

鲁西隆起蒙山晚白垩世-新生代抬升的裂变径迹证据*

唐智博¹, 李理¹, 时秀朋¹, 胡秋媛¹, 宫红波², 王清华³

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院, 山东 东营 257061;

2. 胜利油田分公司物探研究院, 山东 东营 257022;

3. 胜利油田分公司河口采油厂, 山东 东营 257000)

摘要: 研究晚白垩世以来蒙山的抬升对全面认识鲁西隆起区的构造演化具有重要的意义。对采自蒙山山脉的6个岩石样品进行了磷灰石/锆石裂变径迹测年及热历史模拟分析。分析结果表明蒙山自晚白垩世开始快速抬升, 经历了70~43 Ma和32~20 Ma两个快速抬升阶段, 并且蒙山的抬升表现出加速抬升的特征。晚白垩世以来蒙山的快速抬升与其毗邻的泰山有着较好的对应关系, 蒙山的整体抬升略早于泰山, 并且鲁西隆起的抬升表现出由南向北的抬升序列。蒙山的两期快速抬升事件很好地对应了济阳拗陷在这两个时期经历的构造沉降和区域隆升过程, 表明新生代蒙山的快速抬升与济阳拗陷的构造演化有着良好的隆拗耦合关系。

关键词: 裂变径迹; 隆拗耦合; 晚白垩世-新生代; 蒙山

中图分类号: P542.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)02-0127-07

Fission Track Thermochronology of Late Cretaceous-Cenozoic Uplifting Events of the Mengshan Mountain in the Western Shandong Rise, China

TANG Zhibo¹, LI Li¹, SHI Xiupeng¹, HU Qiuyuan¹, GONG Hongbo², WANG Qinghua³

(1. Institute of Geo-resources and Information, China University of Petroleum, Shandong Dongying 257061, China;

2. Geophysical Research Institute of Shengli Oilfield Branch Co., Dongying 257022, China; Hekou Oil Production Plant of Shengli Oilfield Branch Co., Dongying 257000, China)

Abstract: Study on exhumation/uplifting of the Mengshan Mountain since the Late Cretaceous is important for the comprehensive understanding of tectonic evolution of the Western Shandong Rise. Six adamelite samples from the Mengshan Mountain were systematically collected to carry out apatite/zircon fission track dating and time-temperature thermal history modeling. The results indicate that the Mengshan Mountain experienced a relatively rapid exhumation/uplifting since the Late Cretaceous. Two rapid upliftings occurred during 70~43 Ma and 32~20 Ma with an accelerated process. The rapid uplifting events of the Mengshan Mountain since the Late Cretaceous were slightly earlier than that of the Taishan Mountain (northern Mengshan Mountain) and coupled well with it on the whole. The uplifting polarity of the Western Shandong Rise was formed from south to north considering its half-graben structural style. The two uplifting periods of the Mengshan Mountain were consistent with two distinct subsidence/cooling processes occurred in the Jiyang Depression adjacent to the Western Shandong Rise. There is a good uplifting/subsiding coupling relationship between the rapid uplifting of the Mengshan Mountain and the subsidence of the Jiyang Depression.

Key words: fission track; uplifting/subsiding coupling; Late Cretaceous-Cenozoic; Mengshan Mountain

* 收稿日期: 2010-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40772132)

作者简介: 唐智博(1982年生), 男, 硕士; 通讯作者: 李理; E-mail: lilywmwys@upc.edu.cn

自 20 世纪 60 年代裂变径迹测年方法已开始应用到地质学领域, 20 世纪 80 年代中期以来, 测试技术以及在构造地质学领域的研究应用日趋完善^[1-9]。

近年来, 利用裂变径迹测年方法对伸展山体的隆升进行研究的工作也逐渐在华北克拉通东部展开, 并且取得了一些研究成果^[10-13]。已有的研究表明, 鲁西隆起北部泰山 62 Ma 开始整体抬升, 而南部蒙山的抬升仅限于 3 个样品, 导致鲁西隆起一系列半地槽的构造演化序列有待于进一步的研究。本文运用裂变径迹测年方法, 对系统采自蒙山的 6 个不同高程的岩石样品进行分析, 并对裂变径迹数据

进行时间-温度热史的模拟, 试图提取系统的蒙山隆升演化信息, 对比蒙山抬升与北部泰山抬升的关系, 为进一步揭示鲁西隆起不同伸展断块的演化关系提供时间框架, 对济阳拗陷的伸展构造研究也有一定的意义。

1 地质背景及样品采集

鲁西隆起位于华北克拉通东部, 东以郯庐断裂带山东段沂沭断裂潍坊-临沂一线为界, 西以兰考-聊城断层(兰聊断层)为界, 北抵齐河-广饶断层(齐广断层), 南达丰县-沛县断层(丰沛断层)(图 1)。鲁西隆起主要出露早前寒武纪侵入岩

