# 鲁西隆起和济阳坳陷新生代隆坳耦合关系

李理1),钟大赉2),时秀朋1)

1) 中国石油大学地球资源与信息学院,山东东营,257061

2) 中国科学院地质与地球物理研究所,北京,100029

内容提要:为探讨鲁西隆起的抬升史,研究鲁西隆起和济阳坳陷之间的隆-坳演化关系,进一步揭示渤海湾盆地的演化特征,主要利用裂变径迹分析和裂变径迹 *tT*模拟方法建立了新生代鲁西隆起的抬升史和济阳坳陷的沉降史。鲁西隆起三期抬升史分别为 62~53 Ma、44~37 Ma 和 23~20 Ma,济阳坳陷在 65~46 Ma 和 46~38 Ma 期间为快速构造沉降期,构造沉降量大,23 Ma 左右坳陷抬升。对比研究表明,新生代鲁西隆起的抬升与济阳坳陷沉降之间存在隆-坳耦合关系。鲁西隆起的抬升控制了济阳坳陷烃源岩的形成、油气运移时间和油气分布由南向北迁移,并为济阳坳陷古潜山油藏提供了有效的储集空间。研究还认为,鲁西隆起与济阳坳陷的隆坳耦合关系是渤海湾盆地及周边山系盆山耦合事件的一个组成部分。

关键词: 隆坳耦合; 鲁西隆起; 济阳坳陷;新生代

大陆动力学的一个重要内容是盆-山耦合研究。 盆山耦合现象的研究最早出现在强烈挤压变形区的 造山带与前陆盆地中,主要侧重前陆盆地与造山带 之间构造、沉积、深部机制和时、空方面的耦合关系 (Davis et al., 1983;刘和甫等, 1994; Boyer et al., 1995;钟大赉等,1998;Schlunegger, 1999; 吴根耀 等,2003),对伸展盆地与造山带之间耦合关系的研 究相对较少。随着伸展构造区盆-山研究的深入,人 们日益认识到伸展山岭和伸展盆地之间密不可分的 关系(Wernicke, 1981; Wernicke, et al., 1982; Davis et al, 1996; 刘和甫等, 2000; 李扬鉴, 1996; 王桂梁,1999:张家声,2002),但更多的是单纯从 盆地充填推论山系抬升,或从山系的抬升反推盆地 充填,并结合物源分析、深部机制等方面定性研究盆 山关系,具体运用时间作为约束进行山-盆之间耦合 研究较少。作为盆地次级单元,与盆地受统一的应 力场作用,隆起和坳陷之间在构造上、时间上、沉积 上也应存在成生关系。鲁西地块位于郯庐断裂山东 段沂沭断裂潍坊~临沂一线以西,以齐河-广饶断裂 为界,包括鲁西降起和济阳坳陷两个次级单元,是华 北克拉通内部两个非常重要的构造单元(图1)。鲁 西地块地质现象丰富,制约的边界条件相对简单明

了,因此,在稳定的鲁西地块提出的新认识对中国东 部构造研究将有重要的意义。然而鲁西隆起与济阳 坳陷之间的关系,前人的研究是定性的,如有研究认 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,由此鲁西隆起控制了济阳坳陷~渤中 坳陷各凹陷的发育、主要烃源岩和主要油气藏层系 的形成(胡见义等, 2001);也有研究认为新生代以 来受印度板块与欧亚大陆碰撞的远程效应,由于伸 展拉分导致了济阳坳陷的形成和鲁西隆起的不断隆 起(何斌,2001),因此,隆-坳之间的关系尚不清晰。 本文选取与济阳坳陷紧邻的鲁西隆起上的最高山 峰-泰山,利用裂变径迹方法研究泰山的抬升,建立 鲁西隆起的隆升史;选取紧邻鲁西隆起的济阳坳陷 南缘东营凹陷中的最深井,利用裂变径迹方法,辅以 去压实方法研究济阳坳陷的沉降史,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。

# 1 鲁西隆起新生代抬升史

## 1.1 样品采集及裂变径迹分析

泰山位于山东省中部,以最南缘的泰山断层为 界,泰山分为两部分,断裂北侧为泰山主体,主要出

注:本文为国土资源部油气专项(编号 XQ-2004-03-01)资助的成果。

收稿日期:2007-06-19;改回日期:2007-08-02;责任编辑:郝梓国。

作者简介:李理,女,1967年生。博士,副教授,主要从事构造地质学及油气田地质的教学和研究。通讯地址:257061,山东省东营市北二 路中国石油大学(华东)地球资源与信息学院;电话:0546-8397778; Email:lily@hdpu.edu.cn。





Fig. 1 The location of Western Shandong

PY一平邑凹陷;SS一泗水凹陷;DX一大汶口-新泰凹陷;TL-泰莱凹陷;HM-惠民凹陷;DY-东营凹陷;ZH-沾化凹陷;CZ-车镇凹陷; ①一曲堤-仁凤凸起;②一青城凸起;③一滨县凸起;④一陈家庄凸起;F<sub>1</sub>-丰沛断层;F<sub>2</sub>一聊城-兰考断层;F<sub>3</sub>-齐河-广饶断层;F<sub>4</sub>-蒙山断 层;F<sub>5</sub>--汶泗断层;F<sub>6</sub>-新泰-垛庄断层;F<sub>7</sub>-泰山-铜冶店断层;F<sub>8</sub>-陈南断层;F<sub>9</sub>--埕南断层

PY—Pingyi Sag; SS—Sishui Sag; DX—Dawenkou-Xintai Sag; TL—Tailai Sag; HM—Huimin Sag; DY—Dongying Sag; ZH—Zhanhua Sag; CZ—Chezhen Sag; ①—Qudi-Renfeng uplift; ②—Qingcheng uplift; ③—Binxian uplift; ④—Chenjiazhuang uplift; F<sub>1</sub>—Fengpei Fault; F<sub>2</sub>—Liaocheng-Lankao Fault; F<sub>3</sub>—Qihe-Guangrao Fault; F<sub>4</sub>—Mengshan Fault; F<sub>5</sub>—Wensi Fault; F<sub>6</sub>—Xintai~Duozhuang Fault; F<sub>7</sub>—Taishan-Tongyedian Fault; F<sub>8</sub>—Chen'nan Fault; F<sub>9</sub>—Chengnan Fault

露前寒武纪泰山岩群及 TTG 岩系和古元古代造山 花岗岩岩体,向北主要为寒武-奥陶系灰岩、页岩,以 隆升为主,形成起伏的山地;泰山断层南侧沉降,形 成泰莱盆地 2000~3000m 巨厚的第三系碎屑岩及 第四系沉积物。在泰山主体靠近泰山断层南侧发育 两条近东西向的南倾正断层-中天门断层和云步桥 断层,其规模较小,与泰山断层构成阶梯状。

