第 59 卷 第 5 期
2026 年（总 249 期）

西 北 地 质
NORTHWESTERN GEOLOGY

Vol. 59 No. 5
2026(Sum249)



引文格式：艾卉卉，马宇雄，巨大立，等. 秦岭北缘中生代—新生代构造隆升历史:来自现代河砂的低温热年代学约束[J]. 西北地质，2026，59(5)：319−328. DOI：10.12401/j.nwg.2025052

Citation：AI Huihui，MA Yuxiong，JU Dali，et al. Mesozoic-Cenozoic Exhumation of the Northern Margin of the Qinling Mountains: Constraints from Low-Temperature Thermochronology of Modern River Sands[J]. Northwestern Geology，2026，59(5)：319−328. DOI：10.12401/j.nwg.2025052

秦岭北缘中生代—新生代构造隆升历史:来自现代河砂的低温热年代学约束

艾卉卉，马宇雄，巨大立，尤嘉利，史小辉，杨钊*

（西北大学地质学系，大陆演化与早期生命全国重点实验室，陕西 西安 710069）

摘 要：恢复秦岭山脉的隆升历史对于理解板块构造驱动下大陆内部的地表变形过程以及揭示我国现今地貌格局的形成具有重要意义。笔者采用碎屑锆石、磷灰石裂变径迹对秦岭山脉中段涝峪河现今河砂进行热年代学分析。结果显示样品存在 91.0～82.0 Ma、54.4～41.9 Ma 和约 24.9 Ma 等 3 个主要峰值年龄。这些峰值年龄揭示了秦岭山脉晚中生代—新生代以来可能存在 3 期快速隆升剥露阶段。晚白垩世的年龄峰（91～82 Ma）指示了秦岭北缘受燕山运动后期的强烈陆内造山影响下的快速隆升剥露；始新世的快速冷却（54.4～41.9 Ma）指示了秦岭北缘于早新生代在太平洋俯冲或印度–欧亚板块初始碰撞背景下的伸展断陷，这与渭河盆地的初始断陷形成时间一致；渐新世末—中新世早期的快速冷却阶段（约 24.9 Ma）在秦岭北缘地区被广泛报道，这可能与太平洋板块西向俯冲作用相关，并造成了秦岭北缘地区的加速伸展。

关键词：构造热年代学；现代河砂；碎屑裂变径迹；隆升历史；秦岭

中图分类号：P542+1 **文献标志码**：A **文章编号**：1009-6248(2026)05-0319-10

Mesozoic-Cenozoic Exhumation of the Northern Margin of the Qinling Mountains: Constraints from Low-Temperature Thermochronology of Modern River Sands

AI Huihui, MA Yuxiong, JU Dali, YOU Jiali, SHI Xiaohui, YANG Zhao*

（State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China）

Abstract: Reconstructing the exhumation history of the Qinling Mountains is crucial for understanding plate tectonics-driven surface deformation processes within continental interiors and revealing the formation of China's present-day geomorphic framework. This study employs thermochronological analysis using detrital zircon and apatite fission track dating on modern river sands from the Laoyu River in the central Qinling Mountains.The results reveal three dominant peak ages of 91.0–82.0 Ma, 54.4–41.9 Ma, and ca. 24.9 Ma in the samples. These peak ages indicate three potential rapid uplift-exhumation phases in the Qinling Mountains since the Late Mesozoic to Cenozoic: The Late Cretaceous (91–82 Ma) age peak indicates rapid uplift-exhumation of the

收稿日期：2025-02-19；**修回日期**：2025-03-18；**责任编辑**：吕鹏瑞

基金项目：国家自然科学基金面上项目“东秦岭主干断裂晚白垩世—新生代构造活动与山脉隆升”（42172257）资助。

作者简介：艾卉卉（1998−），男，硕士研究生，构造地质学方向。E−mail：Aihuihui0212@163.com。

*通讯作者：杨钊（1982−），男，教授，博士生导师，主要从事构造地质学及构造地貌学研究。E−mail：yangzh@nwu.edu.cn。

© Editorial Office of *Northwestern Geology*. OA under CC BY-NC-ND

northern margin of the Qinling influenced by the late Yanshanian intracontinental orogeny. The Eocene (54.4–41.9 Ma) rapid cooling phase reflects extensional faulting along the northern margin of the Qinling under tectonic regimes of Pacific subduction or initial India-Eurasia collision, consistent with the initial rifting timing of the Weihe Basin. The latest Oligocene to early Miocene (ca. 24.9 Ma) rapid cooling episode, widely documented in the northern Qinling region, is likely associated with westward subduction of the Pacific plate, which accelerated extensional deformation along the northern Qinling margin.

Keywords: tectonothermal chronology; modern river sands; detrital fission tracks; uplift history; Qinling Mountains.

山脉的形成隆升过程是塑造大陆内部构造-地貌格架的主要作用之一，并深刻影响着地球表层剥蚀和沉积作用的分布，还驱动着大气环流与区域气候条件演变。因此，山脉的隆升及其气候环境效应是探讨地球内、外动力地质作用和跨圈层相互作用的绝佳窗口，也是当今地球系统科学研究的热点领域之一(Molnar et al., 1990; Yu et al., 2022)。秦岭山脉位于中国大陆腹地中央，西接青藏高原，东连东部平原地区(图 1a)。南北方向上，秦岭山脉是中国重要的南北方自然地理、气候分界线，其隆升塑造了中国现今的气候格局(郭安林等, 2021; Dong et al., 2022)。此外，秦岭山脉位于青藏高原东向扩展和太平洋板块西向俯冲两大构造域相互影响的交汇地带，是研究板块构造控制下地貌演化的重要地区(Dong et al., 2016a; Yang et al., 2017;董云鹏等, 2019)。因此，恢复秦岭山脉的隆升历史对于揭示中国现今地貌格局的形成以及理解板块构造驱动下的大陆内部地表变形过程具有重要意义。

秦岭地区的构造演化历史可以追溯到古生代以来华南与华北板块之间长期、复杂的俯冲–碰撞造山过程(Meng et al., 1999, 2000; Dong et al., 2011)。然而，现今热年代学、古生物地层及地貌学的研究指出，晚白垩世中晚期至新生代早期秦岭地区可能处于缓慢剥蚀过程，秦岭造山带及两侧盆地(四川盆地、鄂尔多斯盆地)整体进入准平原化演化阶段；作为中国大陆南北分界的高大秦岭山脉可能是新生代中晚期以来才开始隆升形成的(薛祥煦等, 2004; Yang et al., 2017)。秦岭山脉北缘受控于秦岭北缘断裂的强烈活动，与相邻渭河盆地间呈现出显著的地貌落差，也因此吸引了大量学者进行研究。

前人通过基岩低温年代学如锆石、磷灰石裂变径迹(ZFT、AFT)及(U-Th)/He(ZHe、AHe)研究揭示了秦岭北缘不同区域的多阶段冷却过程(图 2；Chen et al., 2001; 尹功明等, 2001; Enkelmann et al., 2006; Liu et al., 2013; Yu et al., 2013; Heberer et al., 2014; Chen et al., 2015; Clinkscales et al., 2021; Dong et al., 2022; Wang et al., 2022)。已开展的研究主要集中在东段华山和西段

