

泰山新生代抬升的裂变径迹证据*

李理^{1,2} 钟大赉¹

LI Li^{1,2} and ZHONG DaLai¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国石油大学地球资源与信息学院, 山东 257061

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Institute of Earth Science and Information, China University of Petroleum, Shandong 257061, China

2005-04-08 收稿, 2006-01-16 改回.

Li L and Zhong DL. 2006. Fission track evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(2) 457–464

Abstract Apatite/zircon fission track thermochronology from 16 samples in the Taishan Mountain, Luxi uplifting reveals the uplifting time and speed for the region after late Proterozoic time. The data show that the Taishan Mountain was characterized by slow uplifting speed from late Proterozoic to late Cretaceous and rapid uplifting after Cenozoic by at least three rapid uplifting events, during 48Ma (early Eocene), 44 ~ 37Ma (mid-late Eocene) and 23 ~ 20Ma (early Miocene). These relatively rapid uplifting events in Cenozoic coupled well with the tectonic evolution of the Jiyang Depression. The uplifting events imply that there was a union basin of the Jiyang depression Lu xi uplifting before the time of 44Ma, and the union basin was separated by the 44 ~ 37Ma’s uplifting events of the Taishan Mountain. Moreover, it controlled the forming of the hydrocarbon rocks of the Jiyang depression. These Cenozoic uplifting events are also corresponded with the tectonic evolution of the Bohai Bay Basin and its peripheral mountains.

Key words fission track uplifting speed, Taishan Mountain, Cenozoic

摘 要 对来自鲁西隆起泰山的 16 个样品进行了磷灰石/锆石裂变径迹分析。分析结果表明泰山在前新生代(晚元古代到晚白垩世)抬升缓慢,新生代以来抬升速度明显加快,共经历了 48Ma、44 ~ 37Ma 和 23 ~ 20Ma 三个抬升阶段,其中后两个阶段为快速抬升时期。新生代泰山快速抬升与济阳坳陷构造演化有着良好的隆-坳耦合关系,暗示 44Ma 之前鲁西隆起与济阳坳陷是一个相连的联合盆地,44 ~ 37Ma 泰山的抬升将二者分开,抬升事件进而控制了坳陷中烃源岩的形成。新生代泰山抬升与渤海湾盆地及其周边山系的构造演化也存在对应关系。

关键词 裂变径迹; 抬升速率; 泰山; 新生代

中图法分类号 P542.2

1 前言

作为华北平原东缘一个十分醒目的地貌单元,有“五岳之首”之称的泰山,以主峰玉皇顶 1524m 的海拔高度,傲然挺立于齐鲁大地,与四周平原和低山丘陵形成强烈对比。泰山出露的岩石主要是形成于前寒武纪的变质杂岩和侵入岩,关于现今泰山地貌格局的形成时间,从其周缘的地质记录中虽然有讨论,但没有确切数据的支持和论证(葛肖虹,1989;吕朋菊等,1995;张明利等,2000;李万程,1998;宋奠南,

2001;赵文智等,2000;车自成等,2002),更没有明确的抬升史。在大地构造上,泰山属于华北板块鲁西隆起的一部分,其北部紧邻济阳坳陷(图 1),是我国第二大油田——胜利油田的产油区。按照伸展盆地-伸展山岭耦合的思路(马杏垣等,1983;叶洪等,1983;刘国栋等,1988;刘和甫等,2000),隆起和坳陷应是同一应力场作用下的产物(张自桓,1995;胡见义等,2001;何斌,2001;张功成等,2001)。泰山隆升与新生代坳陷沉降之间应有一定的关系。胡见义等(2001)认为,新生代时期鲁西隆起的抬升和济阳坳陷的沉降是同时发生的,并推断鲁西隆起控制了济阳坳陷—渤中坳陷各凹陷的

* 中科院知识创新工程重大项目 KZCX-SW-18-04 资助。

第一作者简介:李理,女,1967 年 1 月生,副教授,构造地质学专业, E-mail :lily@mail. hdpu. edu. cn

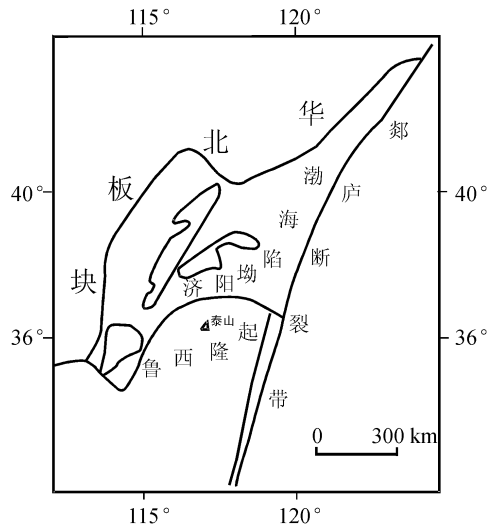


图1 泰山位置图
Fig. 1 Location of the Taishan Mountain

发育、主要烃源岩和主要油气藏层系的形成。但由于缺乏隆起的时限和抬升速率的约束,无法从时间‘耦合’的角度对比隆-坳关系。作为一个较为成熟的方法,裂变径迹测年用于山体隆升的研究已有许多报道(Foster DA and Gleadow AJW 1991; 丁林等, 1995; Yuan WM, *et al.*, 2003; 周祖翼等, 2003), 本文运用该方法对泰山的前寒武纪的岩石进行年代学研究,以初步揭示现今泰山抬升的时间和速率,进而进行

隆-坳演化关系研究,并为进一步揭示济阳坳陷乃至渤海湾盆地的演化特征提供时间框架。

2 样品采集

泰山位于山东省中部,泰山最南缘的泰山山前断裂将泰山分为两部分,断裂北侧为泰山主体,主要出露前寒武纪泰山变质杂岩,向北主要为寒武系—奥陶系灰岩、页岩,以升降为主,形成起伏的山地;山前断裂南侧沉降,形成泰安-莱芜盆地 2000 ~ 3000m 巨厚的第三系碎屑岩及第四系沉积物。使用 GPS 仪器进行定位,气压计测高程,从 1524m 的玉皇顶而下,共采集了 16 个高程不同、重约 1 ~ 2kg 的样品,岩性为新太古代片麻状花岗闪长岩和石英闪长岩,取样点如图 2。

