

文章编号: 1001- 6112(2002) 06- 0555- 06

华北盆地济源凹陷古地温梯度的研究 ——磷灰石裂变径迹的应用

赵伟卫^{1,2}, 金 强³, 王伟锋³

(1. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国石化 中原油田有限公司, 河南 濮阳 457062; 3. 石油大学, 山东 东营 257061)

摘要: 济源凹陷是勘探的前沿地区, 许多油气基础地质问题(如古地温)需要解决。由于它的中生代和第三纪具有不同性质的构造和沉积发育史, 可能导致古地温和油气地质的差异性。作者通过对中生界和第三系岩心和岩屑样品的磷灰石裂变径迹测定和模拟等工作, 认为济源凹陷中生代和第三纪的古地温梯度分别为 2.9℃/100m 和 3.1℃/100m, 阐明了该凹陷自中生代以来经历了两次热事件, 且与该地区大地构造活动的性质变化一致, 也说明磷灰石裂变径迹恢复古地温是可信的。

关键词: 裂变径迹; 磷灰石; 古地温梯度; 济源凹陷; 华北盆地

中图分类号: TE135

文献标识码: A

沉积盆地热体制研究是油气地质学中的重要内容^[1]。但是在属于勘探前沿的济源凹陷因为资料少, 而难以开展这方面的工作, 目前只是沿用其中一口探井(邓 5 井)井温测井获得的现今地温梯度 3.25℃/100m 作为该凹陷热体制基础, 以解释构造演化、烃源岩热演化及其油气生成和资源量等等, 这样不可避免地要造成一系列的错误认识, 从而影响油气勘探的成功率。作者对其进行盆地分析时, 已经发现该凹陷中生代和第三纪的构造活动属性、沉积作用等存在很大差异, 分别属于拗陷和断陷盆地发育阶段, 因此其热历史也应具有一定的差别^[2]。

古地温梯度的恢复方法很多^[1], 采用那种方法常常取决于资料情况。勘探成熟区常用镜质体反射率研究古地温, 但是该数据在本研究区不系统而且在古地温恢复中存在许多局限性^[3]。

磷灰石是一种含微量铀元素的矿物, 其重核铀裂变后的带电碎片能够在矿物晶格上产生放射性损伤痕迹, 也称之为裂变径迹。这种磷灰石的裂变径迹很容易由硝酸溶液溶蚀出来。裂变径迹的数量和密度与其铀含量和累积的地质时间成正比, 所以可以用于计算地质年代。同时裂变径迹具有明显的热效应, 在一定的温度压力条件下才得以保存, 当地下温度超过它的保存温度后, 径迹密度开始减少、径迹

长度缩短, 直至完全消失, 这种特性称之为退火。磷灰石裂变径迹的退火温度在 70℃~ 130℃, 能够有效地反映油气生成等重要的石油地质问题, 因此, 常被视为油气地质的古温度计^[4-8]。本文利用磷灰石裂变径迹的测定结果, 对济源凹陷的地热史进行了分析和模拟。

1 中生界和第三系砂岩样品特征分析

济源凹陷位于南华北盆地的西端, 面积约 2 600 km², 中生界和下第三系组成了该凹陷主要生储盖组合(图 1)。由于磷灰石属于砂岩中的重矿物, 颗粒比较粗的杂砂岩中含量比较高, 因此我们采取了三叠系和侏罗系砂砾岩, 作为磷灰石裂变径迹分析的样品(表 1)。

样品的测试流程如下。a) 样品的破碎与分选: 视磷灰石颗粒大小破碎样品, 过筛后经磁选仪获得重矿物, 于镜下挑出磷灰石并分装编号; b) 制备光薄片: 将磷灰石颗粒用环氧树脂粘在载薄片上, 磨出矿物表面, 要求高度抛光; c) 径迹蚀刻: 用含 7% 的 HNO₃ 溶液, 在室温下浸蚀光薄片 30~ 35s, 取出用蒸馏水冲洗风干, 从而在磷灰石新鲜内表面获得自发裂变径迹待统计; d) 样品辐照: 将已蚀刻出自发裂

收稿日期: 2001- 07- 02; 修订日期: 2002- 10- 17.

基金项目: 中国石油化工总公司勘探项目(99- 014).

作者简介: 赵伟卫(1958-), 男(汉族), 山东单县人, 博士生, 主要从事油气地质勘探的研究工作.