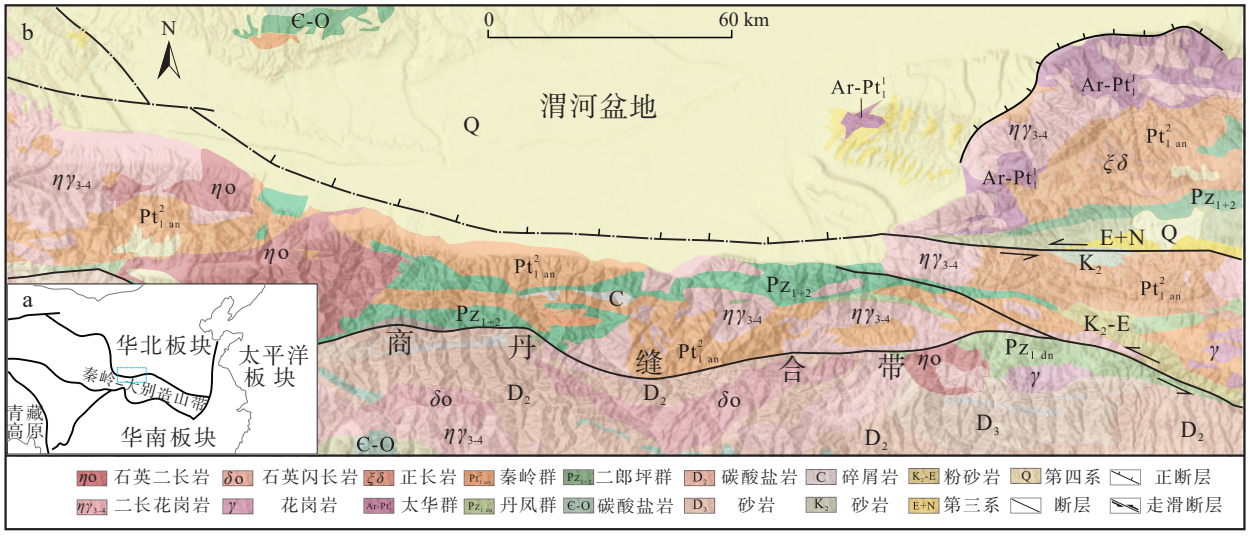
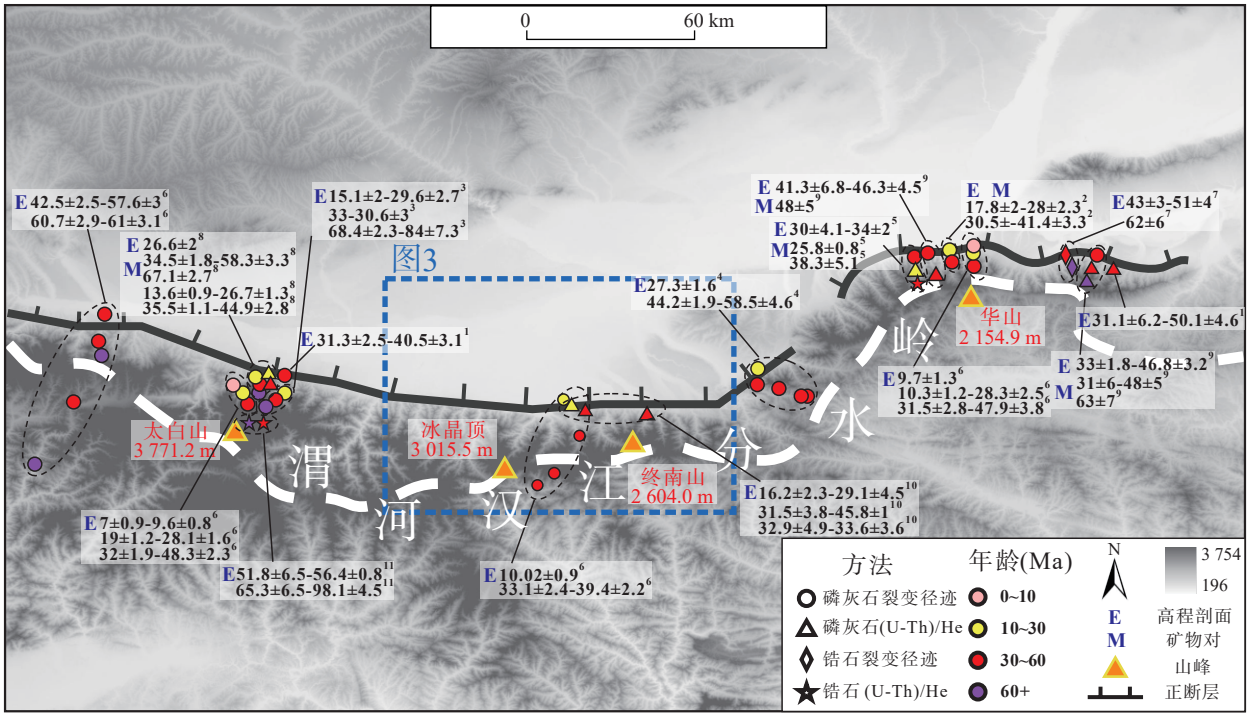


图1 秦岭北缘岩性分布及主要地质构造

Fig. 1 Lithology distribution and major geological structures on the northern margin of the Qinling Mountains



数据来源：1. Chen et al.，2001；2. 尹功明等，2001；3. 万景林等，2005；4. Enkelmann et al.，2006；5. 6. Liu et al.，2013；7. Yu et al.，2013；8. Heberer et al.，2014；9. Clinkscales et al.，2021；10. Wang et al.，2022；11. Zhang et al.，2022

图2　研究区地形地貌及热年代学数据

Fig. 2　Topography, geomorphology and thermochronological data of the study area

太白山等高陡地貌剖面，利用高程剖面法来揭示秦岭北缘的隆升历史，显示秦岭北缘新生代东西段在构造隆升期次和规模上具有一定的时空差异性。然而，已发表的数据大多聚焦于东西两段，而中段研究相对薄弱，导致秦岭北缘 EW 向差异性隆升过程不甚清晰，这种隆升的时空差异性对揭示渭河地堑发育过程和秦岭山脉地貌演化过程具有重要的指示意义。因此，秦岭北缘由西向东不同区段开展精细的热年代学约束成为解决上述问题的关键。