样品采集使用 GPS 仪器进行定位,气压计测高程,沿传统的前山路线,从 1524 m 的玉皇顶由北向南而下,过云步桥断层和中天门断层,共采集了 16

个高程不同、重约 1~2 kg 的样品,挑选其中的 14 个用作裂变径迹实验,其中 1~8 号、14 号样品岩性 为片麻状花岗闪长岩,9~13 号样品为石英闪长岩。

采用磁悬浮和重液等常规方法分离出磷灰石单 矿物。裂变径迹测试实验具体方法和步骤按照 Green的标准(Green, et al, 1986)。测试结果见表 1。

磷灰石裂变径迹年龄分布范围在 48± 3 Ma~ 16± 2 Ma 之间(除特别说明外,其标准偏差均为 1<sub>0</sub>),所有的视年龄都远远小于原岩——泰山岩群的

Table 1	The test	data of	apatite	fission	track	in	West	Shandong	Rise
---------	----------	---------	---------	---------	-------	----	------	----------	------

样品号	经纬度	高程 (m)	颗粒数 (n)	自发径迹密度 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> ) (条数)	诱发径迹密度 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> ) (条数)	中子注量 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> ) (条数)	检验概率 (%)	年龄(Ma) (±1 <sub>σ</sub> )	平均长度(μm) (±1σ) (径迹条数)	轴含量 (×10 <sup>-6</sup> )
1	36°15. 48′N	1524	21	2.110	9.113	7.143	0	29	$13.6 \pm 1.8$	16.63±0.47
	117 06.09 E			(800)	(3455)	(4395)		±Ζ	(119)	
2	35 15.32 N	1460	22	1.389	5.003 (1520)	7.395 (4305)	41	$37\pm2$	$13.0\pm2.0$	8.99±0.41
	36°15 32'N			(422) 1 027	3 445	7 160			(114) 11 6+3 0	
3	117°05. 88'E	1448	25	(315)	(1057)	(4395)	39	$38 \pm 3$	(107)	$6.05 \pm 0.38$
	36°15. 29′N			2.074	7.171	7.035			$12.8 \pm 1.9$	
4	117°06.00'E	1370	21	(688)	(2379)	(4395)	0	$35 \pm 1$	(83)	12.96 $\pm$ 0.50
_	36°15.20′N			1.511	6.160	7.591			12.5 $\pm$ 2.5	
5	117°06.01′E	1290	20	(747)	(3046)	(4395)	28	$33 \pm 2$	(121)	9.65 $\pm$ 0.41
c	36°14.98′N	1050		0.477	3.105	7.395			$12.3 \pm 1.9$	5 01 1 0 50
6	117°06.18′E		23	(209)	(1359)	(4395)	4	20±2	(102)	5.31 $\pm$ 0.50
7	36°14.85′N	0.00	-91	0.324	2.641	7.395	7.2	16-19	$12.0\pm 2.3$	4 41 - 20
1	117°06.32′E	900	21	(105)	(856)	(4395)	73	10 1 2	(69)	4.41 ± 0.30
0	36°14.67′N	010	22	0.673	2.598	7.003	1	22 + 4	12.9 $\pm$ 2.1	1 02±°0 25
0	117°06.45′E	940	22	(198)	(764)	(4395)	1	3314	(95)	4.92 1 0.33
Q	36°14.49'N	900	20	1.538	4.072	7.143	15 48+2	48+3	12.2 $\pm$ 2.5	6 06 + 0 26
5	117°06.53'E	900	20	(522)	(1382)	(4395)	10	40 1 5	(73)	0.00±0.00
10	36°14.14'N	755	26	0.593	3.980	7.647	8	$20 \pm 2$	12.6 $\pm$ 2.3	6 86+0 35
10	117°06.51'E	100	20	(155)	(1041)	(4395)	0	2012	(62)	0.00±0.00
11	36°13.97′N	680	19	0.833	4.730	7.367	0	$29 \pm 4$	$10.9 \pm 3.0$	$7 05 \pm 1 22$
11	117°06.62'E	000	10	(237)	(1345)	(4395)	, v	20 <u>-</u> 1	(61)	1.00 ± 1.00
12	36°13.63′N	560	21	0.396	1.666	7.311	90	$31 \pm 3$	$11.6 \pm 3.0$	$2.71\pm0.53$
15	117°06.84'E	000	51	(172)	(724)	(4395)	00	01_0	(107)	2
13	36°13.24′N	440	21	1.205	3.944	7.291	0.2	$39 \pm 4$	12.5 $\pm$ 2.5	$6.91\pm0.45$
10	117°06.99'E		21	(303)	(992)	(4395)	0.2	00 - 1	(121)	0.01±0.10
14	36°12.81′N	350	19	2.223	12.939	7.339	0	$20 \pm 3$	$12.0\pm 2.1$	$25 26 \pm 0.64$
14 ]	117°07.19′E	10	(454)	(2643)	(4395)	V	U U	20.0	(160)	

注: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。

生成年龄(约2800 Ma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 围限裂变径迹长度为10.9~13.6 μm,标准偏差为 1.8~3.0 μm。

磷灰石裂变径迹年龄-高程图反映年龄随高程 分布的特点。以过云步桥断层、中天门断层的8号、 11号样品为界,1~7号,12~14号两组样品年龄值 随高度下降而降低(图2)。两组年龄数据大致平 行,均与高程呈线性相关的关系,符合山脉的特点 (Foster,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。样品中最老年龄为48Ma,该样品位于云步 桥断层的上盘,由于云步桥断层为一条正断层,上盘 在下降的过程中会导致地温升高,这就导致了该盘 样品所测年龄值偏小。注意到6号样品与10号样 品具有相同的年龄,断层断距按1050m(6号样品) 和 755 m(10 号样品)的差值估算,断层正断距为 295 m,也就是说 9 号样品抬升后又经受了近 300 m 的热史,因此,由其所代表的泰山抬升的时间要早于 48 Ma。年龄修正值为 53 Ma。分析 9 号样品径迹 长度直方图表明该样品已经退火,不能反映最老径 迹形成时的年龄。如果裂变径迹长度的缩短率大于 0.5,长度缩短量/密度减小量将满足 1 : 1 关系 (Green, 1988)。缩短率为 0.78(12.2 $\mu$ m /15.5  $\mu$ m),大于 0.5,故最老径迹形成的时间等于径迹年 龄除以裂变径迹长度缩短率(Willett, 1992)。计算 得出最老径迹形成于 62 Ma。可以推断,泰山是新 生代以来抬升的一个断块山。

裂变径迹测试资料显示出两个明显的特征(图 3)。一是长度-年龄图(图 3a)呈凹面向上的 boomerang图形(Green, 1986)或香蕉图(Gallagher & Brown, 1997),二是标准差-年龄图中长度相对



## 图 2 泰山样品采集地质剖面及磷灰石裂变径迹 年龄-高程图



1一年龄(±1σ);2一采样点;3一正断层;①一云步桥正断层;
②一中天门正断层

1—age (±1σ); 2—sample location; 3—normal fault; ①—Yunbuqiao normal fault; ②—Zhongtianmen normal fault