3 裂变径迹的分析测试条件和测试结果分析

采用磁悬浮和重液等常规方法分离出磷灰石、锆石单矿物。裂变径迹测试实验按照 Green 的步骤(Green PF *et al.*, 1986),利用环氧和聚四氟乙烯分别将磷灰石、锆石制成光薄片。磷灰石在恒温 25℃ 的 7% HNO₃ 溶液中蚀刻 30 s; 锆石在电热板上烘烤后用聚全氟乙丙烯塑料盖于其上,加盖载片并冷却。制好的样片抛光为光薄片。采用外探测器法定年,将低铀白云母贴在光薄片上,与 SRM962 标准铀玻璃一

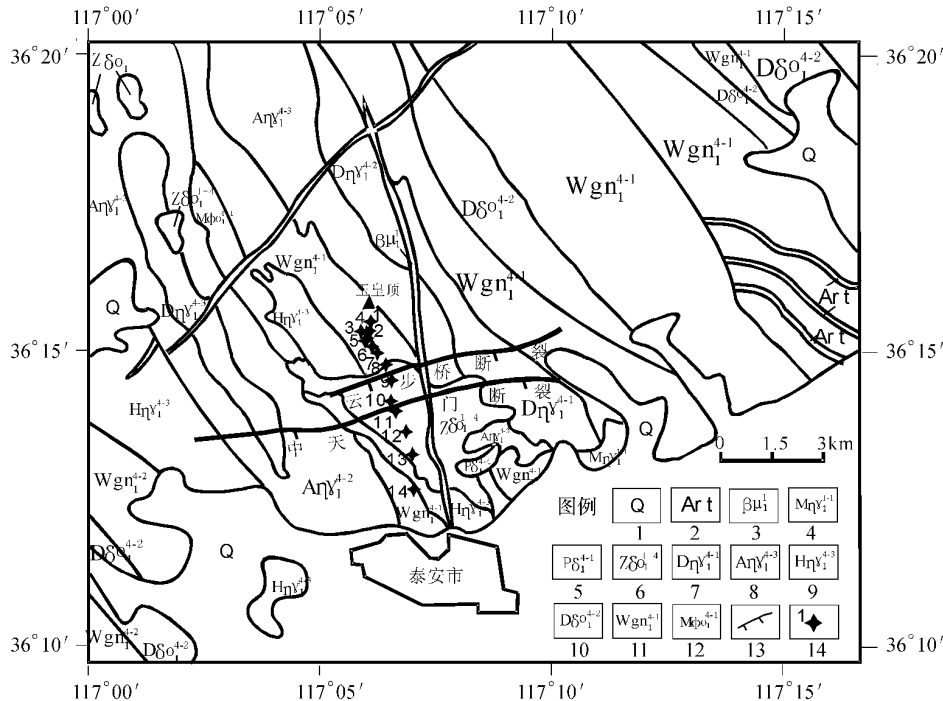


图2 泰山地区新太古宙—古元古代地质简图(据庄育勋等,1995,有改动)
1-第四系;2-太古宙泰山岩群;3-辉绿岩脉;4-二长花岗岩;5-细粒闪长岩;6-中天门石英闪长岩;7-细粒二长花岗岩;8-中粒二长花岗岩;9-中粗粒二长花岗岩 10-石英闪长岩;11-片麻状花岗闪长岩;12-角闪岩;13-断层;14-采样点
Fig. 2 Simplified geological map in late Archean- earlier Proterozoic of Taishan area (from Zhuang YX *et al.*, 1995, revised)

表 1 泰山磷灰石、锆石裂变径迹测试数据

Table 1 Apatite/Zircon fission track test data from Taishan Mountain

样品号		经纬度	高程 (m)	颗粒数 (n)	自发径迹密度 (10 ⁵ /cm ²) (条数)	诱发径迹密度 (10 ⁵ /cm ²) (条数)	中子注量 (10 ⁵ /cm ²) (条数)	检验概率 (%)	年龄* (Ma) (±1σ)	平均长度 (μm) (±1σ) (径迹条数)	铀含量 (×10 ⁻⁶)
磷 灰 石	1	36°15.48'N 117°06.09'E	1524	21	2.110 (800)	9.113 (3455)	7.143 (4395)	0	29 ±2	13.6±1.8 (119)	16.63±0.47
	2	36°15.32'N 117°06.07'E	1460	22	1.389 (422)	5.003 (1520)	7.395 (4395)	41	37 ±2	13.0±2.0 (114)	8.99±0.41
	3	36°15.32'N 117°05.88'E	1448	25	1.027 (315)	3.445 (1057)	7.160 (4395)	39	38 ±3	11.6±3.0 (107)	6.05±0.38
	4	36°15.29'N 117°06.00'E	1370	21	2.074 (688)	7.171 (2379)	7.035 (4395)	0	35 ±1	12.8±1.9 (83)	12.96±0.50
	5	36°15.20'N 117°06.01'E	1290	20	1.511 (747)	6.160 (3046)	7.591 (4395)	28	33 ±2	12.5±2.5 (121)	9.65±0.41
	6	36°14.98'N 117°06.18'E	1050	23	0.477 (209)	3.105 (1359)	7.395 (4395)	4	20 ±2	12.3±1.9 (102)	5.31±0.50
	7	36°14.85'N 117°06.32'E	960	21	0.324 (105)	2.641 (856)	7.395 (4395)	73	16 ±2	12.0±2.3 (69)	4.41±0.30
	8	36°14.67'N 117°06.45'E	940	22	0.673 (198)	2.598 (764)	7.003 (4395)	1	33 ±4	12.9±2.1 (95)	4.92±0.35
	9	36°14.49'N 117°06.53'E	900	20	1.538 (522)	4.072 (1382)	7.143 (4395)	15	48 ±3	12.2±2.5 (73)	6.96±0.36
	10	36°14.14'N 117°06.51'E	755	26	0.593 (155)	3.980 (1041)	7.647 (4395)	8	20 ±2	12.6±2.3 (62)	6.86±0.35
	11	36°13.97'N 117°06.62'E	680	19	0.833 (237)	4.730 (1345)	7.367 (4395)	0	29 ±4	10.9±3.0 (61)	7.05±1.22
	12	36°13.63'N 117°06.84'E	560	21	0.396 (172)	1.666 (724)	7.311 (4395)	90	31 ±3	11.6±3.0 (107)	2.71±0.53
	13	36°13.24'N 117°06.99'E	440	21	1.205 (303)	3.944 (992)	7.291 (4395)	0.2	39 ±4	12.5±2.5 (121)	6.91±0.45
	14	36°12.81'N 117°07.19'E	350	19	2.223 (454)	12.939 (2643)	7.339 (4395)	0	20 ±3	12.0±2.1 (160)	25.26±0.64
锆 石	2	36°15.32'N 117°06.07'E	1460	4	131.158 (361)	24.342 (67)	2.765 (5615)	0	123 ±46	—	246.2±0.82
	5	36°15.20'N 117°06.01'E	1290	4	177.179 (418)	2.967 (7)	2.765 (5615)	54.2	1012 ±389	—	37.21±0.33
	15	36°15.06'N 117°06.12'E	1180	23	298.196 (8530)	5.943 (170)	2.765 (5615)	0.4	797 ±92	—	82.59±0.38
	8	36°14.67'N 117°06.45'E	940	19	177.261 (1969)	16.925 (188)	2.765 (5615)	0	252 ±58	—	154.27±1.06
	9	36°14.49'N 117°06.53'E	900	6	105.459 (311)	5.765 (17)	2.765 (5615)	96.3	327 ±83	—	78.34±0.39
	16	36°14.14'N 117°06.51'E	755	14	32.495 (559)	39.064 (672)	2.765 (5615)	39.6	15 ±1	—	496.57±0.30
	13	36°13.24'N 117°06.99'E	440	24	255.122 (6069)	7.104 (169)	2.765 (5615)	0	567 ±73	—	94.98±0.42
	14	36°12.81'N 117°07.19'E	350	5	210.395 (910)	18.959 (82)	2.765 (5615)	30.3	200 ±25	—	165.4±0.77