以锆石、磷灰石裂变径迹为代表的低温热年代学是研究地壳浅表尺度热事件或地质体隆升剥露过程的重要手段(Reiners et al., 2006; 周海等, 2013; Enkelmann et al., 2016)。通过一系列不同高程样品的表观年龄的系统测定(高程剖面法)或者不同封闭温度矿物对的热年代学分析(矿物对法)，可以获得岩石或地质体的主要隆升期次及不同阶段的隆升速率，从而揭示研究区的隆升历史。碎屑热年代学是基于热年代学分析的另一重要应用，通过采集现代河砂进行碎屑单颗粒定年，得出河流碎屑对应源区的主要隆升历史(Enkelmann et al., 2011)。该方法以流域为“采样器”，使得样品完整涵盖了基岩从峰顶到河谷区间内的全部热历史信息，而研究区内主要的热事件随即表现在碎屑样品的峰值年龄上(Stock et al., 2006; You et al., 2023)。其中，高程剖面法是获得一定水平范围内不同海拔的多个点位的信息，通过年龄–海拔–温度之间的相关性进行研究。因此，需要合理规划采样；而碎屑热年代学则是利用河流的剥蚀搬运作用，可以获得流域内全尺度的热历史信息，通过统计学的方法进行相关研究。矿物对法则是根据不同定年体系的封闭温度差，结合地温梯度以及样品年龄研究剥露过程。

本研究以秦岭北缘中段为研究区，采集研究区内涝峪河出山口处的现代河砂并进行碎屑锆石、磷灰石裂变径迹年龄测试。笔者根据所测样品的年龄峰值，揭示了秦岭山脉中段地区晚中生代以来主要的隆升期次。结合发表的热年代学及构造地质研究，探讨了秦岭山脉的隆升历史及驱动机制。

1　地质背景

1.1　区域地质背景

秦岭是中国南、北方地理、气候和动植物的天然分界线，其演化历史主要包括古生代—中生代俯冲–

碰撞造山的演化阶段和新生代以来秦岭山脉的形成阶段两部分。秦岭造山带作为中央造山带的组成部分，毗邻青藏高原东北缘，向西延伸至昆仑–祁连造山带，向东与大别–苏鲁造山带相接（田智博等，2025）。秦岭造山带的形成源于华北板块及华南板块在古生代—晚三叠世期间经历的碰撞作用，之后又经历多阶段陆内构造活动叠加改造（Meng et al., 1999, 2000; Dong et al., 2011；辛明宇等，2025；杨欢等，2025；周彬等，2025）。其中，古生代期间的拼合过程形成了商丹缝合带，一般以商丹缝合带为界将秦岭造山带划分为南秦岭和北秦岭（Dong et al., 2011）；中生代—新生代期间的陆内挤压过程，形成了位于南秦岭构造带的大巴山逆冲推覆构造（Dong et al., 2016b）。研究区位于商丹缝合带以北的北秦岭地区。北秦岭主要出露岩石单位包括太古界—元古界太华群、秦岭群和宽坪群，古生界丹凤群、二郎坪群，以及中古生代以来的沉积岩盖层和包括石英二长岩、二长花岗岩、石英闪长岩和花岗岩等多期侵入的岩浆岩（图 1b）。新生代以来，在印度–欧亚板块碰撞以及太平洋板块俯冲的共同作用下，秦岭地区经历了多阶段的冷却剥露，秦岭山脉逐渐隆升形成。其中，秦岭北缘地区由于山前正断层的强烈活动和断块掀斜，隆升快幅度大，与毗邻的渭河盆地形成 3 000 m 以上的地貌落差。渭河盆地的形成始于新生代早期，沉积了超过 7 000 m 的厚层河流–湖泊相沉积（韩恒悦等，2002）。秦岭山脉南北两侧隆升幅度不均一导致了秦岭地貌存在明显的掀斜隆升，即由于秦岭北部隆升速率高于秦岭南部，山脉主体呈现北部翘起及向南倾斜的形态。由于这一强烈的掀斜隆升特征，秦岭山脉南、北两侧的水系结构也出现明显的不对称，南侧地形较缓，河流呈现蜿蜒曲折的形态；北侧坡度较陡，河流流域海拔快速降低，河水湍急（刘建辉等，2010）。

1.2 流域地质地貌特征

涝峪河是秦岭北缘中段的重要河流之一，其主要流域位于陕西省西安市鄠邑区境内，全长可达 75.8 km，流域面积约为 441 km^2。其上游整体呈 EW 流向，中下游转为 SN 流向切穿了秦岭山脉北坡的岩石。涝峪河的源头可追溯到海拔 3 015.5 m 的冰晶顶（图 3）。冰晶顶作为太白山以东的秦岭最高峰，地势陡峭，向北以秦岭北缘断裂为界与渭河盆地相望。渭河盆地内有黄河最大支流渭河流经，渭河在陕西境内流长为 502.4 km，流域面积为 67 108 km^2，年均径流量达 7.57×10^9 m^3。涝峪河在秦岭山脉中段汇聚成河后沿着涝峪河谷向北流动，流出秦岭山脉后进入渭河盆地并最终在咸阳西南处汇入渭河干流。涝河流域内的岩石单元主要涵盖了混合岩、混合片麻岩、混合花岗岩、秦岭群变质基底以及粉笔沟组变质石英砂岩等多种岩石类型（图 3）。

