

文章编号: 1000-0550(2004) 03-0541-06

# 大民屯凹陷古今地温场特征及其成藏意义<sup>1</sup>

姜建群<sup>1,2</sup> 李 军<sup>2</sup> 史建南<sup>1</sup> 李明葵<sup>2</sup>

1(石油大学资源与信息学院 北京昌平 102249) 2(中国石油辽河油田分公司 辽宁盘锦 124010)

**摘 要** 利用系统测温资料和试油资料研究了大民屯凹陷现今地温特征,利用磷灰石裂变径迹、流体包裹体均一温度恢复了古地温,利用 EasyRo 模型反演热史变化,并与东西部凹陷热史进行了对比。研究认为:(1)大民屯凹陷现今地温梯度较低,平均为 2.9℃/100 m。(2)磷灰石裂变径迹恢复古地温揭示大民屯凹陷古地温梯度较高,其中安福屯洼陷和荣胜堡洼陷分别 4.07 和 3.6℃/100 m,皆高于东部凹陷(平均为 3.3℃/100m)。从而解释了其较低的生烃门限。(3)流体包裹体均一温度研究结果认为地质历史时期研究区热流体活动较强烈。以高凝油为主的安福屯洼陷油气充注为幕式快速运聚成藏,而以正常稀油为主的荣胜堡洼陷油气运聚为在异常高压下的快速运移和浮力作用下的缓慢运移相结合。(4)大民屯凹陷的热史演化特征明显不同于东部凹陷,与西部凹陷也有差异,整个热史演化程度较低,有利于高凝油油藏的保存。

**关键词** 大民屯凹陷 磷灰石裂变径迹 流体包裹体 古地温 高凝油

**第一作者简介** 姜建群 女 1971 年出生 博士后 油气成藏机理

**中图分类号** TE122.3 **文献标识码** A

## 1 引言

全面认识盆地的地温场特征不仅为揭示盆地形成演化的地球动力学过程的研究提供了重要的依据,而且也是烃源岩及油气演化分析的基础<sup>[1]</sup>。大民屯凹陷位于辽河断陷盆地的东北部,下第三系分布面积约 800 km<sup>2</sup>,凹陷主要为巨厚的新生界所覆盖,局部发育中生界。新生界最大埋深大于 6 000 m(位于荣胜堡洼陷)。荣胜堡洼陷、安福屯洼陷(最大埋深 4 300 m)以及胜东洼陷(最大埋深 4 500 m)是其主力生烃洼陷,而沙四段和沙三段暗色泥岩是凹陷的主力烃源岩,凹陷是是闻名于世的高蜡、高凝原油的生产基地。多种地化资料表明大民屯凹陷生烃门限为 2 250~ 2 500 m,大大浅于辽河盆地其它两个生油凹陷(东部凹陷和西部凹陷约为 2 750 m)。另外大民屯凹陷高凝油丰富,其与地温场关系如何?迄今未见有关大民屯凹陷地温场特征研究的公开报道。本文以丰富的试油资料、系统测温资料分析其今地温,利用磷灰石裂变径迹和包裹体测试资料反演其古地温,结合盆地模拟技术反演其热史,最后利用大民屯凹陷独特的地温演化史探讨其生烃史以及与高凝油的关系。

## 2 大民屯凹陷现今地温场特征

研究区的地温数据主要有 23 口系统测温井资料和 498 个试油静温资料。对上述数据按照测温的性质和精度进行筛选、整理作为研究区地温分布和进行讨论的基础。从沈 169 系统测温井深度与地温梯度关系图(图 1)来看,上、下第三系地温梯度差异不大。这与辽河盆地西部、东部凹陷明显不同。辽河盆地西部凹陷和东部凹陷上第三系沉积厚度大,其中馆陶组水层发育。受该水层的影响,上、下第三系地温梯度差异较大,上第三系和第四系呈明显的低地温梯度,地温梯度( $g$ )一般位于 20~ 30℃/km 之间,下第三系的地温梯度基本上位于 30~ 40℃/km 之间,个别层段可超过 40℃/km,而平面上总体上存在南高北低的变化趋势。大民屯凹陷上第三系不很发育,沉积厚度一般为 200~ 300 m,馆陶水层不发育,上、下第三系地温梯度差异不大。同时考虑到基岩起伏对沉积盖层地温梯度的影响,我们把大民屯凹陷按洼陷区和隆起区分为前进、法哈牛、静安堡、曹台、沈 203 块隆起区和荣胜堡、静西、三台子洼陷区八个区块分别计算其地温梯度。前进、法哈牛、静安堡、曹台、沈 203 块隆起区的地温梯度分别为:3.18、2.98、3.13、2.97 和