* 检验概率 >5% 时,年龄值采用池年龄 ; 检验概率 <5% 时,采用中值年龄。

起构成定年组件。样品均置于反应堆内辐照,照射的中子注量为 $1.015 \times 10^{16} \text{ ncm}^{-2}$ 。云母外探测器置于 25°C 的 HF 中蚀刻 35 s,揭示诱发裂变径迹。利用澳大利亚的 AUTOSCAN 自动测量装置,选择平行 c 轴的柱面测出自发径迹密度和诱发径迹密度,水平封闭径迹长度按照 Green PF *et al.* (1986) 建议的程序测定。根据 IUGS 推荐的 ξ 常数法和标准裂变径迹年龄方程计算年龄值。本文获得磷灰石和锆石的 Zeta 常数分别为 357.8 ± 6.9 和 132.7 ± 6.4 。裂变径迹测试结果见表 1。

磷灰石裂变径迹年龄分布范围在 $48 \pm 3 \sim 16 \pm 2 \text{ Ma}$ 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 48Ma,39~31Ma,20Ma,16Ma 四组(图 3-1)。以过断层的 8 号、11 号样品为界,按照相对高度分为两组,一组($n=5$)年龄相对老,平均年龄为 38Ma,位于断盘的高部位;另一组($n=3$)年龄相对年轻,平均年龄为 20Ma,位于断盘的低部位。所有的视年龄都远远小于原岩——泰山岩群的生成年龄(约 2800Ma 左右)(艾宪森,1998),说明单颗粒年龄是岩石结晶后热退火造成的。样品平均围限裂迹长度度为 $10.9 \sim 13.6 \mu\text{m}$,标准偏差为 $1.8 \sim 3.0 \mu\text{m}$ 。

裂变径迹测试资料显示出两个明显的特征(图 3-2)。一是长度-年龄图(图 3-2A)呈凹面向上的 boomerang 图形(Green PF, 1986)或香蕉图(Gallagher K and Brown RP, 1997),二是标准差-年龄图中长度相对较长($\approx 13.0 \mu\text{m}$)的样品标准差相对较小,一般小于或者略大于 $2 \mu\text{m}$;长度相对

短的样品标准偏差值相对较大,呈现出一个凹面向下的图形(图 3-2B)。这种镜像关系图形表明磷灰石裂变径迹是随古地温的升高而封闭,样品经受了相同的热史所而产生变化,指示山体经历了两次明显的抬升(O'Sullivan PB, 1996)。由此判断出泰山自 48Ma 以来经历了两次明显的抬升 20Ma 左右和 37Ma 左右。由于断盘的下降会导致地温升高,使得断层下降盘样品所测年龄值偏小。以 14、13 号样品为例,二者的年龄值分别为 20Ma 和 39Ma,间距按 755m(10 号样品)和 350m(14 号样品)的差值估算,其年龄修正值为 23Ma 和 44Ma。因此,抬升时期一次在 $44 \sim 37 \text{ Ma}$,另一次是在 $23 \sim 20 \text{ Ma}$ 。

裂变径迹年龄-高程图解(图 4)显示,1~7 号,12~14 号两组样品年龄值随高度下降而降低。由于样品 8~11 号位于云步桥断层和中天门断层,因此,大致平行的两组年龄数据都与高程呈线性负相关关系,这点符合一般山脉的特征(Foster DA, 1991)。断层的存在还导致最老年龄没有出现在山顶,以及年龄相近的样品在不同高度重复出现。尽管如此,由于磷灰石裂变径迹记录的最老年龄是 48Ma,可以推断,泰山是新生代 48Ma 以来抬升的一个断块山。

前已分析,泰山地区侵入岩的冷却是构造抬升和侵蚀造成的,由此可以计算出采样点处的岩石抬升到现在海拔高度的平均抬升速率。磷灰石的封闭温度为 110°C (Gallagher K, 1995),地温梯度采用 $36^{\circ}\text{C}/\text{km}$,地表年平均地温为 14°C (宋明水, 2004),第一组样品(云步桥断层上升盘)的抬升速率如