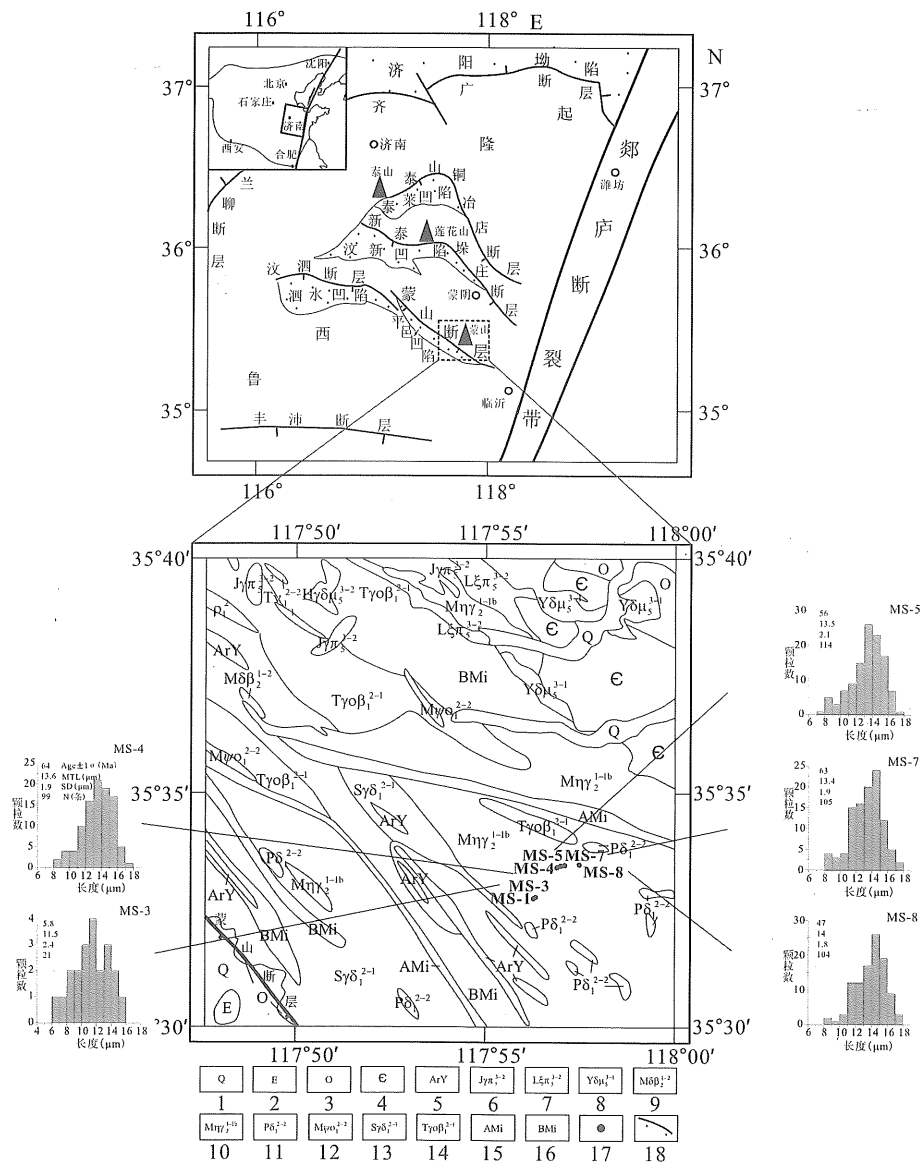


图 1 鲁西隆起构造简图和蒙山地区地质简图及样品位置

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Western Shandong Rise, geological map of the studied area and sample location
 1-第四系; 2-古近系; 3-奥陶系; 4-寒武系; 5-太古宙泰山岩群; 6-花岗岩斑; 7-正长斑岩; 8-闪长玢岩;
 9-黑云母闪长岩; 10-中粗粒二长花岗岩; 11-变闪长岩; 12-角闪石岩; 13-片麻状花岗闪长岩; 14-片麻状英
 云闪长岩; 15-眼球状混合岩; 16-条带状混合岩; 17-采样点; 18-断层

和变质杂岩,包括太古宇泰山岩群、TTG 岩系和古元古代造山花岗岩。古生代,鲁西隆起整体表现为升降运动。印支运动以后,鲁西隆起在 NW-SE 向挤压作用下,形成一系列 NW 或 EW 向张性断裂,如齐广断层、泰山-铜冶店断层、新泰-垛庄断层和蒙山断层等一些南倾断层。晚侏罗世-早白垩世,古太平洋板块向 NNW 方向的俯冲消减,鲁西隆起受到 SN 方向的拉伸作用,沿着早期形成的断裂,地层掀斜形成弧形断陷盆地,如泰莱凹陷,蒙阴凹陷和平邑凹陷等。到新生代古新世,受印欧板块的碰撞、太平洋板块的俯冲和郯庐断裂左旋走滑运动的影响,鲁西隆起开始快速抬升,在 NWW 向拉伸应力作用下,断陷盆地继续发育。总体来说,中、新生代,构造运动强烈,隆起区的山脉表现为大幅度的隆升,山脉间的弧形凹陷则表现为差异沉降。

