

常健, 邱楠生, 李晨星等. 2022. 锆石 He 扩散模型与中国典型克拉通盆地古老层系热史重建. 地球物理学报, 65(2): 711-725, doi:10.6038/cjg2022P0197.

Chang J, Qiu N S, Li C X, et al. 2022. Zircon He diffusion kinetics models and its implications on the thermal history reconstruction of the ancient strata in the craton basins, China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 65(2): 711-725, doi:10.6038/cjg2022P0197.

锆石 He 扩散模型与中国典型克拉通盆地 古老层系热史重建

常健^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 李晨星^{1,2}, 张建勇³, 李文正^{3,4}, 付小东³

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

4 成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 成都 610059

摘要 沉积盆地古老层系已成为我国油气勘探的重要领域, 但由于缺乏有效古温标, 其热史研究一直很薄弱. 本文在系统综述锆石 He 扩散动力学模型及差异性基础上, 探讨了锆石(U-Th)/He 热定年技术在我国克拉通盆地古老层系热史恢复中的适用性. 目前常用的锆石 He 扩散动力学模型包括简单模型、锆石辐射损伤积累和退火模型及扇形-线性模型. 基于不同温度路径模拟发现, 锆石辐射损伤积累和退火模型和扇形-线性模型在约束低温热史时具有较强的一致性, 而在约束高温热史($>200^{\circ}\text{C}$)时, 则具有明显的差异性. 塔里木盆地、四川盆地和华北克拉通盆地的前寒武系样品单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄均小于地层年龄, 且与有效铀浓度呈负相关性, 反映了辐射损伤是锆石 He 年龄分散的主因. 基于正、反演热史模拟明确了三大盆地前寒武系样品自沉积以来的古温度史, 并揭示出它们曾经历过 $160\sim185^{\circ}\text{C}$ 的高温热历史, 这对深层、古老层系烃源岩成熟演化和资源评价具有重要的科学意义.

关键词 锆石(U-Th)/He 技术; He 扩散模型; 辐射损伤; 克拉通盆地; 古老层系; 热历史

doi:10.6038/cjg2022P0197

中图分类号 P314

收稿日期 2021-03-26, 2021-07-14 收修定稿

Zircon He diffusion kinetics models and its implications on the thermal history reconstruction of the ancient strata in the craton basins, China

CHANG Jian^{1,2}, QIU NanSheng^{1,2}, LI ChenXing^{1,2}, ZHANG JianYong³,
LI WenZheng^{3,4}, FU XiaoDong³

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

4 State Key Laboratory of Oil and Gas Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract Although the ancient strata of the sedimentary basins in China have become the important oil and gas exploration target, their thermal history evolution is still ambiguous due to

基金项目 国家自然科学基金项目(41972125, 41830424, U19B6003)和国家重点研发计划深地资源勘查开采重点专项(2017YFC0603102)联合资助.

第一作者简介 常健,男,1982年生,副教授,博士生导师,主要从事低温热年代学和沉积盆地热历史重建方面的研究.

E-mail: changjian@cup.edu.cn

the lack of effective paleo-thermal indicator. Based on a systematic review of zircon He diffusion kinetics models and their differences, this paper investigates the applicability of zircon (U-Th)/He dating in the thermal history reconstruction of ancient strata for the craton basins in China. The zircon He diffusion kinetic models include the simple model, the zircon radiation-damage accumulation and annealing model, and the fanning linear model. Thermal simulation indicated that the zircon radiation-damage accumulation and annealing model and the fanning linear model have a strong consistency when constraining the low-temperature thermal history but have a significant difference when constraining the high-temperature thermal history ($>200^{\circ}\text{C}$). The single-grain zircon (U-Th)/He ages of Precambrian samples from the Tarim Basin, Sichuan Basin and North China Craton Basin are all younger than the stratigraphic ages and negatively correlated with the effective uranium concentration, implying that radiation damage probably caused the dispersion of zircon (U-Th)/He ages. The forward and inverse simulation reveals the thermal history of the Precambrian samples from these three basins since the deposition and the experienced highest temperature of $160\sim185^{\circ}\text{C}$, which has important significance for the maturation evolution and resource evaluation of the deep and ancient strata.

Keywords Zircon (U-Th)/He dating; He diffusion kinetics model; Radiation damage; Craton basin; Ancient strata; Thermal history

0 引言

低温热年代学技术主要包括裂变径迹和(U-Th)/He热定年技术,分别是根据磷灰石、锆石等矿物中含有的放射性同位素U、Th发生裂变和衰变发展而来的。相对于磷灰石,锆石低温热年代学技术可揭示 $140\sim310^{\circ}\text{C}$ 的热信息(Reiners et al., 2004; Yamada et al., 2007; Guenthner et al., 2013),在研究造山带早期隆升剥露史和沉积盆地深层、超深层热历史领域具有优势。由于锆石裂变径迹技术部分退火带($190\sim310^{\circ}\text{C}$)较高(Yamada et al., 2007; Guedes et al., 2013),碎屑岩锆石颗粒(埋藏深度不超过 $12\sim15\text{ km}$)沉积后通常仅发生部分退火,因此利用重分组法进行锆石裂变径迹年龄分析即可研究沉积盆地的构造冷却事件(Fellin et al., 2006; Chang et al., 2014)。对于锆石(U-Th)/He(ZHe)热定年技术,热扩散实验认为当 α 粒子剂量介于 $10^{16}\sim10^{18}\alpha/\text{g}$ 时,其封闭温度为 $140\sim220^{\circ}\text{C}$ (Guenthner et al., 2013)。这与沉积盆地深层、超深层地层温度、油气相态及成熟度具有很好的对应关系(图1)。基于锆石裂变径迹退火模型,Guenthner等(2013)建立了适用于锆石(U-Th)/He热定年技术的辐射损伤积累和退火模型(ZRDAAM),并被广泛地应用于古老克拉通盆地早期热历史恢复研究,如加拿大古老地盾(Canadian Shield)、美国西部怀俄明克拉通

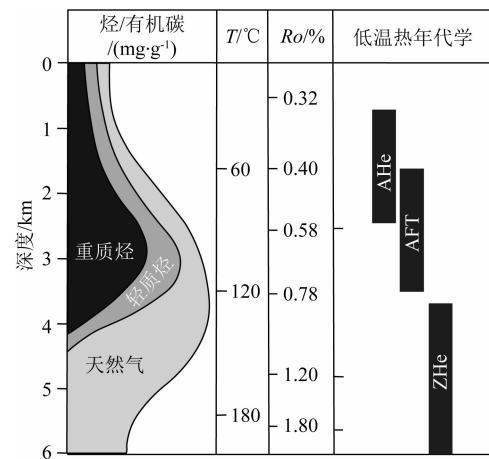


图1 不同低温热年代学方法适用温度范围及与油气相态关系。AHe表示磷灰石(U-Th)/He技术;AFT表示磷灰石裂变径迹技术;ZHe表示锆石(U-Th)/He技术
Fig. 1 Applicable temperature range of the low-temperature thermochronology and its correlation with the oil and gas phase. AHe means apatite (U-Th)/He dating; AFT means apatite fission track dating; ZHe means zircon (U-Th)/He dating

(Wyoming Craton)、南非卡普瓦克拉通(Kaapvaal Craton)等(Guenthner et al., 2015; Delucia et al., 2018; Baughman and Flowers, 2020)。然而一些研究表明这个模型有时无法适用于高辐射损伤剂量的锆石样品(Powell et al., 2016; Johnson et al., 2017)。最近,Ginster等(2019)结合高温热扩散实验和激光拉曼表征辐射损伤强度方法建立了扇形-线性模型,该模

型考虑了锆石颗粒内部各种辐射损伤退火行为,与锆石辐射损伤积累和退火模型相比可更好地解释 He 扩散和丢失行为。锆石(U-Th)/He 热定年技术近几年在 He 扩散动力学模型建立和应用方面得到了飞跃发展,而国内针对这一方法的相关概述及应用还很少。

近年,古老层系已成为我国油气勘探最重要的接替领域,并相继在西部沉积盆地获得重大突破,如塔里木盆地中深 1 井和轮探 1 井寒武系原生油气藏、顺北奥陶系断溶体油气藏及四川盆地安岳震旦—寒武系特大气田等(王招明等,2014; 邹才能等,2014; 焦方正,2018)。然而,由于缺乏有效古温标,古老层系热史研究一直很薄弱,制约了古老烃源岩热演化及生烃和成藏期次研究,进而影响了深层油气勘探和资源评价。为了解决该科学问题,本文在总结锆石(U-Th)/He 热定年技术 He 扩散动力学模型和热史模拟方法技术的基础上,通过正、反演联合模拟阐明了我国三大典型克拉通(含油气)盆地——塔里木盆地、四川盆地及华北克拉通盆地古老层系自沉积以来的构造-热历史,并系统讨论了锆石辐射损伤积累和退火模型与扇形-线性模型在模拟不同热史路径中的差异性和热史有效性,有利于推动锆石(U-Th)/He 热定年方法在国内沉积盆地热史研究领域的应用与发展。

1 锆石 He 扩散动力学模型

实测锆石(U-Th)/He 年龄记录的是锆石颗粒开始低于封闭温度的某一时间点,与裂变径迹相似,为了揭示锆石 He 年龄曾经历的完整时间-温度演化史,必须构建 He 扩散动力学模型。该模型的建立主要是基于对基岩锆石矿物进行分步式热扩散实验明确活化能和频率因子,在此基础上,根据阿伦尼乌斯公式计算相应的封闭温度。锆石(U-Th)/He 热定年技术的 He 扩散动力学模型主要有三种:

1.1 Reiners 等(2004)简单模型

Reiners 等(2004)通过对碎屑岩和岩浆岩锆石样品在 300~550 °C 范围内系统开展分步式热扩散实验分析,计算得到平均活化能(E_a)为 169.03 kJ/mol,频率因子(D_0)为 $0.46 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,再结合 Dodson(1973)提出的公式计算得到锆石(U-Th)/He 封闭温度(T_c)为 171~196 °C(颗粒半径为 60 μm,冷却速率 $\text{为 } 10 \text{ }^\circ\text{C/Ma}$,平均为 183 °C)。该模型认为锆石 He 封闭温度是一个常数,不受辐射损伤和 U-Th 分带

