



引文格式: 赵俊斌, 魏荣珠, 张成龙, 等. 太岳山脉中段中生代—新生代隆升演化裂变径迹约束[J]. 西北地质, 2024, 57(3): 237–250. DOI: 10.12401/j.nwg.2023051

Citation: ZHAO Junbin, WEI Rongzhu, ZHANG Chenglong, et al. Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution in the Central Taiyue Mountain: Constraints from Apatite Fission Track Analysis[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(3): 237–250. DOI: 10.12401/j.nwg.2023051

太岳山脉中段中生代—新生代隆升演化裂变径迹约束

赵俊斌¹, 魏荣珠^{1,*}, 张成龙², 闫涛¹, 高宇辉¹, 杜艳伟¹

(1. 山西省地质调查院有限公司, 山西 太原 030001; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

摘要: 应用磷灰石裂变径迹年代学方法研究太岳山脉中段构造隆升与剥露过程, 这对于进一步认识华北地块构造演化过程具有重要的意义。结果表明: 太岳山脉中段自中侏罗世末期以来经历了持续隆升剥露过程, 并受到了热事件的影响。模拟结果显示, 太岳山脉中段中生代—新生代共经历了 4 期快速隆升剥露: 165~112 Ma、103~85 Ma、80~50 Ma 及 28 Ma 以来。样品裂变径迹年龄与海拔高程呈正相关关系, 隆升速率为 8.4 m/Ma。剥蚀速率从早白垩世晚期以来的 14.9~18.1 m/Ma 逐渐增加到始新世以来的 50.5~64.7 m/Ma, 太岳山脉中段早白垩世晚期以来的隆升过程具有多期性, 总体上呈加速隆升的特点。太岳山脉中段中生代—新生代的隆升史与太行山、吕梁山等山西地块的同期演化史具有一定的一致性, 与汾渭裂谷系的快速沉降相耦合。

关键词: 太岳山脉; 磷灰石裂变径迹; 热演化史模拟; 中生代—新生代多期次剥露; 剥蚀速率

中图分类号: P542; P597.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2024)03-0237-14

Mesozoic-Cenozoic Tectonic Evolution in the Central Taiyue Mountain: Constraints from Apatite Fission Track Analysis

ZHAO Junbin¹, WEI Rongzhu^{1,*}, ZHANG Chenglong², YAN Tao¹, GAO Yuhui¹, DU Yanwei¹

(1. Shanxi Institute of Geological Survey Company Limited, Taiyuan 030001, Shanxi, China; 2. Hydrogeological Environment Geological Survey Center, GGS, Baoding 071051, Hebei, China)

Abstract: In order to shed light on the tectonic evolution processes of the north China block, we applied apatite fission track thermochronology method to the central Taiyue Mountain as a major mountain range in Shanxi massif. The results reveal that since the late middle Jurassic the central Taiyue Mountain experienced a pulsed uplift and exhumation at shallow crustal levels, which could be summarized as four rapid uplift and exhumation stages at 165~112 Ma, 103~85 Ma, 80~50 Ma and since ~28 Ma. These fission track ages show a positive correlation with the altitude, and the exhumation rate is estimated as ~8.4 m/Ma. The denudation rate

收稿日期: 2022-05-10; 修回日期: 2023-04-19; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 中国地质科学院地质研究所项目(121201102000150012-05), 山西省国土资源厅项目(CEITCL-SX-CZFW-160823)联合资助。

作者简介: 赵俊斌(1988-), 男, 工程师, 主要从事区域地质调查研究工作。E-mail: zhaojunbin@vip.qq.com。

* 通讯作者: 魏荣珠(1966-), 男, 正高级工程师, 主要从事区域地质、第四纪地质研究工作。E-mail: jzweirongzhu@126.com。

increases gradually from 14.9~18.1 m/Ma since the late early Cretaceous to 50.5~64.7 m/Ma since the Eocene, reflecting the episodic and accelerated uplift and exhumation of the central Taiyue Mountains since the late Early Cretaceous. The Mesozoic-Cenozoic uplift history of the central Taiyue Mountain has a certain consistency with the evolution history of the Taihang Mountain, Lüliang Mountain in Shanxi massif, which is also coupled with the rapid subsidence of the Fenwei rift valley.

Keywords: Taiyue mountain; apatite fission track; thermal history modelling; pulsed Mesozoic-Cenozoic exhumation; denudation rate

华北克拉通是中国大陆主要的构造单元,长久以来以其独特的演化史受到地学界,特别是构造地质学界的广泛关注与研究(孟元库等, 2015; 任星民等, 2015; 马晓军等, 2019; 王建强等, 2020; 韩伟等, 2020; 孙迪等, 2021)。华北克拉通历经中元古代到晚古生代的长期稳定后,中生代发生克拉通的破坏和地壳的再次活化,引发强烈的构造、岩浆、成矿及热事件(Zhu et al., 2012; Lin et al., 2013; 王瑜等, 2018; 翟明国, 2019; 杨进辉等, 2021; 汤艳杰等, 2021; 林伟等, 2021),其本质是华北克拉通失去稳定性(Yang et al., 2008; Wu et al., 2019)。研究认为,这些是与华北板块-古西太平洋板块的B型俯冲作用相关,也有学者认为其受到了古生代以来华北克拉通边缘地区岩石圈地幔物质组成改变的影响(汤艳杰等, 2021)。其俯冲开始于或早于早侏罗世,破坏作用的峰期为早白垩世(孙建博等, 2006; 李三忠, 2018; 朱日祥等, 2019; Liang et al., 2020; Ma et al., 2021)。此外,也有学者通过研究山西中生代盆地太原组碎屑锆石得出华北克拉通活化开始或早于晚石炭世(李洪颜等, 2009)。山西地块构造上属于华北板块(陈平等, 1997)。太岳山脉位于山西地块中南部,纵贯于太行山主脉及沁水盆地以西,吕梁山以东,构造上属于太行山支系山脉,受中生代—新生代构造控制。由于其特殊的构造位置,太岳山脉可作为研究华北克拉通地质演化,尤其是中生代—新生代以来的山西地块构造运动研究的重要窗口之一。

多年来,中国学者对山西地块(特别是太行山、吕梁山、五台山、沁水盆地等)中生代—新生代以来构造运动史或隆升剥蚀史进行了大量的研究(赵俊峰等, 2009; 李建星等, 2013; 李庶波等, 2015; 孙蓓蕾等, 2017),取得了丰硕的成果。李庶波等(2015)通过裂变径迹反演得出 50~40 Ma 及约 10 Ma 以来隆升速度加快,是太行山地区的主要隆升期;罗照华等(2006)将太行山造山过程分为早期伸展、主期挤压及晚期均

衡 3 个阶段;庆建春等(2008)通过磷灰石裂变径迹研究发现晚白垩世晚期以来五台山的隆升供经历了 74~58 Ma、46~31 Ma、15 Ma 等 3 期快速隆升,且与泰山、张宣隆起在隆升时间上存在对应关系。总体来说,多数学者均发现山西地块中生代—新生代的抬升具有多期次、幕式抬升的特点,但还存在着一些问题,如多数研究成果多集中在太行山、吕梁山主脉,但受不同构造单元差异隆升的影响,局部的成果有其片面性。因此,笔者在参与完成的山西省洪洞县测区 1:5 万区域地质调查成果的基础上,对调查工作进一步进行成果挖掘,以期对华北地块构造演化研究方面做出一些贡献。

多年来,不同学者对太岳山脉构造演化研究虽做过一些工作,但成果较为匮乏。对太岳山脉中-新生代隆升史进行系统研究,一方面对完善山西地块乃至华北地块的演化史及现代地貌的形成史有重要意义;另一方面,由于太岳山脉的隆升与周边临汾盆地、太原盆地乃至沁水盆地的沉降可能存在着盆-山耦合演化关系,对其进行研究能够帮助了解周边盆地的沉降史,进而为探索含油气盆地的形成演化及油气的富集成藏过程提供依据。

裂变径迹热年代学应用热扩散理论,将年龄解释与地质体的热演化史联系起来(冯子睿等, 2020)。磷灰石裂变径迹热年代学是基于 ^{238}U 自发裂变辐射损伤效应的一种同位素定年方法(田朋飞等, 2020),这种方法在重塑低温热历史、揭示地壳上部 3~5 km 内数百万年来的隆升构造方面显示出巨大优势。近年来,该方法已广泛应用到造山带的热史恢复、沉积物源及隆升剥蚀等构造事件的分析中(柏道远等, 2003; 黄志刚等, 2016; 张文高等, 2017; Erhan Gülyüz, 2020; Gelder et al., 2020; Sun et al., 2021)。基于此,笔者在近年来 1:20 万、1:25 万、1:5 万区域地质调查并吸收以往研究资料和成果的基础上,通过对太岳山脉中段多套地层进行系统采样,借助磷灰石裂变径迹的低温热年

代学技术,探讨太岳山脉中段中生代—新生代以来的隆升剥露过程。

1 地质背景

研究区大地构造位置处于山西地块及汾渭裂谷带中南部(图 1a),受中生代—新生代构造控制,构造轮廓清楚。构造线呈 NE—NNE 向展布,与山西省的整体构造线方位一致。自东向西分别横跨沁水板坳、太岳山板隆、临汾盆地等中、新生代的Ⅲ级构造单元(图 1b)。构造上以中生代燕山期断裂、褶皱变形、岩浆活动和新生代盆地叠加为特征。燕山运动是区内最强烈的板内造山过程,控制了基本构造轮廓。喜马拉雅运动是叠加于早先构造形迹之上的又一强烈的构造活动,最终形成了现今的盆岭构造格架。