较长(~13.0μm)的样品标准差相对较小,一般小于 或者略大于 2μm;长度相对短的样品标准偏差值相 对较大,呈现出凹面向下的图形(图 3b)。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产生的变化,指示山 体经历了两次明显的抬升(O'Sullivan, 1996)。由 此判断出泰山自新生代以来经历了两次明显的抬 升:20 Ma 左右和 37 Ma 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 号和 13 号样品为例,二者的年龄值分别 为 20 Ma 和 39 Ma,断距按 755 m(10 号样品)和 350m(14 号样品)的差值估算,其年龄修正值为 23 Ma 和 44 Ma。因此,抬升时期一次在 44~37 Ma, 另一次是在 23~20 Ma。

下面计算云步桥断裂上升盘的视抬升速率。云 步桥断层上升盘1~7号采样点呈线性关系,根据1 ~7号采样点的海拔高度计算,37~35 Ma 期间的 视抬升速率为0.045 mm/a,33~20 Ma 期间视抬升 速率为0.018 mm/a,20~16 Ma 期间为0.023 mm/ a。即,37~35 Ma 和 20~16 Ma 抬升速率较大。视 抬升速率与长度-年龄图和标准差-年龄图分析得出 的结论是相同的。由于侵蚀作用,与最老的9号样 品年龄相同的岩石已经不存在,但将1~7号样品拟 合线延长至48Ma,得到约1625m的高度。延长至 53Ma,得到1700m的高度。由此估算53~48Ma 期间的视抬升速率为0.015mm/a。

## 1.2 裂变径迹热史反演

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 et al (1987)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(Press et al, 1988; Willett, 1997),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%±的置信度限制,模拟过程重复 10000 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



# 图 3 泰山磷灰石裂变径迹数据 Fig. 3 Apatite fission track data of the Taishan Mountain (a)—长度(±1\sigma)-年龄(±1\sigma)图;(b)—标准差-年龄(±1\sigma)图 (a)—fission track length (±1\sigma)-fission track age (±1\sigma); (b)—track length standard deviation-fission track age (±1\sigma)

拟的结果(Ketcham, 2005),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(acceptable fit),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(good fit)。

根据已有的数据,泰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(110±20°,65±20 Ma)。待定的路径由 时间-温度框的随机点所限制,直线再将这些点连接 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(Ketcham, 2003)。随后又对两个时间 (40±10 Ma,20±10 Ma)和温度(60±20°)范围进 行了约束,用其中随机洗取的点来重建热史。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(Age GOF)都远大于 0.5,表明模拟结 果是可靠和可信的。图 3 显示了泰山几个样品的热 史模拟结果,分析如下:①8号样品表明泰山约40 Ma开始进入退火带,此期有一次冷却事件,代表一 次抬升;②9号样品所测年龄最老,为48 Ma,模拟 结果表明泰山约 62 Ma 开始进入退火带,说明新生 代古新世早期泰山开始抬升;③ 11 号样品表明泰 山 22 Ma 左右有一次快速抬升事件;④ 12 号样品 模拟结果表明泰山 40 Ma 开始进入退火带,有一次 抬升,10~8 Ma 又有一次快速抬升,由于此期抬升 所处温度近地表,可能是模拟本身造成的结果,10 Ma 结果不可信(Dempster, 2006)。总体上,从模拟 分析可以看出,泰山自新生代开始抬升,有三次抬升 的时期:一次是在 62 Ma 左右,第二次在 40 Ma 左 右,第三次在22 Ma 左右。

锆石裂变径迹研究表明,泰山在前新生代抬升

速率相当缓慢(李理等,2006),磷灰石裂变径迹研究 和模拟表明,泰山自新生代以来进入快速抬升时期。 共经历了 62~53 Ma、44~37 Ma、23~20 Ma 三个 相对快速抬升阶段。可以说,尽管泰山出露的主岩-变质杂岩和侵入岩的形成时间为 2 800 Ma,现今泰 山却是新生代的产物,即鲁西隆起是新生代开始隆 升的。

# 2 济阳坳陷的沉降史

## 2.1 裂变径迹分析

裂变径迹测试实验与隆起区一致,仍采用 Green的步骤(Green, et al,1986)。为了更好地研 究济阳坳陷的构造沉降,研究引用了1个数据,共测 试、分析了4个磷灰石裂变径迹测年数据(表 2)。 样品组成了现今深度2908.23 m到3802 m的剖 面,所有样品均采自东营凹陷中部,时代为渐新世 (表 2)。

样品年龄在 6~15 Ma 之间,均小于其地层年龄(古新世),随深度下降年龄变化也不大,部分单颗粒无平均裂变径迹长度,部分单颗粒年龄显示为零。较为明显的是,样品短平均径迹短,且短径迹发育,这些都表明冷却的新径迹或残留的老径迹又发生了退火,但裂变径迹年龄未趋于零,仍存在平均裂变径迹长度。

即使是最深(深度在3802 m 处)的样品 W46-3,仍测有径迹长度,为10.3±3.4 µm,裂变径迹年 龄值6 Ma(远小于其地层年龄古新世),因此,它们 位于前完全退火带(冷却带)。

## 2.2 抬升史和裂变径迹热史反演

冷却带中的样品可以直接提供冷却/抬升的时间(Naeser,1979;Green,etal,1989)。冷却带中

样品	深度 (m)	颗粒数 (N)	自发径迹密度 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> )(条数)	诱发径迹密度 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> )(条数)	中子注量 (10 <sup>5</sup> /cm <sup>2</sup> )(条数)	检验概率 (%)	年龄 <sup>①</sup> (Ma) (±1σ)	平均长度±标准偏 差(μm)(径迹条数)	铀含量 (×10 <sup>-6</sup> )
			0,938	12, 191	10,657			$10.6 \pm 2.7$	
W46-1 2908.23 23	23	(79)	(1027)	(5519)	9.6 $15\pm 2$		(15)	15.91±0.74	
								$5.35 \pm 2.2$	
N101 <sup>(2)</sup> 3161.5					21.9	6.9 ±0.9	(10)		
11/10 0	0007 00	01	0.422	11.986	10.657			10.1 $\pm$ 2.5	14 50 1 1 00
W46-2 3327.60	21	(51)	(1448)	(5519)	$0 \qquad 8 \pm 2$		(55)	$14.78 \pm 1.03$	
WAG 0			0.260	12.615	10.657		c   9	10.3 $\pm$ 3.4	15 9 0 96
W46-3   3802.00	30	(42)	(2035)	(5519)	0	6 ±2	(25)	$15.2\pm0.86$	

表 2 济阳坳陷磷灰石裂变径迹数据

Tahla 2	The fission	track data	of anatite	in livong	depression
I abit 2	The moston	mach uata	or apatite	m jiyang	ucpi costoi