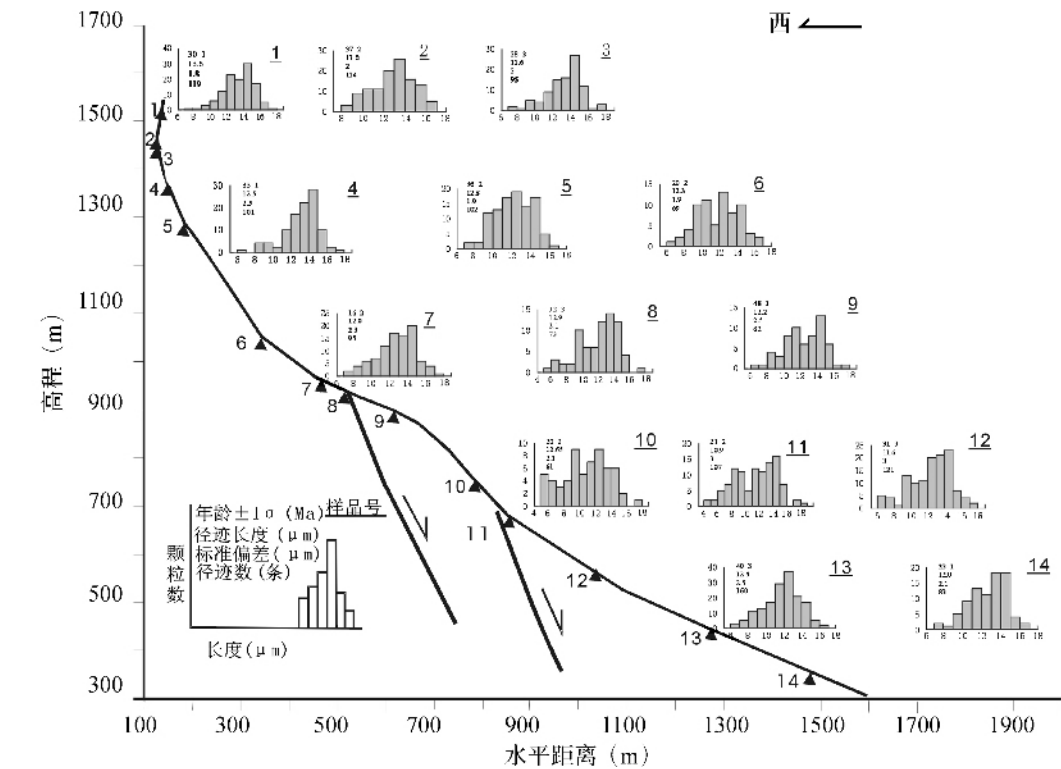


图 3-1 泰山磷灰石裂变径迹数据
Fig. 3-1 Apatite fission track data of the Taishan Mountain. Relationship is shown elevation vs. horizontal distance

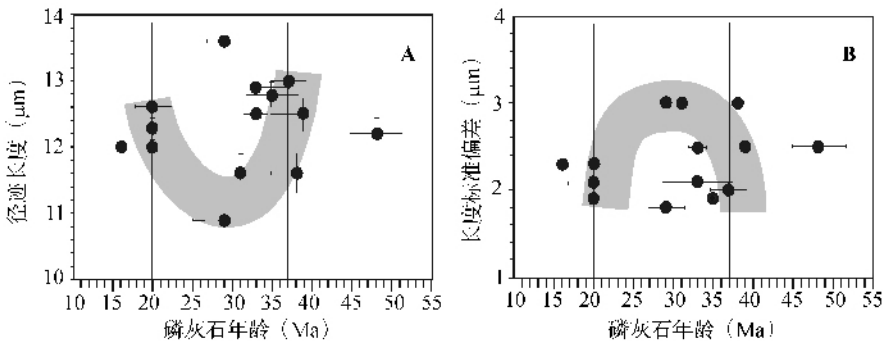


图 3-2 泰山磷灰石裂变径迹数据的径迹长度 ($\pm 1\sigma$) - 年龄 ($\pm 1\sigma$) (A) 和标准差 - 年龄 ($\pm 1\sigma$) (B) 图解
Fig. 3-2 Relation diagrams of mean track length ($\pm 1\sigma$) vs. fission track age ($\pm 1\sigma$) (A) and track length standard deviation vs. fission track age ($\pm 1\sigma$) (B) showing apatite fission track data from Taishan Mountain.

表 2 泰山云步桥断层上升盘抬升速率表

Table 2 Uplifting speed from the upthrow of the Yunbuqiao fault, Taishan Mountain

高程 (m)	1524	1460	1448	1370	1290	1050	960
年龄 (Ma)	29 ± 2	37 ± 2	38 ± 3	35 ± 3	33 ± 1	20 ± 2	16 ± 2
抬升速率 mm/a	0.14	0.11	0.11	0.12	0.12	0.19	0.23

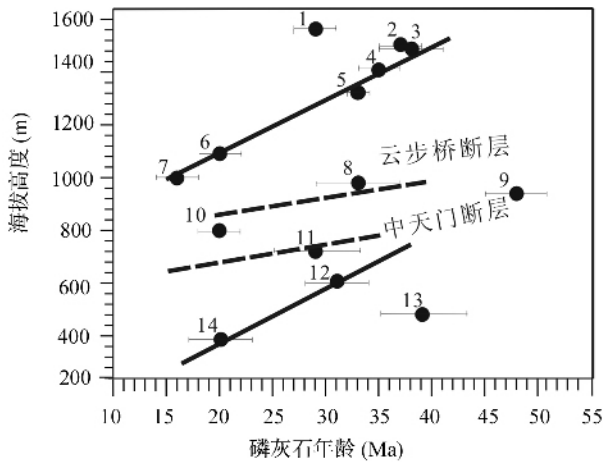


图 4 泰山磷灰石裂变径迹年龄-高程图解
Fig. 4 Diagram of apatite fission track age vs. elevation of the Taishan Mountain

表 2 所示。可以看出,抬升速率分为四个阶段。38 ~ 29Ma 为相对慢速阶段,20Ma 抬升速率明显加快,16Ma 抬升速率升至最大。说明自新生代以来泰山是一个逐渐加速抬升的过程。

下面分别计算云步桥断裂上升盘和中天门断层下降盘的分段视抬升速率。云步桥断层上升盘的岩性为片麻状花岗闪长岩,根据 1 ~ 7 号采样点海拔高度计算,38 ~ 35Ma 间的视抬升速率为 0.026mm/a, 33 ~ 20Ma 间的视抬升速率为 0.018mm/a, 20 ~ 16Ma 的视抬升速率为 0.023mm/a,云步桥断裂上升盘得出的泰山平均视抬升速率为 0.021mm/a。