<sup>1</sup> 国家自然科学基金项目(批准号:40125008)资助。  
收稿日期:2003-07-16; 收修改稿日期:2003-10-29

2.83 °C/100 m, 荣胜堡、静西、三台子洼陷分别为: 2.86、3.28 和 2.85 °C/100 m。地温梯度较高的地区为静西、前进和静安堡, 相对较低的地区为荣胜堡、三台子、法哈牛、曹台和沈 203 块。静西地温梯度较高与大民屯凹陷西侧逆冲断层晚期活动有关。总体上看大民屯凹陷下第三系平均地温梯度较辽河盆地西部、东部凹陷要低一些。这与辽河盆地在晚第三纪时期构造活动南部强于北部相一致。

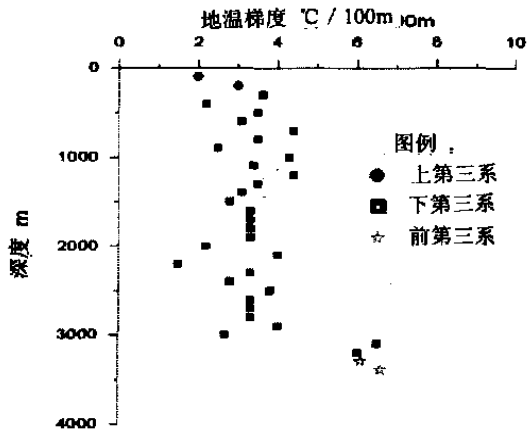


图1 大民屯凹陷沈 169 井地温梯度—深度关系图

Fig. 1 Relationship of geothermal gradient—depth of Well Sheng169 in Damingtun sag

### 3 大民屯凹陷古地温场特征

#### 3.1 应用磷灰石裂变径迹研究古地温

磷灰石裂变径迹近十年来广泛应用于含油气盆地古热史和古构造史并指导勘探, 这主要根据磷灰石裂变径迹退火是时间和温度的函数, 而烃的生成和热成熟也是时间和温度的函数, 且磷灰石裂变径迹退火范围与生烃门限相吻合<sup>[2~4]</sup>。

大民屯凹陷的 19 块磷灰石样品选自于安福屯洼陷和荣胜堡洼陷新生代下第三系沙河街组砂岩。图 2、3 显示浅部样品表观年龄(40~ 70 Ma)均大于或接近地层时代, 深部样品年龄小于地层时代且随着埋深的增加而相应减小, 最深部年龄接近零。径迹长度亦随着埋深增加而缩短, 表明磷灰石来源于陆源碎屑岩物质, 并且经受了不同程度的退火作用。其表观年龄不具地层时代意义, 只反映磷灰石所经受的热作用程度, 即该区裂变径迹表观年龄仅与经受的热历史有关。裂变径迹退火程度随井深增加、地温增高而增强, 裂变径迹密度减小, 导致表观年龄减小。按图中变化趋势外推到表观年龄为零时, 两洼陷井深分别为