注: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;② 引自郭随平等(1996)。



图 4 泰山磷灰石裂变径迹 t-T模拟曲线(采用 Laslett et al,1987 年模型) Fig. 4 The AFT t-T modeling of the Taishan Mountain (from model of Laslett et al, 1987)

的年龄大致在 15~6 Ma,平均径迹长度为 10.6~9.0  $\mu$ m。如果上述径迹长度在 14~15.5  $\mu$ m,标准偏差等 于或小于 1  $\mu$ m (Gleadow, et al., 1986; Green, 1989),则指示一次 15 Ma 的抬升事件。由于径迹长 度和标准偏差都不满足,故冷却事件的发生时间要早 于 15 Ma。裂变径迹的缩短率为 0.7,大于 0.5,符合 裂变径迹长度-年龄 1:1 关系(Green, 1988)。根据 这种关系,得出冷却事件发生的确切时间为 22.5 Ma,这与区域构造事件——东营运动,即古近纪与新 近纪发生的时间吻合得相当好。

不考虑地温的变化,冷却带的裂变径迹年龄-深 度斜率可代表抬升速度(Naeser et al, 1989)。据此, 从 N101 和 W46-3 样品得出抬升速度为 27 m/Ma。

仍选用 Laslett 等 (Laslett et al, 1987)的裂变 径迹封闭扇形模型,运用随机模拟方法来限定裂变 径迹的热史特征。根据济阳坳陷的构造演化和已测 得的裂变径迹数据(郭随平等,1996),以东营凹陷为 代表的济阳坳陷裂变径迹的封闭年龄小于 77 Ma。 因此,热史初始参数选为接近该年龄,温度为高温 (110°± 20°,65±20 Ma)。随后又对两个时间范围 (40±10 Ma,20± 10 Ma)和温度(60°± 20°)框进 行了定义,用其中随机选取的点来重建热史。模拟 结果见图 5。W46-1 号样品模拟表明,济阳坳陷东 营凹陷 75~62 Ma 为抬升剥蚀阶段,62~30 Ma 为 埋藏加温阶段,其中 46~28 Ma 为快速沉降时期, 28~20 Ma 凹陷抬升剥蚀,20 Ma 以来又进入埋藏 加温阶段,但沉降速率明显减小。

#### 2.3 去压实法分析

采用去压实法可以得出盆地的总沉降量。总沉 降量包括构造沉降和沉积负载沉降。假设在局部艾 利均衡状态下,通过计算负载沉降,就能得出构造沉 降。以河 122 井为代表的济阳坳陷总沉降曲线(图 6)表明,65~46 Ma 沉降量较大,为3 200m,约46~ 37 Ma,总沉降量为2 800 m,为新生代平均沉降量 最大的时期,37 Ma 之后,总沉降明显降低,沉降量 为 300 m 左右。65~23.5 Ma 构造沉降量有相同变 化趋势。25 Ma 左右,盆地有一次抬升事件,剥蚀量 达 500 m 左右。

综合研究结果表明,新生代济阳坳陷主要为埋 藏加温的构造沉降时期,其中 62~46 Ma 和 46~38 Ma 为快速沉降阶段,古近纪末期 23 Ma 左右为抬 升剥蚀阶段。

3 鲁西隆起与济阳坳陷的隆坳关系

## 3.1 鲁西隆起与济阳坳陷中次级凸起的关系

按照隆坳耦合的推论,新生代济阳坳陷中各次 级凸起的抬升过程与泰山的抬升过程应该基本上是 同步的。采自济阳坳陷的滨县-陈家庄凸起、青城凸 起、曲堤-仁凤凸起(位置见图 1)的裂变径迹模拟研 究认为<sup>•</sup>,上述济阳坳陷中分隔南部和北部凹陷的 主要凸起,其抬升时间主要开始于古新世孔店组沉 积末期——沙四段沉积初期。以陈家庄凸起为例, 采自凸起上太古宇基底的郑 102 井和郑 39 井岩心 裂变径迹的热史演化模拟结果表明,两井分别给出 了 65 Ma 和 53 Ma 的开始隆升剥蚀时间,这与前述



图 5 济阳坳陷磷灰石裂变径迹 T-t模拟曲线(采用 Laslett et al, 1987 年模型) Fig. 5 The AFT *t*-T modeling of Jiyang depression (from model of Laslett et al, 1987)



Fig. 6 Subsidence curve of Dongying Sag, Jiyang Depression

磷灰石裂变径迹给出的 62~53 Ma 时期泰山新生 代初次抬升相对应。郑 102 井的热史模拟图上在 45~42 Ma 为快速抬升剥蚀时期,这与泰山在 44~ 37 Ma 的快速抬升对应得较好。

另外,青城凸起的抬升时间为 52.5 Ma,并一直 持续到 22.6 Ma,其西南部曲堤——仁凤凸起为 55.3~50.2 Ma 和 46.1~42.1 Ma,这些模拟得到 的时期与泰山新生代的抬升过程是基本吻合的。以 上事实充分说明与鲁西隆起相邻的这些次级凸起与 泰山的抬升基本上是准同步的。

## 3.2 鲁西隆起隆升与济阳坳陷沉降之间的关系

前述裂变径迹分析表明,鲁西隆起在新生代有 三次抬升史,分别为62~53 Ma,44~38 Ma和23~ 20 Ma。裂变径迹分析得出,济阳坳陷在62~46 Ma,46~38 Ma有两期明显的构造沉降和23 Ma左 右的一次抬升剥蚀。考虑到23~20 Ma是一次区 域上的抬升事件,可以说鲁西隆起的抬升与济阳坳 陷的沉降是在时间上是对应的。

盆地总沉降量大致能反映盆地断块与隆起差异 升降运动的总体特征,因此,济阳坳陷总沉降曲线与 鲁西隆起的隆升应该有大致对应关系。前述分析表 明 65~46 Ma 沉降量较大,大致对应鲁西隆起新生 代的首次抬升。约 46~37 Ma,总沉降量为 2 800 m,为新生代平均沉降量最大的时期,对应鲁西隆起 新生代快速抬升时期,视抬升速率达 0.045 mm/a。 37 Ma 之后,总沉降明显降低,沉降量为 300 m 左 右。此期鲁西隆起的抬升速度相对也较慢,视抬升 速率为 0.018 mm/a。25 Ma 左右,盆地有一次抬升 事件,抬升量达 500 m 左右,鲁西隆起也进入了第 二次快速抬升时期,视抬升速率为 0.023 mm/a。 其他学者(马莉娟等, 2000; 陆克政等, 1997;林畅 松等, 2003; 邱楠生等, 2004)对济阳坳陷沉降规律 的研究与河 122 井的结果基本一致。可以说,从沉 降量和抬升速率对应关系方面,这种隆-坳耦合规律 是存在的。