性影响。

1.2 Guenthner 等(2013)锆石辐射损伤积累和退火模型

研究表明,同一样品单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄通常具有很强的分散性。这种分散性往往与辐射损伤强度(α 剂量)具有很强的关联性,因此无法利用简单模型对这些单颗粒(U-Th)/He 年龄进行合理的解释与热史模拟。为了解决这个问题,基于 Flowers 等(2009)提出的磷灰石辐射损伤积累和退火模型,Guenthner 等(2013)在对一系列样品进行热扩散实验基础上,利用蚀刻的裂变径迹代替辐射损伤强度建立了锆石辐射损伤积累和退火模型。当 α 粒子剂量介于 $10^{16} \sim 10^{18} \alpha/\text{g}$ 时,其封闭温度为 140~220 °C,但 α 粒子剂量超过 $2 \times 10^{18} \alpha/\text{g}$ 时,封闭温度迅速减小(图 2a)。单颗粒磷灰石(U-Th)/He 年龄与有效 U 浓度(eU)往往只表现为正相关性,而单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 既有正相关性又有负相关性。Guenthner 等(2013)认为正相关性是由孤立的辐射损伤区域造成的,这些孤立辐射损伤区域通过增加扩散路径的弯曲度来阻碍 He 的扩散行为。锆石 He 扩散行为具有各向异性,其中在 C 轴平行方向上最强。锆石 He 扩散行为减弱主要是由辐射损伤对 C 轴方向通道的持续破坏作用(类似于在高速路上设置路障)造成的。当这些“路障”驻立于锆石矿物内部时,He 原子通道就会变得更弯曲,从而减弱颗粒的有效 He 扩散行为。图 2b 显示了 C 轴平行通道弯曲度增强的证据。He 扩散方向与 C 轴平行的锆石样品的 D_0 值表现为逐渐减小,且覆盖整个损伤范围,而与 C 轴正交的锆石样品的 D_0 值保持不变。需要注意的是,两者在高辐射损伤区具有相似的 D_0 值。也就是说,随着辐射损伤增强,两个方向上的扩散动力学行为将趋近于一致。

单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 负相关性是由中-高 α 剂量($> 2 \times 10^{18} \alpha/\text{g}$)损伤区的相互连通性造成的(Nasdala et al., 2004; Reiners, 2005; Guenthner et al., 2013)。当 α 剂量超过某一临界值时,相互连接的辐射损伤区在锆石晶格内部形成贯穿通道,为 He 快速扩散提供便利。为了达到这一临界值,锆石必须长期处于低温环境,而不发生退火行为。对于辐射损伤严重的锆石,颗粒内部仍含有少量不易扩散的物质,从而造成这种负相关性表现为渐进性,而不具有突变型。

1.3 Ginster 等(2019)扇形-线性模型

Guenthner 等(2013)的 ZRDAAM 模型将可蚀

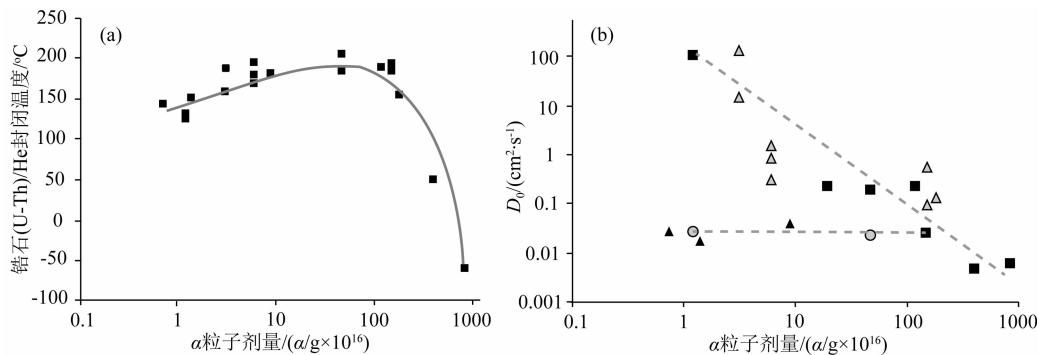


图 2 (a) 锆石(U-Th)/He 封闭温度与 α 粒子剂量关系图。(b) 锆石颗粒频率因子与 α 粒子剂量关系图(黑色方形代表扩散行为与 C 轴平行的颗粒; 灰色圆圈代表扩散行为与 C 轴垂直的颗粒; 灰色三角形数据引自 Reiners 等(2002, 2004); 黑色三角形引自 Reiners 等(2002)与 Wolfe 和 Stocki(2010); 三角形数据的样品扩散行为与颗粒 C 轴关系不明确; Guenthner et al., 2013)

Fig. 2 (a) Correlation between the closure temperature of the zircon (U-Th)/He dating and alpha dose. (b) Correlation between frequency factor and alpha dose for the zircon. The black squares represent the grains with the He diffusion parallel to C-axis; the grey circles represent the grains with the He diffusion orthogonal to C-axis. The data shown as the grey triangles refer to Reiners et al. (2002, 2004); The data shown as the black triangles refer to Reiners et al. (2002) and Wolfe and Stocki (2010). The correlation between the He diffusion and C-axis for the samples shown as the triangles are unclear (Guenthner et al., 2013)

刻的裂变径迹退火行为表示锆石内部所有辐射损伤退火行为,而实际上与已蚀刻裂变径迹退火相比,大部分辐射损伤退火需要更高温度和更长加热时间。当裂变径迹完全退火时,大部分辐射损伤仅退火了 30%~50% (Ginster et al., 2019)。为了更精确地解释锆石内部的辐射损伤退火动力学行为,Ginster 等(2019)通过高温退火实验阐明了具有不同辐射损伤程度的锆石颗粒的退火动力学行为,并根据激光拉曼光谱识别锆石特征峰($\sim 1008 \text{ cm}^{-1}$)的半峰宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)计算了相应的等效损伤剂量(D_{ed})。依据半峰宽和等效损伤剂量,将锆石划分为三种:

低损伤锆石: $\text{FWHM} \leq 8 \text{ cm}^{-1}$; $D_{\text{ed}} \leq 4.6 \times 10^{17} \alpha/\text{g}$

中损伤锆石: $8 \text{ cm}^{-1} \leq \text{FWHM} \leq 14.5 \text{ cm}^{-1}$; $4.6 \times 10^{17} \alpha/\text{g} \leq D_{\text{ed}} \leq 9.5 \times 10^{17} \alpha/\text{g}$

高损伤锆石: $14.5 \text{ cm}^{-1} \leq \text{FWHM} \leq 25 \text{ cm}^{-1}$; $9.5 \times 10^{17} \alpha/\text{g} \leq D_{\text{ed}} \leq 2.2 \times 10^{18} \alpha/\text{g}$

在此基础上,通过将实测退火数据投点到阿伦尼乌斯图上,根据拟合度建立了扇形-线性模型。并结合部分退火率(fractional annealing, φ)将该模型进一步划分为低 φ 、过渡带和高 φ 三个亚区间模型。 $\varphi = (\text{FWHM}_t - \text{FWHM}_{t=0}) / (\text{FWHM}_a - \text{FWHM}_{t=0})$,

其中, φ 表示分馏退火率; $\text{FWHM}_{t=0}$ 表示退火前 FWHM 值,即样品退火前的辐射损伤剂量; FWHM_t 表示

样品被持续加热时间 t 之后的 FWHM 值,即退火实验结束时仍保留的辐射损伤剂量; FWHM_a 表示完全退火样品的 FWHM 值。

低 φ 和高 φ 退火区模型分别适用于短期低温加热和长期高温加热的样品。低 φ 退火区是由可在低温下退火的点缺陷控制的; 而高 φ 退火区是由在高活化能条件下才退火的孤立-稳定点缺陷的外延生长和退火行为主导的。过渡带退火区模型中最小部分退火率边界线等于低 φ 模型中最高部分退火率等值线,过渡带退火区模型中最大部分退火率边界线等于高 φ 模型中最低部分退火率等值线。

2 热史模拟技术

由于低温热年代学年龄仅能反映冷却(隆升)事件的某个时间点,人们根据裂变径迹退火行为和 He 扩散行为建立了相应的化学动力学模型开展正演或反演热史模拟,从而有效地揭示样品在地质历史时期经历的古温度史。对于磷灰石裂变径迹技术,热史模拟由裂变径迹年龄和封闭径迹长度两个参数作为约束条件,因此其热史反演结果被认为是最可靠的。而对于(U-Th)/He 热定年技术,热史反演模拟通常仅有(U-Th)/He 年龄单个参数进行约束,因此模拟结果精度不高。如前所述,古老层系样品单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄往往具有很强的分散性。当同一样品单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄分散性较强时,早期

通常通过计算加权平均(U-Th)/He 年龄或者选择性地剔除掉较老或较年轻的年龄进行分析和研究,而这种处理方法往往会造成某些重要热信息的丢失(Powell et al., 2016)。近年来,随着锆石 He 扩散动力学模型的发展和正演模拟技术的进步,利用单一样品多个单颗粒(U-Th)/He 年龄进行热史模拟得到可靠的热信息变得可能(Guenthner et al., 2015; Powell et al., 2016)。Guenthner 等(2015)提出的继承性包络线(inheritance envelope)概念可很好地解释同一样品中分散的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄。而 Powell 等(2016)不仅进一步完善了继承性包络线概念,而且系统地阐述了利用单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄开展正演和反演热史模拟的方法步骤。