3 600 m 和 4 000 m。超过此深度古径迹全部消退。井深在 2 250 m 和 2 500 m 以上的样品, 表观年龄变化不明显, 不完整径迹投影长度分别在 4.5~ 4.6  $\mu\text{m}$  和 4.9~ 5  $\mu\text{m}$  之间, 其中安福屯洼陷和临清凹陷测得诱发裂变径迹长度 4.62  $\mu\text{m}$  基本一致, 而荣胜堡洼陷则与辽河西部凹陷地区测得 4.92  $\mu\text{m}$  一致。安福屯洼陷由于基底起伏及地下水活动, 长期深部地热作用使古径迹受到轻度退火, 所以径迹长度略低于荣胜堡地区。结合两地区埋藏史、镜质体反射率及地层分层数据综合考虑, 安福屯和荣胜堡洼陷退火带范围应为 2 250~ 3 600 m 和 2 500~ 4 000 m。结合沉积埋藏史资料推算本区磷灰石退火带有效受热时间为 41~ 45 Ma。运用阿雷尼乌斯表达式( $\ln t = \ln A + E/kT$ )估算相应的退火带温度范围为 74~ 130 °C(表 1)。

由上可知安福屯洼陷和荣胜堡洼陷热史略有不同

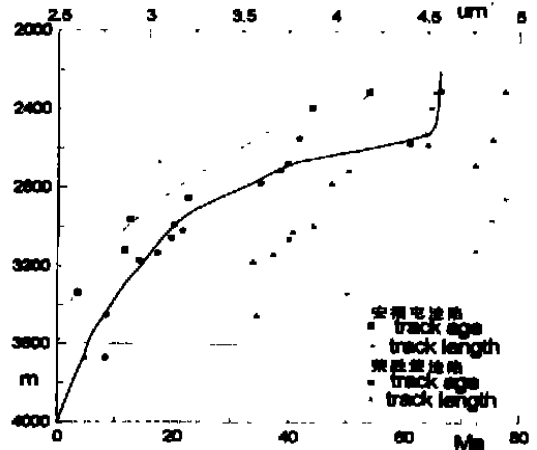


图2 大民屯凹陷裂变径迹年龄、长度与埋深关系  
Fig. 2 Relationship of apatite fission track age, track length and depth in Damingtun sag

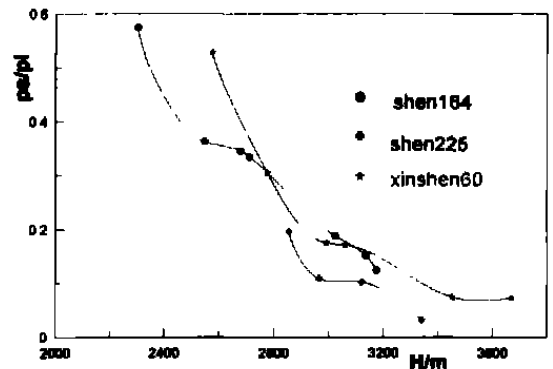


图3 自发裂变径迹/诱发裂变径迹与深度关系

Fig. 3 Spontaneous fission track/induced fission track vs. depth

表1 大民屯凹陷磷灰石裂变径迹退火带埋深范围、古地温及地温梯度

Table 1 The buried depth range of apatite fission track annealing belt, palaeotemperature and geothermal gradient of Damingtun sag

构造位置	井号	退火带埋深范围/m	古地温范围/℃	古地温梯度/(℃/hm)	今地温梯度/(℃/hm)
荣胜堡	沈 164	2500~ 4000	74~ 128	3.6	2.9
	新沈 60				
安福屯	沈 184	2250~ 3600	75~ 130	4.07	3.3
	沈 225				

同,退火带范围分别为 2 250~ 3 600 m、2 500~ 4 000 m,相应退火带温度范围分别为 75~ 130 ℃、74~ 128 ℃,古地温梯度分别为 4.07 ℃/hm、3.6 ℃/hm,但古地温梯度均高于现今地温梯度。

### 3.2 盐水包裹体均一法测定古地温

多相流体包裹体在室内加热过程中达到单一相态的温度为流体包裹体均一温度<sup>[5,6]</sup>。均一温度的测定是在接近常压条件下获得的,而包裹体却是在成岩、成矿时的温、压等一定条件下被捕获的。所以,均一温度只反映了矿物结晶及当时介质流体的温度下限,若从均一温度求捕获温度(即古地温)时应考虑压力的影响<sup>[7]</sup>。由于研究区包裹体含盐度一般低于 10% wt NaCl,而较低盐度的盐水溶液体系等容线图

