

# 四川盆地东南缘中生代构造隆升的裂变径迹证据

李双建<sup>1</sup>, 李建明<sup>2</sup>, 周雁<sup>1</sup>, 沃玉进<sup>1</sup>, 汪新伟<sup>1</sup>

(1. 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 延长石油集团研究院, 陕西西安 710075)

**摘要:**通过对四川盆地东南缘 8 件不同层位的磷灰石样品裂变径迹的分析, 获得了该区中生代构造隆升的时限, 并分析了其构造和油气地质意义。磷灰石裂变径迹分布形态总体具有单峰特征, 部分具有双峰特征, 平均径迹长度在 10~13  $\mu\text{m}$ , 标准偏差在 1.5~2.5  $\mu\text{m}$ , 反映了磷灰石在地质历史时期经历过较缓慢的冷却退火过程。样品的热史模拟结果显示, 所有样品在进入部分退火带(PAZ)以后没有再经历明显的沉降埋藏, 均表现为持续的隆升, 但不同地区进入隆升期的先后次序不同。盆地东南缘的隆升起始时间在 95~60 Ma 左右, 即晚白垩世—古近纪, 向北到达盆地边缘的时间为 40~35 Ma, 为古近纪晚期。几乎所有的样品都具有晚期快速抬升的特点, 抬升时限均在 10 Ma 以内, 多数小于 5 Ma, 部分小于 2 Ma。从油气地质的角度看, 川东南地区喜山期的强烈隆升一方面可能造成已有的气藏破坏, 另一方面也可能有利于形成新的具裂缝性储层的岩性气藏或者水溶气气藏。

**关键词:**川东南, 磷灰石裂变径迹, 构造隆升, 中生代

中图分类号: P597; P542<sup>+</sup>. 1

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2011)02-0225-09

## Fission track evidence for Mesozoic-Cenozoic uplifting in the southeastern margin of Sichuan basin

LI Shuang-jian<sup>1</sup>, LI Jian-ming<sup>2</sup>, ZHOU Yan<sup>1</sup>, WO Yu-jin<sup>1</sup> and WANG Xin-wei<sup>1</sup>

(1. Petroleum Exploration and Production Institute of SINOPEC, Beijing 100083, China; 2. Research Institute of Yanchang Petroleum Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

**Abstract:** Viewed from sedimentary records, the uplift and deformation in the southeastern margin of Sichuan basin occurred later than late Jurassic. Prior to this event, there existed a favorable petroleum geological conditions resulting in large scale hydrocarbon accumulation in this area. However, hydrocarbon accumulation was destroyed and adjusted by uplift and deformation of the sedimentary sequence. It is of great significance to determine the time limit of uplift and analyze its effect on hydrocarbon accumulation. Based on apatite fission track analysis of eight samples from different strata in the southeastern margin of Sichuan basin, the authors confirmed the Mesozoic-Cenozoic uplifting time limit and discussed its tectonic and petroleum geological significance. The apatite track lengths are distributed mostly in the single peak form, with a few in the double-peak form. The mean track length is between 10  $\mu\text{m}$  and 13  $\mu\text{m}$ , and standard error is between 1.5  $\mu\text{m}$  and 2.5  $\mu\text{m}$ . The distribution characteristics of fission tracks suggest that the samples have experienced a slow cooling process. The thermal history simulation results show that all the samples have not experienced obvious subsidence since they entered the partial annealing zone. Almost all the samples have experienced three uplift periods, i. e., fast uplift in the early period, gentle uplift in the middle period and fast uplift in the late period, with the uplift

收稿日期: 2010-04-10; 修订日期: 2010-07-17

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目(2008CB425703); 国家重大科技专项资助项目(2008ZX05005-001-001); 国家自然科学基金委员会-中国石油化工股份有限公司联合研究基金(石油化工联合基金)项目(40739904)

作者简介: 李双建(1978-), 男, 高级工程师, 主要从事石油地质学研究, E-mail: lishuangjian@pepris.com.

time being different in different areas. The first uplift period in the southeastern margin of Sichuan basin occurred at about 90~60 Ma, and the arrival at the margin of the basin occurred at 40~35 Ma after northward transmission. Almost all of the samples experienced fast uplift events in late Cenozoic, and the time limit of them are within 10 Ma, with most of them being younger than 5 Ma and a few of them younger than 2 Ma. From the angle of plate tectonics, the uplift of this area in Himalayan period was related to the uplift of Tibet. From the angle of petroleum geology, the intense uplifting in the southeastern margin of Sichuan basin might have on the one hand destroyed the existent gas accumulations but on the other hand created favorable conditions for the formation of fractured gas accumulations and water-soluble gas accumulations.