利用单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄开展正演模拟主要包括以下 5 个步骤:(1) 根据研究区地层发育特征、不整合面、构造演化成果及热体制,设定 4~5 种具有代表性的温度路径,并明确地表温度(本研究采用 20 °C);(2) 结合锆石 U-Pb、K-Ar 等定年方法明确样品所在层位(主要针对沉积岩)存在几个物源区峰值年龄,并将这些峰值年龄设定为若干个热史模拟开始时间。最小的峰值年龄既表示地层沉积时间,又代表无继承性年龄,即该部分锆石颗粒沉积时无辐射损伤和 He; 其他峰值年龄都被认为是继承性年龄,代表的是该部分锆石颗粒沉积时仍继承有早期的辐射损伤和 He。(3) 设定颗粒半径和误差范围,其中,将所有实测样品的颗粒半径平均值作为正演模拟的半径,误差范围为计算得到的标准误差;(4) 选取锆石 He 扩散动力学模型(本文采用锆石辐射损伤积累和退火模型)进行正演模拟,得到不同温度路径下的继承性包络线图;(5) 将实测单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄投到继承性包络线图中,其中可覆盖最多单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄的继承性包络线对应的温度路径认为是最佳热史路径。本文是利用 Guenthner(2021)开发的 DAAM 程序(<https://github.com/wrguenthner/DAAM>)开展正演热史模拟的。

需要指出的是,继承性年龄与无继承性年龄(样品开始沉积时间)之间的温度变化对正演模拟结果也会产生影响,但考虑到无法获取锆石样品沉积前的隆升-沉降史和本文热史研究的重点是恢复沉积后的温度史,因此采纳国际通用方法进行温度设定,即沉积前的温度统一设置为地表温度(~20 °C; Guenthner et al., 2015; Powell et al., 2016)。尽管

这种设置仍存在较多问题,但目前的研究手段仅能做到这一点。另外,在设置热史模拟开始时间时,本文仅参考了研究区或临近地区的同一层位锆石 U-Pb 年龄的峰值范围。尽管可能与实际仍存在差异,但考虑到本文的研究重点和文章篇幅有限性,未对样品开展特定的锆石 U-Pb 年龄测试与分析。

通过正演模拟获取到最佳热史路径后,再选取典型样品进行反演模拟。本文利用 HeFTy 热史软件开展反演模拟(Ketcham, 2005)。首先,设定温度路径开始(样品开始沉积时间)和结束时间(现今);然后,基于单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄、沉积-构造特征及正演路径设定其他约束条件。其中选择的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄为正演过程中无继承性温度路径可解释的锆石 He 年龄,这是由于继承性温度路径早期的热信息(即沉积前)被人为的简化,如果选取继承性锆石 He 年龄开展反演模拟,会进一步增大热史误差和降低可靠性;最后,利用蒙特卡罗法自由搜索 50000 条温度路径,寻找最佳路径。当热史反演结果也可解释正演模拟得到的最佳热史路径时,这条热史路径就被认为是样品曾经历过的最真实的古温度史。

3 典型克拉通盆地古老层系热史模拟

作为我国典型克拉通盆地,塔里木盆地、四川盆地和华北克拉通盆地的盆内或盆缘都残留有古老层系(图 3),为我们开展古老地层锆石(U-Th)/He 年龄分析和热史模拟提供了机会。

本次研究,在塔里木盆地巴楚隆起北部同 1 井 4660~4720 m 深度处采集了一块新元古界火山碎屑岩样品 T1-04,该样品的 12 个单颗粒锆石 He 年龄介于 117~549 Ma 之间(表 1,图 4),均小于地层

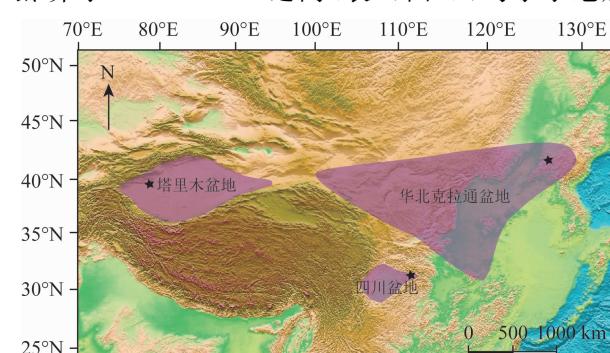


图 3 中国三大克拉通盆地位置图(五角星表示取样位置)
Fig. 3 Locations of the three major Craton basins in China
(The samples' locations are shown by the stars)

表1 塔里木盆地、华北克拉通和四川盆地样品实测锆石(U-Th)/He年龄结果

Table 1 Zircon (U-Th)/He ages of the samples from Tarim, North China Craton and Sichuan Basins

颗粒号	${}^4\text{He}$ (10^{-9} ml)	质量(mg)	F_T	U($\mu\text{g/g}$)	Th($\mu\text{g/g}$)	[eU]($\mu\text{g/g}$)	校正年龄+ 1σ (Ma)	$R_s(\mu\text{m})$
塔里木盆地同1井样品 T1-04(4660~4720 m 深度, 新元古界火山碎屑岩)								
z01 ^a	30.160	0.0079	0.81	234.7	120.9	263.1	117.9 ± 7.3	72.7
z02 ^a	21.286	0.0060	0.79	97.5	108.2	123.0	232.5 ± 14.4	67.4
z03 ^a	17.794	0.0101	0.78	19.0	25.7	25.1	549.0 ± 34.0	60.2
z04 ^a	20.502	0.0073	0.79	51.3	65.2	66.7	334.4 ± 20.7	61.3
z05 ^a	27.567	0.0046	0.75	167.0	149.5	202.1	237.3 ± 14.7	54.3
z06 ^b	100.473	0.0180	0.83	99.3	115.5	126.4	424.2 ± 22.9	74.2
z07 ^b	53.01	0.0163	0.83	67.1	70.2	83.6	377.0 ± 20.4	71.6
z08 ^b	77.868	0.0299	0.86	61.1	82.6	80.6	303.4 ± 16.3	89.4
z09 ^c	219.288	0.0459	0.89	62.8	79.8	81.6	524.2 ± 14.9	123.2
z10 ^c	145.281	0.0209	0.87	113.6	116.8	141.1	452.2 ± 13.1	102.1
z11 ^c	21.353	0.0057	0.79	94.4	89.3	115.4	333.9 ± 9.5	62.8
z12 ^c	23.853	0.0046	0.74	162.1	296.2	231.7	244.7 ± 6.5	49.1
华北克拉通北缘青白口系龙山组露头样品 LX1								
z01 ^d	26.1	0.0031	0.72	215.1	147.7	249.9	383.4 ± 20.2	39.8
z02 ^d	9.5	0.0026	0.70	64.0	63.8	79.0	524.7 ± 27.8	37.1
z03 ^d	9.9	0.0016	0.66	121.4	116.5	148.8	500.1 ± 26.4	31.9
z04 ^d	16.8	0.0024	0.70	98.3	90.9	119.6	658.7 ± 35.2	37.3
z05 ^d	23.6	0.0034	0.74	122.8	76.6	140.8	544.4 ± 28.9	42.2
z06 ^d	9.8	0.0015	0.66	93.5	83.7	113.1	683.5 ± 36.7	32.1
z07 ^d	18.5	0.0014	0.64	558.1	325.0	634.5	274.3 ± 14.5	29.6
z08 ^d	16.3	0.0017	0.67	255.4	177.5	297.1	393.3 ± 20.8	33.0
四川盆地东北角宜昌剖面莲沱组样品 YC-07								
z01 ^a	56.868	0.0076	0.80	599.4	238.1	655.4	92.8 ± 5.8	62.2
z02 ^a	20.602	0.0045	0.75	233.4	166.3	272.5	136.5 ± 8.5	52.3
z03 ^a	17.962	0.0058	0.78	109.6	119.2	137.6	183.4 ± 11.4	62.7
z04 ^a	20.515	0.0045	0.76	78.5	114.0	105.3	346.8 ± 21.5	53.4
z05 ^a	14.812	0.0046	0.74	60.1	76.0	78.0	328.1 ± 20.3	50.4
z06 ^a	12.993	0.0126	0.84	45.2	31.0	52.5	158.8 ± 9.8	82.8
z07 ^a	22.329	0.0054	0.77	298.2	136.7	330.3	102.1 ± 6.3	56.4
z08 ^a	16.938	0.0085	0.79	50.8	64.9	66.0	244.1 ± 15.1	62.3
Z09 ^a	26.401	0.0054	0.78	116.3	113.1	142.8	275.1 ± 17.1	59.6

注: F_T 为 α 辐射校正参数(Farley et al., 1996); R_s 为颗粒等效球面半径(Meesters and Dunai, 2002); a、b、c、d 分别代表该样品锆石(U-Th)/He 年龄测试在澳大利亚墨尔本大学、美国佛罗里达大学、美国亚利桑那大学、中国科学院地质与地球物理研究所等单位完成。

年龄(707 ± 8 Ma; 杨鑫等, 2017), 表明该样品沉积后曾经历过 He 扩散, 适于热史模拟研究; 在华北克拉通盆地北缘凌源地区青白口系龙山组采集了一块露头样品 LX1, 该样品的 8 个单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄介于 $274 \sim 684$ Ma 之间(表 1, 图 5), 均小于地层年龄, 且与 eU 呈负相关性; 在四川盆地

东北角宜昌剖面莲沱组下部采集了一块露头样品 YC-07, 该样品的 9 个单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄介于 $92.8 \sim 346.8$ Ma 之间(表 1, 图 6), 具有较强的分散性, 均小于地层年龄, 表明它们沉积后经历过 He 扩散, 记录了沉积区热信息。三个样品所有锆石颗粒的 eU 介于 $25.1 \sim 655.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间, 处于低