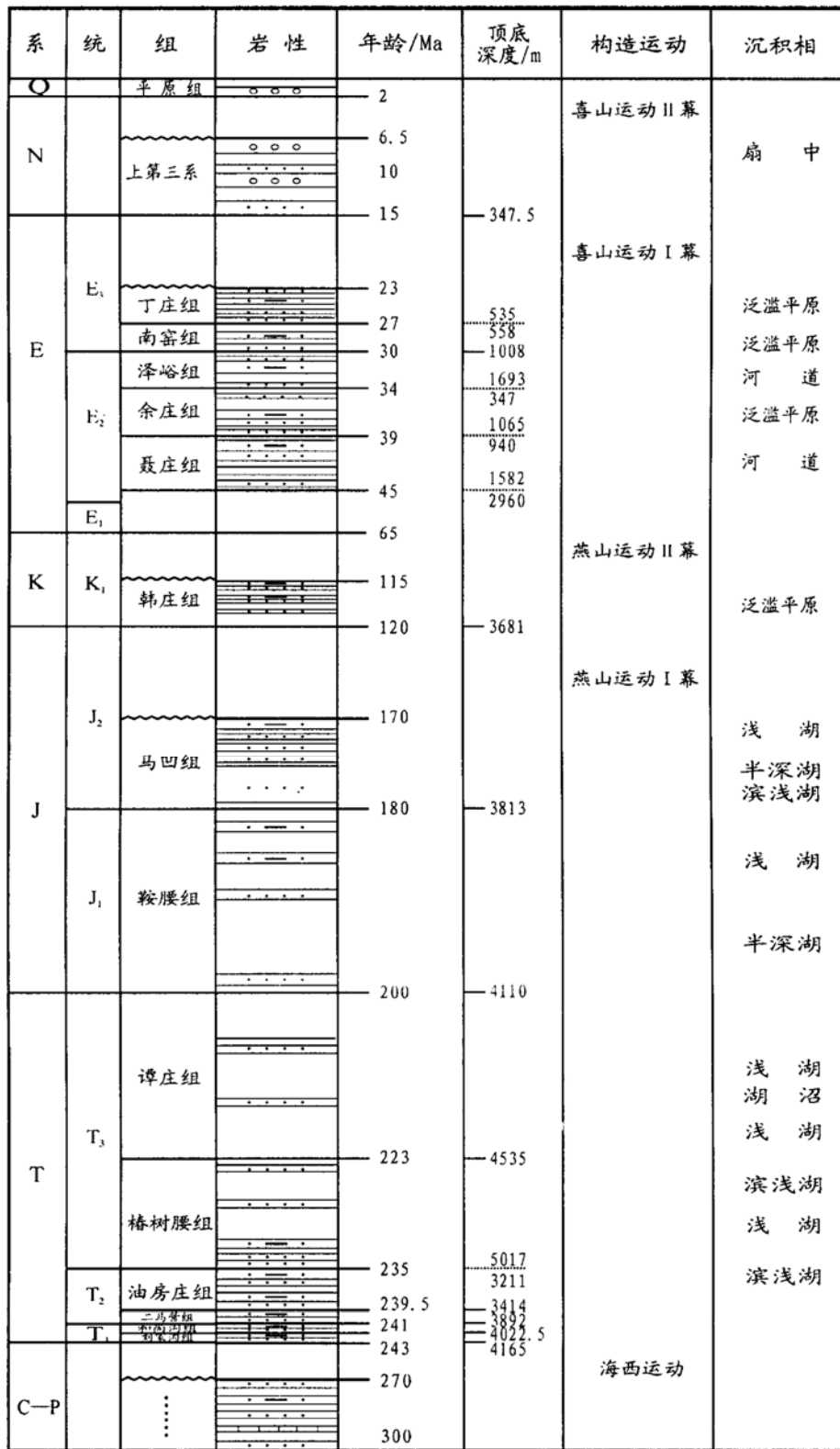


图 1 济源凹陷地层年代、沉积间断和构造活动等综合柱状图

Fig. 1 A column showing the stratigraphy, deposition interruptions, and tectonic movements in the Jiyuan Depression

变径迹的薄片加盖四川雅安低铀含量白云母, 作为外探测器, 加温消去自发径迹后, 送原子能反应堆辐照, 在云母片上获得诱发径迹, 再用 40% HF 在室温下浸蚀 25min, 得到云母片上的径迹蚀; e) 镜下统计: 用偏光显微镜的油浸镜放大 1 000 倍, 分别在磷灰石光薄片及白云母片上统计自发和诱发径迹密度, 及在磷灰石光片上测量自发径迹的围限径迹长