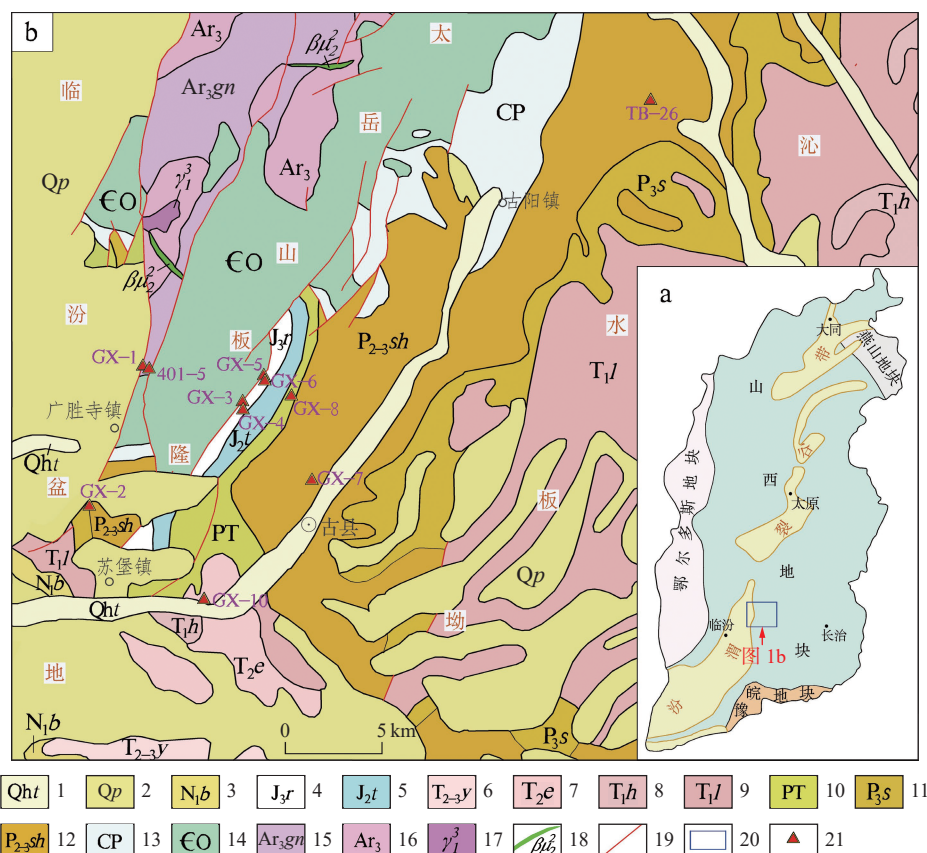
由于抬升和剥蚀,区内广泛出露下古生界寒武系、奥陶系,上古生界石炭系、二叠系,中生界三叠系、侏

罗系及新生界的新近系、第四系等。此外,在古县北西部南山底一带还出露少量新太古代黄梁片麻岩(Ar_3gn)(柴金钟等, 2019)。较全的地层为研究太岳山脉中段的构造—热事件及其抬升提供了理想场所。

2 样品采集及测试

样品均采自太岳山脉中段野外新鲜露头,共采集 11 个样品,利用 GPS 定位了取样位置及高程,采样高程为 521~1 140 m,样品岩性为砂岩、片麻岩及断层泥(表 1),采样位置见图 1。

测试工作由中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。将采集的样品经粉碎研磨、粗选后,应用重液分离法和磁选法等常规手段,分选提纯磷灰石单矿物。将磷灰石颗粒用环氧树脂滴固,然后进行研磨和抛光,使矿物内表面露出。利用 5.5 mol 的 HNO_3 溶液在室温 20 °C 下蚀刻自发径迹,并送到



- 1.沱阳组; 2.更新统; 3.保德组; 4.茹去组; 5.天池河组; 6.延长组; 7.二马营组; 8.和尚沟组; 9.刘家沟组; 10.石千峰群未分組; 11.孙家沟组; 12.石盒子组; 13.太原组、山西组并层; 14.寒武系、奥陶系; 15.新太古代片麻岩; 16.新太古界; 17.新太古代花岗岩; 18.中元古代辉绿岩; 19.断层; 20.研究区范围; 21.采样点

图1 太岳山脉中段区域地质图及采样点位置

Fig. 1 Regional geological map and sampling location of the central Taiyue mountain

表 1 太岳山脉中段磷灰石裂变径迹测试结果统计表

Tab. 1 Test results of apatite fission track in the middle part of Taiyue mountain

样品号	岩性	颗粒数 (n)	$\rho_s(10^5/\text{cm}^2)$ (Ns)	$\rho_i(10^5/\text{cm}^2)$ (Ni)	$\rho_d(10^5/\text{cm}^2)$ (Nd)	$P(\chi^2)$ (%)	中值年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	池年龄 (Ma) ($\pm 1\sigma$)	L (μm) (N)
401-5	黑云角闪二 长片麻岩	20	10.454(333)	35.348(1126)	19.35(16174)	20.4	66.0 $\pm$ 5.2	66.0 $\pm$ 4.8	13.36 $\pm$ 1.43(17)
GX-1	黑云二长片麻岩	24	12.351(1122)	37.935(3446)	18.23(15680)	23.05	68.7 $\pm$ 3.7	68.5 $\pm$ 3.4	10.94 $\pm$ 1.57(46)
GX-2	长石杂砂岩	21	11.235(745)	38.982(2585)	17.71(15680)	99.68	58.9 $\pm$ 3.3	58.9 $\pm$ 3.3	13.15 $\pm$ 1.31(29)
GX-3	断层泥	24	14.732(566)	41.072(1578)	16.66(15680)	80.4	68.9 $\pm$ 4.2	68.9 $\pm$ 4.2	12.69 $\pm$ 1.38(26)
GX-4	(断层壁)长石 砂岩	34	18.679(804)	42.214(1817)	19.63(16174)	74.99	100.1 $\pm$ 5.7	100.0 $\pm$ 5.6	11.25 $\pm$ 1.58(30)
GX-5	断层泥	22	13.536(411)	28.192(856)	19.49(16174)	0.0	123.3 $\pm$ 16.6	107.6 $\pm$ 7.6	12.30 $\pm$ 1.40(27)
GX-6	长石砂岩	20	10.719(919)	19.151(1642)	16.54(14961)	5.97	113.9 $\pm$ 7.7	106.5 $\pm$ 5.9	11.86 $\pm$ 1.86(41)
GX-7	长石英砂岩	11	9.548(259)	23.63(641)	18.54(15680)	96.5	86.3 $\pm$ 7.1	86.3 $\pm$ 7.1	10.46 $\pm$ 1.81(7)
GX-8	长石砂岩	25	17.716(412)	39.598(941)	16.87(16174)	100.0	87.0 $\pm$ 6.0	87.0 $\pm$ 6.0	12.89 $\pm$ 1.25(28)
GX-10	长石砂岩	24	12.893(716)	30.703(1705)	17.29(15680)	23.58	84.5 $\pm$ 5.2	83.7 $\pm$ 4.8	12.92 $\pm$ 1.50(34)
TB-26	长石岩屑砂岩	3	5.07(106)	20.425(427)	16.1(12945)	97.76	50.4 $\pm$ 6.2	50.4 $\pm$ 6.2	11.06 $\pm$ 2.11(5)

注： ρ_s (Ns). 自发裂变径迹密度及径迹数量； ρ_i (Ni). 诱发裂变径迹密度及径迹数量； ρ_d (Nd). 标准铀玻璃诱发径迹密度及数量； $P(\chi^2)$. 检验概率；L. 平均径迹长度；N. 样品中的封闭径迹长度数。

美国俄勒冈大学核物理实验室进行热中子照射, 在白云母片上产生诱发径迹, 并利用 40%HF 酸溶液进行蚀刻。在裂变径迹自动测试仪 (Autoscan) 镜下观察已蚀刻好的薄片, 选择与 C 轴平行的磷灰石作为研究对象, 统计其径迹数、径迹长度及 Dpar 等参数, 最后根据裂变径迹理论公式计算裂变径迹年龄。

本次测试的执行标准采用目前国际上通用的杜兰戈 (Durango) 磷灰石作为标准样品; 采用欧盟委员会认可的 IRMM 540R 作为标准玻璃; 采用国际通用的 ξ 参数进行数据校正。

研究发现, χ^2 是检验不同颗粒是否属于同一组分的重要指标 (Green, 1981; Gelder et al., 2020; Pt et al., 2020)。若 $\chi^2 > 5\%$, 则单颗粒年龄能通过检验, 即其年龄分布服从泊松分布, 为同一年龄组分, 可以使用池年龄; 若 $\chi^2 < 5\%$, 则被测颗粒为非单一组分, 或在部分退火带里时间过长, 只能使用中值年龄 (任星民等, 2015)。