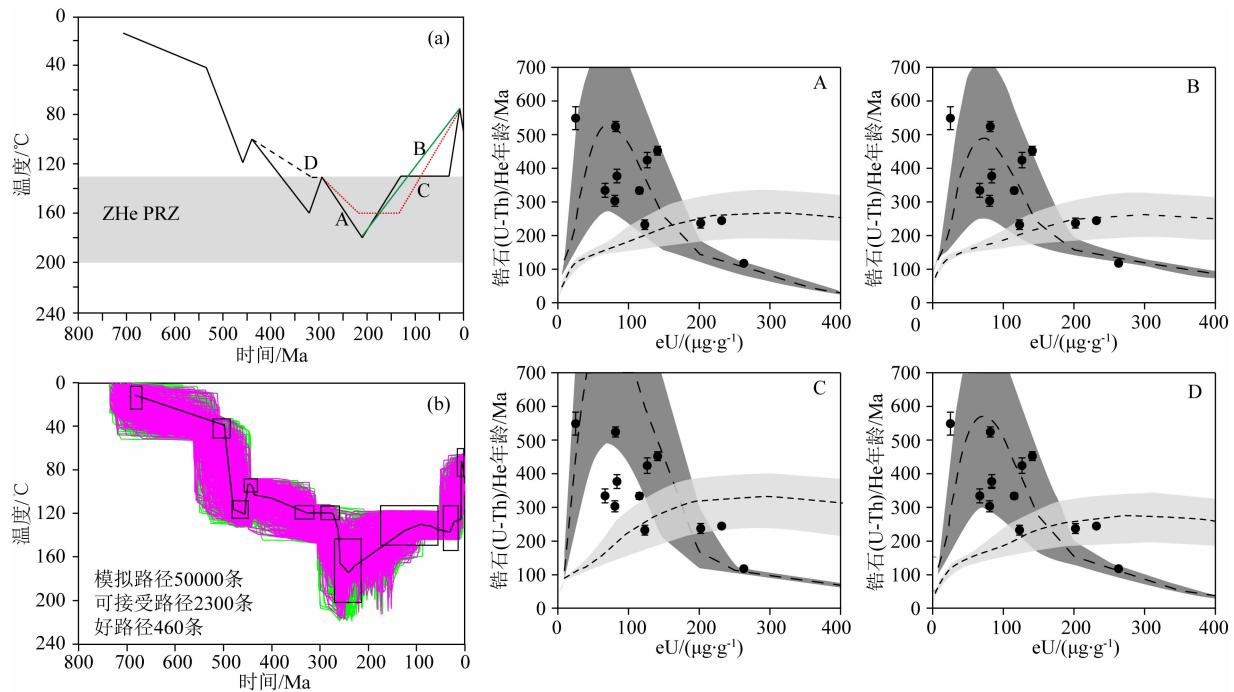


图 4 (a) 塔里木盆地巴楚隆起 T1-04 样品的正演温度路径. 右侧为 A、B、C、D 等 4 条时间-温度路径生成的继承性包络线. 其中, 深色区域对应的是 2000 Ma(继承性)产生的包络线, 浅色区域对应的是 710 Ma(无继承性)产生的包络线, 虚线是由平均半径为 74 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式, 深色区域和浅色区域边缘分别对应的是半径为 95 μm 和 53 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式. (b) 样品 T1-04 热史反演结果. 黑线框表示约束条件, 黑色粗线代表最佳热史路径(拟合度为 95%), 紫线表示好路径(拟合度 > 50%), 绿线表示可接受路径(拟合度介于 5%~50%). ZHePRZ 表示锆石 He 部分保留区($130\sim200\text{ }^{\circ}\text{C}$, Wolfe and Stockli, 2010)

Fig. 4 Forward (a) and inverse (b) temperature paths of the sample T1-04 in Bachu Uplift, Tarim Basin. The forward modeling provided four specific t - T paths A, B, C and D, generating the right corresponding inheritance envelopes. All the envelopes (Dark gray = 2000 Ma for inheritance, light gray = 710 Ma for non-inheritance) correspond to date-eU trends for zircon between 95 μm and 53 μm for the radius. The dashed line in each inheritance envelope represents the date-eU trend for the zircons with the mean radius of 74 μm . For the inverse model (b), black boxes indicate t - T constraints and the solid black line represents the best fitting thermal path (The goodness of fit (GOF) is 95%). Good paths are represented by the magenta lines ($\text{GOF} > 50\%$), whereas acceptable paths are represented by green lines ($5\% < \text{GOF} < 50\%$). ZHePRZ represents the zircon helium partial retention zone with a

temperature range of $130\sim200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Wolfe and Stockli, 2010)

辐射损伤状态. 对于古老克拉通盆地的低辐射损伤颗粒, 锆石辐射损伤积累与扩散模型和扇形-线性模型模拟的单颗粒锆石 He 年龄与 eU 演化模式极为相似(见后面讨论中图 7f, 7g 和 7h). 同时, 考虑到前人关于锆石(U-Th)/He 年龄的热史研究普遍采用锆石辐射损伤与积累模型, 因此, 本文也借助应用更广泛的锆石辐射损伤积累和退火模型开展热史模拟.

3.1 塔里木盆地

塔里木盆地巴楚隆起同 1 井区分布有新元古界、寒武系、下奥陶统、中-下志留统、上新统、第四系等地层, 表明该地区曾经历过多期构造运动. 结合不整合面发育状况和构造演化史成果, 我们总共设置

了 4 条温度路径开展正演模拟评估实测单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与继承性包络线的关系(图 4a). 根据火山碎屑岩的锆石 U-Pb 年龄峰值分布特征及沉积年龄分析结果(杨鑫等, 2017), 将正演模拟开始时间设置为 2000 Ma(继承性)和 710 Ma(无继承性). 其中路径 A 和 D 路径在 $\sim 210\text{ Ma}$ 经受的最大温度为 $\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$, 产生的继承性包络线与实测锆石 He 年龄具有很好的拟合性(除了一个最老的锆石 He 年龄), 这表明除了最大温度, 其他时间点温度的微小变化对继承性包络线无太大影响. 郑晓丽(2016)根据地震资料认为, 巴楚隆起西北部在晚石炭世经历了构造隆升剥蚀过程, 造成上石炭统缺失. 因此, 相对于路径 D, 路径 A 与巴楚隆起实际构造-

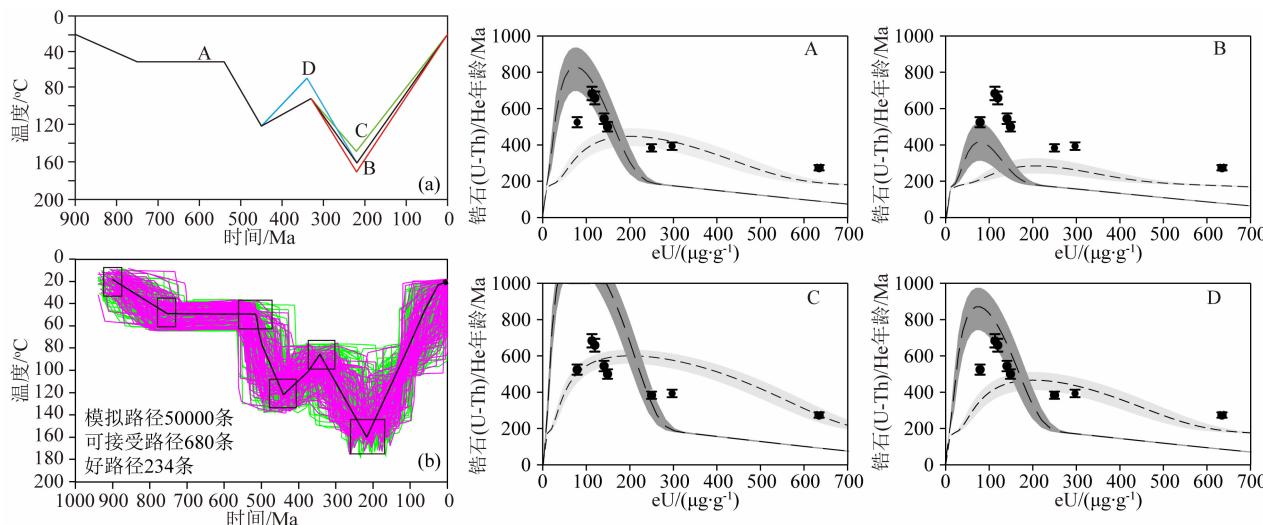


图 5 (a) 华北克拉通北缘露头样品 LX1 的正演温度路径. 右侧为 A、B、C、D 等 4 条时间-温度路径生成的继承性包络线. 其中, 深色区域对应的是 1800 Ma(继承性)产生的包络线, 浅色区域对应的是 900 Ma(无继承性)产生的包络线, 虚线是由平均半径为 $35\text{ }\mu\text{m}$ 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式, 深色区域和浅色区域边缘分别对应的是半径为 $30\text{ }\mu\text{m}$ 和 $40\text{ }\mu\text{m}$ 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式. (b) 样品 LX1 热史反演结果. 黑线框表示约束条件, 黑色粗线代表最佳热史路径(拟合度为 92%), 紫线表示好路径(拟合度>50%), 绿线表示可接受的路径(拟合度介于 5%~50%)

Fig. 5 Forward (a) and inverse (b) temperature paths of the sample LX1 in northern margin of the North China Craton. The forward modeling provided four specific t - T paths A, B, C and D, generating the right inheritance envelopes A, B, C and D, respectively. All the envelopes (Dark gray=1800 Ma for inheritance, light gray=900 Ma for non-inheritance) correspond to date-eU trends for zircon between $30\text{ }\mu\text{m}$ and $40\text{ }\mu\text{m}$ for the radius. The dashed line in each inheritance envelope represents the date-eU trend for the zircons with the mean radius of $35\text{ }\mu\text{m}$. For the inverse model (b), black boxes indicate t - T constraints and the solid black line represents the best fitting thermal path (GOF is 92%). Good paths are represented by the magenta lines ($\text{GOF}>50\%$), whereas acceptable paths are represented by green lines ($5\%<\text{GOF}<50\%$)

热演化过程更相近. 同时热史反演结果也与路径 A 相似, 这表明路径 A 是样品 T-04 曾经历过的古温度史. 路径 B 与路径 A 不同之处在于, 路径 B 在 $210\sim40\text{ Ma}$ 时期经历了一期快速冷却事件, 而这与区域构造演化不符. 早期研究认为中亚大部分地区(包括柯坪隆起)在晚侏罗世-古近纪时期处于构造平静期, 形成了大量古夷平面(Jolivet, 2017; Morin et al., 2019; Chang et al., 2019). 由于巴楚隆起与柯坪隆起在新生代之前为一个整体, 巴楚隆起北部此时也应处于构造平静期. 所以路径 B 与实际地质情况不符. 对于温度路径 C($210\sim130\text{ Ma}$ 期间温度为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$), 有 4 个锆石 He 年龄未落入继承性包络线内, 因此该温度路径与实际不符.