中天门断层下降盘的岩性为石英闪长岩,12、14 号样品 31 ~ 20Ma 的视抬升速率为 0.019mm/a,与云步桥断裂上升盘得出的平均视抬升速率大致相同。按二者的平均视抬升速率 0.02mm/a 计算,泰山 48Ma 以来大约抬升了 960m。

利用锆石裂变径迹数据计算出采样点处的岩石抬升到现在海拔高度的平均抬升速率。对于任何老于 400Ma 的可计数的锆石颗粒,其铀含量必须小于 100×10^{-6} (Wagner GA, 1988),本文相关样品满足这一点。锆石的封闭温度为 $230^\circ \pm 25$ (Gallagher K, 1995),地温梯度和地表年平均地温与前文相同。结果表明,泰山自 1012Ma 左右开始抬升,1012 ~ 567Ma 间的抬升速率为 0.008mm/a,327 ~ 200Ma 时的平均抬升速率为 0.025mm/a,123Ma 时抬升速率为 0.06mm/a。需要指出的是,锆石封闭温度局限于 $10^6 \sim 10^8$ a 范围 (Gallagher K, 1995),因此数据 1012Ma 可能存有误差。中元古代红门期来自泰安地区的辉长辉绿岩样品测试的 K-Ar 年龄为 1206.9 ± 17 Ma (侯贵廷等, 2004),山东省区域地质调查表明,鲁西隆起太古代片麻状英云闪长岩的 K-Ar 年龄为 2445Ma (王世进等, 1990)。据此,认为锆石裂变径迹年龄较老的数据,如 1012Ma、797Ma 等是较为可靠的。推断泰山在 1012Ma 时埋藏较浅,尚未完全退火。由锆石和磷灰石裂变径迹数据得出的泰山抬升速率,见图 5。

综上所述,泰山的抬升是非匀速的,总体上以新生代为界,经历了前新生代的缓慢抬升和新生代以来的快速抬升过程。如果认为上述锆石裂变径迹测得的年龄可靠,那么泰山是自 1012Ma 开始抬升的,只不过抬升速率相当缓慢,为 0.008mm/a,一直持续到 567Ma。327Ma 之后,抬升速率略有提高,增加到 0.025mm/a。123Ma 时(中生代晚白垩世)抬升

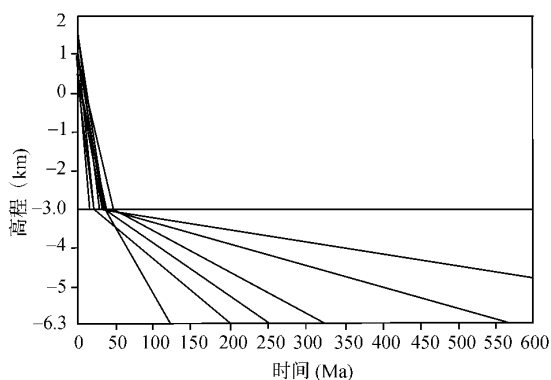


图5 泰山抬升速率图

Fig. 5 Uplifting speed of the Taishan Mountain

速率有所加快,升至 0.06mm/a 。新生代以来,泰山的抬升进入了一个快速、幕式抬升阶段,大致经历了两个快速抬升阶段。磷灰石裂变径迹得出的最老年龄为 48Ma ,表明泰山此时已经抬升,但抬升速率仍不是太快(按前述地温梯度和地表温度条件计算为 0.08mm/a)。泰山新生代经历的两个快速抬升时期分别为 $44\sim 37\text{Ma}$ 和 $23\sim 20\text{Ma}$,抬升速率上升至 0.11mm/a 和 0.19mm/a 。

现今高度指示着断层的总断距。由图4可以得出,云步桥断裂和中天门断裂的总断距大致为 700m ,两条断层呈阶梯式降落,形成了南天门、中天门及一天门三大台阶式的地貌景观,更增强了泰山陡峻高拔和雄伟磅礴的气势。磷灰石裂变径迹表明泰山最近一次的抬升活动为 16Ma ,锆石样品16号(岩脉)得出了 15Ma 相似的年龄。由于泰山山前断裂晚更新世晚期仍然活动,最新时代为距今 $(1.42 \pm 0.12) \times 10^4\text{a}$ (晁洪太等,1999),推断泰山仍然在抬升,显示出其强大的青春活力。

4 讨论和结论

泰山在前新生代抬升速率相当缓慢,自新生代以来进入快速抬升时期。新生代泰山于 48Ma 开始抬升,在 $44\sim 37\text{Ma}$ 开始第一次整体快速抬升, $23\sim 20\text{Ma}$ 为第二次快速抬升时期,经历了两个快速抬升阶段。可以说,尽管泰山出露的主要岩石(变质杂岩和侵入岩)的形成时间为 2800Ma ,现今泰山却是新生代的产物,其年龄仅仅为 $44\sim 37\text{Ma}$ 。

新生代泰山的快速抬升与其周围及邻区盆地的沉降有着较好的对应关系。泰山南侧的泰安-莱芜盆地中堆积了巨厚的下第三系官庄组砂砾岩,其中官一段富含古生界石灰质角砾,暗示泰山在 48Ma 之前已经开始抬升,其上曾有过古生界灰岩盖层。 48Ma 开始的抬升事件,其北侧济阳坳陷和南侧泰安-莱芜盆地在 45Ma 有相似的沉积和构造记录,都存在沉积间断,红层沉积突变为蓝灰色泥岩(帅德福等,1987)。泰山在 $44\sim 37\text{Ma}$ 期间的整体快速隆升事件, 44Ma 和 37Ma

大致对应济阳坳陷沙四段/沙三段之间的济阳运动(I幕)(陈嘉树,1993)和济阳运动II幕(田景春等,1994),表现为沉积体系、古气候和沉降中心发生过明显转化。由一套干旱气候条件下的紫红色砂砾岩、砂泥岩、灰色泥岩开湖盐盆地沉积,变为潮湿气候条件下的深湖和半深湖油页岩及暗色泥岩(主力烃源岩)、砂砾岩、砂岩及泥岩沉积(王秉海等,1992),构造沉降量为 260m (邱楠生等,2004)。同时,火山活动在沙三段沉积期也有相应的表现,拉斑玄武岩减少,碱性玄武岩增多,在盆地拉张的最大部位最为发育(曾广策等,1997)。泰山发生在 $23\sim 20\text{Ma}$ 左右的快速抬升事件,对应济阳坳陷中的东营运动,坳陷整体抬升,造成了约 200m 的剥蚀(郭随平等,1996;史卜庆等,1999)。