3 测试结果与分析

3.1 单颗粒年龄与径迹长度分析

应用裂变径迹法进行热史分析及研究山脉抬升冷却的过程和时限, 关键是对单颗粒年龄及径迹长度的解释。裂变径迹长度分布模式可分为诱发型、无扰

动火山型、无扰动基性岩型、双峰型及混合型, 代表了“事件年龄”、“冷却年龄”和“混合年龄”等裂变径迹年龄 (Gleadow, 1986)。磷灰石裂变径迹长度和径迹年龄等测试数据见表 1。样品 GX-5 $\chi^2 < 5\%$, 未通过 χ^2 检测, 这可能是由于样品 GX-5 为断层泥, 在断层的活动过程中混合了不同地层的物质导致磷灰石来源不一致, 经历了不同的退火动力学过程。笔者选取池年龄对剩余 10 个样品进行分析。

太岳山脉中段裂变径迹年龄分布范围为 (50.4 $\pm$ 6.2)~(106.5 $\pm$ 5.9) Ma。样品的表观年龄均小于其寄主地层或其成岩年龄, 即单颗粒年龄是岩石结晶后热退火造成的, 裂变径迹年龄主要反应了早白垩世以来的构造事件 (图 2)。样品封闭径迹长度为 (10.46 $\pm$ 1.81)~(13.36 $\pm$ 1.43) μm , 远小于其初始长度 (16.3 μm), 表明样品均受到了退火作用的影响 (表 1, 图 3)。

样品 GX-1、GX-2、GX-6、GX-10 表现为非对称的单峰式, 属于未受热干扰的基岩型, 代表样品通过部分退火带的差异冷却年龄 (Gleadow, 1986)。样品 GX-3、GX-4、GX-8、401-5 为较为典型的双峰型, 其中 GX-3、GX-4 为霍山山前断裂带所采的断层泥或断层壁的砂岩。断裂的活动产生强压和高温, 在此条件下, 磷灰石裂变径迹会发生退火, 同时由于构造事件产生的高温-强压可能较低或保持时间较短, 不能使先存的径迹完全消失, 故记录了霍山山前断裂最近一次强烈

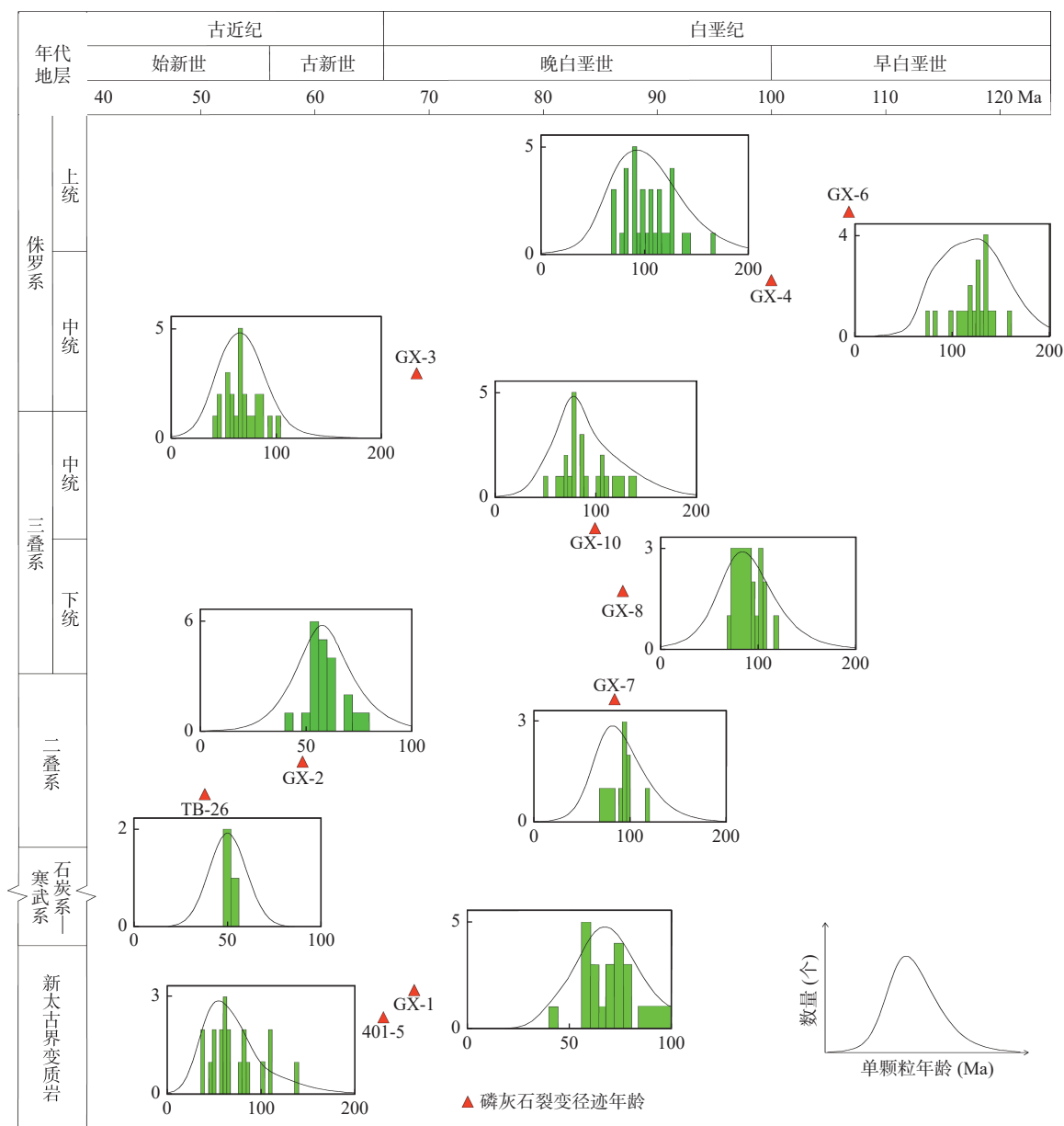


图2 太岳山脉中段磷灰石裂变径迹年龄、层位关系图

Fig. 2 The relationship between apatite fission track ages and horizons in the middle part of Taiyue mountain

活动前后形成的两部分径迹。样品 GX-7、TB-26 的径迹长度分布较为分散,可能与测量的磷灰石单颗粒较少(小于 20 个)有关。磷灰石裂变径迹的准确分析为探讨区内构造隆升事件的时间及过程提供了有利的条件。

利用磷灰石裂变径迹年龄数据绘制出年龄-层位关系分布图显示(图 2),本次磷灰石裂变径迹结果大致分为 4 类:以 J_{2-3} 样品为代表,该类磷灰石裂变径迹年龄为 $(106.5 \pm 5.9) \sim (100.0 \pm 5.6) \text{ Ma}$;以 P_3 - T_2 样品为代表,该类磷灰石裂变径迹年龄为 $(87.0 \pm 6.0) \sim (83.7 \pm 4.8) \text{ Ma}$;以太古代变质基底及断层泥为代表,裂

变径迹年龄大多为 $(68.5 \pm 3.4) \sim (66.0 \pm 4.8) \text{ Ma}$;以 P_3 样品为代表,磷灰石裂变径迹年龄为 $(58.9 \pm 3.3) \sim (50.4 \pm 6.2) \text{ Ma}$ 。可知在有限的区域内地层越新,越早先抬升到封闭温度之上,其裂变径迹年龄越老。年龄分布图以及年龄高斯拟合曲线表现为较窄的单峰式。磷灰石裂变径迹单颗粒年龄值基本小于 140 Ma。可以推测,140 Ma 前,本区前中生代地层处于磷灰石径迹完全退火带温度范围内,至约 140 Ma 才开始抬升脱离完全退火带,并经历了一个漫长而复杂的抬升过程。