3.2 华北克拉通盆地

根据华北克拉通盆地北缘地层分布特征、不整合面及构造演化史(张允平等, 2010; Zhang et al., 2011; 曲永强等, 2012; Zhai et al., 2015; Li et al., 2018), 设置了 4 条时间-温度正演路径(图 5a), 其中包括晚奥陶世和晚三叠世两期快速冷却事件. 根据碎屑锆石 U-Pb 年龄(可联系作者获取)和样品沉积时

间分析, 正演模拟开始时间设置为 1800 Ma(继承性)和 900 Ma(无继承性). 当样品在晚三叠世埋藏温度为 $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时(路径 A), 除两个颗粒外, 其余颗粒锆石(U-Th)/He 年龄均落入继承性包络线内, 而将晚三叠世埋藏温度调整为 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ (路径 C)和 $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ (路径 B)时, 会造成更多颗粒锆石(U-Th)/He 年龄落在继承性包络线之外. 另外热史反演模拟结果与路径 A 也具有相似性(图 6b). 因此, 综合正演和反演结果认为路径 A 是样品 LX1 曾经历过的古温度史. 路径 D 与路径 A 不同之处在于假设样品在晚奥陶世-早石炭世遭受了更多的剥蚀量, 温度降低更多, 但正演模拟结果与路径 A 相同. 这表明, 除最大温度外, 其余时间点的地层温度微调对正演模拟结果无太大影响.

3.3 四川盆地

根据四川盆地东北缘区域性地层分布特征、不整合面及构造演化成果, 设置了 4 条时间-温度正演路径评估实测锆石(U-Th)/He 年龄与继承性包络线的关系(图 6a). 根据碎屑锆石 U-Pb 年龄和地层沉积时间(景先庆等, 2018; Qi et al., 2020), 将正

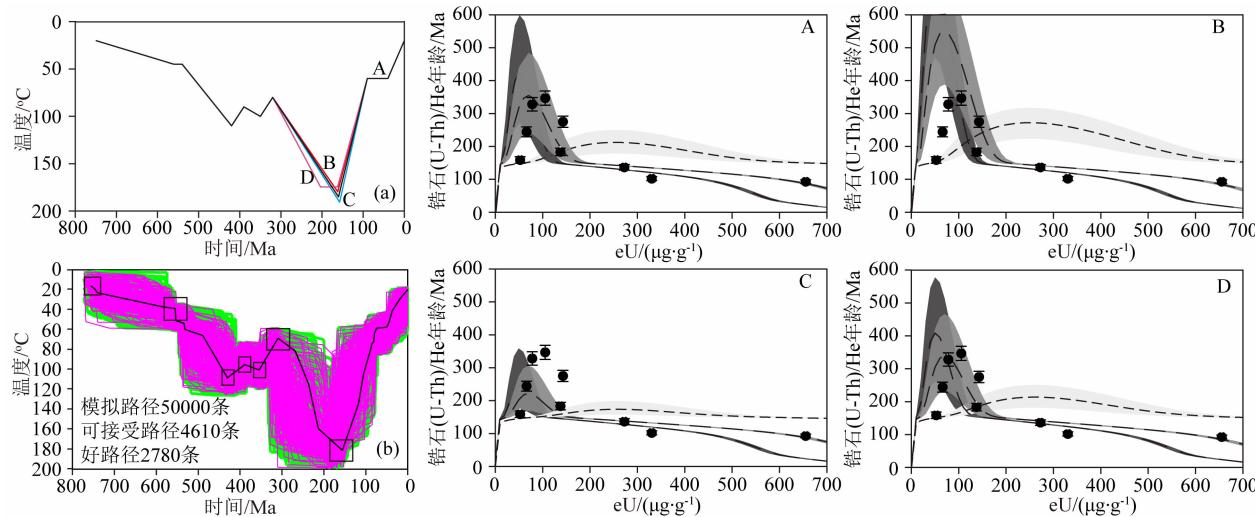


图 6 (a) 四川盆地东北角露头样品 YC-07 的正演温度路径. 右侧为 A、B、C、D 等 4 条时间-温度路径生成的继承性包络线. 其中, 深灰色、中灰色及浅灰色区域分别对应 2500 Ma(继承性)、2000 Ma(继承性)及 750 Ma(无继承性)的包络线, 区域边缘分别对应的是半径为 50 μm 和 70 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式, 虚线是由平均半径为 60 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式. (b) 样品 YC-07 热史反演结果. 黑线框表示约束条件, 黑色粗线代表最佳热史路径(拟合度为 98%), 紫线表示好路径(拟合度 > 50%), 绿线表示可接受的路径(拟合度介于 5%~50%)

Fig. 6 Forward (a) and inverse (b) temperature paths of the sample YC-07 in the northeast corner of the Sichuan Basin. The forward modeling provided four specific t - T paths A, B, C and D, generating the right inheritance envelopes A, B, C and D, respectively. All the envelopes (Dark gray=2500 Ma for inheritance, middle gray=2000 Ma for inheritance, light gray=750 Ma for non-inheritance) correspond to date-eU trends for zircon between 50 μm and 70 μm for the radius. The dashed line in each inheritance envelope represents the date-eU trend for the zircons with the mean radius of 60 μm . For the inverse model (b), black boxes indicate t - T constraints and the solid black line represents the best fitting thermal path (GOF is 98%). Good paths are represented by the magenta lines ($\text{GOF} > 50\%$), whereas acceptable paths are represented by green lines ($5\% < \text{GOF} < 50\%$)

演热史模拟开始时间设置为 2500 Ma(继承性)、2000 Ma(继承性)及 750 Ma(无继承性)三个年龄. 由于前人对研究区前中生代的构造演化认识较统一, 本次研究将中生代之前的温度演化路径设置为相同. 同时样品 YC-07 在早期埋藏浅, 受热温度低, 早期热历史不会对锆石(U-Th)/He 年龄产生影响. 基于已发表锆石(U-Th)/He、磷灰石裂变径迹、磷灰石(U-Th)/He 等低温热年代学年龄和反演热史结果(Hu et al., 2006; Richardson et al., 2010; Xu et al., 2010; Ji et al., 2014), 笔者设置了 A、B、C 等 3 条时间-温度路径, 包含有 160~90 Ma 和 40 Ma 以来两期快速冷却过程. 另外, 沈传波等(2009)认为研究区曾经历过 200~160 Ma 缓慢隆升和 160~90 Ma 快速隆升的演化过程, 因此还设置了温度路径 D. 当样品在 160 Ma 时期经历的最高温度为 185 °C(路径 A)时, 绝大部分锆石(U-Th)/He 年龄(1 个除外)都落入继承性包络线内, 而将 160 Ma 时的最高温度设置为 180 °C(路径 B)和 190 °C(路径 C)时, 落入继承性包络线的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄

减少很多. 当样品在 200~160 Ma 时期长期处于 170 °C 的相对低温(路径 D)时, 产生的继承性包络线趋势与路径 A 相同. 可以看出, 长时期的低温受热对锆石辐射损伤的影响与短期的高温受热可产生同样的效果. 勘探表明四川盆地东北缘古老层系分布有丰富的页岩气藏(罗胜元等, 2020). 根据油气相态与埋藏温度的关系, 认为 185 °C 高温更利于古老层系生气, 所以路径 A 被认为是样品 YC-07 曾经历过的古温度史, 其与热史反演结果也相符(图 7b).

塔里木、华北克拉通、四川等三大盆地早期尽管经历过多期隆升剥蚀过程, 但总体呈沉降状态, 其样品曾经历过的最高温度都是由上覆地层增厚造成的. 但受后期构造演化差异的影响, 三大盆地古老层系经历的最高温度时间存在差异性. 晚三叠世, 受羌塘地体与欧亚板块南缘碰撞作用影响, 昆仑山向塔里木盆地西南部俯冲, 不仅造成塔西南地区发育前陆盆地, 而且使得巴楚隆起(样品 T1-04 所处位置)演变为前陆盆地的前隆部位(Sobel, 1999; Chang et al., 2019), 进入隆升剥蚀状态, 样品 T1-04 最高