1.3 热年代学

笔者收集了前人在秦岭山脉北缘地区发表的热

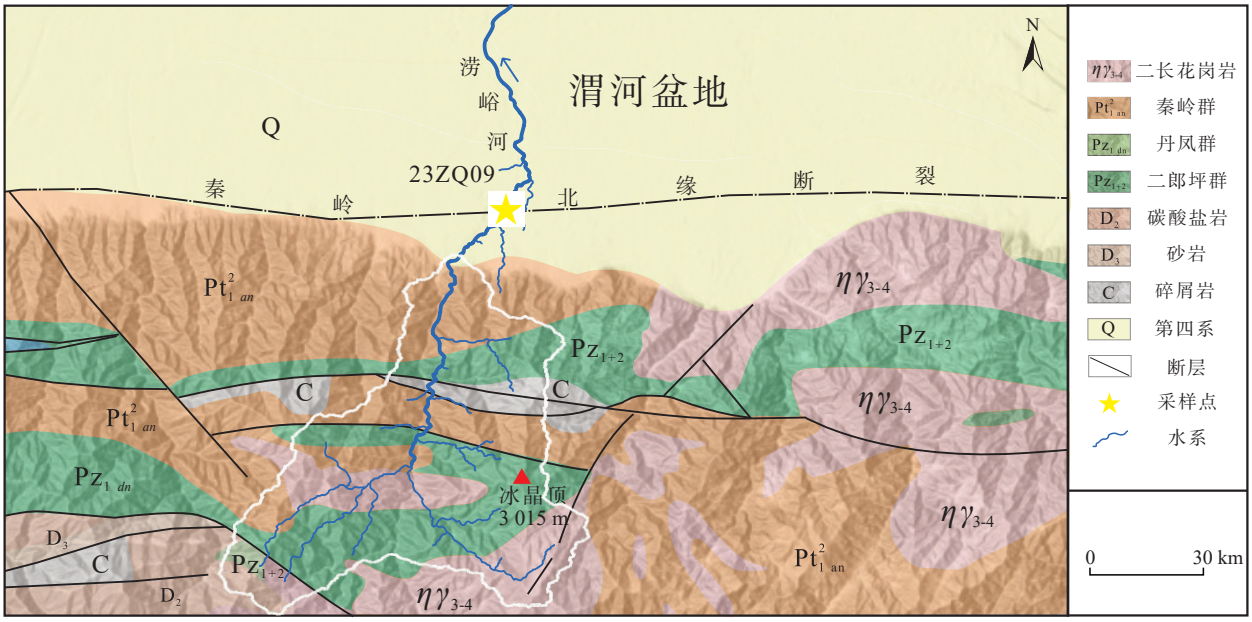


图3 涝峪河流域及主要岩性分布

Fig. 3 Laoyu river basin and distribution of main lithologies

年代学数据(图 2),这些研究主要集中在东部的华山地区和西部的太白山地区,涵盖了锆石、磷灰石裂变径迹及(U-Th)/He 等低温热年代学方法。其中,锆石(U-Th)/He 年龄为 38.3～98.1 Ma(Zhang et al., 2022);磷灰石(U-Th)/He 年龄为 13.6～63.0 Ma(Heberer et al., 2014; Clinkscales et al., 2021; Wang et al., 2022);锆石裂变径迹的年龄为 38.0～68.2 Ma(尹功明等, 2001; Yu et al., 2013);磷灰石裂变径迹的年龄为 7.0～77.0 Ma(Chen et al., 2001; 尹功明等, 2001; 万景林等, 2005; Liu et al., 2013; Heberer et al., 2014; Clinkscales et al., 2021; Wang et al., 2022)。该年龄数据与其对应的海拔高度,显示样品年龄与海拔具有非常好的正相关性,海拔越高,则年龄越大;但也有个别样品年龄–海拔之间存在较弱线性关系的情况,这种情况与低温热年代学对温度和海拔变化的敏感性有关,研究区的新生代构造活动强烈,局部断裂发育,可能导致个别样品现今海拔位置的变化,从而使其年龄和现今海拔的相关性改变。前人利用高程剖面结合矿物对法,揭示了秦岭山脉不同地区热年代学记录的快速冷却/隆升事件,主要构造剥露阶段包括晚中生代(125～110 Ma 和 78～71 Ma)、始新世(65～35 Ma)、渐新世(33～25 Ma)和晚中新世以来(＜10 Ma)。

2　样品采集及实验方法

笔者采集了秦岭山脉北缘中段涝峪河出山口处的现代河砂样品(23ZQ09),进行了碎屑锆石、磷灰石裂变径迹热年代学分析。为保证样品具有代表性,我们在采样点 30 m 范围内不同位置进行采样,共收集大约 5 kg 的中–粗粒河砂,并充分混合(Vermeesch, 2007)。样品颗粒为流域内基岩的天然混合,基岩不同高度的热史信息被剥蚀并记录于碎屑颗粒中,基岩快速冷却/剥露阶段会在碎屑中表现为集中的峰值,在统计学层面上定义为峰值年龄。通过对目标矿物锆石、磷灰石的裂变径迹年龄测定,其冷却年龄峰值即可以代表秦岭北缘中段的主要冷却阶段(Garver et al., 1999; Brewer et al., 2003)。

锆石和磷灰石矿物的挑选遵循标准的矿物分离程序(涉及到重液分选和磁选等手段),通过人工挑选对矿物进一步提纯。锆石矿物采用特弗伦片进行包裹固定,经过打磨、抛光等操作显露出最大内表面,之后将本次研究所制的两组靶样放置于摩尔比为 1∶1 的 KOH 和 NaOH 的共晶溶液之中,在 227～230 ℃ 的温度条件下分别蚀刻 18 h 和 20 h(Gleadow et al., 1976);磷灰石则利用环氧树脂将其包裹固定,同样进行打磨、抛光等操作显露出其最大内表面,后用浓度为 5.5 mol/L 的 HNO_3 溶液,在 21 ℃ 的恒温条件下蚀刻 20 s(Donelick et al., 1999)。经过对锆石和磷灰石的蚀刻处理后,就可以使其抛光面呈现出可在显微镜下观测到的自发径迹。以无铀白云母作为外探测器与样品靶固定,用以检测诱发径迹密度。最后将样本和标样一起进行辐照。采用标准铀玻璃 IRMM-541(用于锆石裂变径迹监测)以及 IRMM-540R(用于磷灰石裂变径迹监测)来进行热中子精准监测。辐照完成后利用 40% HF 溶液蚀刻无铀白云母 40 mins 使其显示出诱发径迹。

在西北大学的大陆动力学国家重点实验室借助自动载物台以及具备 1 000 倍透射光放大功能的蔡司 AxioImager 显微镜,在 500 倍透射光下对裂变径迹进行计数操作。利用 Fish Canyon Tuff 锆石和 Durango 磷灰石作为标样计算统计者的个人 Zeta 值(Hurford et al., 1982),具体数值分别为(119.0±2.8)a cm^2(锆石)和(251.7±15.1)a cm^2(磷灰石)。结合中子通量检测结果,计算每个样品的具体年龄数据。

3　裂变径迹实验结果

本次研究共计测得 100 个碎屑锆石裂变径迹单颗粒年龄(其中蚀刻 18 h 的靶样 63 个、蚀刻 20 h 的靶样 37 个)以及 99 个碎屑磷灰石裂变径迹单颗粒年龄。通过数据分析发现,碎屑裂变径迹年龄呈现出不同年龄成分相互混合的复杂特征,并且锆石裂变径迹和磷灰石裂变径迹的单颗粒年龄呈现出了跨度较大的分布情况(图 4)。采用核密度估计方法可以统计显著且测量合理的年龄组分。基于 Galbraith et al.(1990)提出的混合算法技术,将裂变径迹单颗粒年龄分布拆解为离散的主要颗粒年龄组分,并将其作为峰值年龄的判定依据。利用 Density Plotter 软件,从汇总的裂变径迹年龄数据中,计算每个样本的核密度估计以及峰值年龄,误差范围为 1σ(Vermeesch, 2012)。裂变径迹单颗粒年龄分布图(图 4)展示了秦岭山脉中段地区涝峪河现今河砂的磷灰石裂变径迹和锆石裂变径迹的详细数据信息,包括雷达图、概率密度曲线、核密度估计曲线以及各年龄群组直方图等内容。针对每一个年