样品测试结果基本与区内构造格局和地质事实

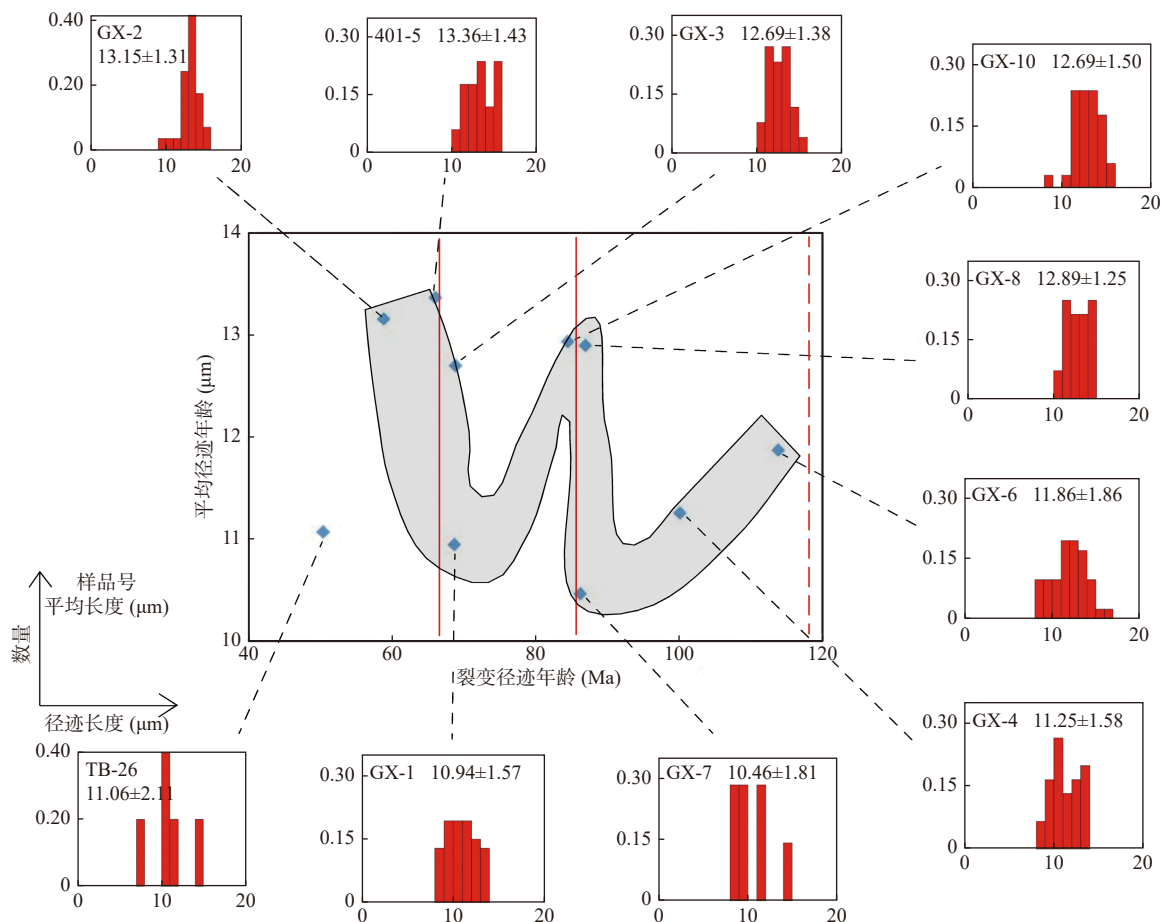


图3 太岳山脉中段磷灰石裂变径迹数据香蕉图

Fig. 3 Boomerang pattern of apatite fission track data in the middle part of Taiyue mountain

相一致。由区域沉积—埋藏史可知,山西地块自晚三叠世以来发生了大规模的抬升作用,但侏罗纪时期抬升缓慢,直至晚白垩世才开始快速隆升(魏荣珠等, 2017; 刘康等, 2019)。

3.2 平均径迹长度-年龄模式分析

磷灰石裂变径迹记录的是寄主地层在部分退火温度为约 $60 \sim (110 \pm 10)^\circ\text{C}$ 范围内所经历的热历史过程(Laslett et al., 1987)。单个径迹年龄所反应的时间不是岩石初始达到特定封闭温度($110 \pm 10^\circ\text{C}$)时径迹的形成年龄,而是磷灰石矿物经部分退火带后的表现年龄。因此,不能直接代表地质活动的准确时间。研究认为,只有具备较长径迹长度及较小标准偏差的径迹年龄所反映的时间才可能是特定地质事件的启动时间(Green, 1981; Gleadow, 1986)。

磷灰石裂变径迹年龄与对应的平均径迹长度的关系可以辨别样品是否经历了不同的冷却史(Green et al., 1986; Pt et al., 2020)。前人研究发现,构造上存在

不连续抬升的地区,差异冷却史普遍表现出平均径迹长度随年龄的减小先变短,长度标准偏差逐渐变大的趋势,随后随着年龄的继续减小,平均径迹长度变长,且长度标准偏差变小的“U”型或“凹”型特征模式,此模式反应了不同层位的样品通过部分退火带的速度及时间的差异或构造快速抬升的不同期次。这一模式通常被称为“香蕉图”或“飞镖图”(Green et al., 1986; Brown et al., 2000; 雷永良等, 2008)。

图3显示,区内10个样品的裂变径迹数据“香蕉图”呈现一个典型的双“U”型或倾斜“W”型,显示出3期相对快速的隆升过程:早于110 Ma,即早于早白垩世晚期;90~80 Ma,即晚白垩世中期;68~55 Ma,即古新世。同时表现出快速隆升样品的平均径迹长度较长,普遍大于 $12.69 \mu\text{m}$,标准偏差小于 $1.5 \mu\text{m}$;而抬升冷却速度慢的样品,平均径迹长度小于 $11.25 \mu\text{m}$,标准偏差大于 $1.57 \mu\text{m}$,最大可达 $2.11 \mu\text{m}$,说明研究区中生代—新生代以来发生了较为强烈的

隆升,且这种隆升具有多期性、间歇性。

3.3 隆升剥露时限与过程

造山带的隆升剥露过程及其机制研究是当代固体地球科学研究的前沿领域(杨巍然等, 1999), 裂变径迹法对研究造山带的隆升剥蚀史有着重要意义。按照裂变径迹退火理论, 在构造运动简单且样品所属地层空间关系不变的前提下, 高程高的样品早抬升通过古部分退火带, 裂变径迹年龄相应也大, 高程低的样品反之。对测得的裂变径迹年龄-高程(除断层泥)进行线性拟合发现, 相关系数仅为 0.04, 二者相关性较差。除去距离较远的样品 TB-26, 进行重新拟合, 相关系数可达 0.48, 隆升速率为 8.4 m/Ma(图 4), 与任星民(2015)利用高差法研究吕梁山脉(110~50 Ma)得到的隆升速率 9.6 m/Ma 基本一致, 说明在早白垩世晚期以来太岳山脉中段及吕梁山脉等地均经历了垂向隆

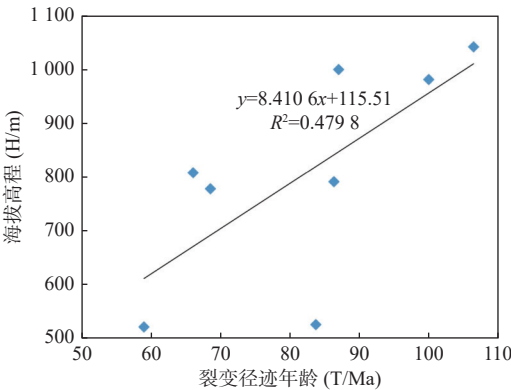


图4 太岳山脉中段磷灰石裂变径迹年龄与海拔高程的关系图

Fig. 4 Relationship between apatite fission track ages and altitudes in the middle part of Taiyue mountain

升剥蚀为主的差异隆升,同时褶皱变形较弱。这也印证了山西地块自中生代末以来由晚白垩世—古新世的弱挤压应力场转换为因软流圈物质上涌而成的伸展应力场,构造运动以垂直升降为主,与板块碰撞或其远程效应无直接关系的论断(孟元库等 2015;魏荣珠等, 2017;刘康等, 2019)。

按照裂变径迹的原理,把一定海拔高度的样品外推到年龄为零(即初始达到封闭温度)的位置,选定一个对应的古地温梯度,通过采样点的现海拔高度与年龄为零时的古海拔高度之差除裂变径迹年龄就可得岩体的抬升速率。但本次研究中,由于一些原因,笔者未能获得研究区古海拔的相关资料,故不能对抬升速率进行讨论,但可对太岳山脉中段晚白垩世以来的剥蚀情况进行研究,从侧面反应区内的隆升事件。以计算公式表达如下:

样点剥蚀量=(磷灰石封闭温度-古地表温度)/古地温梯度 (1)

剥蚀速率=样点剥蚀量/裂变径迹年龄 (2)

本次古地温梯度参考孟元库等(2015)在沁水盆地(邻区)的研究成果,古地表温度以 20℃计,参照以上公式,计算结果如下(表 2)。

分析数据发现自早白垩世晚期以来,太岳山脉中段的剥蚀速率呈现出逐渐增大的趋势。剥蚀量和剥蚀速率分别从早白垩世晚期以来的 1.67~1.82 km, 14.9~18.1 m/Ma 逐渐增加到始新世以来的 2.86 km, 50.5~64.7 m/Ma。与隆升速率(8.4 m/Ma)相比,反映出研究区早白垩世晚期以来古地表海拔有逐步降低的趋势,与白垩纪以来山西地块在伸展构造环境下地壳阶段性夷平裂解相对应。

表 2 太岳山脉中段剥蚀量、剥蚀速率统计表

Tab. 2 Statistics of denudation amount and denudation rate in the middle part of Taiyue mountain

样号	地质单元	池年龄 (Ma)	古地温梯度 (℃/100 m)	剥蚀量 (km)	剥蚀速率 (m/Ma)	速率变化趋势
GX-6	J ₃ r	106.5±5.9	5.5~6	1.67~1.82	14.9~18.1	剥蚀速率逐渐增大
GX-4	J ₂ t	100.0±5.6	5.5~6	1.67~1.82	15.8~19.3	
GX-10	T ₂ e ¹	83.7±4.8	5~5.5	1.82~2	20.6~25.3	
GX-8	T ₁ l	87.0±6.0	5~5.5	1.82~2	19.6~24.7	
GX-7	P ₃ sh ⁵	86.3±7.1	5~5.5	1.82~2	19.5~25.3	
401-5	Ar ₃ Hgn	66.0±4.8	5~5.5	1.82~2	25.7~32.7	
GX-1	Ar ₃ Hgn	68.5±3.4	5~5.5	1.82~2	25.3~30.7	
GX-2	P ₃ sh ³	58.9±3.3	3.5	2.86	46.0~51.4	
TB-26	P ₃ sh ³	50.4±6.2	3.5	2.86	50.5~64.7	