蒙山位于山东省中部,位于东经 $117^{\circ}35'$ - $118^{\circ}20'$ 和北纬 $35^{\circ}10'$ - 38° 之间,跨平邑、蒙阴、费县和沂南 4 县,北西走向,绵亘 75 km,总面积 $1\ 125\text{ km}^2$,蒙山最高峰海拔达 1 150 m。剖面上呈单斜山,平面上呈向北凸出的弧形,蒙山山脉南界为断层面 SW 倾的蒙山断层,倾角 50° - 60° ,断层沿 $\text{NW}300^{\circ}$ 方向沿伸,与其南侧的平邑凹陷呈断面

接触,北界为较缓的斜坡,与北侧的凹陷呈超覆接触。断层上盘发育古生界寒武系、奥陶系,及中生界和新生界古近系,其中中生界包括下-中侏罗统坊子组、中-上侏罗统三台组、下白垩统蒙阴组和西洼组 and 上白垩统固城组和卞桥组底部,古近系包括卞桥组、常路组和朱家沟组,下盘为太古宇。研究区发育多期岩浆侵入,侵入岩呈 NW 向展布,晚太古代泰山期侵入岩主要有片麻状英云闪长岩和片麻状花岗闪长岩,早元古代傲徕山期侵入岩主要有中粗粒二长花岗岩,中生代燕山期侵入岩主要有花岗斑岩和正长斑岩。蒙山山体结构为泰山群变质岩系,核心部分为混合花岗岩。使用 GPS 仪器进行位置及高程定位,从 980 ~ 590 m 自上而下,由南西向北东,共采集 6 个高程不同、重约 1 ~ 2 kg 的样品,岩性为中粗粒二长花岗岩,取样点如图 1。

2 裂变径迹测试结果分析

测试矿物为磷灰石和锆石,采用外探测器法^[2]。本文获得磷灰石和锆石的 Zeta 常数分别为 389.4 ± 19.2 和 85.4 ± 4 。裂变径迹测试结果见表 1。裂变径迹分析中单颗粒年龄的 χ^2 检验值 P (χ^2) 大于 5%,表明样品单颗粒径迹年龄的差别属于统计误差,具有单一的年龄平均值,样品颗粒

表 1 蒙山磷灰石、锆石裂变径迹数据¹⁾

Table 1 Apatite/zircon fission track test data of the Mengshan Mountain

样品号	矿称	经纬度	高程 m	颗粒数	径迹密度/ $(10^5 \cdot \text{cm}^{-2})$		中子 注量 $(10^5 \cdot \text{cm}^{-2})$	检验 概率 %	年龄 Ma ($\pm 1\sigma$)	平均长度 μm ($\pm 1\sigma$)	铀含量 $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$
					自发径迹	诱发径迹					
MS-1	磷灰石	$35^{\circ}32.75'N$ $117^{\circ}56.24'S$	980	9	2.551 (158)	7.638 (473)	8.184 (5 688)	96.7	53 ± 6		10.59 ± 0.57
MS-3	磷灰石	$35^{\circ}32.76'N$ $117^{\circ}56.25'S$	883	32	0.737 (245)	15.891 (5 280)	8.100 (5 688)	0	5.8 ± 0.8	11.5 ± 2.4 (21)	24.85 ± 0.72
MS-4	磷灰石	$35^{\circ}33.38'N$ $117^{\circ}56.87'S$	751	28	3.291 (516)	8.391 (1 316)	8.433 (5 688)	91.6	64 ± 5	13.6 ± 1.9 (99)	10.92 ± 0.65
MS-5	磷灰石	$35^{\circ}33.42'N$ $117^{\circ}56.99'S$	695	28	1.182 (604)	3.293 (1 683)	8.017 (5 688)	99.1	56 ± 4	13.5 ± 2.1 (114)	5.05 ± 0.47
MS-7	磷灰石	$35^{\circ}33.44'N$ $117^{\circ}57.09'S$	660	28	0.835 (831)	2.009 (1 999)	7.851 (5 688)	80.5	63 ± 4	13.4 ± 1.9 (105)	5.62 ± 0.48
MS-8	磷灰石	$35^{\circ}33.51'N$ $117^{\circ}57.47'S$	590	28	1.216 (576)	4.162 (1 972)	8.267 (5 688)	92.6	47 ± 3	14.0 ± 1.8 (104)	6.15 ± 0.59
MS-3	锆石	$35^{\circ}32.76'N$ $117^{\circ}56.25'S$	883	7	170.869 (1 898)	15.034 (167)	6.195 (4 484)	97.6	294 ± 28		86.43 ± 0.17

