

文章编号:1000-0550(2004)04-0737-06

# 异常压力对有机质的抑制作用及其石油地质意义

李会军<sup>1</sup> 吴泰然<sup>1</sup> 郝银全<sup>1</sup> 张秀珠<sup>2</sup> 马宗晋<sup>3</sup>

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871) 2(天津大港油田集团公司 天津 300280)

3(中国地震局地质研究所 北京 100029)

**摘要** 板桥凹陷异常压力发育,在板深 35 井中发现有机质的演化明显的受到了超压的抑制作用,具有和活化能、热导率、水动力等因素造成的热演化异常明显不同的特征。综合地质、地球化学分析表明,异常孔隙流体压力对有机质热演化的抑制作用是有条件的,在超压早期发育、高原始有机质丰度和高有机质热演化产物滞留的情况下超压对有机质的演化具有明显的抑制作用,超压对有机质演化的抑制作用在深层勘探方面具有重要的意义。

**关键字** 板桥凹陷 异常压力 抑制作用  $R_o$

**第一作者简介** 李会军 男 1971 年出生 在读博士生 石油地质学

**中图分类号** P593 **文献标识码** A

## 1 引言

沉积盆地实际上是一个低温化学反应器,地层中所发生的各种化学过程遵循化学动力学,温度是主要动力,压力是重要控制因素。由于异常压力在沉积盆地的演化过程中最终将被释放,自然界中压力对有机质热演化和油气生成的影响难以识别,因此压力对有机质热演化和油气生成作用的研究大多采用模拟的方法。学术界关于压力在有机质热演化和油气生成过程中的作用存在 3 种相互矛盾的观点:(1)压力对有机质的热演化和油气生成无明显影响<sup>[1,2]</sup>; (2)压力的增大加速烃类的热裂解<sup>[2]</sup>; (3)压力的增大明显抑制有机质的热演化和油气生成作用<sup>[3,4,5]</sup>。对地质实例进行详细的观察和分析是研究和理解压力对有机质热演化效应的最好方法。

板桥凹陷是渤海湾盆地重要的新生代含油气凹陷之一,板深 35 井是板桥凹陷已钻的最重要的深探井,资料全面而丰富。根据埋藏史分析,板深 35 井自沙三段至东营组存在一快速沉降过程,沙三段沉积速率平均 300 m/m.y.,最大沉积速率 600 m/m.y.,沙二段—东营组沉积速率平均 150 m/m.y.,最大沉积速率 300 m/m.y.。由于快速的沉降速率和沉积速率导致的欠压实,加之烃类生成、粘土矿物转化和流体热膨胀,在板桥凹陷大部分地区超压发育,压力系数最

大 1.6<sup>[6,7,8,9]</sup>,由三个压力系统构成:浅部的正常压力系统,深度小于 2 000 m,压力系数小于 1.0;中间的超压系统,深度 2 000~3 600 m,压力系数 1.0~1.2;下部的强超压系统,深度大于 3 600 m,压力系数大于 1.2(图 1)。通过地质、地球化学的综合分析,发现板深 35 井超压层段有机质的成熟作用受到明显的抑制,是研究异常孔隙流体压力对有机质热演化和油气生成作用影响的难得场所。

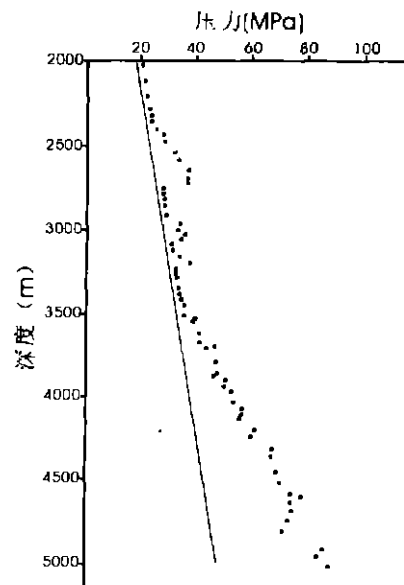


图 1 板深 35 井压力剖面图

Fig. 1 Pressure profile of Well Banshen 35

## 2 实测资料的可信性分析

大港油田研究院和渤海油田研究院对板深35井2045~5078.09 m井段的56个不同层位的岩屑或岩心泥岩样品进行了 $R_o$ 测试,大部分样品超过30个测点。两家实验室的测试结果相差不大,反映测试结果较为准确(图2A)。但也都存在一些和本地区 $R_o$ 演化规律明显不符的数据点,因为板桥凹陷即不存在岩浆岩活动,也没有发生地层倒转,有理由相信这些异