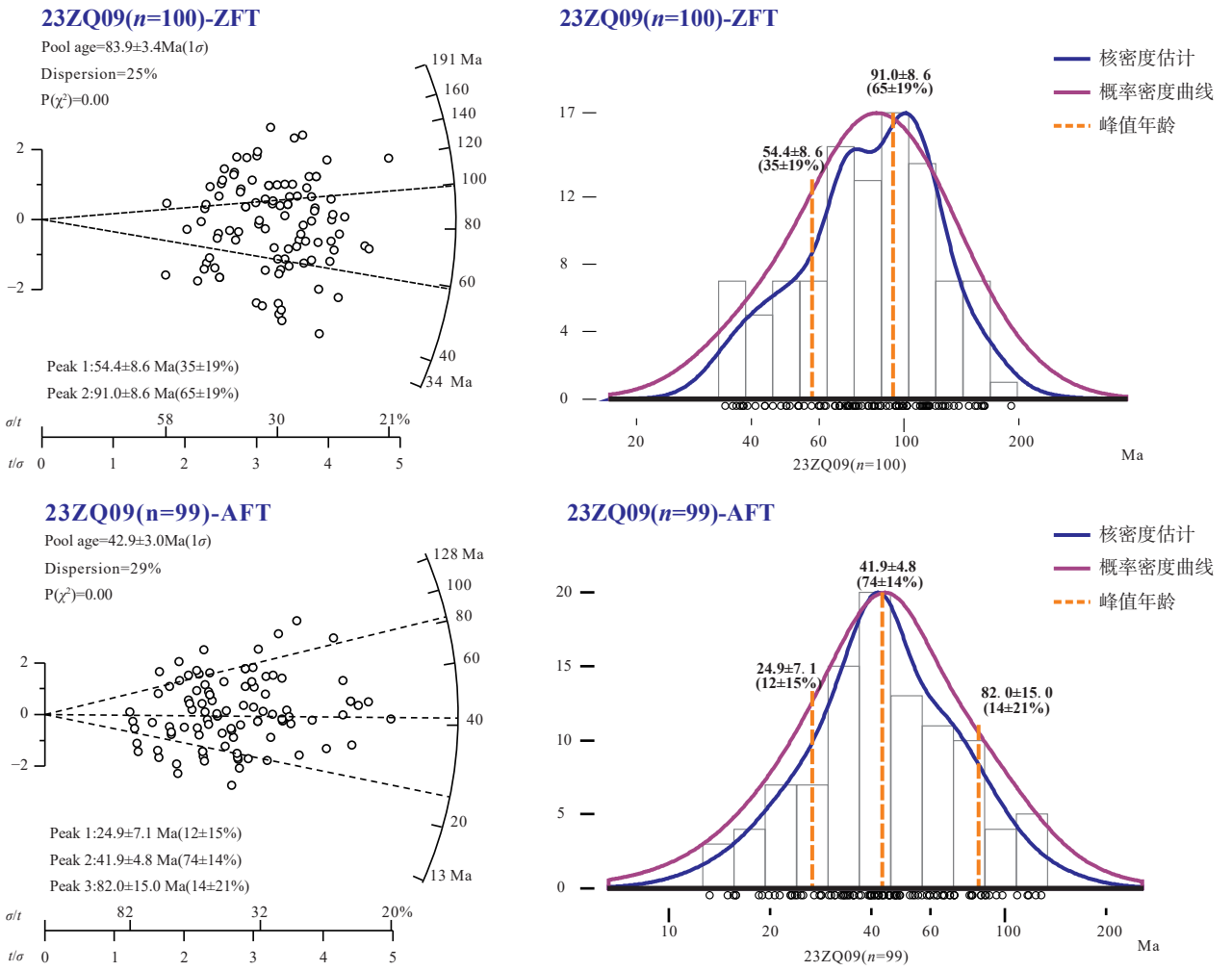


图4 秦岭北缘涝峪河碎屑锆石、磷灰石裂变径迹分析图

Fig. 4 Fission tracks dating analysis diagram of detrital zircon and apatite in Laoyu river on the northern margin of the Qinling Mountains

龄群体，笔者提供了峰值年龄（表 1）的拟合结果，以 1σ 误差用于描述误差的宽度情况。经过 χ^2 检验发现，所有样品的检验结果均小于 0.05，表明碎屑颗粒来源于不同源区并经过了充分混合。

碎屑定年结果显示，锆石裂变径迹的两个主要峰值年龄为（54.4±8.6）Ma（35%）和（91.0±8.6）Ma（65%），单颗粒年龄为 34.0～191.0 Ma；磷灰石裂变径迹呈现出（24.9±7.1）Ma（12%）、（41.9±4.8）Ma（74%）、（82.0±15.0）Ma（14%）3 个峰值年龄，单颗粒年龄为 13.2～128.0 Ma。

4 讨论

综合区域构造背景与前人研究结果，研究数据揭示了秦岭山脉北缘中段自晚中生代以来经历的多阶

表 1 现代河流碎屑锆石/磷灰石（样品 23ZQ09）裂变径迹数据及峰值拟合结果

Tab. 1 Fission track data of detrital zircon/apatite (Sample 23ZQ09) in the modern river and peak fitting results

采样位置	纬度 N (°)	经度 E (°)	nG	Ns	Ni	ζ ± 1σ (a cm²) ZFT/AFT	ρd (10^6/cm²)	P(χ^2) (%)	池年龄 (Ma)	年龄 (Ma)	P1(Ma) (%)	P2(Ma) (%)	P3(Ma) (%)
涝峪河	34.041 9	108.561 8	100	3 875	1 568	119.0±2.8(Z)	0.574	0.00	83.9±3.4	34.0～191.0		54.4±8.6 (35%)	91.0±8.6 (65%)
			99	1 081	3 564	251.8±15.1(A)	1.034	0.00	42.9±3.0	13.2～128.0	24.9±7.1 (12%)	41.9±4.8 (74%)	82.0±15.0 (14%)

注：nG. 测试颗粒数；Ns. 自发径迹数；Ni. 诱发径迹数；ζ. Zeta校准因子RM541（锆石裂变径迹）和IRMM-540R（磷灰石裂变径迹）；ρd. 标准铀玻璃中的径迹密度；P(χ^2). 卡方检测概率；P(1-3). 峰值年龄；误差为1σ。