1): 检验概率 $P > 5\%$ 时, 年龄值采用池年龄; 检验概率 $P < 5\%$ 时, 采用中值年龄; 表中括号内数字均为径迹条数。

径迹年龄可以视为同组年龄, 即裂变径迹计年体系启动是单一成因的, 表示样品经过了单一的冷却过程, 除 MS-3 样品外都通过了检验; $P(\chi^2)$ 小于 5%, 表明所测单颗粒年龄属于不同年龄组^[3]。

磷灰石裂变径迹年龄分布范围在 (5.8 ± 0.8) ~ (64 ± 5) Ma 之间 (除特别说明外, 其标准偏差均为 1σ) 年龄分布不连续, 大致分为 64 ~ 47 Ma, 5.8 Ma 两组。样品 MS-4、MS-5、MS-7 和 MS-8 平均围限裂变径迹长度 (MTL) 为 13.4 ~ 14.0 μm , 标准偏差 (SD) 为 1.8 ~ 2.1 μm , 裂变径迹长度均小于原始径迹长度 $(16.3 \pm 0.9 \mu\text{m})$, 但仍然较长, 而且所有样品的视年龄都远远小于其原岩-摩天岭中粗粒二长花岗岩生成年龄 (约 219 Ma)^[14], 由此判断山体的隆升导致岩石样品经历过退火。径迹长度分布直方图 (图 1) 显示所选样品属于单峰型^[1], 表明样品并没有经历过复杂的热历史, 可能一直处于单调冷却的过程中。

磷灰石的裂变径迹年龄和平均径迹长度关系可以判断样品是否经历了不同程度的冷却历史^[4,6-7]。本文裂变径迹数据长度-年龄图呈凹面向上的 boomerang 图形^[4]或香蕉图^[8] (图 2), 64 ~ 5.8 Ma 间随年龄的下降径迹长度在约 47 Ma 左右出现了一次波动, 由于 47 Ma 的样品平均长度 $14.0 \pm 1.8 \mu\text{m}$ 与 64 Ma 的样品平均长度 $13.6 \pm 1.9 \mu\text{m}$ 相差不大, 因此认为 64 ~ 47 Ma 期间属于同一抬升期, 5.8 Ma 属于另一期抬升。

3 热史模拟

运用随机模拟方法可以限定裂变径迹的热史特征。模拟方法选用 Laslett 等^[5]的裂变径迹封闭扇形模型。在一定的时间和温度范围内, 采用随机的方法预测热史过程中裂变径迹的年龄和长度分布。长度分布拟合采用的是 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验^[15-17], K-S 表示径迹长度模拟值与实测值的吻合程度, 年龄采用 95% \pm 的置信度限制, 模拟过程重复 10 000 次, 用以寻找与所测裂变径迹参数拟合得较好的热史。选取年龄和长度的统计最小值来评价模拟的结果^[17], 当最小值大于 0.05 时, 且所有的置信检测统计超过 95%, 模拟被称为可接受, 当在统计范围内最小值大于 0.5 时, 该模拟被称为高质量的。

考虑区域构造发展史, 根据已有的数据, 蒙山裂变径迹的封闭年龄小于 65 Ma。因此, 热史开始的参数选为接近该年龄, 温度为高温 (65 ± 20 Ma, 110 ± 20 $^{\circ}\text{C}$)。待定的路径由时间-温度框的

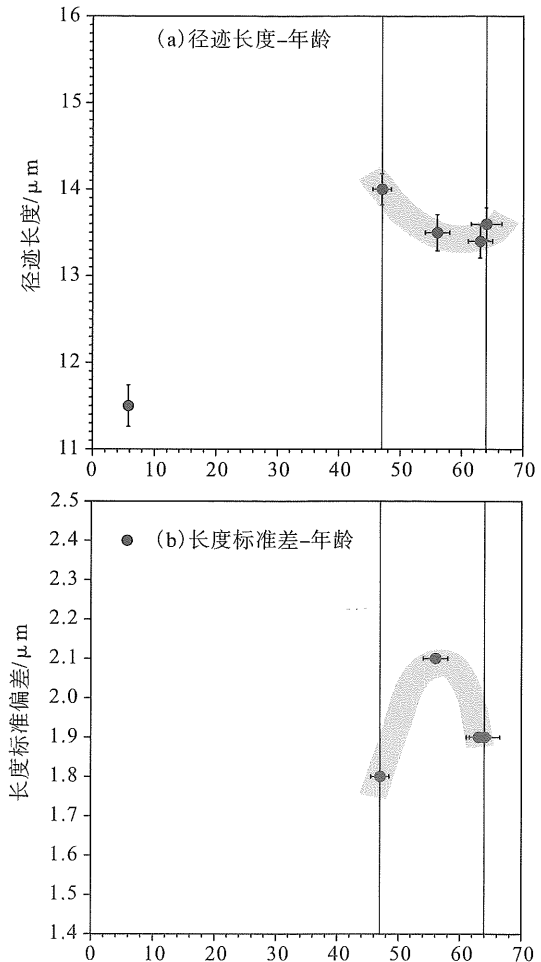


图 2 蒙山磷灰石裂变径迹数据的径迹长度 ($\pm 1\sigma$) - 年龄 ($\pm 1\sigma$) 和标准差 - 年龄 ($\pm 1\sigma$) 图解