**Key words:** southeast margin of Sichuan basin; apatite fission track; uplift; Mesozoic and Cenozoic

四川盆地属扬子准地台,古生代时主体为克拉通盆地的陆表海沉积,发育了巨厚的碳酸盐岩层系地层,受广西运动的影响,中晚志留世—二叠纪相对隆起,缺乏泥盆系和石炭系,印支运动转换为大型拗陷,晚燕山运动,特别是喜马拉雅运动后发生褶皱隆起(童崇光,1992)。四川盆地的格局主要受北东—南西向及北西向两条构造线控制,构成了典型的菱形盆地(郭正吾等,1996)。目前关于四川盆地周缘中新代构造隆升的研究,西缘与北缘的研究较多,东缘和南缘的研究相对较少(刘树根等,1995,2008a;胡圣标等,2005;沈传波等,2007;邱楠生等,2008)。前人对龙门山和米仓—大巴山的构造演化研究表明,中新代以来四川盆地西缘和北缘先后受秦岭板块由北向南挤压和青藏板块由西向东的挤压,发生过多阶段幕式隆升,不同构造带构造隆升强度也存在很大差异,对油气成藏改造的强度和方式具有各自的特点(罗志立,1994;刘树根等,2006)。四川盆地东南缘处于川东北东向构造和川南北西向构造交接部位,其构造隆升受到多个方向应力的影响,研究该区构造隆升的时序对认识四川盆地形成与演化有重要意义。

由于区域上普遍缺失连续的新生代沉积记录,且没有明显的由新生代挠曲沉降造成的前渊凹陷,从而导致新生代构造活动和构造变形难于系统地恢复和重建。目前已经有一些研究工作试图通过岩浆活动、沉积不整合、构造层序和区域构造解析等重建新生代构造运动的框架(刘树根等,1996;颜丹平等,2000;李勇等,2002),但这些研究很难精确厘定无沉积记录时期构造运动的时限。近年来,随着低温年代学技术(包括磷灰石、锆石裂变径迹和U-Th/He定年)的不断发展,这种低温年代学技术在原理与方法上都已相当成熟,测年时间可由几百万年跨度到亿年,它是约束浅部岩石(10 km以内)冷却、剥露作

用的有效手段之一,在盆地构造演化、热史分析、沉积物源恢复以及造山带剥露等领域获得了广泛的应用(Garver and Brandon,1999;Batt *et al.*,2000;许长海等,2004;邱楠生等,2004;胡圣标等,2005;袁万明等,2005;郑德文等,2005)。目前已经有大量分析数据可为四川盆地及周缘的新生代构造活动提供进一步约束与限定(沈传波等,2007;刘树根等,2008a;邱楠生等,2008;安艳芬等,2008;雷永良等,2009),这些数据点多分布在四川盆地西缘和北缘,东缘和东南缘的数据较少。

本文选择四川盆地东南缘为主要研究区,取得不同层位的砂岩样品,依据磷灰石裂变径迹分析技术,试图构建研究区中新代构造活动的时序特征,并分析其油气地质意义。

## 1 地质背景及样品采集与测试

研究区位于四川盆地东南缘、黔中隆起北部。在该区的中元古代褶皱基底之上,发育有上扬子地台区最完整的新元古界和下古生界沉积盖层(上志留统除外)。上志留统和泥盆系全部缺失,石炭系仅在台陷边缘地带残留少量,绝大部分地区亦多缺失。二叠系及下中三叠统遍布全区,平行不整合超覆于中下志留统或石炭系之上。此外,在遵义—息烽一线以西地区,向斜核部还常保存有侏罗系内陆湖盆相红层。上述沉积盖层累计厚度可达7 000~10 000 m。从地层缺失和接触关系上分析,四川盆地东南缘的变形构造主要形成于早白垩世的燕山主褶皱造山期。研究区典型构造型式为左行雁列式(或称反多字型)褶皱及与之配套的断裂组合,属直扭型构造,其中最具有代表性的构造形迹见于桐梓—仁怀一线,为一群褶皱枢纽向南东凸出、近直角弧形急转并呈近东西向左行横向(或称反多字型)排列而成的



表 1 川东南磷灰石裂变径迹测试数据

Table 1 Apatite fission track measurement data obtained from southeast Sichuan basin

样号	层位	$n$	$\rho_s$ ( $10^5/cm$ )	$N_s$	$\rho_i$ ( $10^5/cm$ )	$N_i$	$\rho_d$ ( $10^5/cm$ )	$N_d$	$P(X^2)\%$	$t_c \pm 1\sigma/Ma$	$L/\mu m$	$N_T$
PD048	$P_1l$	30	6.623	543	3.452	283	1.620	2 220	99.3	$60 \pm 5$	$10.7 \pm 2.1$	56
LC019	$O_1m$	32	5.086	285	3.623	203	1.091	2 220	100	$29 \pm 5$	$10.4 \pm 1.9$	43
BS007	$\epsilon_1m$	32	4.598	362	2.807	221	1.380	2 220	98.7	$43 \pm 4$	$11.4 \pm 1.6$	90
BS022	$O_1m$	32	3.495	369	2.198	232	1.404	2 220	99	$43 \pm 4$	$11.1 \pm 2.2$	103
BS040	$T_{3s}$	34	3.524	990	1.516	426	1.356	2 220	96.1	$60 \pm 4$	$11.9 \pm 1.9$	102
XW022	$S_2h$	32	4.836	229	4.706	291	1.380	2 220	97.9	$27 \pm 3$	$11.8 \pm 2.4$	59
XW029	$T_1f$	32	0.681	196	0.448	129	1.043	2 220	100	$30 \pm 4$	$12.6 \pm 2.1$	49
XW041	$J_2s$	32	2.124	364	1.897	325	1.307	2 220	99.7	$28 \pm 2$	$11.6 \pm 2.3$	97