与水的等容线图差别不大,且形成温度低(< 250~ 300 ℃)。因此,在缺乏盐度测试资料的情况下,压力对温度的校正可用纯水体系代替,使所得到的温度更接近于包裹体形成时的古地温,用于校正的压力取分析矿物所处的埋深条件下的正常静水压力代替,压力梯度为 0.1 kg·cm<sup>-2</sup>·m<sup>-1</sup>。表 2 为包裹体测试结果。所测盐水包裹体均与烃类包裹体(烃类包裹体含量最丰富时)共生,因此可反映油气主运聚时期的古地温。表 2 为大民屯凹陷油气主充注时期的古地温。可见该区地温梯度分布不平衡,主要表现在地温梯度变化为 3.95~ 4.6 ℃/100m,且凹陷中北部地温梯度大于中南部,西部大于东部。安福屯洼陷古地温明显大于荣胜堡洼陷。这与现今地温分布规律一致。

表2 大民屯凹陷盐水包裹体测定及古地温计算

Table 2 Palaeotemperature calculated from salt water fluid inclusion of Damingtun sag

井号	井深/m	层位	赋存矿物 产状	时期 /Ma	盐水包裹体均一温度/℃			古埋深 /m	古地温梯度 /(℃/100 m)
					实测值	平均值	压力校正 温度		
沈 225	3270.5	S <sub>4</sub>	石英碎屑	37	119~ 120(3)*	119	137	3000	4.60
沈 184	2311.1	S <sub>3</sub> <sup>3</sup>	石英碎屑	37	80~ 88(5)	84	96	2000	4.30
安 114	2335.1	S <sub>3</sub> <sup>4</sup>	石英碎屑	37	84~ 89(8)	87	99	2000	4.45
静 25	2755	S <sub>3</sub> <sup>4</sup>	石英碎屑	37	83~ 86(15)	85	98	2050	4.30
静 9	2592.3	S <sub>4</sub> <sup>1</sup>	石英碎屑	37	85~ 91(9)	87	99	1980	4.5
沈 119	3270.4	S <sub>4</sub> <sup>2</sup>	加大石英	34	103~ 109(12)	107	123	2800	4.00
新沈 60	3451.8	S <sub>3</sub> <sup>4</sup>	加大石英	34	103~ 116(16)	109	126	2900	4.00
哈 12	2521.3	S <sub>3</sub> <sup>4</sup>	石英碎屑	34	74~ 86(9)	81	93	2100	3.95

注:\*( )内数字表示测点数

### 3.3 应用镜质体反射率反演古地温

利用镜质体反射率  $R_o$  恢复古地温,前人作了大量工作。归纳起来,镜质体反射率  $R_o$  的计算模型可分为三类:镜质体反射率  $R_o$  为温度的函数(最大温度模型)、 $R_o$ -TTI 关系模型和  $R_o$  为降解率的函数(化学动力学模型)。本文采用 EASY%  $R_o$  模型即改进后的化学动力学模型<sup>[8]</sup>。

从单井模拟结果来看(表 3、图 4),大民屯凹陷的

热流演化经历了由低到高,再由高到低的过程。总体上看大民屯凹陷的热流在沙三段沉积期末达到最高值,最高热流值为 1.91HFU,进入沙一、二沉积期热流开始由高降低,现今热流值最低,最低热流值为 0.89HFU。平面上看,凹陷热流演化从北往南其最大值逐渐增高,且到达最大值的时代越早。从北部三台子凹陷的东营早期热流到达到最大值(1.24HFU)到安福屯洼陷沙一末期的最大值(1.52),而到荣胜堡