Fig. 2 Diagrams of MTL ($\pm 1\sigma$) - FTA ($\pm 1\sigma$) (a) and SD - FTA ($\pm 1\sigma$) (b) of the Mengshan Mountain

随机点所限制, 再将这些点用直线连接起来。这些线段可以是直线, 也可以断成折线, 以满足路径中的最大变化或“干扰”。这样做并非给裂变径迹资料额外增加一些细节, 而是充分考虑到热史的复杂性^[18]。随后又对时间 20 ± 10 Ma 和温度 60 ± 20 $^{\circ}\text{C}$ 范围进行了约束, 用其中随机选取的点来重建热史。每个样品模拟时, 模拟结果的长度拟合度 (K-S 检验) 和年龄拟合度都远大于 0.5, 表明模拟结果是可靠和可信的。图 3a 显示蒙山岩体样品的模拟结果整体呈阶梯状, 并且样品首次进入磷灰石部分退火带底部 (110 ± 10 $^{\circ}\text{C}$) 的时间约 70 ~ 58 Ma, 冷却转折的节点分别出现在 70 ~ 45 和 32 ~ 23 Ma。

模拟结果分析如下: ① MS-4 模拟表明蒙山约 70 Ma 开始进入退火带, 蒙山开始快速抬升, 至 58 Ma 抬升稳定, 约 32 Ma 又有一次快速抬升 (图 3a₁); ② MS-5 模拟表明约 59 Ma 开始进入退火

带, 大约 59 ~ 45 Ma 为快速抬升阶段, 约 27 Ma 又有一次快速抬升 (图 3a₂); ③MS - 7 模拟表明蒙山大约 67 Ma 进入退火带, 开始快速抬升, 67 ~ 49 Ma 为快速抬升阶段, 大约 29 Ma 又有一次快速抬升 (图 3a₃); ④MS - 8 模拟表明蒙山有两期快速抬升, 一次是 43 Ma 左右, 另一次是 24 Ma 左右 (图 3a₄)。总体上, 从模拟分析可以看出, 蒙山自晚白垩世开始抬升, 有两期快速抬升: 一期是在 70 ~ 43 Ma, 第二期在 32 ~ 20 Ma。

磷灰石中的径迹分布通常表现出不同的长、短径迹组合。较长的径迹对应较年轻的年龄组分, 较

短的径迹则可能与较早期的冷却事件相关联^[1]。利用 TASC 程序编制的径迹长度年龄谱图^[19], 其优势在于其保留了所有来自长度直方图的原始热历史信息, 且经过长度校正后年龄分布谱线能够更容易地揭示出冷却事件的时限, 长度年龄谱曲线的转折点就反映冷却变动的事件。长度年龄谱 (图 3b) 指示出早期冷却启动的年龄约在 80 ~ 57 Ma, 随后, 70 ~ 40 Ma 样品记录了冷却事件的发生时间, 同时, MS - 4 样品揭示了最近一期冷却事件约发生在 22 Ma 左右 (图 3b₁)。