样品分析使用外探测器法 标准玻璃 CN-5 作为照射通量的监视器 磷灰石测试使用 Durango 磷灰石作为标准样 测得  $Zeta$  为  $385 \pm 12$  锆石测试使用 FCT 锆石作为标准样 测得  $Zeta$  为  $132.7 \pm 5.5$  ;  $N$  为测试的颗粒数  $\rho_s, \rho_i, \rho_d$  分别为自发径迹、诱发径迹、标准玻璃的诱发径迹密度 ;  $N_s, N_i, N_d$  分别为自发径迹、诱发径迹和标准玻璃诱发径迹的条数 ;  $P(X^2)$  为 Chi-sq 检验概率 ;  $t_c \pm 1\sigma$  为中值年龄及其标准差 ,  $L$  为所测试的封闭径迹平均长度 ,  $N_T$  为封闭径迹条数。

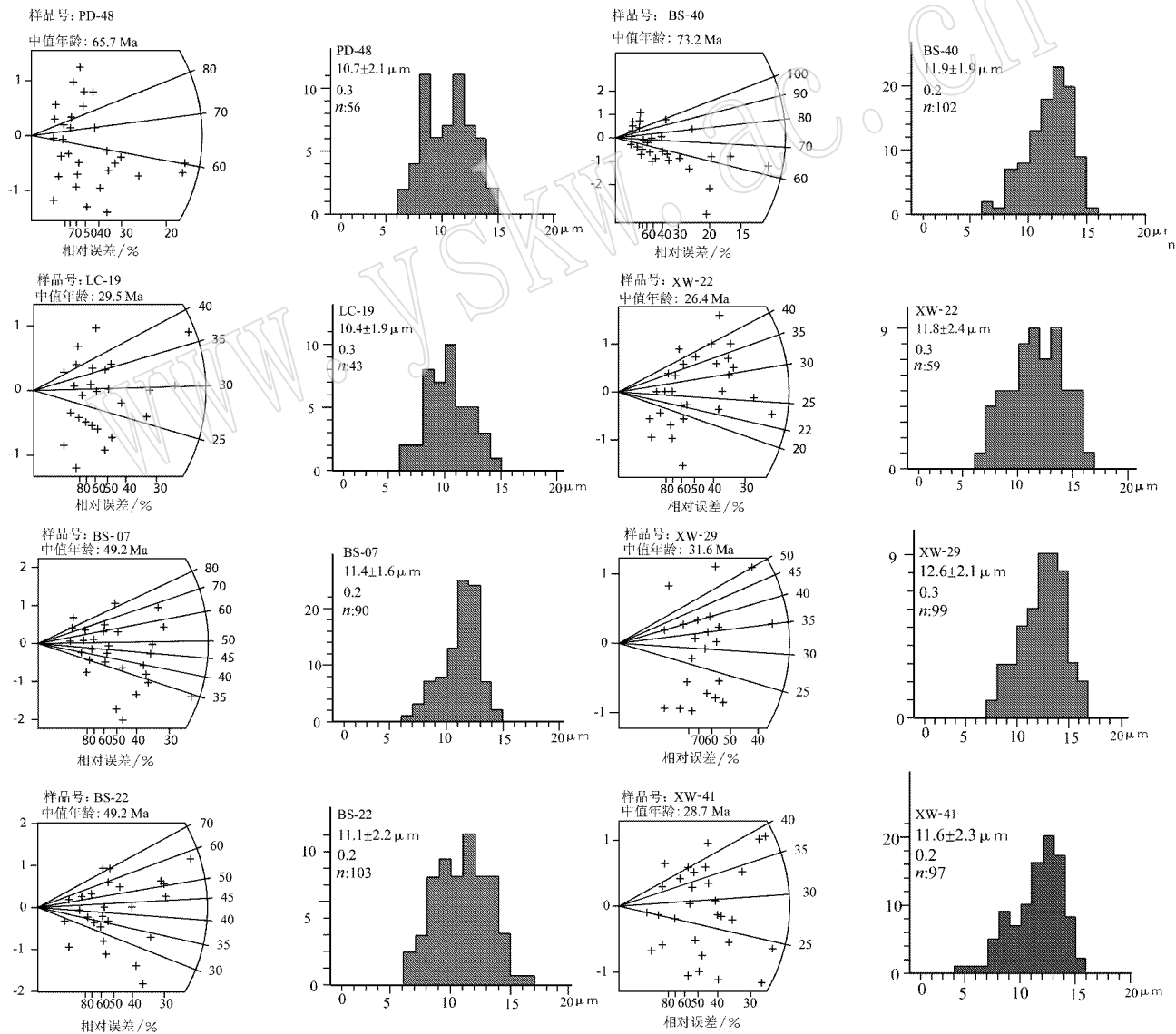


图 2 川东南磷灰石单颗粒年龄辐射图与裂变径迹长度分布图

Fig. 2 Single grain age radial plots and track length histograms for apatite samples from southeast Sichuan basin

### 3 磷灰石裂变径迹热史模拟

以实验退火模型为基础,应用颗粒年龄、围限径迹长度以及 Cl 含量或 Dpar 等测量参数,可以进行磷灰石裂变径迹(AFT)热史模拟(Ketcham *et al.*, 2000)。AFTSolve 是常用的热史模拟软件之一,它既可以进行正演也可以进行反演模拟。本次研究对磷灰石裂变径迹进行了反演模拟,模拟过程中使用 Ketcham 退火模型,设定  $T-t$  曲线模拟数目为