常数据点是非地质因素造成的。为了更真实、准确的反映地质规律,在有机质演化一般规律的指导下,根据以下两项原则对原始数据进行了筛选:一是随着深度加大, $R_o$ 值也随之增大;二是每一个 $R_o$ 段至少要有四个数据点构成,筛选后的数据如图2B。另外还对板深35井1905~3845 m井段的39个样品进行了孢粉颜色和色变指数(TAI)测定,二种参数和 $R_o$ 都具有一定的吻合性。

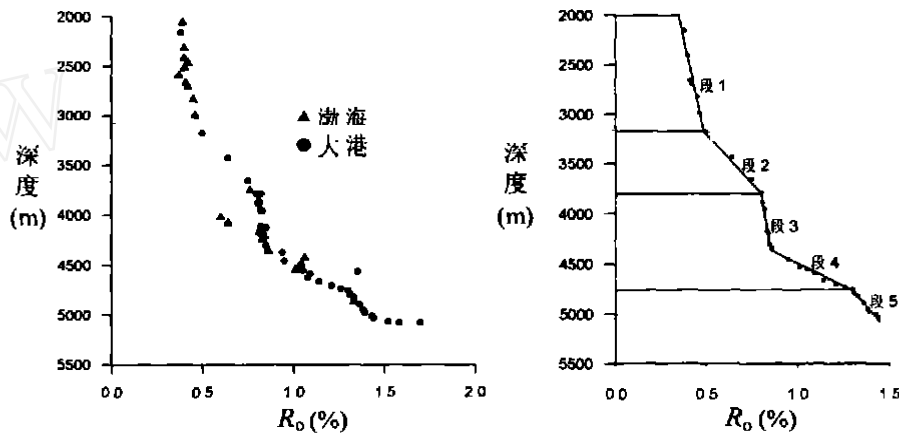


图2 板深35井 $R_o$ 随深度变化图

(A)全部原始数据 (B)经过筛选后的数据

Fig. 2 Plot of  $R_o$  with depth in Well Banshen 35

## 3 超压抑制作用的证据及与其它成因有机质热演化异常的区别

图3是板深35井的有机地化剖面图。和图2对比可以看出,该井有机质热演化表现出明显的异常:

$R_o$ 剖面不连续而呈明显的5段,段2、段4和段5 $R_o$ 梯度正常,段1和段3 $R_o$ 梯度异常低,几乎接近零(表1); TOC、 $S_1$ 和 $S_2$ 剖面也可分为5段,分别对应各 $R_o$ 梯度变化段,段1对应TOC、 $S_2$ 高含量和 $S_1$ 低含量段,段3对应TOC、 $S_1$ 和 $S_2$ 高含量段,而高 $R_o$ 梯度段分别对应TOC、 $S_1$ 和 $S_2$ 的低含量段;5个 $R_o$ 梯度变化段皆位于超压带内(图1,图2)。

通常认为,有机质的成熟度主要受控于温度、有效受热时间及源岩增温速率。板深35井各段地温梯度相似(图3),因此应该有类似的 $R_o$ 演化梯度。需要指出的是,板深35井 $R_o$ 剖面的不连续性及其异常低的有机质成熟度不可能是井漏引起的,在发生严重井漏的情况下,各项分析参数应保持基本恒定或出现相同的变化趋势。但在板深35井中,源岩的TOC及其