表3 大民屯凹陷沈221、沈150井等热史模拟结果

Table 3 Thermal history of Well Shen221, Shen150 etc of Damingtun sag

沈221井			安78井			沈184井			沈150井		
时代	热流	地温梯度	时代	热流	地温梯度	时代	热流	地温梯度	时代	热流	地温梯度
/Ma	/HFU	/( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )	/Ma	/HFU	/( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )	/Ma	/HFU	/( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )	/Ma	/HFU	/( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )
0	0.89	2.9	0	1	2.32	0	1.08	3.06	0	0.96	2.79
24.6	0.95	2.74	24.6	1.05	2.98	24.6	1.08	3.15	24.6	1.03	2.81
36	1.18	3.49	36	1.33	3.7	36	1.52	3.67	36	1.5	3.55
38	1.16	3.78	38	1.32	3.98	38	1.41	4.19	38	1.81	3.42
43	1.07	3.58	43	1.17	2.9	43	1.29	3.32	43	1.35	3.13
45.4	1.06	3.2	45.4	1.17	2.92	45.4	1.27	2.74	45.4	1.3	2.89

洼陷则在沙三末期达热流最大值(1.91)。图4显示荣胜堡洼陷古地温从沙四开始沉积到沙三沉积末地温快速增加,到沙三末期普遍达到历史最高温,之后逐渐下降直到东营末期,东营末期到现今地温变化不大,呈略微减少趋势。表3揭示该区古地温变化与热流演化趋势基本一致。

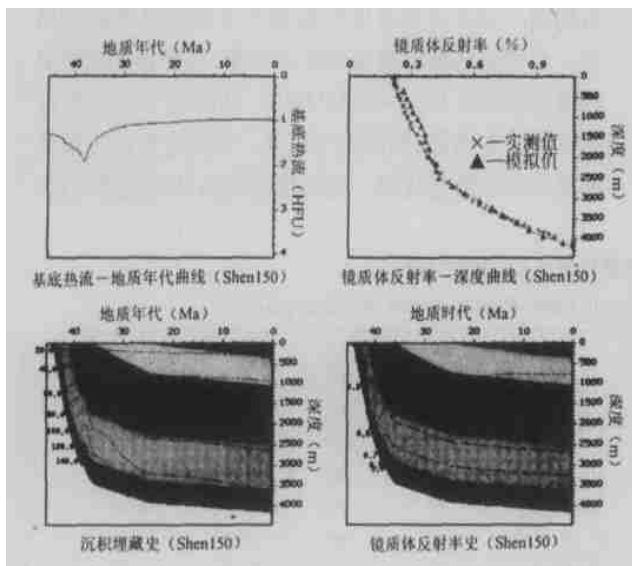


图4 沈150井热史模拟成果图

Fig. 4 The plot of thermal history modeling of Well Shen 150

#### 4 大民屯凹陷地温场特征及其成藏意义

前文用磷灰石裂变径迹、包裹体均一温度和 Easy $R_0$ 三种技术恢复了大民屯凹陷的古地温。其中由包裹体均一温度恢复的古地温明显高于其它两种方法。磷灰石裂变径迹和 Easy $R_0$ 模拟技术恢复的古地温比较吻合。原因是由包裹体均一温度恢复古地温存在许多假设条件和不确定性<sup>[5]</sup>。因而本文采用其它两种方法计算的结果。

由磷灰石裂变径迹计算出的古地温梯度为 3.6~

4.07 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 大于东部凹陷古地温( $E_{S_3}$  时为 3.01~4.05 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ , 平均 3.28 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ )。因而大民屯凹陷生烃门限低于东部凹陷。而前面研究知大民屯凹陷自东营以来至今地温梯度较低, 平均为 2.9 $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ 。