段冷却历史过程, 指示现今秦岭的基本地貌形态是在晚中生代—新生代多期、多动力场的陆内构造活动下逐步形成的。

4.1　晚中生代燕山期陆内造山

涝峪河现今河砂中, 有 14% 的磷灰石颗粒呈现出 (82±15.0) Ma 的冷却年龄, 65% 的锆石显示 (91±8.6) Ma 的冷却年龄(表 1)。利用“矿物对–封闭温度法”可以计算出快速冷却速率为 14.4 ℃/Ma, 以地温梯度为 30 ℃/km 进行计算, 该阶段浅表的构造剥露速率可达 480 m/Ma(刘海青等, 2014)。这一晚中生代的快速的冷却剥露事件与秦岭燕山期陆内造山活动相关。在晚三叠世华北–华南板块全面碰撞造山后, 整个秦岭造山带进入了陆内构造演化阶段, 造成了显著的地壳缩短与构造隆升(Dong et al., 2016a, 2016b)。在中国东部, 燕山期存在 170～136 Ma 和 90～80 Ma 两期主要的地壳缩短事件(Dong et al., 2018)。众多热年代学研究揭示了秦岭及邻区这一时期遭受了广泛而强烈的隆升剥露作用。例如, 锆石和磷灰石裂变径迹测年记录华南板块北部的快速剥蚀年龄为约 165～95 Ma (Yang et al., 2013, 2017); 大巴山地区 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 显示出 166～163 Ma 的冷却年龄区间(Li et al., 2013), 碎屑磷灰石裂变径迹的研究也揭示出 150～140 Ma 和 116～86 Ma 的冷却年龄峰值(You et al., 2023), 这与本次研究约 91～82 Ma 的快速冷却事件一致。此外, Heberer et al.(2014)在北秦岭太白花岗岩测得锆石 U-Pb 年龄 (156±3 Ma 和 124±1 Ma)、角闪石 $^{40}Ar/^{39}Ar$(122.2±0.7)Ma、黑云母 $^{40}Ar/^{39}Ar$(115.0±0.4～123.4±0.3 Ma)和钾长石 $^{40}Ar/^{39}Ar$ 年龄(111.1±1.9～117.0±1.4 Ma), 结果显示在早白垩世北秦岭西段太白山地区经历了一次岩浆侵入事件和快速的冷却剥露过程, 太白山花岗岩体从 800 ℃ 快速冷却至 100 ℃。本研究碎屑裂变径迹显示在北缘中段终南山区段存在持续至晚白垩世早期的快速剥露事件。值得注意的是, 涝峪河少部分碎屑锆石裂变径迹年龄中存在早白垩世的冷却年龄信息, 但并未形成明显的峰值。这可能是由于北秦岭地区更强烈后期剥露造成早期热历史信息被剥蚀导致的。因此, 92～81 Ma 的冷却年龄峰值与燕山期陆内造山运动所导致的造山带向两侧前陆快速扩展变形相关, 秦岭南缘的大巴山逆冲推覆构造带强烈的构造活动也终止于 80 Ma 之前(Yang et al., 2017; You et al., 2023)。

4.2　新生代快速剥露

涝峪河碎屑裂变径迹测试揭示秦岭北缘中段存在 54.4～41.9 Ma(冷却速率约为 10.4 ℃/Ma, 剥蚀速率为 350 m/Ma)和约 24.9 Ma 两个新生代的年龄峰值(表 1), 表明秦岭北缘中段在新生代经历了至少两期快速冷却及强烈的构造剥露作用, 很可能与东亚大陆周缘动力场的调整变化引起的陆内构造活化相关。

已有研究表明秦岭腹地与两侧前陆在晚中生代至新生代经历了差异性隆升, 众多热年代学研究揭示了秦岭腹地经历了 70～40 Ma 的快速剥露。这一时期的构造活动表现为强烈的伸展断陷并在秦岭山间形成了一系列晚白垩世—古近纪断陷盆地, 如安康盆地、山阳盆地、房县盆地等(李建华等, 2010; Yang et al., 2017; Han et al., 2022)。这些盆地与相邻山脉组成了盆–山体系。而在秦岭北缘, 主要的构造隆升起始时间集中在 45～40 Ma (Yang et al., 2017)。以秦岭北缘断裂为界, 渭河盆地的形成被也认为始于 50 Ma 左右(Lu et al., 2023)。秦岭北缘的隆升与渭河地堑的沉积在时空维度上表现出了良好的盆–山耦合。这一新生代早期的快速冷却也同样被记录在涝峪河现今河砂中, 大多数(74%)的碎屑磷灰石及 1/3 的锆石颗粒呈现出 54.4～41.9 Ma 冷却年龄, 体现了秦岭北缘新生代初期冷却事件的显著。虽然这一时期的冷却过程被广泛地识别和报道, 但何种构造背景导致了秦岭地区的伸展仍然存在众多争议。新生代早期亚洲地区同时发生了印度–欧亚板块的初始碰撞和太平洋板块的西向俯冲。渭河盆地边缘断层的构造解析记录了区域古近纪 NNE–SSW 收缩和 WNW–ESE 伸展, 与印度–亚洲碰撞造成的收缩和挤压方向一致。一些研究支持区秦岭断陷系统的活动与印度–欧亚板块的初始碰撞相关(Ratschbacher, 2003)。然而, 东秦岭的断层运动学研究显示在古新世—中新世的 NW–SE 伸展断陷活动导致三门峡盆地、商洛盆地、渭河盆地等的发育(Shi et al., 2019)。对太平洋板块运动和青藏高原东段形成的研究显示, 中国中部和东部在新生代早期大陆内部裂陷活动主要与太平洋俯冲相关的弧后伸展背景有关(Seton et al., 2015; Fan et al., 2019)。因此, 在新生代早期, 秦岭地区的快速剥蚀隆升可能受到太平洋弧后伸展活动的影响, 同时叠加了印度–欧亚碰撞的初始远程响应的影响, 这一问题的解决仍需要在精细的年代学格架基础上, 开展详细的构造解析来恢复不同时空背景下周缘动力场的变化特征。

此外, 碎屑磷灰石裂变径迹数据也记录了约 24.9 Ma 的快速冷却事件, 这显示渐新世也是秦岭北缘存

在的又一期快速隆升事件。Heberer et al.(2014)通过矿物对以及高程剖面的综合研究,认为秦岭北缘太白山地区存在 25 Ma 的加速冷却。Yu et al.(2022)通过太白山磷灰石(U-Th)/He 的高程剖面,以及热模拟印证了这一地区约 25 Ma 的隆升剥露,并将该渐新世秦岭的隆升与同期中国大陆气候格局的重组联系在一起。Wang et al.(2022)在秦岭北缘东段的华山、中段的终南山开展了基于高程剖面和热模拟的磷灰石(U-Th)/He 研究,揭示其分别存在 36～28 Ma 以及 32～28 Ma 的快速隆升。对于这期事件的研究以(U-Th)/He 方法为主,是因为针对基岩的研究,He 定年相较裂变径迹的封闭温度更低,可以揭露更年轻的冷却剥露事件。除了热年代学数据,渭河盆地的沉积速率也在渐新世末期呈现明显的加速(Liu et al., 2013)。由于这些快速冷却与盆地沉降事件与青藏高原周缘的边界断裂活动具有同时性,Wang et al.(2022)认为秦岭山脉渐新世的隆升不能忽视印度–欧亚板块碰撞的远程效应的影响;Clinkscales et al.(2021)提出秦岭渐新世冷却与华北地区 NW–SE 伸展有关,仍然是西太平洋板块俯冲的结果;断层运动学分析也支持了这一观点(Shi et al., 2020)。考虑到文中涝峪河–冰晶顶地区的年龄峰值与秦岭北缘华山、终南山以及太白山的研究结果,似乎在 EW 方向上,该渐新世的隆升有由东至西起始时间年轻化的趋势;西段太白山和中段的终南山及本研究的冰晶顶地区,还保存有晚白垩世早期的快速冷却年龄信息,而东段的华山及小秦岭地区,新生代之前的冷却信息已被剥蚀殆尽,也显示了渐新世构造剥露厚度具有东强西弱的特点,可能揭示了太平洋板块俯冲造成的中国大陆腹地伸展作用由东至西的传递过程。而青藏高原东向扩展的影响导致东、西秦岭的地貌反转及后期活化,更可能始于晚中新世约 13 Ma 以来(Yang et al., 2017)。