4 热历史模拟及问题讨论

由裂变径迹分析原理可知, 裂变径迹退火程度与温度密切相关。温度越高, 越有利于径迹退火。而温度与时间互补, 长时间低温、短时间高温可以使裂变径迹达到相同退火程度(杨巍然等, 1999)。因此根据裂变径迹年龄和径迹长度分布关系即可进行热史反演(Ketcham, 2005; Gelder et al., 2020; Díaz et al., 2020), 进而获得岩样更多表观年龄下更详尽的地质信息。为了进一步了解太岳山脉中段所经历的构造隆升史, 笔者利用 HeFTy 软件对岩样所经历的构造热演化进行热史模拟。模拟方法选用多元动力学退火模型(Ketcham et al., 2009), 年龄置信检测采用大于 95% (可接受) 限制。依据实验获得的磷灰石裂变径迹数据及样品所处的地质背景来确定热历史模拟的边界条件, 以 120~60 °C 作为磷灰石部分退火带的温度范围, 以池年龄和单颗粒最大年龄作为模拟的时间约束。在以上条件下来自动反演模拟与所测磷灰石裂变径

迹数据拟合较好的时间-温度曲线。

热史模拟结果(图 5)显示, 太岳山脉中段中生代—新生代隆升史大致可分为 4 期。第一期为中侏罗世末期—早白垩世晚期(165~112 Ma), 对应侏罗系、中三叠统的样品, 中侏罗世末期—早白垩世早期为燕山运动构造变形的强挤压陆内造山阶段, 华北地块遭受多向挤压变形, 区域上 165 Ma 开始进入地壳加厚挤压阶段一致(董树文等, 2007; 卫彦升等, 2022)。通过逆冲抬升和褶皱变形, 使处于深部的变质岩与表层的中生界在平面上处于相近海拔位置, 地表持续抬升, 形成山地或准高原地势, 使得山西地块中南部普遍缺失或剥蚀上侏罗统一中新统。从早白垩世早期开始, 以华北为中心的岩石圈在伸展背景下垮塌减薄, 发生大规模岩浆活动(孟元库等, 2015; 王瑜等, 2018; 董树文等, 2019), 其中 127 Ma 前研究区南侧塔儿山二长闪长斑岩的侵入为代表性事件(黄志刚等, 2016)。

通过对区内中三叠统二马营组—上侏罗统茹去组进行地层剖面测制、系统采样及薄片鉴定, 发现该剖面不同地层中岩屑组分相对单一, 均以中酸性火山岩

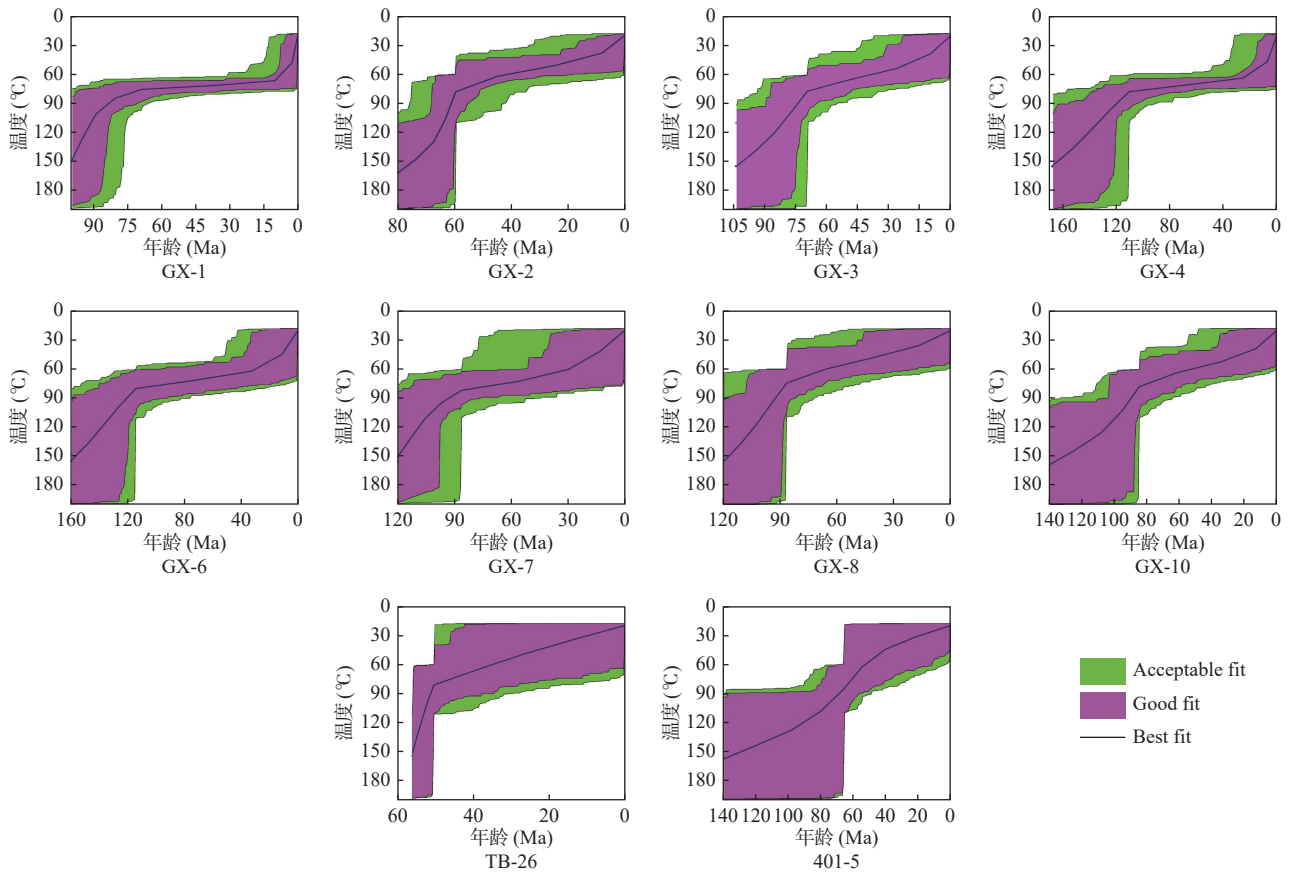


图5 磷灰石裂变径迹模拟结果汇总图

Fig. 5 Modeling results based on apatite fission track

岩屑为主,可判断不同地层具有类比的物源,但其含量具有差异性,这可能与构造隆升及剥蚀速率相关联,结合岩石碎屑成分以次棱角—次磨圆状为主,结构成熟度较低,判断为近源沉积,即可通过分析砂岩中中酸性火山岩岩屑含量变化来示踪物源及指示构造演化。结果显示,二马营组及云岗组沉积期,中酸性火山岩岩屑含量变化于10%~25%;天池河组、茹去组一、二段沉积期中酸性火山岩岩屑含量为5%~25%,且有逐渐增大的趋势;茹去组三、四段中酸性火山岩岩屑含量最高,主体可达20%~50%,推测二马营组—茹去组岩石沉积期,中酸性火山岩出露区受构造抬升影响,不断遭受剥蚀,持续而较稳定的提供沉积介质(图6)。特别是茹去组三、四段沉积期暨晚侏罗世早期,从火山岩碎屑异常增加可反应出该区处于快速隆升、剥蚀阶段。

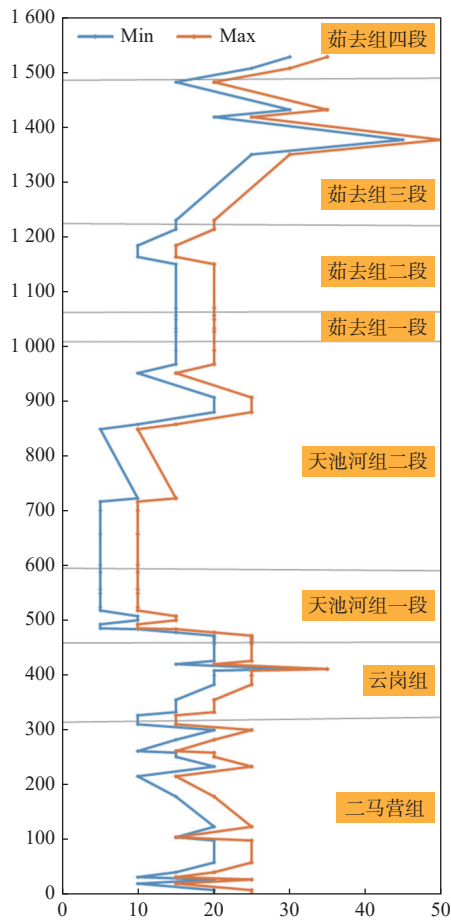


图6 茹去村中三叠统二马营组—上侏罗统茹去组中酸性火山岩岩屑含量垂向变化特征

Fig. 6 Vertical variation characteristics of debris content of intermediate acid volcanic rocks from middle Triassic Ermaying formation to upper Jurassic Ruqu formation in Ruqu village

第二期为早白垩世末期—晚白垩世中期(103~85 Ma),对应中—下三叠统、上二叠统、新太古界、断层泥等样品,该时期山西地块在伸展构造机制下,晋北地区(阳高、左云、天镇等)发育伸展型断陷盆地(赵祯祥等, 2004; 卫彦升等, 2022),其沉积组合在垂向上以砾岩—泥岩交替发育为特征,指示山体经历了周期性快速抬升剥露过程。而包括太岳山脉在内的大鄂尔多斯盆地发生区域整体抬升剥露而未接受沉积,吕梁山脉、太行山发生伸展造山运动,霍山山前断裂带进入了活动期。