度。

2 磷灰石裂变径迹年龄和退火带的确定

表 2 给出了 11 个样品测定结果, 从 L- 1 到 L- 5 样品的年龄值均在 135~ 124Ma, 平均值为 129. 5

表1 磷灰石裂变径迹样品简介

Table 1 Brief introduction of the samples for apatite fission track measuring

样品号	井号	层位	深度/ m	岩性	样品性质	磷灰石 颗粒数
L-1	邓2	E _{2y}	607.9	浅红色中砂岩	岩屑	19
L-2	邓2	E _{2y}	682.8	浅红色粗砂岩	岩心	17
L-3	邓2	E _{2y}	687.8	浅红色细砾岩	岩心	21
L-4	邓2	E _{2y}	709.5	红色粗砂岩	岩心	27
L-5	邓2	E _{2y}	831.4	浅红色粗砂岩	岩心	32
L-6	邓5	J _{2m}	2 802.2	灰白色中砂岩	岩屑	48
L-7	邓5	J _{2m}	2 954.1	浅灰色粗砂岩	岩屑	30
L-8	邓6	T _{3t}	3 47.6	褐色中砂岩	岩心	40
L-9	邓6	T _{3t}	1 046.7	灰黄色粗砂岩	岩心	30
L-10	邓6	T _{3t}	1 048.2	灰色粗砂岩	岩心	40
L-11	邓5	T _{3c}	3 182.4	灰白色粗砂岩	岩心	35

Ma, 此年龄值实际代表了这套地层物源区(可能为晚侏罗世到早白垩世)磷灰石的原始混合年龄, 这样下第三系的磷灰石裂变径迹分析结果与中生界样品有很好的可比性。从L-6样品开始, 随着层位的加深, 年龄值逐渐减小, 直至L-11样品(层位T_{3c}, 深度3 182.4m), 年龄减为0.25Ma。这是由于地层的埋藏作用, 地热增温, 而引起磷灰石径迹退火作用造成的^[9]。

表2中裂变径迹表观年龄为

$$T = [\ln(1 + \lambda_0 \times \rho_s \times n \times \sigma \times I / (\lambda_f \times \rho_t))] / \lambda_0$$

式中, ρ_s 为自发裂变径迹密度(径迹数/cm²); ρ_t 为诱发裂变径迹密度(径迹数/cm²); λ_0 为铀的总裂变常数($1.54 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1}$); n 为中子通量(0.345×10^{16} 中子/cm²); σ 为反应堆中子诱发裂变的截面($562 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$); I 为²³⁵U 与²³⁸U 的丰度比(1.25×10^{-3})。

表2 磷灰石裂变径迹年龄和古地温计算结果

Table 2 Calculated ages and palaeo-subsurface temperatures from the apatite fission tracks

样品号	自发径迹密度/ 10 ⁻⁷ cm ⁻²	诱发径迹密度/ 10 ⁻⁷ cm ⁻²	裂变径迹年龄/ Ma	古地温/ ℃	自发径迹/ 诱发径迹
L-1	0.025 99(110)	0.058(246)	130 ± 13	67	0.448 1
L-2	0.027 68(82)	0.066 8(196)	125 ± 11	71	0.414 4
L-3	0.029 37(87)	0.068 2(202)	127 ± 12	73	0.430 6
L-4	0.027 44(196)	0.062 69(451)	121 ± 10	73	0.437 7
L-5	0.020 18(148)	0.067 05(908)	122 ± 6	74	0.301 0
L-6	0.007 05(48)	0.068 33(1388)	25 ± 4	114	0.010 3
L-7	0.004 65(86)	0.080 4(1022)	31 ± 3	115	0.057 8
L-8	0.006 49(51)	0.091 5(1549)	14 ± 1.5	117	0.070 9
L-9	0.006 69(38)	0.115 78(1470)	12 ± 1	123	0.057 8
L-10	0.006 26(16)	0.114 7(1942)	11 ± 1	123	0.054 6
L-11	0.000 95(6)	0.135 3(1782)	0.36	125	0.007 02