由于鲁西隆起南、北两侧的泰安-莱芜盆地和济阳坳陷都发育沙三段以下(古新世-早始新世沉积)地层,暗示在沙三段沉积之前,鲁西隆起与济阳坳陷是一个相连的联合盆地, $44\sim 37\text{Ma}$ 期间泰山整体快速隆升,鲁西隆起与济阳坳陷分隔开来,进入各自的隆、拗演化史。这次抬升事件造成济阳坳陷大幅度沉降,进而控制了坳陷中主力烃源岩即沙三段暗色泥岩的形成(王秉海等,1992)。

泰山的隆升过程同时与渤海湾盆地及其周边山系的构造演化乃至中国也有一定的对应关系。 $44\sim 38\text{Ma}$ 的快速抬升,明显地反映在渤海湾盆地黄骅坳陷的孔店地区,如 43Ma 期间的“孔店升降”(阎敦实等,1980)。东濮凹陷文留背斜在 $43\sim 38\text{Ma}$ 期间形成,整个凹陷也随之整体抬升(许化政等,2003)。新生代辽河盆地的形成、演化中古新世裂谷初期火山活动期($40\sim 38\text{Ma}$)也是抬升的印证(马寅生等,2000)。除了渤海湾盆地外,在中国大陆东部许多新生代陆内和边缘盆地,如依兰-伊通盆地、南海北部边缘盆地和东海地区,充填序列中也有与其相关的构造变革界面(任建业,2004)。泰山 $23\sim 20\text{Ma}$ 的快速抬升对应辽河盆地的构造反转期(马寅生等,2000)、苏北与南黄海的三垛运动末期(陈安定,2001)及东海的玉泉运动(许薇龄等,1998),在太行山山前中生代—新生代伸展滑拆离带中所记载的年龄为 $23\sim 18\text{Ma}$ (张家声等,2002),整个燕山、太行山还形成了一级夷平面——甸子梁面(吴忱等,1997)。上述事实说明,新生代泰山的抬升是一个区域性构造事件。

致谢 裂变径迹测试由中科院高能物理所袁万明先生完成,成文中与中科院地质与地球物理所胡圣标研究员进行了有益的探讨,样品采集得到了中国石油大学宋全友博士的帮助,在此一并致谢!

References

- Ai XS, Zhang CJ and Wang SJ. 1998. Progress in regional geological surveys in Shandong Province over the past ten years. Regional Geology OF Chian, 17 (3): 228 - 235 (in Chinese with English abstract)