大民屯凹陷热流演化也证实了其具有比西部凹陷早进入高古地温阶段, 但整个地温演化较西部凹陷低。前面热史研究显示大民屯凹陷热流经历了由低到高, 再由高到低的过程(图4)。热流值在沙三段沉积期末达到最高值, 最高热流值为 1.91 HFU, 现今热流值最低为 0.84 HFU。这与辽河盆西部凹陷的热流演化相似, 但热演化程度不如西部凹陷。廖兴明等<sup>[9]</sup>采用分段计算古热流及磷灰石裂变径迹研究古地温。认为西部凹陷热流从古到今有一较明显变化, 在东营末以前古热流为缓慢上升阶段, 大约在东营末热流值最大, 约为 2.05 HFU, 之后古热流呈下降趋势, 但现今仍保留较高的地热背景, 热流值为 1.5 HFU。东部凹陷古热流值一直较高(约 2.05 HFU), 直到东营期末盆地进入拗陷期, 古热流值降低, 地温才开始下降。大民屯凹陷热流演化特征与其总的构造背景相吻合, 大民屯凹陷在沙四-沙三期处于拉张沉陷阶段, 其中沙三期间拉张程度最大, 由于拉张使得来自地幔的热流再次升高, 导致盆地地表热流也升高。沙一、二期以来, 凹陷构造活动减弱, 特别是凹陷进入晚第三纪以来, 盆地处于热沉降阶段(拗陷阶段), 构造活动基本停止, 地表热流与地幔热流亦同步下降。

由流体包裹体均一温度恢复的古地温差异较大, 如沈184、安114井浅部地温梯度异常(表2)。地温梯度异常说明由于深处活动热流体(烃类)向浅处快速幕式运移, 致使局部地温梯度升高。且安福屯洼陷烃类活动强度大于荣胜堡洼陷。而安福屯洼陷以高凝油为主, 富含高分子量化合物, 其运聚规律可能不同于正常稀油, 由其运聚期间浅部异常高地温梯度推

测其可能主要沿孔隙性较大的孔洞和裂缝做快速幕式运移(如活动断裂带)。而荣胜堡洼陷以正常稀油为主,其运聚期间地温梯度稍低推测其主要以异常压力和浮力作用下的快速和缓慢运移相结合为主。

Tegelaar<sup>[10]</sup>等做了一系列的模拟试验研究高蜡油中正构烷烃的成因。从树叶中分离出角质体进行热模拟实验。气相色谱产物显示其产物主要由正构烷烃组成。较低温度(325℃)的产物与高蜡油结构相似,即以C<sub>29</sub>为主,含少量C<sub>15</sub>正构烷烃。325℃时的产物以C<sub>23</sub>为主,含少量的C<sub>15</sub>正构烷烃。而较高温度时(375℃)的产物则以C<sub>15</sub>为主的中低分子量为。该实验的主要目的是为证实树叶中的角质体是高蜡油中正构烷烃的主要母质。但高蜡油中正构烷烃的分布与相对低的热成熟度下的热解产物的一致性揭示高蜡油形成于较低的热演化程度。大民屯凹陷地温场演化的研究结果证实其整体热演化程度较低,弱于东部凹陷和西部凹陷,其较低的地温场演化有利于高凝油油藏的形成和保存。

## 5 结论

本文利用系统测温资料和丰富的试油资料研究了大民屯凹陷现今地温特征,利用磷灰石裂变径迹、流体包裹体均一温度恢复了古地温,利用EasyR<sub>0</sub>模型反演热史变化,并与东西部凹陷热史进行了对比。研究认为:

(1) 大民屯凹陷现今地温梯度较低,平均为2.9℃/100 m。地温分布不均,安福屯洼陷高于荣胜堡洼陷。

(2) 磷灰石裂变径迹恢复古地温揭示大民屯凹陷古地温梯度较高,其中安福屯洼陷和荣胜堡洼陷分别4.07和3.6℃/100 m,皆高于东部凹陷(平均为3.3℃/100 m)。从而解释了其较低的生烃门限。

(3) 流体包裹体均一温度研究结果显示油气主充注期地温梯度高于油气大量生烃期的地温梯度,说明地质时期研究区热流体活动较强烈,浅部异常高的地温梯度说明以富含高分子量的高凝油为主的安福屯洼陷油气充注为幕式快速运聚成藏,而以正常稀油为主的荣胜堡洼陷油气运聚为在异常高压下的快速运移和浮力作用下的缓慢运移相结合。