鲁西隆起快速抬升必然导致较高的剥蚀量, 坳 陷中对应有较高的沉积速率。据研究(宗国洪等, 1999), 济阳坳陷新生代古近纪沉积速率有如下变化 规律:65~50.5 Ma 时期沉积速率为 0.260 mm/a, 50~37.0 Ma 沉积速率为 0.237 mm/a, 37.0~24.6 Ma 时期沉积速率为 0.129 mm/a。泰山新生代 62 ~53 Ma 开始抬升,首次快速抬升时期为 44~37 Ma,这两个阶段济阳坳陷的沉积速率也是最大的, 约 0.237 mm/a。从济阳坳陷每个凹陷的沉积速率 看(宗国洪等, 1995;表 3),沙三期(43~38 Ma)各 凹陷的平均沉积速率都较大,平均值为 0.250 mm/ a。因此,从沉积速率的角度看,隆起和坳陷之间也 存在耦合关系。

## 表 3 济阳坳陷古近纪平均沉积速率 (mm /a) (据宗国洪等, 1995)

Table 3The Paleogene average rate of sedimentation ofJiyang Depression (mm/a) (from Zong Guohong et al, 1995)

	惠民凹陷	东营凹陷	沾化凹陷	车镇凹陷
东营期	0.080	0.090	0.120	0.130
沙一期	0.080	0.090	0.080	0.080
沙二期	0.090	0.080	0.060	0.090
沙三期	0.280	0.320	0.200	0.200
沙四晚期	0.130	0.070	0.050	0.040
孔店一沙四早期	0.190	0.150	0.050	0.080

# 3.3 鲁西隆起的隆升与渤海湾盆地及其周边山系 的关系

新生代泰山的快速抬升表现在与其周围及邻区 盆地的沉降、沉积和火山活动之间有着较好的对应 关系。泰山南侧的泰莱盆地中堆积了巨厚的始新统 砂砾岩,其下部富含古生界石灰质角砾,隐示泰山在 48 Ma之前(据前文分析为 62~53 Ma)已经开始抬 升,其上曾有过古生界灰岩盖层。抬升事件使得其 北侧济阳坳陷和南侧泰莱盆地在 45 Ma 有相似的 沉积和构造记录,不但都存在沉积间断,红层沉积也 都突变为蓝灰色泥岩(帅德福等,1987)。泰山 44~ 37 Ma 期间的整体快速隆升事件,在济阳坳陷表现 为沉积体系、古气候和沉降中心发生明显转化。23 ~ 20 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 200~500 m 厚 的地层被剥蚀(郭随平等,1996;史卜庆等,1999; 宗国洪等,1995)。

以泰山为代表的鲁西隆起的隆升过程同时与渤 海湾盆地及其周边山系的构造演化也有一定的对应 关系。44~38 Ma的快速抬升在渤海湾盆地黄骅坳 陷的孔店地区称为"孔店升降"(阎敦实等,1980)。 东濮凹陷文留背斜在43~38 Ma期间形成,整个凹 陷也随之整体抬升(许化政等,2003)。在辽河盆地 40~38 Ma的火山活动期也是抬升的印证(马寅生 等,2000)。渤海湾盆地黄骅坳陷、辽河坳陷、渤中 均陷的基底沉降曲线变化(陆克政等,1997)表明, 43~38Ma 是基底沉降量和沉降速度最快的时期。 泰山 23~20 Ma 的快速抬升对应辽河盆地的构造 反转期(马寅生等,2000),在太行山山前中~新生 代伸展滑拆离带中所记载的年龄为 23~18 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 生代鲁西隆起的抬升是华北克拉通区域性隆升事件 的一个组成部分。

# 4 鲁西隆起的隆升与油气的关系

由于鲁西隆起南、北两侧的泰莱凹陷和济阳坳 陷都发育沙三段以下(65~43 Ma)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,44~37 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 (李理等,2006)。这次抬升事件造成济阳坳陷大幅 度沉降,进而控制了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)等(王秉海等, 1992)形成。济阳坳陷由南向北惠民、东营、车镇和 沾化四个凹陷构造沉降曲线表明,邻近鲁西隆起的 凹陷时代偏老,远离隆起的凹陷时代偏新(李理, 1999;胡见义等,2001),这种构造沉降迁移,导致了 沉积速率类似的变化(表 3),控制着烃源岩的形成、 油气运移时间和油气分布由南向北迁移(图 7)。

鲁西隆起新生代的抬升为济阳坳陷古潜山油藏 提供了有效的储集空间。研究表明,济阳坳陷岩溶 发育分为三期(表4),只有喜山期形成的岩溶孔隙



图 7 济阳坳陷油气系统图(据胡见义等,2001,有修改) Fig. 7 Petroleum system of the Jiyang Depression (adapted from Hu Jianyi et al, 2001)

2007 年

表 4 岩溶发育期鉴别标志

Table 4 The discriminate sign of karst in different stage

出家生苔期	溶蚀孔隙					
石榴及月朔	充填物	充填程度	相互关系			
印支期I	鳞片状泥岩为主,混有粉砂,其次是方解石	一般全充填				
燕山期 Y	方解石为主,其次为白云石、泥质、硅质等	一般全充填,偶见晶间孔	切穿I期孔缝			
喜山期 H	铁方解石为主,见含铁白云石、石英、天青石,偶见荧石、菱锌矿	一般半充填,局部全充填,多数孔隙 发育	改造切割 Y 期孔缝,偶见切穿 I 期溶 缝现象			

才得以保留,并改造了燕山期和印支期的溶孔。而 济阳坳陷大规模的油气运移主要发生在新近纪明化 镇组沉积末期(王秉海,1992),因此,喜马拉雅时期 形成的溶蚀孔隙成为有效地储集空间。新生代泰山 23 Ma 左右的快速抬升,对应济阳坳陷区也有一次 区域性的抬升,造成了 200~500 m 的剥蚀,并在地 表的条件下发育了溶蚀孔隙,正是这次抬升造就了 油气有效的储集空间。

此外,前述鲁西隆起与济阳坳陷在沙三段沉积 之前是一个相连的联合盆地及泰莱凹陷、大汶口-新 泰等凹陷都发育沙三段以下(65~43 Ma)地层,其 中鲁西隆起上的这些凹陷始新世为慢速扩张的湖泊 充填沉积,发育较厚的泥岩、泥灰岩夹粉砂岩;含石 膏、盐、油页岩等化学岩;在泰莱凹陷,厚度超过 1000m,在大汶口凹陷超过3000m。这种咸水湖泊 相碳酸盐岩-硫酸盐-岩盐和钾盐组合,如,大汶口凹 陷中的含矿建造类型,与东营凹陷沙四段非常相似, 在石膏和岩盐上下,出现暗色富含有机质的泥页岩, 形成咸化湖盆烃源岩(金强等, 2006),有一定的油 气显示。推测鲁西隆起上的这些凹陷可能有一定的 油气潜能。

# 5 结论与讨论

(1) 裂变径迹研究建立了鲁西隆起新生代三期 抬升史,62~53 Ma开始抬升,视抬升速率较快,为 0.015 mm/a,快速隆升的时间发生在44~38 Ma和 23~20 Ma,视抬升速率分别为 0.045 mm/a 和 0.023 mm/a。