第三期为晚白垩世末期—始新世早期(80~50 Ma),对应上二叠统、新太古界样品,晚白垩世末期,在持续的岩石圈不均衡调整作用下,山西地块大地构造演化进入了山体整体隆升期。在弱挤压的应力体制下,先存NW和NE向断裂复活,发生山体整体隆升不再接受沉积,以继承性断裂和地壳间歇性抬升为主导,形成一系列NW和NE向地堑、地垒式断裂组合(卫彦升等, 2022)。古新世早期山西地块仍整体处于隆起状态,遭受剥蚀、夷平作用,北台期夷平面开始形成,古新世晚期—始新世早期上地幔开始上隆,在燕山期区域性背斜隆起区产生了一系列呈NE向斜列的剪切拉张带(赵祯祥等, 2004),构成燕山运动最晚一期构造形迹。本次构造转换主要表现为印度板块由SW向NE的碰撞挤压,叠加在活化的华北陆块之上, NNE向构造开始形成。

第四期为渐新世中期以后(28 Ma~今),几乎所有的样品均有体现。研究发现当温度低于60℃,即抬升到磷灰石部分退火带顶界之上后,磷灰石中裂变径迹不再退火,后期的快速隆升事件无法模拟(庆建春等, 2008),故该期隆升事件不做过多讨论。但研究区分布的新生界最老地层保德组底部堆积了一套分选磨圆较差的近源砂砾石堆积(柴金钟等, 2019),其低界年龄为8~10 Ma(邓涛等, 2004; Pan et al., 2011),侧面反映出太岳山脉在中新世濩河期快速隆升遭受剥蚀。结合太岳山脉北部太原盆地ZK03孔全孔取心古地磁研究成果,太原盆地的形成时间要早于10 Ma(魏荣珠等, 2021),反映了太岳山脉中新世以来的强烈隆升与临汾盆地、太原盆地的快速沉降彼此耦合。同时区内形成了唐县期夷平面和黄土丘陵地貌单元,奠定了研究区现今构造格局的基础。结合1:5万区调过程中对区内及邻区河流阶地的研究成果认为,汾河及沁河I、II级河流阶地的光释光年龄分别为

1.53~6.39 ka、11.63~26.98 ka, II级阶地面高出 I 级阶地面 8~20 m, 也印证了研究区第四纪以来区内发生了较强烈的间歇性抬升(柴金钟等, 2019)。

与上文中平均径迹长度-年龄模式分析结论进行比对发现, 二者有很好的对应关系。其中 165~112 Ma 的冷却年龄与上文中对“香蕉图”分析得出的第一期快速隆升年龄早于 110 Ma 一致; 103~85 Ma 的冷却年龄与第二期快速隆升年龄 90~80 Ma 相对应; 而 80~50 Ma 的冷却年龄与第三期快速隆升年龄 68~55 Ma 基本一致。第四期 28 Ma 以来的冷却年龄由于没有相应年轻的裂变径迹年龄的样品。因此, 在平均径迹长度-年龄模式分析中没有体现。

中生代—新生代以来, 不论是岩石圈的差异演化、构造体制转换、还是地貌反转, 位于华北板块中部的山西地块总是处于过渡带的位置, 优越的地理位置说明了该区在华北陆块演化研究中的重要地位。区内主要发育太行山、吕梁山、太岳山等山系, 前人对各

山系及周边盆地中生代以来的构造运动、热演化史及盆山耦合等做了大量的工作, 吴中海等(2001)、赵俊峰等(2009、2015)、李建星等(2015)、李庶波等(2015)、孙蓓蕾等(2017)等从不同角度, 采用不同手段, 特别是裂变径迹年代学方法对山西地块及邻区的构造隆升与演化进行了深入的研究。不同学者由于研究区域、地层、构造部位及技术手段等不尽相同, 最终结论也略有差异, 但总体发现前人对太行山、吕梁山等中生代以来的研究成果与本文得出的太岳山四期快速隆升认识中的一期或者几期一致, 且在新近纪以来有强烈隆升的特点(图 7)。这说明山西地块在中侏罗世以来持续受到燕山、喜马拉雅运动的影响, 发生了强烈的幕式造山过程, 太行山、吕梁山、太岳山脉等相继隆起, 是区域性、整体性的构造事件, 与汾渭裂谷系的快速沉降相耦合, 致使区内及邻区普遍缺失白垩系、古近系, 形成了中新统与下伏侏罗系间的区域不整合面。

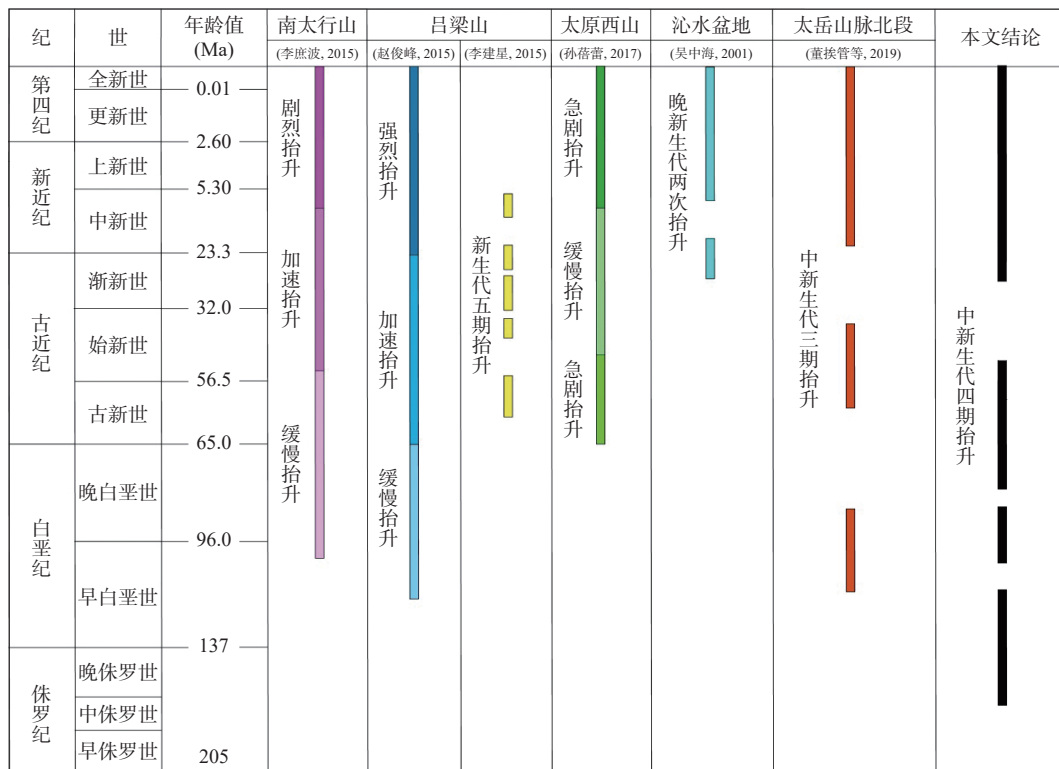


图7 山西地块部分山脉、盆地中生代—新生代以来隆升演化特征对比图

Fig. 7 Comparison of uplift evolution characteristics of some mountains and basins in Shanxi massif since Mesozoic-Cenozoic

华北板块晚中生代以来发生的广泛的陆内造山与构造-岩浆事件是由特定的板块动力学背景所决定的。研究表明中、晚侏罗世开始, 华北板块周缘的三大洋(古太平洋、蒙古鄂霍茨克洋及班公湖-怒江洋)

板块开始向华北板块俯冲碰撞, 形成东部的古太平洋沟弧盆体系、北部的蒙古鄂霍茨克碰撞造山带和西部的班公湖-怒江汇聚构造带, 这些陆缘板块构造带向板块内部的能量传播, 形成了包括研究区在内的规模宏

大的隆升区和陆内造山带(董树文等, 2019)。对于山西地块, 区内新生代褶皱、断裂构造特别发育, 新构造运动活跃, 太行山、吕梁山、太岳山等山脉与汾渭裂谷系相间分布。山脉和盆地代表了地貌垂向的起伏, 是构造运动在地表的直接反映, 山地的抬升-剥蚀和盆地的沉降-沉积是一种对立统一的地质作用过程。

5 结论

(1) 太岳山脉中段磷灰石的裂变径迹年龄为 $(50.4 \pm 6.2) \sim (106.5 \pm 5.9)$ Ma, 封闭径迹长度为 $(10.46 \pm 1.81) \sim (13.36 \pm 1.43)$ μm 。有限区域内裂变径迹年龄与海拔高程呈正相关关系, 隆升速率为 8.4 m/Ma。剥蚀速率从早白垩世晚期以来的 14.9~18.1 m/Ma 逐渐增加到始新世以来的 50.5~64.7 m/Ma, 反应出太岳山脉中段早白垩世晚期以来的隆升剥蚀史具多期次, 总体上加速隆升剥蚀的特点, 古地表海拔有逐步降低的趋势, 与白垩纪以来山西地块在伸展构造环境下地壳阶段性夷平裂解相对应。

(2) 太岳山脉中段中生代—新生代共经历了 4 期快速隆升冷却事件: 165~112 Ma、103~85 Ma、80~50 Ma 及 28 Ma 以来。这一隆升过程与前人对太行山、吕梁山等山系的隆升史研究成果具有一定的一致性, 说明山西地块在中侏罗世末期以来发生了强烈的、区域性的幕式造山运动, 太行山、吕梁山、太岳山脉等相继隆起。