(4) 大民屯凹陷的热史演化特征明显不同于东部凹陷,与西部凹陷也有差异,整个热史演化程度较低,有利于高蜡油油藏的保存。

致谢 文中磷灰石裂变径迹分析和流体包裹体分析测试工作由北京核工业部欧光习高级工程师等完成,文中研究工作还受到辽河油田研究院王延山高级工程师的帮助,在此一并致谢。

## 参考文献(References)

- 任战利,刘池阳,张小会,等. 酒东盆地热演化史与油气关系研究. 沉积学报, 2000, 18(4): 619~ 623 [ Ren Zanli, Liu Chiyang, Zhang Xiaohui, et al. Late Mesozoic comparative research on the geothermal field of the Ordos Basin and Qinsui Basin. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(4): 619~ 623
- Gleadow A J W, Tingate P R, Laslett G M. Therm annealing of fission track in apatite: a quantitative description. Chemical Geology, 1986, 59: 237~ 253
- Gleadow A J W, Duddy I R, Louering J F. Fission track analysis: a new tool for the evolution of thermal history and hydrocarbon potential. Austria Exploration Association Journal, 1983, 23: 93~ 102
- Duddy I R, Green P F, Laslett G M. Therm annealing of fission track in apatite. three variable temperature behavior. Chemical Geology, 1988, 73(1/96): 25~ 38
- 柳少波,顾家裕. 包裹体在石油地质研究中的应用与问题讨论. 石油与天然气地质, 1997, 18(4): 326~ 331, 342 [ Liu Shaobo, Gu Jiayu. The application of fluid inclusion on the research of petroleum geology and discussion. Oil and Gas Petroleum, 1997, 18(4): 326~ 331, 342]
- 张金亮. 利用流体包裹体研究油藏注入史. 西安石油学院学报, 1998, 13(4): 1~ 4 [ Zhang Jingliang. Application of fluid inclusions to the study of oil reservoir filling history. Journal of Xian Petroleum Institute, 1998, 13(4): 1~ 4]
- Eadington P J, et al. Fluid history analysis - A new concept for prospect evaluation. The APEA Journal, 1991, 31: 202~ 294
- Sweeney J J, Burnham A K. Evolution of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. AAPG Bulletin, 1990, 74: 1559~ 1570
- 廖兴明,姚继峰,于天欣,等. 辽河盆地构造演化与油气. 北京:石油工业出版社, 1996 [ Liao Xinming, Yao Jifeng, Yu Tianxing, et al. The tectonic development and hydrocarbon in Liaohe basin. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996]
- Tegelaar E W, Mathez R. M., Jansen J B H, Horsefield B, De Leeuw J W. Possible origin of n-alkanes in high-wax crude oils. Nature, 1989, 342: 529~ 531

## Geothermal Characteristics of Damingtun sag and Its Significance for Petroleum Accumulation

JIANG Jian-qun<sup>1,2</sup> LI Jun<sup>2</sup> SHI Jian-nan<sup>1</sup> LI Ming-kui<sup>2</sup>

1(Faculty of Natural Resource and Information Technology, Petroleum University, Changping, Beijing 102249)

2(Liaohé Oilfield Branch Company, PetroChina, Panjīng, Liaoning 124010)

**Abstract** The present temperature has been studied with testing data and the paleotemperature has been restored with fission track in apatite and fluid inclusion in Damingtun sag. The thermal history has been displayed by the model of EasyRo and the comparison has been carried out with East sag and West sag. Conclusion has been drawn as follows: (1) The present geothermal gradient is low, the average is 2.9 °C/100m. (2) The paleotemperature restored by fission track in apatite shows that paleotemperature is relatively high, and that of Anfutun sag is 4.07 °C/100m while that of Rongshenpu is 3.6 °C/100m. (3) The homogenization temperature of fluid inclusion shows that the thermal fluid was active. The filling model of Anfutun sag features with high pour point oil is episodic while that of Rongshengpu sag features with normal oil is the combination of episodic movement under the overpressure and the relative slow movement forced by buoyancy. (4). The thermal history difference exists between Damingtun sag and East sag and West sag. The former features with low thermal evolution as a whole, which is favorable for the preservation of high pour point reservoir.

**Key words** Damingtun sag, fission track in apatite, fluid inclusion, paleotemperature, high pour point oil