(2)研究表明济阳坳陷古近纪有两期明显的沉降史,分62~44 Ma和44~38 Ma两个阶段,构造沉降量大,沉积速率最快,分别为0.260 mm/a和0.237 mm/a,古近纪末23 Ma左右坳陷整体抬升。

(3)新生代鲁西隆起的快速抬升与坳陷的沉降 之间存在隆-坳耦合关系,与济阳坳陷中次级凸起之 间的抬升也是准同步的。此外,鲁西隆起与周围及 邻区盆地的沉降也有着较好的对应关系。鲁西隆起 新生代抬升是一次区域性的事件。

(4) 44 Ma 之前鲁西隆起与济阳坳陷是联合盆 地,鲁西隆起上的次级凹陷中发育咸化湖盆烃源岩, 有一定的油气显示。44~37 Ma 期间鲁西隆起的整 体快速隆升使二者分隔开来,造成济阳坳陷大幅度 沉降,控制着烃源岩的形成、油气运移时间和油气分 布由南向北迁移;鲁西隆起约 23 Ma 的抬升为古潜 山油藏提供了有效的储集空间。

晚中生代以来,渤海湾盆地所在的华北克拉通 进入岩石圈减薄伸展裂陷时期(翟明国等,2004;张 旗等,2001)。新生代受太平洋板块的俯冲、郯庐断 裂的走滑活动及印欧板块的碰撞,地壳裂陷减薄,地 幔再次上隆,控制了伸展作用及伸展断陷与沉积加 积。由于板块俯冲速度、方向的不同、走滑活动性质 的不同和碰撞影响到东部时间的不同,伸展裂陷呈 强弱不同的"幕"式进行(陆克政等, 1997)。在伸 展裂陷的序幕期,裂陷伸展作用较强烈,由于侧向物 质的迁移,使深部相同圈层的物质缩短增厚(徐杰 等,2001;牛树银等,2006),反映在隆起区具有较 快的隆升速率,坳陷区则有较大的构造沉降量和沉 积速率,在伸展裂陷的强烈期,必然对应隆起区的快 速抬升和凹陷区的快速沉降。研究表明(徐杰等, 2001; 李扬鉴等, 1996;张家声等, 2002;邱爱金等, 2002; 胡宝清等, 2003; 张进等, 2004; 胡圣标等, 2005),新生代渤海湾盆地的沉降与周围山系的隆升 之间具有耦合关系,如阴山-燕山、秦岭-大别山、太 行山等山脉,不但与中新生代大幅度沉降的断陷盆 地毗邻,而且隆升时间(阴山-燕山新生代于始新世 开始隆升,太行山在 68~52Ma,23~18Ma 快速抬 升,秦岭~大别山于 60~40Ma,40~20Ma 快速抬 升)与断陷大体同步,隆坳幅度也相近。新生代鲁西 隆起与济阳坳陷的耦合关系仅仅是山-盆耦合的一 个组成部分。在更大尺度上,新生代中国东部岩石 圈减薄、盆地的沉降与西部板块的碰撞、增厚和抬升

在构造-沉积-岩浆事件诸方面具准同时性(钟大赉 等,2001),属于岩石圈尺度的盆山耦合。

**致谢**:样品采集得到中国石油大学宋全友博士 及蔡福龙、龚鹏宇同学的帮助,裂变径迹测试由中科 院高能物理所袁万明先生完成,裂变径迹热史反演 得到了中科院地质与地球物理所胡圣标研究员的指 导,在咸化湖盆烃源岩方面与中国石油大学金强教 授进行了有益的探讨,在此一并表示感谢。

## 注 释

● 王国芝. 2005. 济阳坳陷陈家庄~白庙地区构造成因及演化研究,胜利油田博士后报告.

#### 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.
- 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.
- 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.
- 胡宝清,刘顺生,王世杰.2003.秦岭-大别造山带的盆-山体系演化及 其区域环境效应.长江流域资源与环境,12(5):450~456.
- 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.
- 胡圣标,郝杰,付明希,等.2005.秦岭-大别-苏鲁造山带白垩纪以来 的抬升冷却史-低温年代学数据约束.岩石学报,21(4):1167~ 1173.
- 金强,朱光有.2006.中国中新生代咸化湖盆烃源岩沉积的问题及相关进展.高校地质学报,12(4):483~492.
- 李理.1999.惠民-东营凹陷孔店组-沙四段构造对油气的控制作用. 石油地质,21(增刊):10~14.
- 李理,钟大赉.2006.泰山新生代抬升的裂变径迹证据.岩石学报,22 (2):457~464.
- 李扬鉴,张星亮,陈延成.1996.中国东部中新生代盆-山系及有关地 质现象的成因机制.中国区域地质,(1):88~95.
- 林畅松,郑和荣,任建业,等.2003. 渤海湾盆地东营、沾化凹陷早第三 纪同沉积断裂对沉积充填的控制.中国科学(D辑),33(11): 1025~1036.
- 刘和甫,梁慧社,蔡立国,等.1994.天山两侧前陆冲断系构造样式与 前陆盆地演化.地球科学-中国地质大学学报,19(6):727~ 741.
- 刘和甫,梁慧社,李晓清,等.2000.中国东部中新生代裂陷盆地与伸 展山岭耦合机制.地学前缘,7(4):477~486.
- 陆克政,漆家福,戴俊生,等.1997.渤海湾新生代含油气盆地构造模式.北京:地质出版社:1~251.
- 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.
- 牛树银,邵济安,孙爱群,等.2006. 华北东部盆山耦合与内生成矿作 用.大地构造与成矿学,30(3):331~342.
- 邱爱金,张万良.2002.阴山-燕山造山带的"开-合"历史.地学前缘,9

(2):414.

- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 王桂梁,刘桂建,邹海,等.1999.华北地台北缘中生代盆-山的耦合转 移及其动力学分析.煤田地质与勘探,27(6):14~17.
- 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.
- 吴根耀,马力.2003. 试论"盆""山"的耦合和脱耦及其运动学. 石油实 验地质,25(2):99~109.
- 徐杰,高战武,孙建宝,等.2001.区域伸展体制下盆-山构造耦合关系 的探讨--以渤海湾盆地和太行山为例.地质学报,75(2):165~ 174.
- 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.
- 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.
- 张进,马宗晋,任文军.2004.对盆山耦合研究的新看法.石油实验地 质,26(2):169~175.
- 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(S4~5):207~210.
- 翟明国,孟庆任,刘建明,等.2004.华北东部中生代构造体制转折峰 期的主要地质效应和形成动力学探讨.地学前缘,11(3):285 ~297.
- 张旗,钱青,王二七,等.2001.燕山中晚期的中国东部高原:埃达克岩的启示.地质科学,36(2):248~255.
- 钟大赉等. 1998. 滇川西部古特提斯造山带. 北京: 科学出版社.
- 钟大赉,丁林,季建清,等.2001.中国西部新生代岩石圈汇聚和东部 岩石圈离散的耦合关系与古环境格局演变的探讨.第四纪研究, 21(4):303~312.
- 宗国洪,李常宝,施央申,等.1999.济阳坳陷构造演化及其大地构造 意义.高校地质学报,5(3):275~282.
- 宗国洪,施央申,王秉海,等.1995.济阳盆地中生代构造特征与油气. 地质论评,44(3):289~294.
- Wang Guozhi. 2005. Tectonic origin and evolution of Chenjiazhuang-Baimiao area in Jiyang depression, Eastern China. The postdoctorate thesis of the Shengli oil field.
- Ai Xiansen, Zhang Chengji, Wang Shijin. 1998. Progress in regional geological surveys in Shandong province over the past ten years. Regional Geology of China, 17(3): 228~235 (in Chinese with English abstract).
- Boyer Steven E. 1995. Sendimentary basin taper as a factor controlling the geometry and advance of thrust belts. American Journal of Science, 295: 1220~1254.
- Davis D, Suppe J, Dahlen F A. 1983. Mechanics of folds and thrust belts and accretionary wedges. Journal of Geophysical Research, 88(B2): 1153~1172.

- Davis G A, Qian X, Zheng Y, et al. 1996. Mesozoic deformation and Platonism in the Yunmeng Shan: a metamorphic complex north of Beijing, China. Yin A, Harrison M, eds. The Tectonic Evolution of Asian. Cambridge University Press. 253~280.
- Dempster T J, Persono C. 2006. Low-temperature thermochronology: Resoving geotherm shapes or denudation histories? Geology, 34(2): 73~76.
- Foster D A, Gleadow A J W. 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, Brown R P. 1997. The onshore record of passive margin evolution. Journal of the Geological Society. 154(3): 451~457.
- Gleaelow A J W, Duddy I R, Green P F, et al. 1986. Confined fission track lengths in apatite: a diagnosed tool in thermal history analysis. Mineralogy and Petrology, 94: 405~ 415.
- Green, P F, Duddy I R, Gleadow A J W et al. 1986. Thermal annealing of fission tracks in apatite 1. A qualitative description. Chem. Geol., 59: 237~253.
- Green P F. 1988. The relationship between track shorting and track age reduction in apatite. Combined influences of inherent instability, annealing anisotropy, length bias and system calibration. Earth and Planetary Science Letters,  $89: 335 \sim$ 352.
- Green P F, Duddy I R, Laslett G M, et al. 1989. Thermal annealing of fission tracks in apatite 4. Qualititave modeling techniques and extensions to geological timescales. Chemical Geology, 79: 155~182.
- Guo Suiping, Shi Xiaobin, Wang Liangshu. 1996. Thermal history analysis of Dongying Depression, Shengli oil region. Oil & Gas Geology, 17(1): 32~36 (in Chinese with English abstract).
- He Bin. 2001. On dynamics of the Bohai Bay complex faulted basin. Experimental petroleum geology, 23(1):  $27 \sim 30$  (in Chinese with English abstract).
- Hu Baoqing, Liu Shunsheng, Wang Shijie. 2003. Basin-range system evolution of Qinling-Dabie orogenic belt and its effects on regional environment. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 12(5):  $450 \sim 456$  (in Chinese with English abstract).
- Hu Jianyi & Niu Jiayu. 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).
- Hu Shengbiao, Hao Jie, Fu Mingxi, etal. 2005. Cenozoic denudation and cooling history of Qinling-Dabie-Sulu orogens: apatite fission track thermochronology constraints. Acta Petrologica Sinica, 21 (4): 1167 ~ 1173 (in Chinese with English abstract).
- Ketcham A R. 2003. Effects of allowable complexity and multiple chronometers on thermal history investion. Gelchim Cosmochim Acta, a, 67: A213.

- Ketcham A R. 2005. Forward and inverse modeling of lowtemperature thermochronometry data. Reviews in Mineralogy & Geochemistry, 58: 275~314.
- Laslett G M, Green P F, Duddy I R, Gleadow A J W. 1987. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2. A quantitative analysis. Chem. Geol., 65: 1~13.
- Jin Qiang, Zhu Guangyou. 2006. Progress in research of deposition of oil source rocks in Saline lakes and their hydrocarbon generation. Geological Journal of China Universites, 12(4):483 ~492 (in Chinese with English abstract).
- Li Li. 1999. The structural control on hydrocarbon accumulation in Ek-Es<sup>4</sup> strata of Huimin-Dongying Depression, Experimental Petroleum Geology, 21(suppl.):10~14.
- Li Li, Zhong Dalai. 2006. Fission track evidence of Cenozoic uplifting events of the Taishan Mountain, China. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 457~464 (in Chinese with English abstract).
- Li Yangjian, Zhang Xingliang, Chen Yancheng. 1996. On the formation mechanism of the Meso-Cenozoic basin-range system and its related geological phenomena in eastern China. Regional Geology of China, (1): 88 ~ 95 (in Chinese with English abstract).
- Lin Changsong, Zheng Herong, Ren Jianye et al. 2003. Early Teriary fill control of synsedimentary faulting in Dongying Sag and Zhanhua Sag, Bohai Bay Basin. Science in China (Series D), 33(11): 1025~1036 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguo et al. 1994. Evolution and Structural Style of Tianshan and Adjacent Basins, Northwestern China. Earth Science-journal of China University of Geosciences, 19(6): 727~741.
- Liu Hefu, Liang Huishe, Li Xiaoqing et al. 2000. The coupling mechanisms of Mesozoic-Cenozoic rift basins and extensional mountain system in eastern China. Earth Science Frontiers, 7 (4): 477~486 (in Chinese with English abstract).
- Lu Kezheng, Qi Jiafu, Dai Junsheng et al. 1997. The Cenozoic structural pattern of oil and gas basin, Bohai Bay Basin. Beijing: Geology Publish, 1~251 (in Chinese).
- Ma Yinsheng, Cui Shengqin, Wu Jinguo et al. 2000. Uplift history of the Yiwulushan Mountain in West Liaoning. Acta Geoscientia Sinica, 21(3): 245~253 (in Chinese with English abstract).
- Naeser C W. 1979. Thermal history of sedimentary basins: fission track dating of subsurface rocks. In P A Scholle and R P Schluger eds., Aspect of diagenesis: SEPM Special Publication, 26: 109~112.
- Naeser N D, Naeser C W, McCulloh T H. 1989. The application of fission track dating to the depositional and thermal history of rocks in sedimentary basin. In: N. D. Naeser & T. H. Mc Culloh eds. Thermal history of sedimentary basins: methods and Case histories. Springer Verlag, New York, 157~180.
- Niu Shuyin, Shao Ji'an, Sun Aiqun. 2006. Coupling relationship between Basin-Mountain and nedogenic mineralization in the

eastern part of North China. Geotectonica et Metallogenia, 30 (3): 331~342 (in Chinese with English abstract).