10 000,采用 Monte-Carlo 模拟搜寻法则。将模拟结果划分为“可以接受的”、“好的”与“最佳的”3类,最后给出 AFT 颗粒年龄与径迹长度的模拟值以及 K-S 与 GOF 检验值。K-S 检验值表示径迹长度模拟值与观测值的吻合程度,GOF 检验值表示径迹年龄模拟值与观测值的吻合程度。当 GOF 与 K-S 检验值大于 5% 时,表示模拟热史“可以接受”;当检验值超过 50% 时,表示模拟结果是最佳的。本次研究的 8 块磷灰石样品的热史模拟结果如图 3,所有样品的 GOF 与 K-S 检验值均大于 5%,表明模拟结果是可

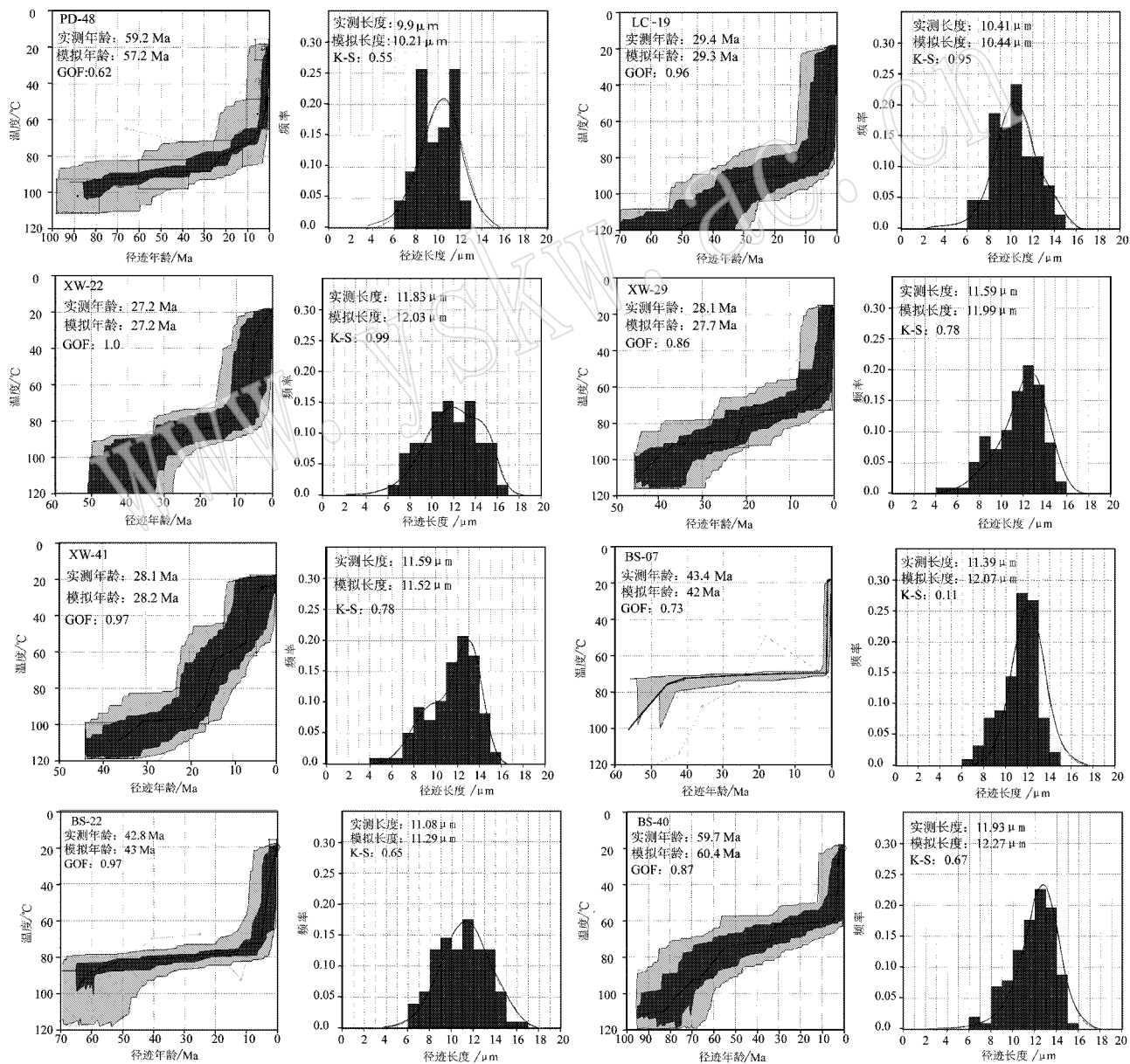


图 3 磷灰石裂变径迹的热史模拟

Fig. 3 Thermal history simulation of apatite fission tracks

靠的。整体来看,几乎所有样品均表现为3个构造隆升阶段,即早期快速隆升阶段、中期平缓隆升阶段和晚期快速隆升阶段。但是,不同构造位置的样品起始隆升和大规模隆升的时限有所差异。本文对裂变径迹热史模拟的最佳路径进行了详细分析,以期能了解川东南地区构造隆升的细节。