- Chao HT, Wang ZC, Li JL, *et al.* 1999. The latest activities of faults in the Tai'an region, Shandong Province and the Taishan Mountain earthquake. *Seismology and Geology*, 21 (2) : 105 – 114 (in Chinese with English abstract)
- Che ZC, Liu L and Luo JH. 2002. Regional tectonics of China and adjacent districts. Beijing Science Press 278 – 294 (in Chinese)
- Chen AD. 2001. Dynamic Mechanism of Formation of Dustpan Subsidence, Northern Jiangsu. *Geological Journal of China Universities*, 7 (4) : 408 – 418 (in Chinese with English abstract)
- Chen JS. 1993. Features of the Jiyang Movement and the effects on the evolution of the jiyang depression. *Experimental Petroleum Geology*, 15 (1) : 86 – 99 (in Chinese with English abstract)
- Ding L, Zhong DL, PanYS, *et al.* 1995. Fission track evidence of the rapid uplifting events in eastern Himalayan Syntaxis since Pliocene 1995. *Chinese Science Bulletin*, (16) : 1497 – 1500 (in Chinese)
- Fitzgerald PG, Fryxel JE and Wernicke BP. 1991. Miocene crustal extension and uplift in southeastern Nevada : constraints from fission track analysis. *Geology*, 19 : 1013 – 1016
- Foster, DA and Gleadow AJW. 1992. The morphotectonic evolution of rift-margin mountains in central Kenya : Constraints from apatite fission track analysis. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 113 : 157 – 171
- Gallagher K. 1995. Evolving temperature histories from apatite fission-track data. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 136 : 421 – 435
- Gallagher K and Brown RP 1997. The onshore record of passive margin evolution. *Journal of the Geological Society*. 154 (3) : 451 – 457
- Ge XH. 1989. The history of formation of intraplate orogenic belts in the north China Paleoplate. *Geological Reviews*, 35 (3) : 254 – 261 (in Chinese with English abstract)
- Green PF 1986. On the thermo-tectonic evolution of Northern England : evidence from fission track analysis. *Geological Magazine*, 123 : 493 – 506
- Green PF, Duddy IR, Gleadow AJW, *et al.* 1986. Thermal annealing of fission tracks in apatite 1 : A qualitative description. *Chem. Geol.*, 59 : 237 – 253
- Guo SP Shi XB Wang LS. 1996. Thermal history analysis of Dongying Depression, Shengli Oil Region : Evidence of apatite fission track. *Oil & Gas Geology*, 17 (1) : 32 – 36 (in Chinese with English abstract)
- He B. 2001. On dynamics of the Bohai Bay complex faulted basin. *Experimental Petroleum Geology*, 23 (1) : 27 – 30 (in Chinese with English abstract)
- Hou GT, Li JH, Jin AW and Qian XL. 2004. New Comment on the early Precambrian tectono-magmatic subdivision and evolution in the western Shandong block. *Geological Journal of China Universities*, 10 (2) : 239 – 249 (in Chinese with English abstract)
- Hu JY and Niu JY. 2001. The further deepening of oil-gas accumulation theory and exploratory practice of Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 22 (1) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract)
- Hurford AJ. 1986. Cooling and uplift patterns in the Lepontine Alps, south central Switzerland, and an age of vertical movement on the Insubric fault line. *Contrib. Min. Petrol.*, 92 : 413 – 427
- Li WC. 1998. Analysis methods of structural style in coal field, in addition to structure deformation of western Shandong. *Coal geology of China*, 10 (3) : 4 – 9 (in Chinese with English abstract)
- Liu HF, Liang HS and Li XQ. 2000. Coupling mechanisms of mesozoic-cenozoic rift basin and extensional mountain system in eastern China. *Earth science frontiers*, 7 (4) : 477 – 486 (in Chinese with English abstract)
- Liu GD and Ye H. 1988. On the crust and upper mantle structure in north China fault-block area, In : Sun S, Zhong DL and Li YH (ed.). *Theory and application of fault-block structure*. Beijing : Science Press : 143 – 149 (in Chinese)
- Lu PJ, Zhang ML and Zhang YS. 1995. Formation of recent Mount Tai and geomorphologic landscapes are concerned with Neo-tectonicism. *Journal of Shandong mining institute*, 14 (4) : 331 – 335 (in Chinese with English abstract)
- Ma XY, Liu HF, Wang WX and Wang YP. 1983. Meso-cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in eastern China. *Acta geological sinica*, 57 (1) : 22 – 31 (in Chinese with English abstract)
- Ma YS, Cui SQ, Wu GG, *et al.* 2000. Uplift history of the Yiwulshan Mountains in West Liaoning. *Acta Geoscientia Sinica-Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 21 (3) : 245 – 253 (in Chinese with English abstract)
- O'Sullivan PB, Foster DA, Kohn BP and Gleadow AJ. 1996. Multiple postorogenic denudation events : An example from the eastern Lachlan fold belt. *Australia. Geology*, 24 (6) : 563 – 566
- Qiu NS, Li SP and Zeng JH. 2004. Thermal history and tectonic-thermal history of the Jiyang depression in the Bohai Bay Basin, east China. *Acta Geologica Sinica*, 78 (2) : 263 – 269 (in Chinese with English abstract)
- Ren JY. 2004. Identification of Cenozoic fold-thrust structure and its dynamics setting in Jiyang sag. *Geological Science and Technology Information*, 23 (3) : 1 – 5 (in Chinese with English abstract)
- Song DN. 2001. Basic characteristics and evolution history of Mesozoic basins in Shandong Province. *Shandong Geology*, 17 (5) : 5 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Shi BQ, Wu ZP, Wang JX, *et al.* 1999. A study on the geological characteristics and geodynamic origin of Dongying movement, Bohai Bay Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 21 (3) : 196 – 200 (in Chinese with English abstract)
- Song MS. 2004. Mesozoic and Cenozoic maturity curve of Jiyang Depression and its application calculation of strata denudation. *Geological Journal of China Universities*, 10 (1) : 121 – 127 (in Chinese with English abstract)
- Shuai DF and Wang BH (ed.). 1987. *Petroleum Geology of China, Vol. 6 Shengli Oil Field*. Editorial Committee of "Petroleum Geology of China". Beijing : Petroleum Industry Press. (in Chinese)
- Tian JC, Zeng YF, Zhang CG, *et al.* 1994. The research of sequence stratigraphy and stratigraphic framework of Shahejie formation in Dongying sag. *J. Mineral. Petrol.*, 14 (2) : 37 – 46 (in Chinese with English abstract)
- Wagner GA. 1988. Apatite fission-track geochrono-thermometer to 60 C : Projected length studies. *Chemical Geology (Isotope Geoscience Section)*, 72 : 145 – 153
- Wang BH and Qian K (ed.). 1992. *Geology research and exploration practice in the Shengli petroleum province*. Shandong : China University of Petroleum Press (in Chinese)
- Yuan WM, Zhang XT, Dong JQ, *et al.* 2003. A new vision of the intracontinental evolution of the eastern Kunlun Mountains, Northern Qinghai-Tibet plateau, China. *Radiation Measurements*, 36 : 357 – 362
- Wu Chen, Zhang XQ and Ma Y. 1997. Restudy to the planation surfaces of the Dian-zi-liang period and the physiogeographical period in early Tertiary. *Geography and Territorial Research*, 13 (3) : 39 – 46 (in Chinese)
- Wang SJ, Zhang ZQ, Liang BQ, *et al.* 1990. Chinese Specification to the regional geological survey. *Geology and Minerals Bureau of Shandong Province* (in Chinese)
- Yan DS, Wang SW and TZ. 1980. Block faulting and formation of oil and gas fields associated with buried hills in Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 1 (2) : 1 – 10 (in Chinese with English abstract)
- Xu HZ and Zhou XK. 2003. Tectonic evolution and reservoir formation in Wenliu area, Bohai Wang Basin. *Experimental Petroleum Geology*, 25 (6) : 712 – 719 (in Chinese with English abstract)
- Xu WL and Le JY. 1988. Tectonic movement and evolution of the east China Sea. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 8 (1) : 9 – 21 (in Chinese with English abstract)
- Ye H and Zhang WY. 1983. History and deformation dynamic mechanism of Cenozoic crust movement in north China. In : Zhang WY (ed.). *Fault-block structure*. Beijing : Science Press : 130 – 138 (in Chinese)
- Zeng GG, Wang FZ, Zhen HR, *et al.* 1997. Cenozoic volcanic rocks and its relation to basin evolution and oil accumulation in Dongying sag. *Earth Science Journal of China University of Geosciences*, 22 (2) : 158 – 164 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GC, Zhu WL and Shao L. 2001. Pull-apart tectonic and hydrocarbon prospecting in Bohai bay and its nearby area. *Acta Petrolei Sinica*, 22 (2) : 14 – 18 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JS, Xu J, Wan JL, *et al.* 2002. Meso-Cenozoic detachment zones in the front of the Taihang Mountains and their fission-track ages. *Geological Bulletin of China*, 21 (S) : 4 – 5 (in Chinese)
- Zhang ML, Jin ZJ, Lu PJ, *et al.* 2000. Formation of Taishang Mountain