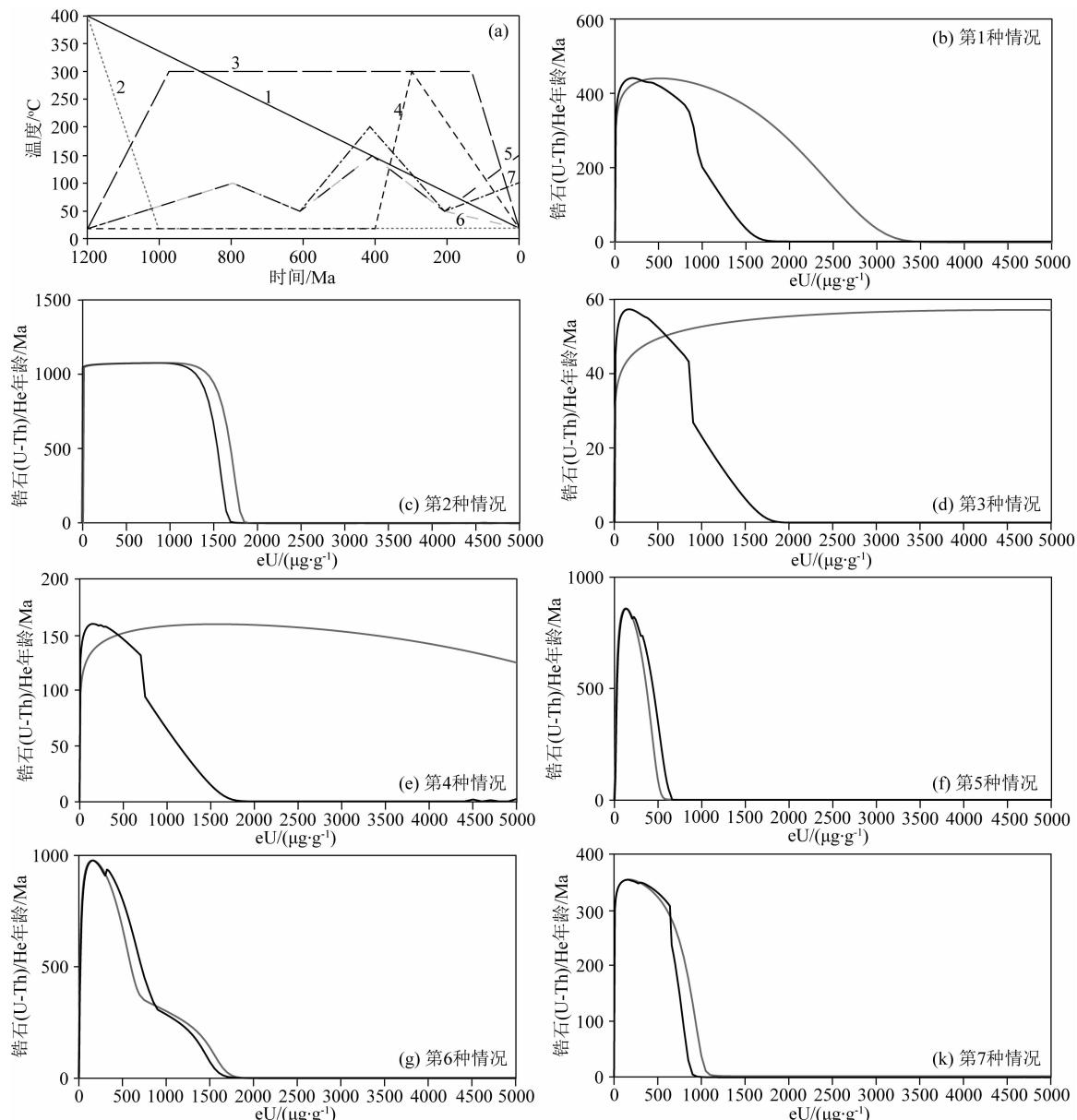


图 7 (a) 7 种代表性时间-温度演化路径; (b—k) 基于不同时间-温度路径和扩散动力学模型得到的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 演化模式. 灰线表示 Guenthner 等 (2013) 锆石辐射损伤积累和退火模型, 黑线表示 Ginster 等 (2019) 扇形-线性模型

Fig. 7 (a) Seven representative time-temperature paths; (b—k) Evolution correlation of the eU with the single-grain zircon (U-Th)/He ages according to the different t - T paths and He diffusion dynamics model. Gray lines are created by the zircon radiation-damage accumulation and annealing model of Guenthner et al. (2013), dark lines are created by the fanning linear model of Ginster et al. (2019)

温度随着上覆沉积物减薄而逐渐降低(图 4). 四川盆地北缘样品的地层温度降低是由晚侏罗世(~ 160 Ma)秦岭造山带向南递进变形造成的(图 6; Yang et al., 2013). 受蒙古—鄂霍次克洋洋壳向南俯冲作用影响(Zhang et al., 2012), 华北克拉通盆地北缘自晚三叠世以来整体处于隆升剥蚀状态, 造成样品温度逐渐降低(图 5). 华北克拉通破坏作用曾造成华北克拉通东部(渤海湾盆地)经历过两期高热流(84~88

$\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)阶段(Qiu et al., 2014; Chang et al., 2018), 且现今热流仍很高($\sim 64.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; Qiu et al., 2015). 然而, 华北克拉通北缘现今热流仅为 $\sim 50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (Jiang et al., 2019), 明显低于渤海湾盆地, 这说明华北克拉通破坏对其北缘热效应影响有限. 因此, 即使华北克拉通北缘在中-新生代受克拉通破坏作用影响古热流有所增大, 但在隆升剥蚀综合影响下, 样品温度仍处于逐渐降低状态(图 5).

4 讨论

4.1 基于不同热史的锆石 He 扩散动力学模型对比

如前文所述,根据锆石 He 扩散动力学模型和温度-时间路径,可以预测单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与辐射损伤(eU)的演化关系。简单模型由于未考虑辐射损伤,其预测的锆石(U-Th)/He 年龄通常为一个常数(即受热温度小于封闭温度 183 °C 的时间点),而锆石辐射损伤积累和退火模型与扇形-线性模型则表现出明显的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄分散性特征(图 3)。通过选取不同热史路径开展正演模拟,进一步阐明了锆石辐射损伤和退火模型与扇形-线性模型预测的锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 演化关系的差异性(图 7)。对于基岩样品(即原位岩体,路径 1 和 2),两种模型预测的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄在低 eU 区演化模式差别不大,而在高 eU 区演化差异性逐渐增大。这种差异性还与冷却速率和时间有关。冷却速率越快且冷却时间越早,两种模型预测的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄在 eU 区演化差异性越小(路径 2),而冷却速率越慢且冷却时间越晚,差异性越大(路径 1)。对于高温(200~300 °C)沉积样品(路径 3 和 4),扇形-线性模型预测的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄在低 eU 区($\sim 150 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)表现为逐渐增大,而在高辐射损伤区($> 150 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)表现为快速减小(图 7d 和 7e);而锆石辐射损伤积累和退火模型预测的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 在低辐射损伤区($< \sim 1500 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)呈非线性正相关性,而在高辐射损伤区会随着快速冷却时间的变化(由晚变早)由非线性正相关性向负相关性转变(路径 3 和 4)。对于低温($< 200 ^\circ\text{C}$)沉积岩样品,本文设置了时间-温度路径 5、6 和 7(这三条路径考虑了古老克拉通盆地普遍经历过多次构造沉降-隆升过程;图 7a)。路径 5 与路径 6 不同之处在于路径 5 样品现今为钻孔样品,而路径 6 样品现在为地表样品。在这三种热史路径下,两种模型预测的锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 演化模式具有相似性。现今埋藏温度对单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄演化具有一定的影响(图 7f 和 7g)。现今样品温度越低,辐射损伤(eU)对单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄影响范围越大。而路径 7 代表的是早期经历过 200 °C 高温且现今埋藏温度小于路径 5 的钻孔样品,相对于路径 5,单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄明显减小,但分布区间($0 \sim 90 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$)变宽。另外,锆

石颗粒半径也会对单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 的演化模式产生影响,但总体表现为相同的辐射损伤强度,颗粒半径越大,锆石(U-Th)/He 年龄越大,两者呈正相关性。这一演化趋势从图 4、图 5 和图 6 中可观察到,这里不再赘述。

热史模拟结果表明我国三大克拉通盆地古老层系的样品都曾经历过 160~185 °C 的高温,同时锆石颗粒的辐射损伤强度普遍偏低,因此利用辐射损伤积累和退火模型与扇形-线性模型模拟的锆石(U-Th)/He 年龄和 eU 演化模式除局部存在略微差异外,总体表现为一致性(图 8)。另外,美国科罗拉多山脉古老层系是世界上为数不多经历过长期低温($< 50 ^\circ\text{C}$)演化的地层,这一过程被高辐射损伤锆石(U-Th)/He 年龄(该年龄比同层位磷灰石(U-Th)/He 年龄还小)有效地记录下来(Johnson et al., 2017)。Guenthner(2021)利用锆石辐射损伤和退火模型与扇形-线性模型分别模拟了科罗拉多山脉古老层系锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 演化关系,并与实测数据对比发现,在低 eU 区,扇形-线性模型可更好地拟合实测值,而在高 eU 区,锆石辐射损伤和退火模型可更好地拟合实测值。无论哪一种模型,在实际运用中都会与实测值存在一定的差异,这是由 He 扩散动力学模型造成的,还是由样品自身或者温度路径的不真实性造成的?都有待于进一步研究。尽管仍存在着诸多科学问题,但锆石 He 扩散动力学模型的逐渐完善和进步,极大地推动了锆石(U-Th)/He 热定年技术的应用发展,尤其是针对古老层系的热历史重建。

4.2 锆石(U-Th)/He 年龄的正、反演热史模拟有效性

因为同一样品的不同锆石颗粒往往具有不同的辐射损伤强度,所以这些颗粒的 He 封闭温度不同。因此,不同锆石颗粒的(U-Th)/He 年龄通常记录的是不同地质时期的热状况。如果利用这些颗粒的锆石(U-Th)/He 开展联合热史模拟,就可以有效地揭示整个地质时期的热信息(Guenthner, 2021)。本文在利用锆石(U-Th)/He 年龄进行正演热史模拟时,除考虑研究区残余地层厚度、不整合面发育状况、构造演化史等沉积构造特征外,还参考了前人基于磷灰石裂变径迹、磷灰石(U-Th)/He 等低温热年代参数模拟的热史结果。因此,本文在热史模拟过程中尽管仅体现了单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄的约束性,但仍离不开多种年代学耦合模拟才能得到有效热历史的基本思想。为了进一步阐明基于锆石(U-Th)/

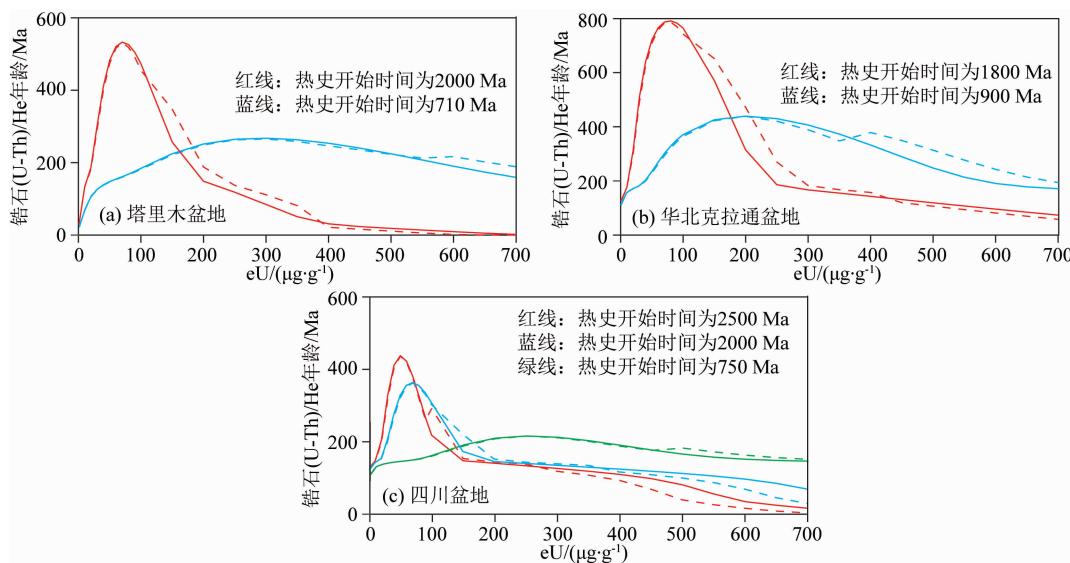


图 8 不同锆石 He 扩散动力学模型预测的三大盆地锆石(U-Th)/He 年龄与 eU 演化模式. 实线为锆石辐射损伤积累和扩散模型模拟结果, 虚线为扇形-线性模型模拟结果. 塔里木、华北克拉通、四川盆地的时间-温度路径均采用 A 模式时间-温度路径(即最佳温度路径, 见图 4、图 5 和图 6), 颗粒半径设置为 $60 \mu\text{m}$