桐梓县坡度剖面的样品 PD-48 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出3个阶段:84~27.4 Ma,缓慢隆升,冷却速率仅为0.097°C/Ma,如果以四川盆地平均古地温梯度25°C/km(Richardson *et al.*, 2008; 李双建等, 2008)计算,该阶段累计隆升剥蚀量为220 m;27.4~7.4 Ma,岩石的隆升速率有所增加,冷却速率为0.82°C/Ma,累计隆升剥蚀量为652 m;7.4 Ma至今,为快速隆升阶段,温度从72°C降到20°C,隆升剥蚀量为2 080 m。

习水县良村剖面的样品 LC-19 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出4个阶段:36~33.4 Ma,快速隆升,温度从114°C降到94°C,隆升剥蚀量为800 m;33.4~12.2 Ma,为缓慢隆升阶段,温度从94°C降到88.5°C,隆升剥蚀量为220 m;33.4~12.2 Ma,为快速隆升阶段,温度从88.5°C降到76°C,该阶段隆升剥蚀量为500 m;4.3 Ma至今,为加速隆升阶段,隆升剥蚀量为2 240 m。

兴文县剖面的样品 XW-22 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出4个阶段:42~33.9 Ma,快速隆升,冷却速率为3.72°C/Ma,隆升剥蚀量为1 204 m;33.9~9.4 Ma,为缓慢隆升阶段,冷却速率为0.54°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为528 m;9.4~4.9 Ma,为快速隆升阶段,冷却速率为9.8°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 764 m;4.9 Ma至今,为快速隆升阶段,冷却速率为2.572°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为504 m。

样品 XW-29 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出3个阶段:37.3~9.6 Ma,缓慢隆升,冷却速率为0.86°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为952 m;9.6~1.2 Ma,为快速隆升阶段,冷却速率为1.94°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为652 m;1.2 Ma至今,为加速隆升阶段,冷却速率为30.9°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 484 m。

样品 XW-41 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出3个阶段:38.2~17 Ma,缓慢隆升,冷却速率为0.92°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为784 m;17~9.1 Ma,为快速隆升阶段,冷却速率为3.65°C/

Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 152 m;9.1 Ma至今,为加速隆升阶段,冷却速率为4.38°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 596 m。

遵义市泮水剖面的样品 BS-07 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出3个阶段:52.5~45.6 Ma,快速隆升,冷却速率为2.35°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为648 m;45.6~1.4 Ma,为缓慢隆升阶段,冷却速率为0.14°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为248 m;1.4 Ma至今,为加速隆升阶段,冷却速率为35.4°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 984 m。

样品 BS-22 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出2个阶段:60.2~5.5 Ma,缓慢隆升,冷却速率为0.32°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为696 m;5.5 Ma至今,为加速隆升阶段,冷却速率为9.64°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为2 120 m。

样品 BS-40 模拟结果显示,岩石的构造隆升总体呈现出3个阶段:92.4~53.5 Ma,快速隆升,冷却速率为0.97°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 512 m;53.5~4.2 Ma,为缓慢隆升阶段,冷却速率为0.3°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为584 m;4.2 Ma至今,为加速隆升阶段,冷却速率为9.24°C/Ma,该阶段隆升剥蚀量为1 552 m。

## 4 讨论与结论

磷灰石裂变径迹记录了样品进入部分退火带以后(地温低于110°C)经受的抬升与埋藏过程。本文8个样品的热史模拟结果显示,所有样品在进入了部分退火带(PAZ)以后,都没有再经历明显的沉降埋藏,均表现为持续的隆升,但是由于构造位置的不同,不同样品进入部分退火带的初始时间不同,它代表不同地区和样品所在构造位置进入隆升期的先后次序不同。以各样品在110°C时的时间顺序来看(图3),遵义泮水剖面 and 桐梓坡渡剖面的样品进入隆升期较早,而靠近四川盆地的习水和兴文剖面的样品隆升起始时间较晚,由此可见四川盆地东南缘的地层隆升的序列为先东南、后西北,由盆地周缘向盆地内部传递。盆地东南缘的隆升起始时间在95~60 Ma左右,也即是晚白垩世晚期—古近纪早期,而向北传递到盆地边缘的时间为35~40 Ma,为古近纪晚期。

除了起始隆升时间外,从裂变径迹的模拟结果还可以看出,几乎所有的样品都具有晚期快速抬升



的特点,抬升的时限均在 10 Ma 以内,多数小于 5 Ma,部分小于 2 Ma,如桐梓坡渡的 PD-48 样品、兴文剖面的 XW-22、泮水剖面的 BS-07 样品等。