5 结论

(1)涝峪河现代河砂碎屑锆石裂变径迹定年记录了(54.4±8.6)Ma(35%)和(91.0±8.6)Ma(65%)两个峰值年龄;碎屑磷灰石裂变径迹记录了(24.9±7.1)Ma(12%)、(41.9±4.8)Ma(74%)和(82.0±15.0)Ma(14%)3 个峰值年龄。这些数据代表了秦岭山脉中段地区晚中生代以来的经历了 91～82 Ma(冷却速率约为 14.4 ℃/Ma)、54.4～41.9 Ma(冷却速率约为 10.4 ℃/Ma)及约 24.9 Ma 等 3 期快速冷却/剥蚀阶段。

(2)秦岭山脉中段晚中生代 91～82 Ma 快速冷却受燕山期的陆内造山运动影响所致;进入新生代后,秦岭地区经历了始新世 54.4～41.9 Ma 与渐新世 24.9 Ma 左右的加速隆升。始新世的山脉隆升与渭河盆地的形成时间一致,指示了在印度–欧亚板块初始碰撞和/或太平洋板块俯冲作用下秦岭地区的伸展断陷;渐新世的加速隆升广泛存在于秦岭北缘地区,可能与太平洋板块俯冲背景下的中国腹地的岩石圈伸展作用相关。

利益冲突声明(Conflict of Interests):

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

参考文献(References):

董云鹏, 张国伟, 孙圣思, 等. 中国大陆“十字构造”形成演化及其大陆动力学意义[J]. 地质力学学报, 2019, 25(5): 769−797.

DONG Yunpeng, ZHANG Guowei, SUN Shengsi, et al. The “Cross-Tectonics” in China Continent: Formation, Evolution, and Its Significance for Continental Dynamics[J]. Journal of Geomechanics, 2019, 25(5): 769−797.

郭安林, 张国伟, 董云鹏, 等. 秦岭: 地球多圈层相互作用的热点[J]. 西北大学学报 (自然科学版), 2021, 51(6): 922−934.

GUO Anlin, ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, et al. Qinling Mountains: A hot spot of Earth multi-spherical interaction[J]. Journal of Northwest University, 2021, 51(6): 922−934.

韩恒悦, 张逸, 袁志祥. 渭河断陷盆地带的形成演化及断块运动[J]. 地震研究, 2002, (4): 362−368.

HAN Hengyue, ZHANG Yi, YUAN Zhixiang. The Evolution of Weihe Down-faulted Basin and the Movement of the Fault Blocks[J]. Journal of Seismological Research, 2002, (4): 362−368.

李建华, 张岳桥, 董树文, 等. 北大巴山凤凰山基底隆起晚中生代构造隆升历史——磷灰石裂变径迹测年约束[J]. 地质科学, 2010, 45(4): 969−986.

LI Jianhua, ZHANG Yueqiao, DONG Shuwen, et al. Apatite fission track thermochronologic constraint on Late Mesozoic uplifting of the Fenghuangshan basement uplift[J]. Chinese Journal of Geology, 2010, 45(4): 969−986.

刘建辉, 张培震, 郑德文, 等. 秦岭太白山新生代隆升冷却历史的磷灰石裂变径迹分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(10): 2405−2414.

LIU Jianhui, ZHANG Peizhen, ZHEN Dewen, et al. The cooling history of Cenozoic exhumation and uplift of the Taibai Mountain, Qinling, China: evidence from the apatite fission track (AFT)

analysis[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(10): 2405−2414.

刘海青, 李荣西, 张艳妮, 等. 磷灰石裂变径迹在确定造山带隆升速率中的应用[J]. 西北地质, 2014, 47(2): 119−125.

LIU Haiqing, LI Rongxi, ZHANG Yanni, et al. The Application of Apatite Fission Track in Determining the Tectonic Uplift Rates [J]. Northwestern Geology, 2014, 47(2): 119−125.

田智博, 苟龙龙, 徐晓飞, 等. 秦岭造山带涝峪地区宽坪岩群变质作用温压条件及原位 Rb–Sr 年代学研究[J]. 西北地质, 2025, 58(1): 1−26.

TIAN Zhibo, GOU Longlong, XU Xiaofei, et al. Metamorphic P–T Conditions and In–situ Rb–Sr Geochronology of the Kuanping Group in the Laoyu Area of the Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(1): 1−26.

万景林, 王瑜, 李齐, 等. 太白山中新生代抬升的裂变径迹年代学研究[J]. 核技术, 2005, (9): 712−716.

WAN Jinglin, WANG Yu, LI Qi, et al. Apatite fission track study of Taibai Mountain uplift in the Mesozoic-Cenozoic[J]. Nuclear Techniques, 2005, (9): 712−716.

薛祥煦, 李虎侯, 李永项, 等. 秦岭中更新世以来抬升的新资料及认识[J]. 第四纪研究, 2004, (1): 82−87.

XUE Xiangxu, LI Huhou, LI Yongxiang, et al. The New Data of the Uplifting of Qinling Mountains Since the Middle Pleistocene [J]. Quaternary Sciences, 2004, (1): 82−87.

辛明宇, 刘丽, 盛渊明, 等. 东秦岭北岭金矿床黄铁矿标型特征及成矿指示意义[J]. 西北地质, 2025, 58(5): 75−86.

XIN Mingyu, LIU Li, SHENG Yuanming, et al. Typomorphic Characteristics and Metallogenic Indicative Significance of Pyrite in Beiling Gold Deposit, East Qinling[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(5): 75−86.

尹功明, 卢演俦, 赵华, 等. 华山新生代构造抬升[J]. 科学通报, 2001, (13): 1121−1123.

YIN Gongming, LU Yanchou, ZHAO Hua, et al. Tectonic Uplift of the Huashan Mountain in the Cenozoic[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, (13): 1121−1123.

杨欢, 李玉宏, 韩伟, 等. 陕西小秦岭地区牧护关高 Ba-Sr 花岗岩体的成因及其形成构造背景[J]. 西北地质, 2025, 58(6): 149−172.

YANG Huan, LI Yuhong, HAN Wei, et al. Petrogenesis and Tectonic Setting of the Muhuguan High Ba-Sr Granitic Pluton in Xiao Qinling Area, Shaanxi Province[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(6): 149−172.

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

ZHOU Hai, LEI Chuan. The Study Progressin Apatite Fission Track (AFT)[J]. Northwestern Geology, 2013, 46(1): 168−177.

周彬, 朱毓, 高沛, 等. 秦岭造山带凤县–山阳地区富钴–镍钠长角砾岩年代学研究及地质意义[J]. 西北地质, 2025, 58(4): 174−196.

ZHOU Bin, ZHU Yu, GAO Pei, et al. Geochronology Study and Geological Significance of Cobalt-Nickel-Rich Albite Breccia in the Fengxian-Shanyang, Qinling Orogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(4): 174−196.