- O'Sullivan P B, Foster D A, Kohn B P, Gleadow A J. 1996. Multiple post orogenic denudation events: An example from the eastern Lachlan fold belt. Australia. Geology, 24(6): 563~ 566.
- Press W H, Flannery B P, Teukolsky S A, Vettering W T. 1988. Numerical reciples of C. Cambridge University Press, Cambridge.
- Qiu Aijin, Zhang Wanliang. 2002. The "open-shut" history of Yinshan Mountain and Yanshan Mountain orogenic zone. Earth Science Frontiers, 9 (2): 414 (in Chinese with English abstract).
- Qiu Nansheng, Li Shanpeng, Zeng Jianhui. 2004. Thermal history and tectonic-thermal evolution of the Jiyang Depression in the Bohai Bay Basin, East China. Acta Geologica Sinica, 78(2): 263~269 (in Chinese with English abstract).
- Schlunegger F. 1999. Controls of surface erosion on the evolution of the Alps: constraints from the stratigraphies of the adjacent foreland basins. International Journal of Earth Science, 88: 285  $\sim$ 304.
- Shi Puqing, Wu Zhiping, Wang Jixiang 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).
- Shuai Defu, Wang Binhai. 1987. The geology of oil and gas in China (vol. 6). The editorial committee of China geology. Beijing: Petroleum Industry Press (in Chinese).
- Wang Binghai, Qian Kai. 1992. The geologic research and exploration in Shengli Oil Region. Shandong: University of Petroleum Press (in Chinese).
- Wang Guiliang, Liu Guijian, Zou Hai et al. 1999. Coupling and transition of the Mesozoic Basin-Mountain on the northern edge of North China platform and its dynamics analysis. Coal Geology & Exploration, 27(6): 14 ~ 17 (in Chinese with English abstract).
- Wernicke B. 1981. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen. Nature, 291: 645~648.
- Wernicke B, Burchfiel B C. 1982. Modes of extensional tectonics. Journal of Structural Geology, (4): 105~115.
- Willett S D. 1997. Inversion modeling of fission tracks in apatite 1: A controlled search method. American Journal of Sciences, 297: 939~969.
- Willett S D. 1992. Modeling thermal annealing of fission tracks in apatite. In: Short Course Handbook on Low Temperature Thermo chronology. Zentilli M, Reynolds P H. (eds) Mineralogical Association of Canada: 43~72.
- Wu Chen, Zhang Xiuqing, Ma Yonghong. 1997. The discussion of Dianziliang period planation surface and early Teriary

physiographic in North Chian mountain region. Geography and Territorial research, 13(3):39~46 (in Chinese).

- Wu Genyao, Ma Li. 2003. An approach to orogenesis-coupled/ decoupled basin development and its kinematics. Petroleum Geology & Experiment, 25(2): 99 ~ 109 (in Chinese with English abstract).
- Xu Jie, Gao Zhanwu, Sun Jianbao et al. 2001. A preliminary study of the coupling relationship between basin and mountain in extensional environments. Acta Geologica Sinica, 75(2): 165~ 174 (in Chinese with English abstract).
- Xu Huazheng, Zhou Xinke. 2003. The tectonic evolution and reservoir formation in Wenliu area, Bohaiwan Basin. Petroleum Geology & Experiment, 25(6): 712~719 (in Chinese with English abstract).
- Yan Dunshi, Wang Shangwen, Tang Zhi. 1980. The block activity and the forming of paleo-burried hill reservoir in Bohai Bay Basin. Actaa Petrolei Sinica, 1(2): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo, Meng Qingren, Liu Jianming. 2004. Geological features of Mesozoic tectonic regime inversion in Eastern North China and implication for geodynamics. Earth Science Frontiers, 11(3): 285~297.
- Zhang Jin, Ma Zo; ngjin, Ren Wenjun. 2004. Thinking on the present research of Basin-Mountain Coupling. Petroleum Geology & Experiment, 26 (2): 169 ~ 175 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiasheng, Xu Jie, Wan Jinglin et al. 2002. Meso-Cenozoic detachment in the front of the Taihang Mountains and their fission-track ages. Geological Bulletin of China, 21(S4-5): 207 ~210 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qi, Qian Qing, Wang Erqi et al. 2001. An East China plateau in mid-late Yanshanian period: implication from adakites. Geological Science, 36(2):248~255 (in Chinese with English abstract).
- Zhong Dalai et al. 1998. The Paleotethys orogenic belts of the Western Yunnan and Sichuan Province. Beijing: Scientific publishing house.
- Zhong Dalai, Ding Lin, Ji Jianqing et al. 2001. Coupling of the lithospheric convergence of West China and dispersion of East China in Cenozoic: link with paleoenvironmental changes. Quaternary Sciences, 21 (4): 303 ~ 312 (in Chinese with English abstract).
- Zong Guohong, Li Changbao, Shi Yangshen et al. 1999. Evolution of Jiyang Depression and its tectonic implications. Geological Journal of China Universities, 5(3): 275~282 (in Chinese with English abstract).
- Zong Guohong, Shi Yangshen, Wang Binghai et al. 1995. Mesozoic structures ans their relations to Hydrocarbon traps in the Jiyang Basin. Geological Review, 44(3): 289~294 (in Chinese with English abstract).

# Cenozoic Uplifting/Subsidence Coupling Between the West Shandong Rise and the Jiyang Depression, Northern China

LI Li<sup>1)</sup>, ZHONG Dalai<sup>2)</sup>, SHI Xiupeng<sup>1)</sup>

Institute of earth science and information, China University of Petroleum, Shandong, Dongying, 257061
Institute of the geology and geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing, 100029

#### Abstract

This paper mainly studies the Cenozoic uplifting history of the West Shandong Rise and the subsidence of the Jiyang Depression in order to understand the uplifting history of the West Shandong Rise (WSR), the relationship between the WSR and the Jiyang Depression, further better our insights into the Bohai Bay Basin. Our AFT analysis and AFT t-T model indicates that there were three relatively rapid stages for uplifting of the West Shandong Rise:  $62 \sim 53$  Ma,  $44 \sim 37$  Ma and  $23 \sim 20$  Ma. Meanwhile, two rapid subsidence with big a big magnitude of subsidence at  $65 \sim 46$  Ma and  $46 \sim 38$  Ma, and one uplifting at 23 Ma also took place in the Jiyang Depression. Comparison study shows that the uplifting of the West Shandong Rise at Cenozoic coupled well with the subsidence of the Jiyang Depression. Furthermore, the uplifting events not only control the formation of hydrocarbon's mother rock, and the time, distribution and migration of oil-gas, but also provide a reservoir space for the oil-gas in the buried hills. Our research also suggests that the uplift-depression coupling events are part of the couplings between the Bohai Bay Basin and its peripheral mountains.

Key words: Uplift/subsidence coupling; West Shandong rise; Jiyang depression; Cenozoic