(3) 中新世中晚期以来, 受构造作用控制, 太岳山脉快速隆升, 罗云山断裂、霍山断裂及其周缘的纵、横张性破裂发生正断陷, 临汾盆地形成, 反映了太岳山脉的强烈隆升与临汾盆地甚至汾渭裂谷系的快速沉降彼此耦合。

参考文献(References):

- 柏道远, 孟德保, 刘耀荣, 等. 青藏高原北缘昆仑山中段构造隆升的磷灰石裂变径迹记录[J]. *中国地质*, 2003, 30(3): 240–246.
- BAI Daoyuan, MENG Debao, LIU Yaorong, et al. Apatite fission track records of the tectonic uplift of the central segment of the Kunlun Mountains on the northern margin of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 2003, 30(3): 240–246.
- 柴金钟, 高宇辉, 王瑞军, 等. 1: 5 万洪洞县测区区域地质调查报告[R]. 太原: 山西省地质调查院, 2019.
- 陈平, 柴东浩. 山西地块石炭纪铝土矿沉积地球化学研究[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 1997.
- CHEN Ping, CHAI Donghao. Sedimentary Geochemistry of Carboniferous Bauxite Deposits in Shanxi Massif[M]. Taiyuan: Shanxi Science and Technology Press, 1997.
- 邓涛, 王伟铭, 岳乐平, 等. 新近系保德阶建阶研究新进展[J]. *地层学杂志*, 2004, 28(1): 41–47.
- DENG Tao, WANG Weiming, YUE Leping, et al. New advances in the Establishment of the Neogene Baode stage[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2004, 28(1): 41–47.
- 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. *地质学报*, 2007, 81(11): 1449–1461.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LONG Changxiang, et al. Jurassic Tectonic Revolution in China and New Interpretation of the Yanshan Movement[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(11): 1449–1461.
- 董树文, 张岳桥, 李海龙, 等. “燕山运动”与东亚大陆晚中生代多板块汇聚构造——纪念“燕山运动”90周年[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49: 913–938.
- DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LI Hailong, 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*, 2019, 49: 913–938.
- 董挨管, 杜艳伟, 杨俊才, 等. 1: 5 万张兰镇测区区域地质调查报告[R]. 太原: 山西省地质调查院, 2019.
- 冯子睿, 袁万明, 袁二军. 青海省都兰东北部多金属矿床锆石裂变径迹年代学分析[J]. *中国矿业*, 2020, 29(S1): 284–286+293.
- FENG Zirui, YUAN Wanming, YUAN Erjun. Zircon fission track dating evidence in polymetallic ore district, north-eastern Dulan, Qinghai province[J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(S1): 284–286+293.
- 韩伟, 李玉宏, 刘溪, 等. 鄂尔多斯盆地东南南召地区中生代以来的构造演化研究——来自低温热年代学的证据[J]. *地质学报*, 2020, 94(10): 2834–2843.
- HAN Wei, LI Yuhong, LIU Xi, et al. Tectonic evolution since the Mesozoic of the Nanzhao area in southeast of the Ordos Basin: evidence from low-temperature thermal chronology[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(10): 2834–2843.
- 黄志刚, 任战利, 高龙刚. 鄂尔多斯盆地东南缘白垩纪以来构造演化的裂变径迹证据[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(10): 3753–3764.

- HUANG Zhigang, REN Zhanli, GAO Longgang. Evidence from detrital zircon and apatite fission track for tectonic evolution since Cretaceous in southeastern margin of Ordos basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(10): 3753–3764.
- 雷永良, 钟大赉, 季建清, 等. 东喜马拉雅构造结更新世两期抬升—剥露事件的裂变径迹证据[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(4): 584–590.
- LEI Yongliang, ZHONG Dalai, JI Jianqing, et al. Fission Track Evidence for two Pleistocene uplift-exhumation Events in the eastern himalayan Syntaxis[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 584–590.
- 李洪颜, 徐义刚, 黄小龙, 等. 华北克拉通北缘晚古生代活化: 山西宁武-静乐盆地上石炭统太原组碎屑锆石 U-Pb 测年及 Hf 同位素证据[J]. *科学通报*, 2009, 54(5): 632–640.
- LI Hongyan, XU Yigang, HUANG Xiaolong, et al. Activation of northern margin of the North China Craton in Late Paleozoic: Evidence from U-Pb dating and Hf isotopes of detrital zircons from the Upper Carboniferous Taiyuan Formation in the Ningwu-Jingluo basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, 54(5): 632–640.
- 李建星, 刘池洋, 岳乐平, 等. 吕梁山新生代隆升的裂变径迹证据及其隆升机制探讨[J]. *中国地质*, 2015, 42(4): 960–972.
- LI Jianxing, LIU Chixiang, YUE Leping, et al. Apatite fission track evidence for the Cenozoic uplift of the Lüliang Mountains and a discussion on the uplift mechanism[J]. *Geology in China*, 2015, 42(4): 960–972.
- 李建星, 岳乐平, 刘池洋, 等. 中新世以来吕梁山及邻区构造—沉积演化[J]. *地层学杂志*, 2013, 37(1): 93–100.
- LI Jianxing, YUE Leping, LIU Chiyang, et al. The Tectonic-Sedimentary Evolution of the Lüliang Mountains since the Miocene[J]. *Journal of Stratigraphy*, 2013, 37(1): 93–100.
- 李庶波, 王岳军, 张玉芝, 等. 南太行山新生代隆升过程: 磷灰石裂变径迹证据[J]. *大地构造与成矿学*, 2015, 39(3): 84–93.
- LI Shubo, WANG Yuejun, ZHANG Yuzhi, et al. Meso-Cenozoic Uplifting of South Taihang Mountains: Constraints from Apatite Fission Track Data[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2015, 39(3): 84–93.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造—岩浆响应[J]. *科学通报*, 2018, 63(16): 1550–1593.
- LI Sanzhong, SUO Yanhui, LI Xiyao, et al. Mesozoic plate subduction in West Pacific and tectono-magmatic response in the East Asian ocean-continent connection zone[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(16): 1550–1593.
- 林伟, 曾纪培, 孟令通, 等. 伸展构造与华北克拉通破坏——花岗岩磁组构和变质核杂岩的构造分析[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(9): 1558–1593.
- LIN Wei, ZENG Jipei, MENG Lingtong, et al. Extensional tectonics and North China Craton destruction: Insights from the magnetic susceptibility anisotropy (AMS) of granite and metamorphic core complex[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 64(9): 1557–1589.
- 刘康, 魏荣珠, 续世超. 山西隆起区燕山期构造变形特征[J]. *中国地质调查*, 2019, 6(2): 58–67.
- LIU Kang, WEI Rongzhu, XU Shichao. Structure deformation characteristics of Shanxi uplift area during Yanshan movement period[J]. *Geological Survey of China*, 2019, 6(2): 58–67.
- 罗照华, 魏阳, 辛后田, 等. 太行山中生代板内造山作用与华北大陆岩石圈巨大减薄[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 52–63.
- LUO Zhaohua, WEI Yang, XIN Houtian, et al. The Mesozoic intra-plate orogeny of the Taihang Mountains and the thinning of the continental lithosphere in North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(6): 52–63.
- 马晓军, 梁积伟, 李建星, 等. 鄂尔多斯盆地中西部中生代构造抬升及演化[J]. *西北地质*, 2019, 52(4): 127–136.
- MA Xiaojun, LIANG Jiwei, LI Jianxing, et al. Meso-cenozoic Tectonic Uplift and Evolution of Central and Western Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2019, 52(4): 127–136.
- 孟元库, 汪新文, 李波, 等. 华北克拉通中部沁水盆地热演化史与山西高原新生代岩石圈构造演化[J]. *西北地质*, 2015, 48(2): 159–168.
- MENG Yuanku, WANG Xinwen, LI Bo, et al. Thermal Evolution History of Qinshui Basin in the Middle of North China Craton and Mesozoic-Cenozoic Lithosphere Tectonic Evolution in Shanxi Plateau[J]. *Northwestern Geology*, 2015, 48(2): 159–168.
- 庆建春, 季建清, 王金铎, 等. 五台山新生代隆升剥露的磷灰石裂变径迹研究[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 384–392.
- QING Jianchun, JI Jianqing, WANG Jinduo, et al. Apatite fission track study of Cenozoic uplifting and exhumation of Wutai Mountain, China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(2): 384–392.
- 任星民, 朱文斌, 朱晓青, 等. 山西吕梁山地区中—新生代隆升剥露过程: 磷灰石裂变径迹证据[J]. *地球科学与环境学报*, 2015, (4): 63–73.
- REN Xingmin, ZHU Wenbin, ZHU Xiaoqing, et al. Mesozoic-Cenozoic Uplift-exhumation History in Lüliangshan Area of Shanxi:

- Evidences from Apatite Fission Track[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2015, (4): 63–73.
- 孙蓓蕾, 曾凡桂, 刘超, 等. 太原西山煤田新生代隆升史的磷灰石裂变径迹约束[J]. *地质学报*, 2017, 91(01): 43–54.
- SUN Beilei, ZENG Fangui, LIU Chao, et al. Cenozoic Uplift History of the Xishan Coalfield and Constraints from Apatite Fission Track Dating[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(01): 43–54.
- 孙迪, 李秋根, 陈隽璐, 等. 山西五台绿岩带柏枝岩组条带状铁建造(BIFs)成因及其环境意义[J]. *西北地质*, 2021, 54(4): 16–41.
- SUN Di, LI Qiugen, CHEN Junlu, et al. The Origin and Environmental Significance of Banded Iron Formations in the Baizhiyan Formation of Wutai Greenstone Belt, Shaanxi Province[J]. *Northwestern Geology*, 2021, 54(4): 16–41.
- 孙建博, 陈刚, 章辉若, 等. 鄂尔多斯盆地中生代构造事件的峰值年龄及其沉积响应[J]. *西北地质*, 2006, 39(3): 91–96.
- SUN Jianbo, CHEN Gang, ZHANG Huiruo, et al. Peak Ages and Sedimentary Responses of the Mesozoic-Cenozoic Tectonic Events in Ordos Basin[J]. *Northwestern Geology*, 2006, 39(3): 91–96.
- 汤艳杰, 英基丰, 赵月鹏, 等. 华北克拉通岩石圈地幔特征与演化过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 64(9): 1492–1503.
- TANG Yanjie, YING Jifeng, ZHAO Yuepeng, et al. Nature and secular evolution of the lithospheric mantle beneath the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 64(9): 1492–1503.
- 田朋飞, 袁万明, 杨晓勇. 热年代学基本原理、重要概念及地质应用[J]. *地质论评*, 2020, 66(4): 975–1004.
- TIAN Pengfei, YUAN Wanming, YANG Xiaoyong. The basics, essential concepts and geological applications of thermochronology[J]. *Geological Review*, 2020, 66(4): 975–1004.
- 王建强, 刘池洋, 赵红格, 等. 鄂尔多斯盆地西南部三叠纪末抬升剥蚀事件及热年代学记录[J]. *岩石学报*, 2020, 36(4): 238–251.
- WANG Jianqiang, LIU Chiyang, ZHAO Hongge, et al. Uplift and exhumation events and thermochronological constraints at the end of Triassic in southwestern Ordos Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(4): 238–251.
- 王瑜, 孙立新, 周丽云, 等. 燕山运动与华北克拉通破坏关系的讨论[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 48(5): 499–514.
- WANG Yu, SUN Lixin, ZHOU Liyun, et al. Discussion on the relationship between the Yanshanian Movement and cratonic destruction in North China[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2018, 48(5): 499–514.
- 魏荣珠, 李好斌, 徐朝雷, 等. 对山西隆起区中生代构造演化的认识[J]. *中国地质调查*, 2017, 4(1): 24–34.
- WEI Rongzhu, LI Haobin, XU Chaolei, et al. Review on Mesozoic tectonic evolution in Shanxi uplift[J]. *Geological Survey of China*, 2017, 4(1): 24–34.
- 魏荣珠, 杨鹏生, 魏云峰, 等. 1:5万清徐县测区区域地质调查报告[R]. 太原: 山西省地质调查院, 2021.
- 卫彦升, 冯志强, 闫涛, 等. 华北板块中部中生代构造演化—以山西为例[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(4): 1127–1152.
- WEI yansheng, FENG Zhiqiang, YAN Tao, et al. Mesozoic Tectonic Evolution of the Central North China Craton: A Case Study from the Shanxi Province[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(4): 1127–1152.
- 吴中海, 吴珍汉. 鄂尔多斯、沁水盆地晚新生代隆升—剥蚀历史[J]. *地质科技情报*, 2001, 20(3): 16–20.
- WU Zhonghai, WU Zhenghan. Ordos and Qinshui Basin History of Uplift-Denudation[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2001, 20(3): 16–20.
- 杨进辉, 许蕾, 孙金凤, 等. 华北克拉通破坏与岩浆—成矿的深部动力学过程[J]. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(9): 1401–1419.
- YANG Jinhui, XU Lei, SUN Jinfeng, et al. Geodynamics of decratonization and related magmatism and mineralization in the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2021, 64(9): 1409–1427.
- 杨巍然, 王国灿, 李长安. 造山带中—新生代隆升作用构造年代学研究新进展[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(4): 19–22.
- YANG Weiran, WANG Guocan, LI Chang'an. Progresses of the study on the Tectono-Chronology of the Mesozoic-Cenozoic uplifting in orogenic Belt[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1999, 18(4): 19–22.
- 翟明国. 华北克拉通构造演化[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(5): 722–745.
- ZHAI Mingguo. Tectonic Evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Geomechanics*, 2019, 25(5): 722–745.
- 张文高, 陈正乐, 蔡琳博, 等. 西天山白垩纪隆升—剥露的裂变径迹证据[J]. *地质学报*, 2017, 91(3): 510–522.
- ZHANG Wengao, CHEN Zhengle, CAI Linbo, et al. Cretaceous Uplifting-Exhumation Process of west Tianshan: Evidence from Apatite Fission Track[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(3): 510–522.
- 赵俊峰, 刘池洋, 王晓梅, 等. 吕梁山地区中—新生代隆升演化探讨[J]. *地质论评*, 2009, 55(5): 663–672.

- ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, WANG Xiaomei, et al. Uplifting and Evolution Characteristics in the Lüliang Mountain and Its Adjacent Area during the Meso-Cenozoic[J]. *Geological Review*, 2009, 55(5): 663–672.
- 赵俊峰, 刘池洋, Nigel MOUNTNEY, 等. 吕梁山隆升时限与演化过程研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(10): 1427–1438.
- ZHAO Junfeng, LIU Chiyang, Mountney N, et al. Timing of uplift and evolution of the Lüliang Mountains, North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2015, 45(10): 1427–1438.
- 赵祯祥, 杜晋锋. 山西大地构造划分、成矿旋回与演化[R]. 太原: 山西省地质调查院, 2004.
- 朱日祥, 徐义刚. 西太平洋板块俯冲与华北克拉通破坏[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(9): 1346–1356.
- ZHU Rixiang, XU Yigang. The subduction of the west Pacific plate and the destruction of the North China Craton[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(9): 1346–1356.
- Brown R, Gleadow A. Fission track thermochronology and the long-term denudational response to tectonics[M]. *Geomorphology and Global Tectonics*, 2000: 57–75.
- Díaz DV, Omodeo-Salé S, Ulyanov A, et al. Insights into the Thermal History of North-Eastern Switzerland-Apatite Fission Track Dating of Deep Drill Core Samples from the Swiss Jura Mountains and the Swiss Molasse Basin[J]. *Geosciences (Switzerland)*, 2020, 11(10): 1–21.
- Ma Q, Xu Y G. Magmatic perspective on subduction of Paleo-Pacific plate and initiation of big mantle wedge in East Asia[J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 213: 1–11.
- Erhan Gülyüz. Apatite fission track dating of the Beypazar Granitoid: insight for the inception of collision along the Northern Neotethys, Turkey[J]. *Geodinamica Acta*, 2020, 32(1): 1–10.
- Gelder I, Willingshofer E, Andriessen P, et al. Cooling and Vertical Motions of Crustal Wedges Prior to, During, and After Lateral Extrusion in the Eastern Alps: New Field Kinematic and Fission Track Data from the Mur - Mürz Fault System[J]. *Tectonics*, 2020, 39(3): 1–26.
- Gleadow A J W. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1986, 94(4): 405–415.
- Green, Paul F. On the thermo-tectonic evolution of Northern England: evidence from fission track analysis[J]. *Geological Magazine*, 1986, 123(05): 493–506.
- Green P F. A new look at statistics in fission track dating[J]. *Nuclear Tracks*, 1981, 5: 77–86.
- Ketcham R A. Forward and Inverse Modeling of Low-Temperature Thermochronometry Data[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2005, 58(1): 275–314.
- Ketcham R A, Donelick R A, Balestrieri M L, et al. Reproducibility of apatite fission-track length data and thermal history reconstruction[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 284(3–4): 504–515.
- Laslett G M, Green P F, Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis[J]. *Chemical Geology*, 1987, 65(1): 1–13.
- Liang C, Neubauer F, Liu Y, et al. Diachronous onset and polyphase cooling of the Taili-Yiwulüshan metamorphic core complex corridor, NE China, and its relationships to the formation of adjacent extensional basins[J]. *Gondwana Research*, 2020, 102: 271–298.
- Lin W, Faure M, Chen Y, et al. Late Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Yiwulüshan massif, NE China and its bearing on the evolution of the Yinshan–Yanshan orogenic belt[J]. *Gondwana Research*, 2013, 23(1): 54–77.
- Pan B, Hu Z, Wang J, et al. A magnetostratigraphic record of landscape development in the eastern Ordos Plateau, China: Transition from Late Miocene and Early Pliocene stacked sedimentation to Late Pliocene and Quaternary uplift and incision by the Yellow River[J]. *Geomorphology*, 2011, 125(1): 225–238.
- Pt A, Xy B, Wy A. Formation and preservation of the Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit, Inner Mongolia: Insights from evidences of petrogenesis, geochemistry and apatite fission track dating - ScienceDirect[J]. *Solid Earth Sciences*, 2020, 1–18.
- Sun Y, Kohn B P, Boone S C, et al. Burial and Exhumation History of the Lujing Uranium Ore Field, Zhuguangshan Complex, South China: Evidence from Low-Temperature Thermochronology[J]. *Minerals*, 2021, 11(2): 1–24.
- Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, et al. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2019, 47(1): 173–195.
- Yang J H, Wu F Y, Wilde S A, et al. Mesozoic decratonization of the North China block[J]. *Geology*, 2008, 36(6): 467–470.
- Zhu G, Jiang D, Zhang B, et al. Destruction of the eastern North China Craton in a backarc setting: Evidence from crustal deformation kinematics[J]. *Gondwana Research*, 2012, 22(1): 86–103.