注: 括号中数字为侧得的裂变径迹条数。

国内外的理论和实验研究表明^[10,11], 裂变径迹的退火作用, 从开始到完全退火不是在瞬间完成的, 而是中间有个过渡带, 这个带被称之为裂变径迹退火带。其相应的温度范围可由理论值外推或实际观测求得。根据上述系统测定的磷灰石裂变径迹表观年龄的变化并对比所处地层, 就有可能确定该井磷灰石径迹的退火带。上述数据分析表明, L-1至L-5样品(下第三系)均在135~124Ma之间, 也即是物源区剥蚀的原始平均年龄, 而且不是济源凹陷中生代热事件的反映。从L-6样品开始, 表观年龄随层位加深而递减的趋势十分明显, 例如, L-6样品的表观年龄值为25Ma, 已远小于前5个样品的平均值(129.5Ma), 说明L-6样品已受到退火影响。因此, 我们可推断研究区中生界和下第三系退火带具有较大差异, 即L-5和L-6样品之间。从马凹组样品L-6向下, 随着地层层位和深度的增加, 退火程度也逐渐递增, 至最深的L-11样品(3 182.4m), 其表观年龄为0.36Ma, 如果再深就要为零值。也就是说, L-11样品已接近磷灰石裂变径迹退火带的底界深度(温度)。

总之, 研究区下第三系样品刚进入磷灰石裂变径迹退火带, 中生界样品已接近磷灰石裂变径迹退火带的下限, 这从它们的裂变径迹长度直方图(图2)可以清楚看到。

3 古地温和热历史回溯

分析样品的裂变径迹长度直方图(图2)明显地表明, 第三系样品可能仅遭受过简单的一次热事件(裂变径迹均为单峰分布), 而中生界样品基本为双峰特征, 表明中生界可能经历了复杂的热历史(即两

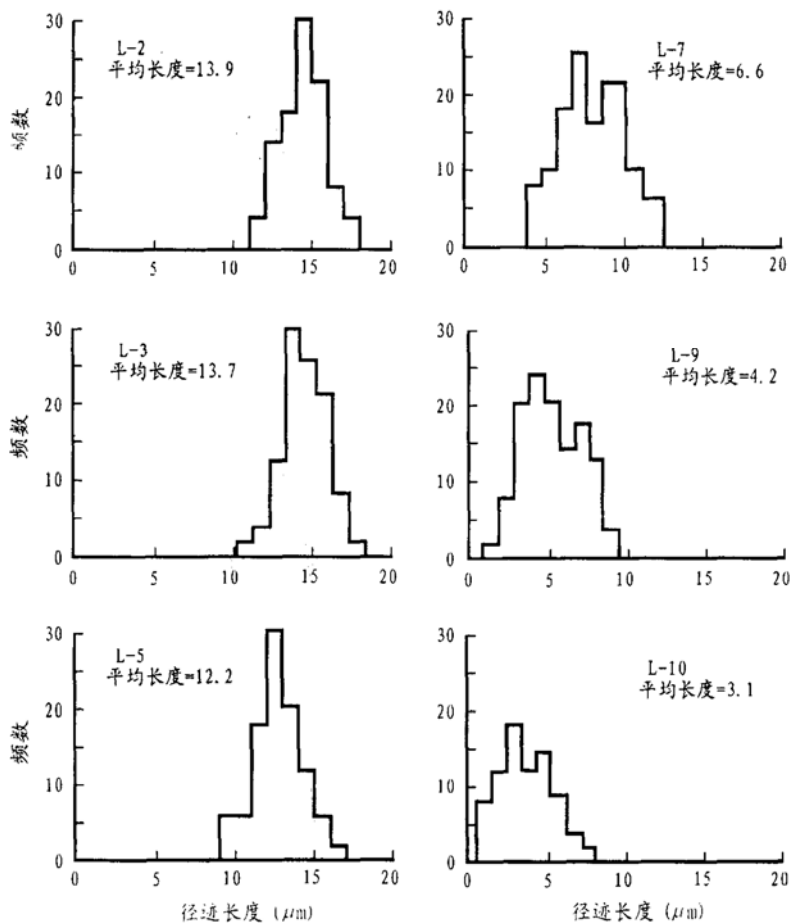


图 2 磷灰石裂变径迹长度分布直方图

Fig. 2 The length histograms of the apatite fission tracks

次热事件)。

Duddy 等(1991)^[12] 已对地下和实验室条件下磷灰石自发裂变径迹退火的温度-时间关系做了研究,并给出了关系图(图 3)。该图表明,在实验室和地质条件下,磷灰石径迹退火的特征基本是一致的,所不同的是,在地质条件下,退火持续时间会很长,且一次退火后至今的时间区段内,仍会有新生长径迹产生。在实验室条件下控制径迹退火的主要因素仍然是温度,而时间因素是次要的。当时间因素改变两个数量级(1~100Ma)时,相应退火带位置改变仅相差 25℃。