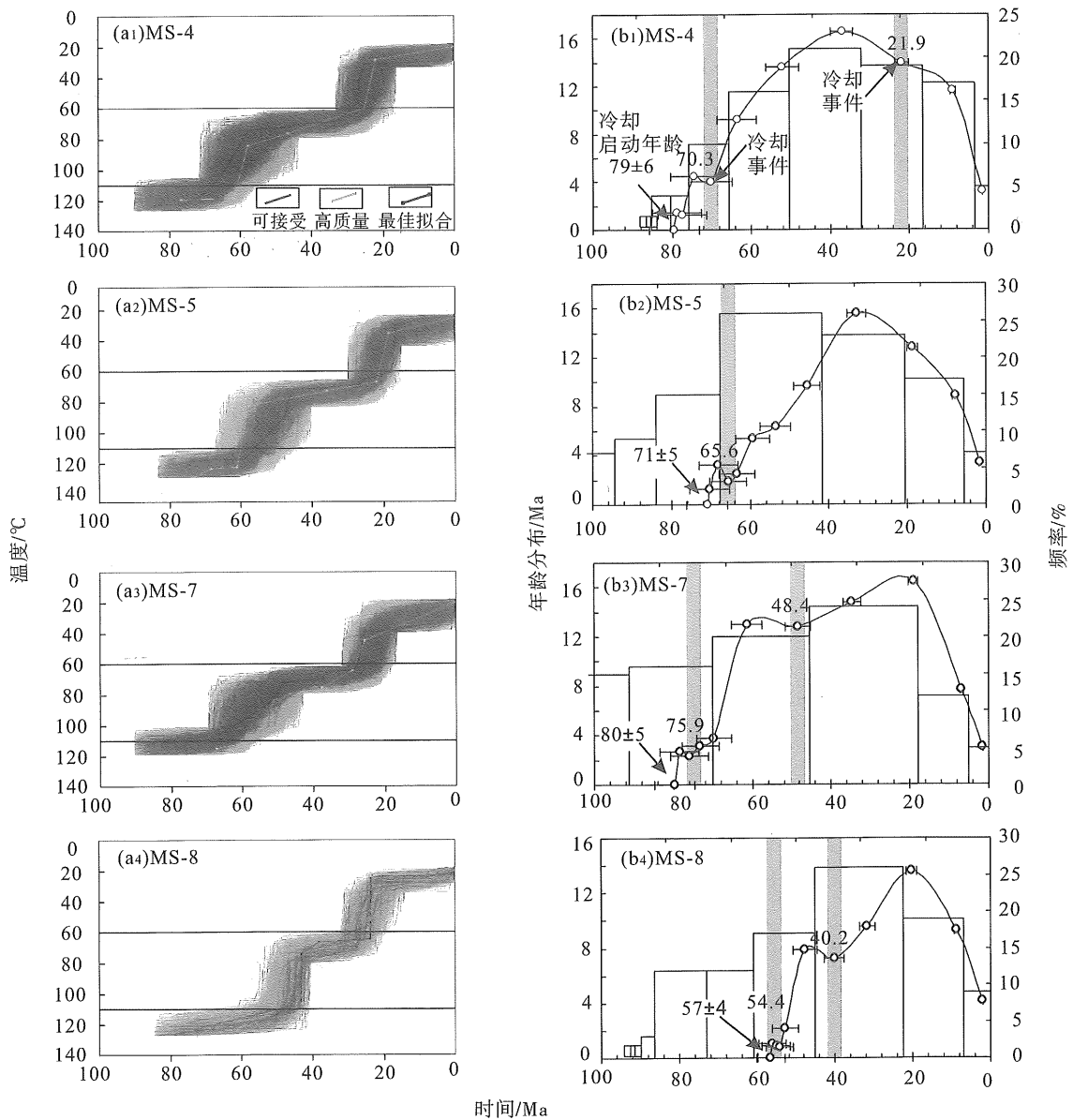


图 3 蒙山磷灰石裂变径迹 $t-T$ 热史反演模拟 (图 a 据文献 [5]) 和径迹长度年龄谱图 [图 b 据文献 [9]]
 Fig. 3 The AFT $t-T$ inverse modeling and track age spectrum of apatite fission track analyses of the Mengshan Mountain

鲁西隆起区的地温梯度采用 $36\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^{[20]}$, 依据热史模拟的结果, 晚白垩世—中始新世, 蒙山岩体由于山体抬升冷却了 $35\sim 45\text{ }^{\circ}\text{C}$, 抬升大约 $1\ 000\sim 1\ 200\text{ m}$, 快速抬升对应的时间范围大约 $15\sim 20\text{ Ma}$, 平均抬升速率大约 $0.05\sim 0.08\text{ mm/a}$ 。渐新世—早中新世, 岩体冷却 $25\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, 蒙山抬升大约 $700\sim 1\ 100\text{ m}$, 快速抬升对应的时间范围大约 5 Ma 左右, 平均抬升速率大约 $0.14\sim 0.2\text{ mm/a}$ 。表 2 是利用外推法计算的蒙山抬升速率^[21], 磷灰石的封闭温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}^{[22]}$, 地表年平均温度为 $14\text{ }^{\circ}\text{C}^{[20]}$, 可以看出, 抬升速率分为 2 个阶段。64~47 Ma 为相对慢速阶段, 5.8 Ma 抬升速率升至最大。锆石的封闭温度为 $230\pm 25\text{ }^{\circ}\text{C}^{[22]}$, 地温梯度和地表年平均地温同前文, 计算得出蒙山 294 Ma 时的抬升速率为 0.02 mm/a 。外推法计算的抬升速率与依据模拟结果计算的抬升速率数值上比较相近, 因此, 模拟结果是比较可靠的。

表 2 蒙山抬升速率表

Table 2 Uplifting speed of the Mengshan Mountain

项目	MS-1	MS-3	MS-4	MS-5	MS-7	MS-8
高程/m	980	883	751	695	660	590
年龄/Ma	53	5.8	64	56	63	47
速率/($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)	0.07	0.61	0.05	0.06	0.05	0.07

综上所述, 蒙山经历了前新生代的缓慢抬升和晚白垩世以来的快速抬升过程。晚白垩世以来蒙山经历了两期快速抬升, 并且蒙山山体的抬升是一个逐渐加速的过程。

4 讨论和结论

本文应用裂变径迹测年方法和热史模拟方法, 揭示出蒙山晚白垩世以来的两期快速抬升: $70\sim 43\text{ Ma}$ 和 $32\sim 20\text{ Ma}$, 其平均抬升速率分别为 $0.05\sim 0.08\text{ mm/a}$ 和 $0.14\sim 0.2\text{ mm/a}$, 由此可见, 晚白垩世以来蒙山表现出加速抬升的特征。