Fig. 8 Evolution correlation of the eU with the single-grain zircon (U-Th)/He ages for the Tarim, North China Craton and Sichuan Basins in China according to the zircon radiation-damage accumulation and annealing model (solid lines) and the fanning linear model (dashed lines). The t - T paths for these three basins refer to the A pattern (the best temperature paths by shown in Figs. 4, 5 and 6), the grain radius is $60 \mu\text{m}$

He 年龄正演热史模拟的精度, 我们利用塔里木盆地样品 T1-04 又开展了基于不同最高温度和晚期沉积间断期温度变化的热史模拟(图 9). 当样品 T1-04 在 210 Ma 经历的最高温度分别为 175 °C 和 185 °C 时, 落在继承性包络线外的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄明显增多. 同时, 四川盆地和华北克拉通盆地样品的模拟结果也具有同样的特点, 因此, 我们认为正演热史模拟的温度具有较高的准确度. 在约束最高温度时, 如果参考镜质体反射率温标进行验证, 应当会进一步提升精度. 对于晚期沉积间断期温度变化, 10~20 °C 的温度误差会对正演模拟结果产生很大的影响, 这也从一定程度上表明了正演热史模拟的科学性和正确性.

对于塔里木盆地样品 T1-04, 温度路径 A 和 D 产生的继承性包络线相似, 这可能是因为实测锆石(U-Th)/He 年龄无法有效地约束最高温度之前的温度史; 而对于四川盆地样品 YC-07 的温度路径 A 和 D 产生的继承性包络线相同, 这是因为短期高温和长期低温可造成相同的辐射损伤造成的. 因此, 在热史模拟过程中, 除精确测定锆石(U-Th)/He 年龄外, 还应认真参考区域性地层、沉积、构造等基础地质资料. 对经历过多期构造活动的古老克拉通盆地, 尽管低温热年代学年龄通常并不能全面地记录

每期事件, 但模拟过程中充分考虑所有的地质事件, 才能得到信服的热史模拟结果.

5 结论及建议

锆石(U-Th)/He 热定年技术主要包括简单模型、锆石辐射损伤积累和退火模型及扇形-线性模型等三种 He 扩散动力学模型. 对于高温(> 200 °C)热史路径, 与锆石辐射损伤积累和退火模型相比, 扇形-线性模型在高辐射损伤区会产生更年轻的锆石 He 年龄. 这是由于高温可使裂变损伤全部消失, 而其他损伤行为仍存在(利于 He 扩散)造成的. 我国塔里木、四川、华北等三大克拉通盆地古老层系典型样品的单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄都小于地层年龄, eU 含量偏低, 表现为低辐射损伤特征. 通过正、反演联合热史模拟揭示了三大克拉通盆地古老层系曾经历过 160~185 °C 的高温, 从而有效地约束了缺乏有效古温标古老层系经历的古温度史, 为古老烃源岩成熟演化研究提供了重要的理论依据.

对于古老碎屑岩, 由于物源复杂, 往往造成其锆石(U-Th)/He 年龄分布复杂. 尽管本文在尝试利用锆石(U-Th)/He 技术研究三大克拉通盆地热历史中采用了多个物源区年龄, 但是, 每个物源区年龄产

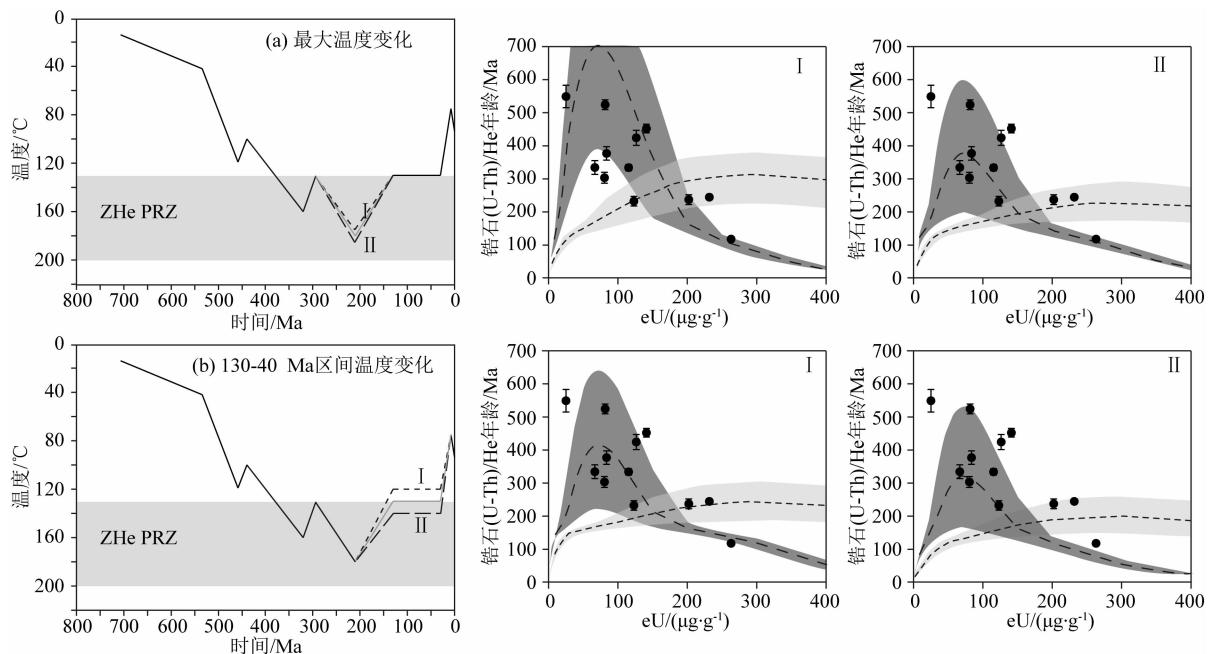


图 9 塔里木盆地 T-04 样品的时间-温度路径(左侧)及对应的继承性包络线(右侧)演化模式。(a)和(b)图中的黑线为图 4a 中的时间-温度路径 A。(a)图中长虚线和短虚线分别对应于 210 Ma 时期的最大温度为 185 °C 和 175 °C,(b)图中长虚线和短虚线表示 130~40 Ma 时期的温度分别为 140 °C 和 120 °C。右侧 I 和 II 框内,深色区域对应的是 2000 Ma(继承性)产生的包络线,浅色区域对应的是 710 Ma(无继承性)产生的包络线,虚线是由平均半径为 74 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式,深色区域和浅色区域边缘分别对应的是半径为 95 μm 和 53 μm 的锆石颗粒产生的年龄-eU 演化模式。ZHePRZ 表示锆石 He 部分保留区(130~200 °C, Wolfe and Stockli, 2010)

Fig. 9 t - T paths (left) and corresponding inheritance envelopes (right) for the sample T-04 in Tarim Basin. In (a) and (b), the solid black t - T paths correspond to the pattern A in Fig. 4a. The long and short dashed t - T curves (I, II) in (a) correspond the maximum temperatures of 185 °C and 175 °C in 210 Ma, respectively. The long and short dashed t - T curves (I, II) in (b) correspond the temperatures of 140 °C and 120 °C during 130~40 Ma, respectively. To the right boxes (I, II), the date-eU inheritance envelopes are shown with the dark (2000 Ma for inheritance) and light (710 Ma for non-inheritance) gray areas, in which the dashed black lines corresponding to the mean radius of 74 μm were plotted. The lower and upper bonds of the date-eU inheritance envelopes were generated by the grain radii of 53 μm and 95 μm , respectively. ZHePRZ represents the zircon helium partial retention zone with a temperature range of 130~200 °C (Wolfe and Stockli, 2010)

生的继承性包络线是否与该物源区的实测锆石(U-Th)/He 年龄一一对应仍存在疑问?为了解决这个问题,同时为了更大限度地挖掘不同碎屑锆石蕴含的地质热信息,笔者建议未来开展古老碎屑岩锆石(U-Th)/He 热定年研究时,首先基于碎屑锆石形态、颜色及大小挑选不同类型的颗粒,然后通过激光拉曼光谱定量分析明确各个颗粒的辐射损伤强度,接着再采用高精度原位(U-Th)/He 方法对所选颗粒进行锆石 U-Pb 和(U-Th)/He 两种年龄测试与分析,从而更好地建立继承性包络线与单颗粒锆石(U-Th)/He 年龄之间的对应关系,最后就容易识别出哪些颗粒适合模拟,从而更好地开展热史模拟。

致谢 感谢澳大利亚墨尔本大学 Barry K. Kohn 教授、美国亚利桑那大学 Peter W. Reiners 教授和佛

罗里达大学 Kyle Min 副研究员及中国科学院地质与地球物理研究所吴林博士在锆石(U-Th)/He 年龄测试中给予的帮助;感谢审稿专家提出的宝贵意见。

References

- Baughman J S, Flowers R M. 2020. Mesoproterozoic burial of the Kaapvaal craton, southern Africa during Rodinia supercontinent assembly from (U-Th)/He thermochronology. *Earth and Planetary Science Letters*, 531: 115930, doi: 10.1016/j.epsl.2019.115930.
- Chang J, Brown R W, Yuan W M, et al. 2014. Mesozoic cooling history of the “Bachu Uplift” in the Tarim Basin, China: Constraints from zircon fission-track thermochronology. *Radiation Measurements*, 67: 5-14.