- and Cenozoic tectonicism. *Journal of Geomechanics*, 6(2): 23–29 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZH. 1995. Luxi extensional structure-implication for middle-upper crust plate. *Shandong Geology*, 11(2): 23–31 (in Chinese with English abstract)
- Zhao WZ and Chi YL. 2000. Regional distribution regularity and its controlling factors of oil and gas bearings in Bohai Bay Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 10–15 (in Chinese with English abstract)
- Zhou ZY, Xu CH, Reiners PW, *et al.* 2003. Evidence of (U-Th)/He & fission track analysis on denudation history after Late Cretaceous in the Tiantangzhai area of the Dabieshan Mountain. *Chinese Science Bulletin*, 48(6): 598–602 (in Chinese)

附中文参考文献

- 艾宪森, 张成基, 王世进. 1998. 山东省十年区域地质调查工作新进展. *中国区域地质*, 17(3): 228–235
- 晁洪太, 王志才, 李家灵等. 1999. 山东泰安地区断层的最新活动与“泰山震”. *地震地质*, 21(2): 105–114
- 车自成, 刘良, 罗金海编著. 2002. 中国及邻区区域大地构造学. 北京: 科学出版社: 278–294
- 陈安定. 2001. 苏北箕状断陷形成的动力学机制. *高校地质学报*, 7(4): 408–418
- 陈嘉树. 1993. 济阳运动的特点及其对济阳坳陷的影响. *石油实验地质*, 15(1): 86–99
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生等. 1995. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*, 40(16): 1497–1500
- 葛肖虹. 1989. 华北板内造山带的形成史. *地质论评*, 35(3): 254–261
- 何斌. 2001. 渤海湾复式盆地动力学探讨. *石油实验地质*, 23(1): 27–30
- 胡见义, 牛嘉玉. 2001. 渤海湾盆地油气聚集理论和勘探实践的再深化—为渤海湾盆地发现40周年而作. *石油学报*, 22(1): 1–5
- 郭随平, 施小斌, 王良书. 1996. 胜利油区东营凹陷热史分析. *石油与天然气地质*, 17(1): 32–36
- 侯贵廷, 李江海, 金爱文, 钱祥麟. 2004. 鲁西地块早前寒武纪构造-岩浆活动区划及演化的新认识. *高校地质学报*, 10(2): 239–249
- 李万程. 1998. 煤田构造样式分析步骤—兼论鲁西区构造变形. *中国煤田地质*, 10(3): 4–9
- 刘国栋, 叶洪. 1988. 华北断块的地壳上地幔结构. 见: 孙枢, 钟大赉, 李荫槐主编, *断块构造理论及其应用*, 北京: 科学出版社, 143–149
- 刘和甫, 梁慧社, 李晓清等. 2000. 中国东部中生代裂陷盆地与伸展山岭耦合机制. *地学前缘*, 7(4): 477–486
- 吕朋菊, 张明利, 张永双. 1995. 新构造运动与现今泰山的形成及其地貌景观. *山东矿业学院学报*, 14(4): 331–335
- 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 汪一鹏. 1983. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. *地质学报*, 57(1): 22–31
- 马寅生, 崔盛芹, 吴淦国等. 2000. 辽西医巫闾山的隆升历史. *地球学*

- 报*, 21(3): 245–253
- 邱楠生, 李善鹏, 曾溅辉. 2004. 渤海湾盆地济阳坳陷热历史及构造-热演化特征. *地质学报*, 78(2): 263–269
- 任建业. 2004. 济阳坳陷新生代褶皱-冲断构造的厘定及其动力学背景分析. *地质科技情报*, 23(3): 1–5
- 史卜庆, 吴智平, 王纪祥等. 1999. 渤海湾盆地东营运动的特征及成因分析. *石油实验地质*, 21(3): 196–200
- 宋冀南. 2001. 山东中生代盆地基本特征及演化过程. *山东地质*, 17(5): 5–10
- 宋明水. 2004. 济阳坳陷中、新生成成熟度曲线及其在剥蚀量计算中的运用. *高校地质学报*, 10(1): 121–127
- 帅德福, 王秉海主编. 1987. 中国石油地质志(卷六). 中国石油地质志编委会. 北京: 石油工业出版社
- 田景春, 曾允孚, 张长俊等. 1994. 东营凹陷沙河街组层序地层及地层层架研究. *矿物岩石*, 14(2): 37–46
- 许化政, 周新科. 2003. 渤海湾盆地东濮凹陷文留构造发育特征与气藏形成. *石油实验地质*, 25(6): 712–719
- 许薇龄, 乐俊英. 1988. 东海的构造运动及演化. *海洋地质与第四纪地质*, 8(1): 9–21
- 王秉海, 钱凯著. 1992. 胜利油区地质研究与勘探实践. 山东: 石油大学出版社
- 王世进, 张增奇, 梁邦后等编. 1990. 中华人民共和国区域地质调查说明书. 山东省地质矿产局
- 吴忱, 张秀清, 马永红. 1997. 再论华北山地甸子梁期夷平面及早第三纪地文期. *地理学与国土研究*, 13(3): 39–46
- 阎敦实, 王尚文, 唐智. 1980. 渤海湾含油气盆地断块活动与古潜山油气藏的形成. *石油学报*, 1(2): 1–10
- 叶洪, 张文郁. 1983. 华北新生代地壳运动的历史及变形力学机制. 见: 张文佑主编, *断块构造文集*. 北京: 科学出版社: 130–138
- 张明利, 金之钧, 吕朋菊等. 2000. 新生代构造运动与泰山形成. *地质力学学报*, 6(2): 23–29
- 张功成, 朱伟林, 邵磊. 2001. 渤海海域及邻区拉分构造与油气勘探领域. *石油学报*, 22(2): 14–18
- 张家声, 徐杰, 万景林等. 2002. 太行山山前中-新生代伸展拆离构造和年代学. *地质通报*, 21(S): 4–5
- 张自桓. 1995. 鲁西伸展构造—一个中-上地壳板块的提示. *山东地质*, 11(2): 23–31
- 赵文智, 池英柳. 2000. 渤海湾盆地含油气层系区域分布规律与主控因素. *石油学报*, 21(1): 10–15
- 曾广策, 王方正, 郑和荣等. 1997. 东营凹陷新生代火山岩及其与盆地演化、油藏的关系. *地球科学—中国地质大学学报*, 22(2): 158–164
- 周祖翼, 许长海, Reiners PW 等. 2003. 大别山天堂寨地区晚白垩世以来剥露历史的 (U-Th)/He 和裂变径迹分析证据. *科学通报*, 48(6): 598–602