碎屑矿物的裂变径迹模拟证实,四川盆地及其周缘褶皱带中新生带以来的强烈变形剥蚀时限存在差异性和递变性。沈传波等(2007)通过对磷灰石裂变径迹、电子自旋共振(ESR)和 K/Ar 定年结果的综合分析,认为北大巴山逆冲推覆构造活动主要发生在 232~195 Ma,南大巴山逆冲推覆构造活动发生在 133~100 Ma、70~60 Ma、48~33 Ma 和 12 Ma,且由北东向南西的年龄表现出阶段性递进年轻的特点,距今 12 Ma 以来的新构造运动使得川东构造带进一步隆升并最终定型。雷永良等(2009)认为龙门山北段—米仓山地区存在 4 期构造事件,其对应的时限分别为 143~112 Ma、93.6~88 Ma、42~40 Ma 和 25.6 Ma,从盆地向造山带,由东向西裂变径迹年龄由老变新,指示喜山期的造山作用主要集中在龙门山地区。刘树根等(2008a)认为龙门山大规模隆升发生于晚白垩世,且裂变径迹年龄由北向南逐渐变小,指示喜山期的构造活动强度具有南强北弱的特点。安艳芬等(2008)对川南马边地区磷灰石裂变径迹模拟结果表明,在距今 25 Ma 以来相当长的时间内该区都处于一个相对稳定的阶段,直到距今 3 Ma 发生大规模的构造抬升事件。在盆地内,邱楠生等(2008)通过磷灰石和锆石的 He 年龄揭示了川东北地区大致在晚白垩世期间开始隆升且抬升剥蚀量较大。刘树根等(2008a)认为川南威远地区距今 100~65 Ma,为中低速差异抬升阶段,距今 65~25 Ma 为中速隆升阶段,距今 25 Ma 以来为快速抬升时期。结合本次研究结果表明,四川盆地及其周缘的抬升剥蚀始于印支期,燕山晚期得到加强,喜山期最为强烈,抬升的次序总体是由盆地边缘向盆地内传递。盆地北缘和东缘的抬升早于西缘,西北缘早于西南缘,而盆地南缘和东南缘大规模抬升的时间最晚,发生在近 5 Ma 左右。这次隆升事件的动力学背景可能与印支板块喜山期以来向东南幕式挤压有关,表现为青藏高原东缘向东的隆升分步扩展和四川盆地及其周缘整体抬升。

中生代以来的构造运动不但对四川盆地的形成与定型有重要作用,而且对盆地内油气藏后期调整、定型也有重要影响。前人研究表明,四川盆地及其周缘的海相油气藏普遍具有“多元生烃、多期成藏、油气转化、晚期定型(或破坏)”的动态成藏特点

(戴金星等,2003;蔡立国等,2005;刘树根等,2008b),其中晚期定型主要是指喜山期以来的构造改造对油气藏的影响,即喜马拉雅期的隆升作用改变了原有的构造格局,老圈闭调整(破坏),新圈闭形成,古气藏调整,溶解于水的天然气脱溶,最终形成现今的气藏。本文研究区川东南和黔中隆起北坡都属于先天成藏条件优越、后期改造强烈的地区,一系列的古油藏和钻井的成藏解剖(徐国盛等,2007;赵泽恒等,2008;李双建等,2009)揭示,本区的寒武系、志留系和二叠系烃源岩在中晚侏罗世均已进入生气阶段,燕山晚期以来该区强烈的褶皱变形与地层抬升作用,一方面或造成古油气藏的广泛破坏,如丁山和林滩场构造;另一方面也可能形成新的裂缝性储层的岩性气藏或者水溶气气藏,而且由于强烈抬升的时间较晚,也有利于减少新生气藏由于扩散作用引起的储量损失,如赤水气田。在黔中隆起北坡—川东南赤水地区,断层切割层位较浅并且有中生代地层覆盖的地区,寻找晚期成藏的隐伏构造或岩性圈闭是该区油气勘探的主要方向。

## References

- An Yanfen, Han Zhujun and Wan Jinglin. 2008. Fission track thermochronology evidence for Cenozoic uplifting process of Mabian area, South of Sichuan [J]. *Science in China*, 38(5): 555~563 (in Chinese with English abstract).
- Batt G E, Braun J, Kohn B P, et al. 2000. Thermochronological analysis of the dynamics of the southern Alps, New Zealand [J]. *GSA Bulletin*, 112(2): 250~266.
- Cai Liguang, Rao Dan, Pan Wenlei, et al. 2005. The evolution model of the Puguang gas field in Northeast of Sichuan [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 27(05): 462~467 (in Chinese with English abstract).
- Dai Jinxing, Wei Yanzhao and Zhao Jingzhou. 2003. Important role of the formation of gas accumulations in the late stage in the formation of large gas field [J]. *Chinese Geology*, 30(1): 10~19 (in Chinese with English abstract).
- Garver J I and Brandon M T. 1999. Erosional denudation of the British Columbia Coast Ranges as determined from fission track ages of detrital zircon from the Tofino basin, Olympic Peninsula, Washington [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 106(11): 1398~1412.
- Gleadow A J W, Duddy I R, Green P F, et al. 1986. Confined fission track lengths in apatite: A diagnostic tool for thermal history analysis [J]. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 94(4): 405~415.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui, et al. 1996. Generation