- Chang J, Qiu N S, Zhao X Z, et al. 2018. Mesozoic and Cenozoic tectono-thermal reconstruction of the western Bohai Bay Basin (East China) with implications for hydrocarbon generation and migration. *Journal of Asian Earth Sciences*, 160: 380-395.
- Chang J, Li D, Min K, et al. 2019. Cenozoic deformation of the Kalpin fold-and-thrust belt, southern Chinese Tian Shan: New insights from low-T thermochronology and sandbox modeling. *Tectonophysics*, 766: 416-432.
- DeLucia M S, Guenthner W R, Marshak S, et al. 2018. Thermochronology links denudation of the Great Unconformity surface to the supercontinent cycle and snowball Earth. *Geology*, 46(2): 167-170.
- Dodson M H. 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 40(3): 259-274.
- Farley K A, Wolf R A, Silver L T. 1996. The effects of long alpha-stopping distances on (U-Th)/He ages. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60(21): 4223-4229.
- Fellin M G, Vance J A, Garver J I, et al. 2006. The thermal evolution of Corsica as recorded by zircon fission-tracks. *Tectonophysics*, 421(3-4): 299-317.
- 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.
- Ginster U, Reiners P W, Nasdala L, et al. 2019. Annealing kinetics of radiation damage in zircon. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 249: 225-246.
- Guedes S, Moreira P A F P, Devanathan R, et al. 2013. Improved zircon fission-track annealing model based on reevaluation of annealing data. *Physics & Chemistry of Minerals*, 40(2): 93-106.
- Guenther W R, Reiners P W, Ketcham 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.
- Guenther W R, Reiners P W, DeCelles P G, et al. 2015. Sevier belt exhumation in central Utah constrained from complex zircon (U-Th)/He data sets: Radiation damage and He inheritance effects on partially reset detrital zircons. *GSA Bulletin*, 127(3-4): 323-348.
- Guenther W R. 2021. Implementation of an alpha damage annealing model for zircon (U-Th)/He thermochronology with comparison to a zircon fission track annealing model. *Geochimistry, Geophysics, Geosystems*, 22(2): e2019GC008757, doi: 10.1029/2019GC008757.
- Hu S B, Raza A, Min K, et al. 2006. Late Mesozoic and Cenozoic thermotectonic evolution along a transect from the North China craton through the Qinling orogen into the Yangtze craton, central China. *Tectonics*, 25(6): TC6009, doi: 10.1029/2006TC001985.
- Ji W B, Lin W, Faure M, et al. 2014. Origin and tectonic significance of the Huangling massif within the Yangtze craton, South China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 86: 59-75.
- Jiang G Z, Hu S B, Shi Y Z, et al. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications. *Tectonophysics*, 753: 36-48.
- Jiao F Z. 2018. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 39(2): 207-216.
- Jing X Q, Yang Z Y, Tong Y B, et al. 2018. A SHRIMP U-Pb zircon geochronology of a tuff bed from the bottom of Liantuo Formation in the Three Gorges Area and its geological implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 48(1): 165-180.
- Johnson J E, Flowers R M, Baird G B, et al. 2017. "Inverted" zircon and apatite (U-Th)/He dates from the Front Range, Colorado: High-damage zircon as a low-temperature (<50 °C) thermochronometer. *Earth and Planetary Science Letters*, 466: 80-90.
- Jolivet M. 2017. Mesozoic tectonic and topographic evolution of Central Asia and Tibet: a preliminary synthesis. *Geological Society, London, Special Publications*, 427(1): 19-55.
- Ketcham R A. 2005. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 275-314.
- Li S Z, Zhao S J, Liu X, et al. 2018. Closure of the Proto-Tethys Ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in East Asia. *Earth-Science Reviews*, 186: 37-75.
- Luo S Y, Chen X H, Yue Y, et al. 2020. Analysis of sedimentary-tectonic evolution characteristics and shale gas enrichment in Yichang area, Middle Yangtze. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 31(8): 1052-1068.
- Meesters A G C A, Dunai T J. 2002. 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. *Chemical Geology*, 186(3-4): 347-363.
- Morin J, Jolivet M, Barrier L, et al. 2019. Planation surfaces of the Tian Shan Range (Central Asia): Insight on several 100 million years of topographic evolution. *Journal of Asian Earth Sciences*, 177: 52-65.
- Nasdala L, Reiners P W, Garver J I, et al. 2004. Incomplete retention of radiation damage in zircon from Sri Lanka. *American Mineralogist*, 89(1): 219-231.
- Powell J, Schneider D, Stockli D, et al. 2016. Zircon (U-Th)/He thermochronology of Neoproterozoic strata from the Mackenzie Mountains, Canada: Implications for the Phanerozoic exhumation and deformation history of the northern Canadian Cordillera. *Tectonics*, 35(3): 663-689.
- Qi L, Cawood P A, Xu Y J, et al. 2020. Linking South China to North India from the late Tonian to Ediacaran: constraints from the Cathaysia Block. *Precambrian Research*, 350: 105898, doi: 10.1016/j.precamres.2020.105898.
- Qiu N S, Zuo Y H, Chang J, et al. 2014. Geothermal evidence of Meso-Cenozoic lithosphere thinning in the Jiyang sub-basin, Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. *Gondwana Research*, 26(3-4): 1079-1092.

- Qiu N S, Xu W, Zuo Y H, et al. 2015. Meso-Cenozoic thermal regime in the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton. *International Geology Review*, 57(3): 271-289.
- Qu Y Q, Pan J G, Liang L D, et al. 2012. The attributes of the Mesoproterozoic unconformities in the Yanliao rift trough. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology* (in Chinese), 32(2): 11-22.
- 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.
- 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.
- Reiners P W. 2005. Zircon (U-Th)/He thermochronometry. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 58(1): 151-179.
- Richardson N J, Densmore A L, Seward D, et al. 2010. Did incision of the Three Gorges begin in the Eocene? *Geology*, 38(6): 551-554.
- Shen C B, Mei L F, Liu Z Q, et al. 2009. Apatite and zircon fission track data, evidences for the Mesozoic-Cenozoic uplift of Huangling Dome, Central China. *Journal of Mineralogy and Petrology* (in Chinese), 29(2): 54-60.
- Sobel E R. 1999. Basin analysis of the Jurassic-Lower Cretaceous southwest Tarim basin, northwest China. *GSA Bulletin*, 111(5): 709-724.
- Wang Z M, Xie H W, Chen Y Q, et al. 2014. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 19(2): 1-13.
- 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.
- Xu C H, Zhou Z Y, Chang Y, et al. 2010. Genesis of Daba arcuate structural belt related to adjacent basement upheavals: constraints from Fission-track and (U-Th)/He thermochronology. *Science China Earth Sciences*, 53(11): 1634-1646.
- Yamada R, Murakami M, Tagami T. 2007. Statistical modelling of annealing kinetics of fission tracks in zircon; Reassessment of laboratory experiments. *Chemical Geology*, 236(1-2): 75-91.
- Yang X, Li H L, Yue Y, et al. 2017. The strata and palaeo-geomorphology framework at the end of Neoproterozoic and development mode of source rocks at the beginning of Cambrian. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 28(2): 189-198.
- Yang Z, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. 2013. Late-stage foreland growth of China's largest orogens (Qinling, Tibet): evidence from the Hannan-Micang crystalline massifs and the northern Sichuan Basin, central China. *Lithosphere*, 5(4): 420-437.
- Zhai M G, Hu B, Zhao T P, et al. 2015. Late Paleoproterozoic-Neoproterozoic multi-rifting events in the North China Craton and their geological significance: a study advance and review. *Tectonophysics*, 662: 153-166.
- Zhang C H, Li C M, Deng H L, et al. 2011. Mesozoic contraction deformation in the Yanshan and northern Taihang mountains and its implications to the destruction of the North China Craton. *Science China Earth Sciences*, 54(6): 798-822.
- Zhang S H, Zhao Y, Ye H, et al. 2012. Early Mesozoic alkaline complexes in the northern North China Craton: implications for cratonic lithospheric destruction. *Lithos*, 155: 1-18.
- Zhang Y P, Su Y Z, Li J C. 2010. Regional tectonics significance of the Late Silurian Xibiehe Formation in central Inner Mongolia, China. *Geological Bulletin of China* (in Chinese), 29(11): 1599-1605.
- Zheng X L. 2016. The faulting characteristics and paleo-uplift migration of Bachu uplift, Tarim Basin [Ph. D. thesis] (in Chinese). Hangzhou: Zhejiang University.
- Zou C N, Du J H, Xu C C, et al. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian-Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 41(3): 278-293.

附中文参考文献

- 焦方正. 2018. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景. 石油与天然气地质, 39(2): 207-216.
- 景先庆, 杨振宇, 全亚博等. 2018. 三峡地区新元古代莲沱组底部凝灰岩锆石SHRIMP U-Pb年代学及其地质意义. 吉林大学学报(地球科学版), 48(1): 165-180.
- 罗胜元, 陈孝红, 岳勇等. 2020. 中扬子宜昌地区沉积-构造演化与寒武系页岩气富集规律. 天然气地球科学, 31(8): 1052-1068.
- 曲永强, 潘建国, 梁利东等. 2012. 燕辽裂陷槽中元古界不整合面的性质. 沉积与特提斯地质, 32(2): 11-22.
- 沈传波, 梅廉夫, 刘昭茜等. 2009. 黄陵隆起中-新生代隆升作用的裂变径迹证据. 矿物岩石, 29(2): 54-60.
- 王招明, 谢会文, 陈永权等. 2014. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义. 中国石油勘探, 19(2): 1-13.
- 杨鑫, 李慧莉, 岳勇等. 2017. 塔里木盆地震旦纪末地层-地貌格架与寒武纪初期烃源岩发育模式. 天然气地球科学, 28(2): 189-198.
- 张允平, 苏养正, 李景春. 2010. 内蒙古中部地区晚志留世西别河组的区域构造学意义. 地质通报, 29(11): 1599-1605.
- 郑晓丽. 2016. 塔里木盆地巴楚隆起断裂特征及古隆起迁移演化规律[博士论文]. 杭州: 浙江大学.
- 邹才能, 杜金虎, 徐春春等. 2014. 四川盆地震旦系-寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现. 石油勘探与开发, 41(3): 278-293.

(本文编辑 何燕)