根据每个样品实际测得的裂变径迹年龄,再根据样品随深度增加而裂变径迹年龄缩减的特征,进行模拟退火计算^[10],可推算出每个样品所经历的最高古地温(表 2)。因此得知,下第三系和中生界样品对应的古地温范围分别为 67℃~74℃和 114℃~125℃。由此可推算,早第三纪和中生代的平均古地温梯度:

$$G_T = dT/dH = (74 - 67) / (831 - 608) = 3.1 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$$

$$G_M = dT/dH = (125 - 114) / (3182 - 2802) = 2.9 \text{ } ^\circ\text{C}/100\text{m}$$

即济源凹陷中生代古地温梯度为 2.9℃/100m,第三

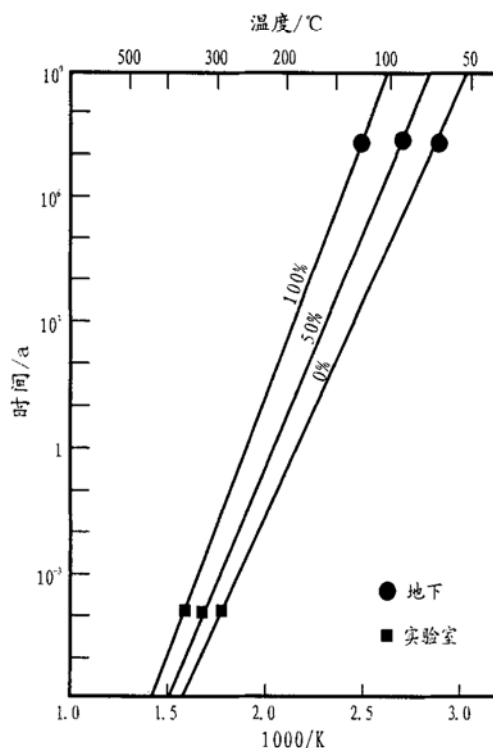


图 3 地下和实验室条件下磷灰石自发裂变径迹退火的温度-时间关系^[4]

1. 地下; 2. 实验室

Fig. 3 A plot of temperatures and times in annealing of apatite authogenic fission tracks in subsurface and laboratory conditions

纪的古地温梯度为 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 低于现今地温梯度 ($3.25\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$)。

磷灰石裂变径迹用于单一地体制盆地的古地温梯度恢复成功率很高^[7, 13], 有人用于多期构造活动的盆地也取得成功^[14]。由于济源凹陷两期构造旋回具有明显的差异性, 所以作者认为恢复的古地温梯度反映了构造性质的演变。

4 结束语

a) 济源凹陷三叠系—侏罗系磷灰石裂变径迹经历了两次退火过程带, 第三系磷灰石经历了一次退火作用, 根据样品所受最高古地温计算出中生代地温梯度为 $2.9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 第三纪为 $3.1\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

b) 磷灰石裂变径迹指示的古地温梯度反映了研究区大地构造演化特征, 因为中生代研究区是广盆拗陷性质具有相对低的地温梯度, 第三纪具有断陷性质, 地温梯度较高。晚白垩世—古新世沉积间断(并伴有抬升剥蚀)期是地温梯度的转变期。

c) 由磷灰石裂变径迹推演出的济源凹陷古地温梯度应用于盆地演化分析、生油岩油气生成和油气资源评价, 取得有关部门和专家的满意。因此说磷灰石裂变径迹研究转型盆地的古地温体制是可行的。

参考文献:

- [1] 胡圣标, 汪集场. 沉积盆地地体制研究的基本原理和进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 171-180.
- [2] Wang Jiyang and Qiu Nansheng. Thermal regime of sedimentary basins[J]. Petroleum Science, 1998, 1(1): 2-6.