- and Evolution of Sichuan Basin [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Hu Shengbiao , Hao Jie , Fu Mingxi , *et al.* 2005. Cenozoic denudation and cooling history of Qinling-Dabie-Sulu orogens : apatite fission track thermochronology constraints [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 21 ( 4 ) : 1 167 ~ 1 173 ( in Chinese with English abstract ).
- Ketchum R A , Donelick R A and Donelick M B. 2000. AFTSolve : A program for multikinetic modeling of apatite fission-track data [ J ]. *Geological Material Research* , 2 ( 1 ) : 1 ~ 32.
- Laslett G M and Galbraith R M. 1996. Statistical modelling of thermal annealing of fission tracks in apatite [ J ]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 60 ( 24 ) : 5 117 ~ 5 131.
- Lei Yongliang , Jia Chengzao , Li Benliang , *et al.* 2009. Distribution of low temperature thermochronology for Cenozoic tectonic activities in west Upper Yangtze area [ J ]. *Chinese Journal of Geology* , 44 ( 3 ) : 877 ~ 888 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Huili , Qiu Nansheng and Jin Zhijun. 2005. Thermal history of central area of the Tarim basin by apatite fission track analysis [ J ]. *Chinese Journal of Geology* , 40 ( 1 ) : 129 ~ 133 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Shuangjian , Xiao Kaihua , Wang Xinwei , *et al.* 2008. Thermochronology of detrital from Southern China and minerals in the Silurian strata and its geological implications [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 82 ( 8 ) : 1 068 ~ 1 076 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Shuangjian , Zhou Yan , Xiao Kaihua , *et al.* 2009. Characteristics of Silurian destroyed oil reservoir in Houtan section of Xishui area in southeastern margin of Sichuan basin [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 30 ( 6 ) : 849 ~ 855 ( in Chinese with English abstract ).
- Li Yong , Hou Zhongjian , Si Guangying , *et al.* 2002. Cenozoic tectonic sequence and tectonic event at the eastern margin of the Qinghai-Tibet plateau [ J ]. *Geology in China* , 29 ( 1 ) : 30 ~ 36 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Shugen , Li Zhiwu , Liu Shun , *et al.* 2006. Generation and Evolution of Thrust Belt in Dabashan Foreland Basin [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Liu Shugen , Luo Zhili , Dai Sulan , *et al.* 1995. The uplift of the Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 69 ( 3 ) : 205 ~ 214 ( in Chinese ).
- Liu Shugen , Luo Zhili and Dai Sulan. 1996. The Sichuan movement in west Sichuan foreland basin and its relation to oil and gas [ J ]. *Oil & Gas Geology* , 17 ( 4 ) : 276 ~ 281 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Shugen , Ma Yongsheng , Sun Wei , *et al.* 2008b. Studying on the differences of Sinian natural gas pools between Weiyuan gas field and Ziyang gas-brone area , Sichuan basin [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 82 ( 3 ) : 328 ~ 337 ( in Chinese with English abstract ).
- Liu Shugen , Sun Wei , Li Zhiwu , *et al.* 2008a. Tectonic uplifting and gas pool formation since Late Cretaceous Epoch , Sichuan Basin [ J ]. *Natural Gas Geoscience* , 19 ( 3 ) : 293 ~ 300 ( in Chinese with English abstract ).
- Luo Zhili. 1994. Uplift of Longmen Mountain Orogenic Belt and the Formation and Evolution of Sichuan Basin [ M ]. Chengdu : Press of Chengdu university of Science and Technology ( in Chinese ).
- Qiu Nansheng , Li Shanpeng and Zeng Jianhui. 2004. Thermal history and tectonic-thermal evolution of the Jiyang depression in the Bohai bay basin , east China [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 78 ( 2 ) : 263 ~ 269 ( in Chinese with English abstract ).
- Qiu Nansheng , Qin Jianzhong , McInnes Brent , *et al.* 2008. Tectonothermal evolution of the northeastern Sichuan Basin : constraints from apatite and zircon ( U-Th ) He ages and vitrinite reflectance data [ J ]. *Geological Journal of China Universities* , 14 ( 2 ) : 223 ~ 230 ( in Chinese with English abstract ).
- Richardson N J , Densmore A L , Seward D , *et al.* 2008. Extraordinary denudation in the Sichuan Basin : Insights from low-temperature thermochronology adjacent to the eastern margin of the Tibetan Plateau [ J ]. *J. Geophys. Res.* , 113 ~ 123.
- Shen Chuanbo , Mei Lianfu , Xu Zhenping , *et al.* 2007. Fission track thermochronology evidence for Mesozoic-Cenozoic uplifting of Daba Mountain , central China [ J ]. *Acta Petrologica Sinica* , 23 ( 11 ) : 2 901 ~ 2 910 ( in Chinese with English abstract ).
- Tong Chongguang. 1992. Tectonic Evolution and Oil and Gas Accumulation in Sichuan Basin [ M ]. Beijing : Geological Publishing House ( in Chinese ).
- Xu Changhai , Zhou Zuyi , Van Den Haute P , *et al.* 2004. Apatite fission-track thermochronology of tectonic evolution in Dabieshan orogen [ J ]. *Science in China , Ser. D* , 34 ( 7 ) : 622 ~ 634 ( in Chinese with English abstract ).
- Xu Guosheng , Yuan Haifeng , Ma Yongsheng , *et al.* 2007. The source of Sinian and Lower-Palaeozoic bitumen and hydrocarbon evolution in the middle and Southeast of the Sichuan basin [ J ]. *Acta Geologica Sinica* , 81 ( 8 ) : 1 143 ~ 1 152 ( in Chinese with English abstract ).
- Yan Danping , Wang Xinwen and Liu Youyuan. 2000. Analysis of fold style and its formation mechanism in the area of boundary among Sichuan , Hubei and Hunan [ J ]. *Geoscience* , 14 ( 1 ) : 37 ~ 43 ( in Chinese with English abstract ).
- Yuan Wanming , Dong Jinquan , Wang Shicheng , *et al.* 2005. Apatite fission track analysis for revealing tectonic evolution of the South-Block in eastern Kunlun Mountains , northern Qinghai-Tibet Plateau [ J ]. *Nuclear Techniques* , 28 ( 9 ) : 707 ~ 711 ( in Chinese with English abstract ).
- Yue Guangyu , Du Siqing , Huang Jijun , *et al.* 1996. Principle of Structural Compounding-Combine : Analysis of Structural Association-Superposition in Sichuan Basin and Guizhou Plateau , China [ M ]. Chengdu : Press of Chengdu University of Science and Technology ( in Chinese ).
- Zhao Zeheng , Zhang Guiquan and Xue Xiuli. 2008. Fossil oil pools and residual oil and gas pools in the lower assemblage of Qianzhong uplift [ J ]. *Natural Gas Industry* , 28 ( 8 ) : 39 ~ 42 ( in Chinese with English abstract ).
- Zheng Dewen , Zhang Peizhen , Wan Jinglin , *et al.* 2005. Apatite fission track evidence for the thermal history of the Liupanshan basin [ J ]. *Chinese Journal of Geophysics* , 48 ( 1 ) : 157 ~ 164 ( in Chinese