从时间框架上, 新生代蒙山的快速抬升与其毗邻的泰山有着较好的对应关系。泰山的抬升时期分别为 $62\sim 53$ 、 $44\sim 37$ 和 $23\sim 20\text{ Ma}^{[11]}$, 而蒙山的分别为 $70\sim 43\text{ Ma}$ 和 $32\sim 20\text{ Ma}$ 。由此可见, 晚白垩世以来, 蒙山的整体抬升略早于泰山。从沉积上, 蒙山断层控制的平邑凹陷沉积了晚白垩世固城组砖红色泥岩, 而其北部汶泗断层控制的蒙阴凹陷以及泰山—铜冶店断层控制的莱芜凹陷缺乏晚白垩

世沉积, 沉积的是古近纪巨厚的常路组砂砾岩^[23-25]。可以推断, 蒙山断层在晚白垩世开始活动, 其北部的汶泗断层和泰山—铜冶店断层于古新世中期开始活动。也就是说, 晚白垩世以来鲁西隆起具有由南向北的抬升序列, 这为构造物理模拟方法得出的控凹断裂的演化规律提供了时间依据^[26]。

毗邻鲁西隆起的济阳拗陷在孔店组—沙四段沉积期间 ($65\sim 43\text{ Ma}$) 为快速的构造沉降阶段, 构造沉降量最大可达 $2\ 000\text{ m}^{[27-28]}$, 这个时期的快速沉降大致对应鲁西隆起晚白垩世—中始新世 ($70\sim 43\text{ Ma}$) 的快速抬升。济阳拗陷的沉降特征分析结果表明, 新生代以来, 断陷期东营凹陷拉张量最大, 惠民凹陷次之, 车镇凹陷最小, 最大沉降中心由南西向北东逐渐迁移^[29]。 $70\sim 43\text{ Ma}$ 期间鲁西隆起的整体快速隆升与济阳拗陷大幅度沉降有着成因上的联系, 并且济阳拗陷的沉降中心由西南向东北的迁移和油气分布由南向北的迁移与鲁西隆起由南向北的抬升序列具有一致性。蒙山发生在 $32\sim 20\text{ Ma}$ 的快速抬升事件和泰山发生在 $23\sim 20\text{ Ma}$ 的抬升事件, 很好地对应了济阳拗陷东营凹陷在 $30\sim 20\text{ Ma}$ 比较明显的冷却过程, 如东营组末期凹陷遭受抬升剥蚀, 剥蚀厚度约 $200\text{ m}^{[30]}$, 说明新生代蒙山的抬升具有区域性。综上所述, 蒙山和泰山的抬升有着较好的对应关系, 并且与邻区拗陷的沉降有着较好的耦合关系,

鲁西隆起和济阳拗陷是中国华北克拉通东部两个重要的次级构造单元, 上述隆—拗关系在深部应该受控于岩石圈动力学机制, 而西太平洋板块相对于欧亚板块的聚敛作用可能是一种重要的因素。西太平洋板块晚白垩世以来的聚敛速率有几个变化时期: ①晚白垩世最高, 为 $120\sim 140\text{ mm/a}$; 到新生代迅速下降, 至始新世 ($55.8\sim 33.9\text{ Ma}$) 降至最小, 聚敛速率为 $30\sim 40\text{ mm/a}$; ②渐新世到中新世初期 ($33.9\sim 20.4\text{ Ma}$) 板块聚敛速率开始回升至 $70\sim 95\text{ mm/a}$; 中新世早—中期 ($20.4\sim 11.6\text{ Ma}$) 板块聚敛速率再次下降为 $65\sim 70\text{ mm/a}$, ③晚中新世以来又升至 $100\sim 110\text{ mm/a}^{[31]}$ 。可以看出, 太平洋板块相对于欧亚板块聚敛速率减小的两个时期大致对应蒙山乃至鲁西隆起的快速抬升和济阳拗陷的快速沉降, 因此, 两大板块晚白垩世以来的聚敛速率变化是蒙山抬升和隆—拗耦合关系存在的深部背景。

