earth and Planetary Science Letters*, 397: 174–183.
- [92] Gautheron C, Tassan-Got L, Barbarand J, et al. Effect of alpha-damage annealing on apatite (U-Th)/He thermochronology[J]. *Chemical Geology*, 2009, 266(3–4): 157–170.
- [93] Willett C D, Fox M, Shuster D L. A helium-based model for the effects of radiation damage annealing on helium diffusion kinetics in apatite [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 477: 195–204.
- [94] Guenther W R. Implementation of an alpha damage annealing model for zircon (U - Th)/He thermochronology with comparison to a zircon fission track annealing model [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2021, 22(2): e2019GC008757.
- [95] Jonckheere R, Heinz D, Hacker B R, et al. A borehole investigation of zircon radiation damage annealing [J]. *Terra Nova*, 2019, 31(3): 263–270.
- [96] Gao W, Hu R, Hofstra A H, et al. U-Pb dating on hydrothermal rutile and monazite from the Badu gold deposit supports an Early Cretaceous age for Carlin-Type gold mineralization in the Youjiang Basin, Southwestern China[J]. *Economic Geology*, 2021, 116(6): 1355–1385.
- [97] Li H, Danišik M, Zhou Z K, et al. Integrated U-Pb, Lu-Hf and (U-Th)/He analysis of zircon from the Banxi Sb deposit and its implications for the low-temperature mineralization in South China[J]. *Geoscience Frontiers*, 2020, 11(4): 1323–1335.
- [98] Li H, Wu Q H, Evans N J, et al. Geochemistry and geochronology of the Banxi Sb deposit: Implications for fluid origin and the evolution of Sb mineralization in central-western Hunan, South China[J]. *Gondwana Research*, 2018, 55: 112–134.
- [99] Peng J T, Hu R Z, Burnard P G. Samarium-neodymium isotope systematics of hydrothermal calcites from the Xikuangshan antimony deposit (Hunan, China): the potential of calcite as a geochronometer[J]. *Chemical Geology*, 2003, 200(1–2): 129–136.
- [100] 肖宪国. 贵州半坡锑矿床年代学, 地球化学及成因[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [101] Yakubovich O, Podolskaya M, Vikentyev I, et al. U-Th-He geochronology of pyrite from the Uzelga VMS deposit (South Urals)—new perspectives for direct dating of the ore-forming processes [J]. *Minerals*, 2020, 10(7): 629.
- [102] Bafti B S, Dunkl I, Madanipour S. Timing of fluorite mineralization and exhumation events in the east Central Alborz Mountains, northern Iran: constraints from fluorite (U-Th)/He thermochronometry[J]. *Geological Magazine*, 2021, 158(9): 1600–1616.
- [103] van den Kerkhof A M, Sosa G M, Oberthür T, et al. The hydrothermal Waterberg platinum deposit, Mookgophong (Naboomspruit), South Africa. Part II: Quartz chemistry, fluid inclusions and geochronology[J]. *Mineralogical Magazine*, 2018, 82(3): 751–778.
- [104] 常远, 周祖翼. 利用低温热年代学数据计算剥露速率的基本方法[J]. *科技导报*, 2010, 28(21): 86–94.
- [105] 喻顺, 陈文, 张斌, 等. 中天山科克苏河地区隆升剥蚀历史—来自 (U-Th)/He 年龄的制约[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2922–2936.
- [106] Sun J, Li Y, Zhang Z, et al. Magnetostratigraphic data on Neogene growth folding in the foreland basin of the southern Tianshan Mountains[J]. *Geology*, 2009, 37(11): 1051–1054.
- [107] Zhang T, Fang X, Song C, et al. Cenozoic tectonic deformation and uplift of the South Tian Shan: implications from magnetostratigraphy and balanced cross-section restoration of the Kuqa depression[J]. *Tectonophysics*, 2014, 628: 172–187.
- [108] Lin X, Jolivet M, Liu-Zeng J, et al. Mesozoic-Cenozoic cooling history of the Eastern Qinghai Nan Shan (NW China): Apatite low-temperature thermochronology constraints[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2021, 572: 110416.
- [109] Miller S R, Sak P B, Kirby E, et al. Neogene rejuvenation of central Appalachian topography: Evidence for differential rock uplift from stream profiles and erosion rates[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 369: 1–12.
- [110] Gallen S F, Wegmann K W, Bohnenstiehl D R. Miocene rejuvenation of topographic relief in the southern Appalachians[J]. *GSA Today*, 2013, 23(2): 4–10.
- [111] Zhao W, Zhao X, Xue C, et al. Thermochronological constraints on the exhumation history of the Carboniferous Katebasu gold deposit, western Tianshan gold belt, NW China[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2022, 516(1): SP516–2020.
- [112] 孙华山, 韩静波, 申玉科, 等. 胶西北玲珑、焦家金矿田锆石 (U-Th)/He 年龄及其对成矿后剥露程度的指示[J]. *地球科学*, 2016, 41(4): 644–654.