with English abstract).

## 附中文参考文献

- 安艳芬, 韩竹军, 万景林. 2008. 川南马边地区新生代抬升过程的裂变径迹年代学研究[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 38(5): 555~563.
- 蔡立国, 饶丹, 潘文蕾, 等. 2005. 川东北地区普光气田成藏模式研究[J]. 石油实验地质, 27(05): 462~467.
- 戴金星, 卫延召, 赵靖舟. 2003. 晚期成藏对大气田形成的重大作用[J]. 中国地质, 30(1): 10~19.
- 郭正吾, 邓康龄, 韩永辉, 等. 1996. 四川盆地形成与演化[M]. 北京: 地质出版社, 8~13.
- 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[J]. 岩石学报, 21(4): 1167~1173.
- 雷永良, 贾承造, 李本亮, 等. 2009. 上扬子西部地区新生代构造活动的低温热年代学特征[J]. 地质科学, 44(3): 877~888.
- 李勇, 侯中健, 司光影, 等. 2002. 青藏高原东缘新生代构造层序与构造事件[J]. 中国地质, 29(1): 30~36.
- 李慧莉, 邱楠生, 金之钧. 2005. 利用磷灰石裂变径迹研究塔里木盆地中部地区的热历史[J]. 地质科学, 40(1): 129~132.
- 李双建, 肖开华, 汪新伟, 等. 2008. 南方志留系碎屑矿物热年代学分析及其地质意义[J]. 地质学报, 82(8): 1068~1076.
- 李双建, 周雁, 肖开华, 等. 2009. 四川盆地东南缘水吼滩志留系古油藏特征[J]. 石油学报, 30(6): 849~855.
- 刘树根, 马永生, 孙玮, 等. 2008b. 四川盆地威远气田和资阳含气区震旦系油气成藏差异性研究[J]. 地质学报, 82(3): 328~337.
- 刘树根, 李智武, 刘顺, 等. 2006. 大巴山前陆盆地-冲断带的形成演化[M]. 北京: 地质出版社.
- 刘树根, 罗志立, 戴芬兰, 等. 1995. 龙门山冲断带的隆升和川西前陆盆地的沉降[J]. 地质学报, 69(3): 205~214.
- 刘树根, 罗志立, 戴芬兰. 1996. 川西前陆盆地的“四川运动”及与油气关系[J]. 石油与天然气地质, 17(4): 276~281.
- 刘树根, 孙玮, 李智武, 等. 2008a. 四川盆地晚白垩世以来的构造隆升作用与天然气成藏[J]. 天然气地球科学, 19(3): 293~300.
- 罗志立. 1994. 龙门山造山带的崛起和四川盆地的形成与演化[M]. 成都: 成都科技大学出版社.
- 邱楠生, 李善鹏, 曾澌辉. 2004. 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, 78(2): 263~269.
- 邱楠生, 秦建中, Brent I A McInnes, 等. 2008. 川东北地区构造-热演化探讨——来自(U-Th)/He 年龄和  $R_o$  的约束[J]. 高校地质学报, 14(2): 223~230.
- 沈传波, 梅廉夫, 徐振平, 等. 2007. 大巴山中-新生代隆升的裂变径迹证据[J]. 岩石学报, 23(11): 2901~2910.
- 童崇光. 1992. 四川盆地构造演化与油气聚集[M]. 北京: 地质出版社.
- 徐国盛, 袁海锋, 马永生, 等. 2007. 川中-川东南地区震旦系-下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报, 81(8): 1143~1152.
- 许长海, 周祖翼, Van Den Haute P, 等. 2004. 大别造山带磷灰石裂变径迹(AFT)年代学研究[J]. 中国科学: D 辑, 34(7): 622~634.
- 颜丹平, 汪新文, 刘友元. 2000. 川鄂湘边区褶皱构造样式及其成因机制分析[J]. 现代地质, 14(1): 37~43.
- 袁万明, 董金泉, 王世成, 等. 2005. 东昆仑南部带磷灰石裂变径迹分析的地质意义[J]. 核技术, 28(9): 707~711.
- 乐光禹, 杜思清, 黄继钧, 等. 1996. 构造复合联合原理——川黔构造组合叠加分析[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 5~100.
- 赵泽恒, 张桂权, 薛秀丽. 2008. 黔中隆起下组合古油藏和残余油气藏[J]. 天然气工业, 28(8): 39~42.
- 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 2005. 六盘山盆地热历史的裂变径迹证据[J]. 地球物理学报, 48(1): 157~164.