致谢: 中国地质大学(北京)袁万明先生完成样品的裂变径迹测试, 并且对裂变径迹年代学的分析提出了建设性的意见, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] GLEADOW A J W, DUDDY I R, GREEN P F, et al. Confined fission track lengths in apatite: a diagnostic tool for thermal history analysis [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 1986, 94: 405 - 415.
- [2] GLEADOW A J W, DUDDY I R. Natural long-term annealing experiment for apatite [J]. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 1981(5): 169 - 174.
- [3] GALBRAITH R F. On statistical models for fission track counts [J]. *Math Geol*, 1981, 13: 471 - 488.
- [4] GREEN P F. On the thermo-tectonic evolution of Northern England: evidence from fission track analysis [J]. *Geological Magazine*, 1986, 123: 493 - 506.
- [5] LASLETT G M, GREEN P F, DUDDY I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis [J]. *Chem Geol*, 1987, 65: 1 - 13.
- [6] O'SULLIVAN P B, FOSTER D A, KOHN B P, et al. Multiple postorogenic denudation events: An example from the eastern Lachlan fold belt, Australia [J]. *Geology*, 1996, 24(6): 563 - 566.
- [7] GLEADOW A J W, KOHN B P, BROWN R W, et al. Fission track thermotectonic imaging of the Australian continent [J]. *Tectonophysics*, 2002, 349: 5 - 21.
- [8] GALLAGHER K, BROWN R P. The onshore record of passive margin evolution [J]. *Journal of the Geological Society*, 1997, 154(3): 451 - 457.
- [9] YUAN W M, CARTER A, DONG J Q, et al. Mesozoic-Tertiary exhumation history of the Altai Mountains, northern Xinjiang, China: New constraints from apatite fission track data [J]. *Tectonophysics*, 2006, 412: 183 - 193.
- [10] 李理, 钟大赉. 泰山新生代抬升的裂变径迹证据 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(2): 457 - 464.
- [11] 李理, 钟大赉, 时秀朋. 鲁西隆起和济阳拗陷新生代隆坳耦合关系 [J]. *地质学报*, 2007, 81(9): 1 215 - 1 228.
- [12] 王振兰, 王金铎, 季建清, 等. 鲁西隆起与济阳拗陷箕状断陷形成时代研究 [J]. *石油学报*, 2008, 29(2): 206 - 212.
- [13] 杨伟, 朱文斌, 郭随平, 等. 鲁西南地区新生代盆山耦合作用的裂变径迹证据 [J]. *原子能科学技术*, 2008, 42(6): 557 - 560.
- [14] 王世进, 张增奇, 梁帮启, 等. 中华人民共和国区域地质调查说明书(新泰幅) [R]. 济南: 山东省地质矿产局, 1990.
- [15] PRESS W H, FLANNERY B P, TEUKOLSKY S A & VETTERLING W T. Numerical recipes of in C: The art of scientific computing [M]. UK: Cambridge University Press, 1988.
- [16] WILLETT S D. Inversion modeling of fission tracks in apatite: A controlled search method [J]. *American Journal of Sciences*, 1997, 297: 939 - 969.
- [17] KETCHAM A R. Forward and inverse modeling of low-temperature thermochronometry data [J]. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2005, 58: 275 - 314.
- [18] KETCHAM A R. Effects of allowable complexity and multiple chronometers on thermal history inversion [J]. *Gelchim Cosmochim Acta*, 2003, 67: A213.
- [19] BELTON D X. TASC: Theory and application of the track age spectra calculation [D]. Melbourne: The University of Melbourne, 2005: 1 - 32.
- [20] 宋明水. 济阳拗陷中新生代成熟度曲线及其在剥蚀量计算中的运用 [J]. *高校地质学报*, 2004, 10(1): 121 - 127.
- [21] 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据 [J]. *科学通报*, 1995, 40(16): 1497 - 1501.
- [22] GALLAGHER K. Evolving temperature histories from apatite fission-track data [J]. *Earth and Planet Sci Lett*, 1995, 136: 421 - 435.
- [23] 李守军, 郑德顺, 蔡进功, 等. 鲁北和鲁西南地区古近纪盆地沉积特征与控制因素探讨 [J]. *地质论评*, 2003, 49(3): 225 - 232.
- [24] 李守军, 洪铭, 徐永梅, 等. 关于鲁西侏罗纪-白垩纪岩石地层单位使用之我见 [J]. *地质论评*, 2007, 53(1): 6 - 10.
- [25] 关绍曾, 庞其清, 萧宗正. 鲁西南莱芜、蒙阴、平邑盆地早第三纪地层的划分和对比 [J]. *化工矿产地质*, 1997, 19(3): 149 - 161.
- [26] 时秀朋, 李理, 胡秋媛, 等. 鲁西隆起晚中生代以来北西向正断层特征及物理模拟 [J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2010, 49(2): 17 - 25.
- [27] 邱楠生, 李善鹏, 曾溅辉. 渤海湾盆地济阳拗陷热历史及构造-热演化特征 [J]. *地质学报*, 2004, 78(2): 263 - 269.
- [28] 邱楠生, 苏向光, 李兆影, 等. 济阳拗陷新生代构造-热演化历史研究 [J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1127 - 1135.
- [29] 郭兴伟, 施小斌, 丘学林, 等. 济阳拗陷新生代构造沉降特征 [J]. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2006, 30(3): 6 - 11.
- [30] 郭随平, 施小斌, 王良书. 胜利油区东营凹陷热史分析-磷灰石裂变径迹证据 [J]. *石油与天然气地质*, 1996, 17(1): 32 - 36.
- [31] NOTHRUP C J, ROYDEN L H, BURCHFIELD B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology*, 1995, 23(8): 719 - 722.