- [3] Carr A D. Suppression and retardation of vitrinite reflectance, Part I: formation and significance for hydrocarbon generation[J]. Journal of Petroleum Geology, 2000, 23(2): 313-343.
- [4] Gleadow B S. Estimation of the maximum temperatures attained in sedimentary rocks[A]. D H Welte. Developments in Petroleum Geology - I[C]. Appl Scien Pub Ltd, London, 1983. 78-95.
- [5] 周祖翼, Dunelick R. 基于磷灰石裂变径迹分析数据的时间-温度历史的多元动力学模拟[J]. 石油实验地质, 2001, 23(1): 97-102.
- [6] Kamp P J J, K S Webster S. Nathan. Thermal history analysis by integrated modeling of fission track and vitrinite reflectance data: application to an inverted basin (Buller Coalfield, New Zealand)[J]. Basin Research, 1996, 8(4): 383-402.
- [7] 姜亮, 周新华, 金强. 用磷灰石裂变径迹研究西湖凹陷古地温[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2001, 25(1): 30-34.
- [8] 周祖翼, 廖宗廷, 杨凤丽, 等. 裂变径迹分析及其在沉积盆地研究中的应用[J]. 石油实验地质, 2001, 23(3): 332-336.
- [9] 周成礼, 冯石, 王世成, 等. 磷灰石裂变径迹长度分布数值模拟及其地质应用[J]. 石油实验地质, 1996, 16(4): 409-415.
- [10] Laslett G M, Green P F, and Duddy I R, et al. Thermal annealing of fission tracks in apatite 2: A quantitative analysis[J]. Chemical Geology, 1987, 65: 1-13.
- [11] Jin Qiang, Wang Weifeng, et al. North Jiangsu basin in eastern China: early accumulation of immature oils and Paleogene reservoir diagenesis[J]. Journal of Petroleum Geology, 1997, 20(3): 286-305.
- [12] Duddy I R, Green P E and Hegarty K A, et al. Reconstruction of thermal history in basin modeling using apatite fission track analysis[A]. Offshore Australia Conference Process, 1[C]. 1991. 49-61.
- [13] 施小斌, 王捷. 磷灰石裂变径迹数据的热史反演及其局限性[J]. 地质科学, 1998, 32(2): 187-194.
- [14] 王璐, 刘顺生. 磷灰石裂变径迹的退火作用及其在沉积盆地油气勘探中的应用—以东濮凹陷为例[J]. 大地构造与成矿学, 1998, 22(3): 259-263.

ESTIMATION OF ANCIENT SUBSURFACE TEMPERATURES WITH THE APATITE FISSION TRACKS IN JIYUAN DEPRESSION, NORTH CHINA BASIN

ZHAO Weiwei^{1,2}, JIN Qiang³, WANG Weifeng³

(1. Geochemical Institute of Chinese Academy, Guiyang, Guizhou 550002, China;

2. Zhongyuan Oil Oilfield Co. Ltd., Puyang, Henan 457062, China;

3. University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China)

Abstract: By measuring apatite fission tracks, the paleogeotemperature gradients in the Mesozoic and Tertiary in the Jiyuan Depression, North China Basin were estimated. The annealing temperatures of the apatite fission

tracks were 67-74 °C and 114-125 °C corresponding to the Tertiary samples and Mesozoic samples respectively. Based on the anneal modeling method, the calculated subsurface temperature gradients were 2.9 °C/100m in the Mesozoic, and 3.1 °C/100m in the Tertiary respectively. The different temperature gradients between the Mesozoic and Tertiary were resulted from different tectonic movements in the studied area, where a great lake depression (with lower temperature gradient) was formed in Mesozoic, and become a rift (with higher temperature gradient) in Tertiary. These temperature gradients were applied successfully in assessment of thermal evolution of organic matters of source rocks, and in estimation of generated petroleum quantity in the Jiyuan Depression. Therefore, estimation of paleo-geotemperatures with apatite fission tracks is an useful tool in rebuilding basin thermal evolution, even in the basin with different tectonic natures.

Key words: fission track; apatite; paleo-geotemperature gradient; Jiyuan Depression; North China Basin

(continued from page 554)

Abstract: A new method was used to separate authigenic clay minerals in sedimentary rocks—a repetitive freezing-thawing process. The aim of this process was to disaggregate rock samples using the volume expansion of water that impregnates samples. The new method can avoid the shortcoming that a conventional crushing produces an over-crushing of the larger grains of a rock, creating artificially clay-sized particles which become intimately mixed with the natural clay component of the rock. For the most of our samples, fractions smaller than 1 μ m, the new method already remove the presence of K-feldspar, while the conventional method can not achieve; In addition, with the reduction of grain size, the content of detritus illite in clay mineral component decreased gradually. For our samples, in the most of fractions smaller than 0.2 μ m, the content of detritus illite < 5%, in some of them, the detritus illite already removed.

Key words: authigenic clay minerals; separation and purification; repetitive freezing-thawing method