Brewer I D, Burbank D W, Hodges K V. Modelling detrital cooling-age populations: Insights from two Himalayan catchments[J]. Basin Research, 2003, 15(3): 305−320.

Chen B L, Yin G M, Li W L, et al. Determination of tectonic uplift rates of Qinling mountains in central China by fission tracks[J]. Radiation Measurements, 2001, 34(1−6): 405−408.

Clinkscales C, Kapp P, Thomson S, et al. Regional exhumation and tectonic history of the Shanxi Rift and Taihangshan, North China[J]. Tectonics, 2021, 40(3): e2020TC006416.

Chen H, Hu J M, Wu G L, et al. Apatite fission-track thermochronological constraints on the pattern of late Mesozoic–Cenozoic uplift and exhumation of the Qinling Orogen, central China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 114: 649−673.

Donelick R A, Ketcham R A, Carlson W D. Variability of apatite fission-track annealing kinetics: II. Crystallographic orientation effects[J]. American Mineralogist, 1999, 84(9): 1224−1234.

Dong S W, Zhang Y Q, Li H L, et al. The Yanshan orogeny and late Mesozoic multi-plate convergence in East Asia-Commemorating 90th years of the "Yanshan Orogeny" [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 61: 1888−1909.

Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41(3): 213−237.

Dong Y P, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. Gondwana Research, 2016a, 29(1): 1−40.

Dong Y P, Yang Z, Liu X M, et al. Mesozoic intracontinental orogeny in the Qinling Mountains, central China[J]. Gondwana Research, 2016b, 30: 144−158.

Dong Y P, Shi X H, Sun S S, et al. Co-evolution of the Cenozoic tectonics, geomorphology, environment and ecosystem in the Qinling Mountains and adjacent areas, Central China[J]. Geosystems and Geoenvironment, 2022, 1(2): 100032.

Enkelmann E, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. Cenozoic exhumation and deformation of northeastern Tibet and the Qinling: Is Tibetan lower crustal flow diverging around the Sichuan Basin?[J]. Geological Society of America Bulletin, 2006, 118(5−6): 651−671.

Enkelmann E, Ehlers T A, Zeitler P K, et al. Denudation of the Namche Barwa antiform, eastern Himalaya[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2011, 307(3−4): 323−333.

Enkelmann E, Garver J I. Low-temperature thermochronology applied to ancient settings[J]. Journal of Geodynamics, 2016, 93: 17−30.

Fan L G, Meng Q R, Wu G L, et al. Paleogene crustal extension in the eastern segment of the NE Tibetan plateau[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2019, 514: 62−74.

Gleadow A J W, Hurford A J, Quaife R D. Fission track dating of zircon: improved etching techniques[J]. Earth and planetary sci-

ence letters, 1976, 33(2): 273−276.

Garver J I, Brandon M T, Roden-Tice M, et al. Exhumation history of orogenic highlands determined by detrital fission-track thermochronology[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1999, 154(1): 283−304.

Galbraith R F, Green P F. Estimating the component ages in a finite mixture[J]. International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 1990, 17(3): 197−206.

Hurford A J, Green P F. A users' guide to fission track dating calibration[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 59(2): 343−354.

Heberer B, Anzenbacher T, Neubauer F, et al. Polyphase exhumation in the western Qinling Mountains, China: Rapid Early Cretaceous cooling along a lithospheric-scale tear fault and pulsed Cenozoic uplift[J]. Tectonophysics, 2014, 617: 31−43.

Han F, Wang Q, Wang H, et al. Low dinosaur biodiversity in central China 2 million years prior to the end-Cretaceous mass extinction[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022, 119(39): e2211234119.

Liu J H, Zhang P Z, Lease R O, et al. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range–Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. Tectonophysics, 2013, 584: 281−296.

Lu H Y, Zhang H Z, Feng H, et al. Landform evolution in Asia during the Cenozoic revealed by formation of drainages of Wei River and Indus River[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2023, 619: 111516.

Molnar P, England P. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chicken or egg?[J]. Nature, 1990, 346(6279): 29−34.

Meng Q R, Zhang G W. Timing of collision of the North and South China blocks: controversy and reconciliation[J]. Geology, 1999, 27(2): 123−126.

Meng Q R, Zhang G W. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China[J]. Tectonophysics, 2000, 323(3−4): 183−196.

Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history[J]. Tectonophysics, 2003, 366(1−2): 1−53.

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.

Stock G M, Ehlers T A, Farley K A. Where does sediment come from? Quantifying catchment erosion with detrital apatite (U-Th)/He thermochronometry[J]. Geology, 2006, 34(9): 725−728.

Seton M, Flament N, Whittaker J, et al. Ridge subduction sparked reorganization of the Pacific plate-mantle system 60–50 million years ago[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(6): 1732−1740.

Shi W, Chen L, Chen X Q, et al. The Cenozoic tectonic evolution of the faulted basins in the northern margin of the Eastern Qinling Mountains, Central China: Constraints from fault kinematic analysis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2019, 173: 204−224.

Shi W, Dong S W, Hu J M. Neotectonics around the Ordos Block, North China: A review and new insights[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 200: 102969.

Vermeesch P. Quantitative geomorphology of the White Mountains (California) using detrital apatite fission track thermochronology[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2007, 112(F3).

Vermeesch P. On the visualisation of detrital age distributions[J]. Chemical Geology, 2012, 312: 190−194.

Wang Y Z, Li C P, Hao Y Q, et al. Multi-stage growth in the north margin of the Qinling Orogen, Central China, Revealed by both low-temperature thermochronology and River Profile Inversion [J]. Tectonics, 2022, 41(4): e2021TC007029.

You J L, Yang Z, Shi X H, et al. Exhumation and deformation of the Daba Shan Orocline as determined from modern river sands apatite fission-track[J]. Journal of Earth Science, 2023, 34(4): 1140−1149.

Yu J X, Zheng D W, Pang J Z, et al. Cenozoic mountain building in eastern China and its correlation with reorganization of the Asian climate regime[J]. Geology, 2022, 50(7): 859−863.

Yu X Q, Liu J L, Zhang D H, et al. Uprising period and elevation of the Wenyu granitic pluton in the Xiaoqinling District, Central China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58: 4459−4471.

Yang Z, Ratschbacher L, Jonckheere R, et al. 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[J]. Lithosphere, 2013, 5(4): 420−437.

Yang Z, Shen C, Ratschbacher L, et al. Sichuan Basin and beyond: Eastward foreland growth of the Tibetan Plateau from an integration of Late Cretaceous-Cenozoic fission track and (U-Th)/He ages of the eastern Tibetan Plateau, Qinling, and Daba Shan[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2017, 122(6): 4712−4740.

Zhang Y Q, Qiu E K, Dong S W, et al. Late Mesozoic intracontinental deformation and magmatism in North and NE China in response to multi-plate convergence in NE Asia: An overview and new view[J]. Tectonophysics, 2022, 835: 229377.