表1 板深35井 $R_o$ 分段数据表

Table 1  $R_o$  values of different intervals in Well Banshen35

$R_o$ 段	深度区间	$R_o$ 范围	厚度	$R_o$ 变化值	$R_o$ 梯度
	/m		/m		
段1	2155~3175	0.38~0.50	1020	0.12	0.01
段2	3175~3790	0.50~0.80	615	0.30	0.05
段3	3790~4345	0.80~0.86	555	0.06	0.01
段4	4345~4755	0.86~1.30	410	0.44	0.11
段5	4755~5035	1.30~1.44	280	0.14	0.05

它地化指标随深度发生明显的变化。并且在原始数据进行筛选后(图2B),我们相信井漏的影响已经被去除了。另外,这不是由于地层沉积间断造成的。本井只有在东营组沉积后有较长时间的沉积间断,以下层位皆为连续沉积,这也可从 $R_o$ 值的连续变化得到证实,和由地层沉积间断造成的 $R_o$ 值的不连续变化截然不同。

因此,造成垂向上有机质成熟度不连续的原因可能有4种:有机质生源或沉积—成岩条件变化引起的活化能差异<sup>[10,11,12]</sup>;对流传导对有机质热演

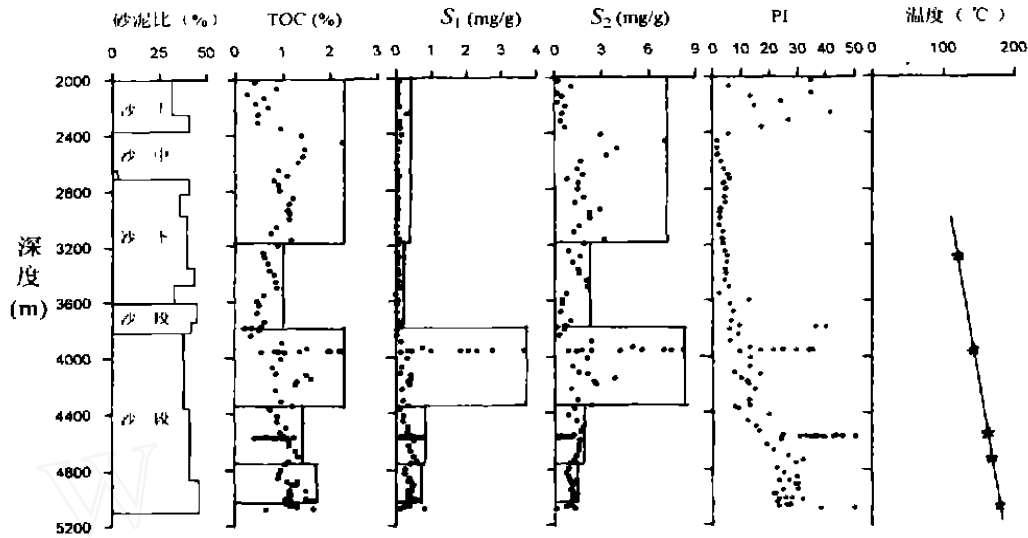


图 3 板深 35 井有机地化剖面

Fig. 3 Organic geochemical profile of Well Banshen 35

化和油气生成的影响<sup>[13,14]</sup>;与岩性、孔隙度或孔隙流体组成有关的热导率差异<sup>[15]</sup>;压力对有机质热演化的抑制作用<sup>[5]</sup>。

活化能较高的有机质,热演化速率相对较低,在相同的热力条件下,活化能较高的有机质,成熟度较低。板深 35 井各层位源岩有机质丰度和有机质类型存在较大的差异(图 3),活化能可能存在比较明显的变化。但活化能的变化不是造成低  $R_o$  梯度的原因。板桥凹陷沙一中产自生自储的未熟—低熟油,低熟油的  $R_o$  值范围为 0.45~0.60,油源为受细菌强烈改造的陆源有机质<sup>[16,17]</sup>。卢双舫等人对经细菌强烈改造过的陆源有机质进行了详细的化学动力学研究<sup>[18]</sup>,表明有机质成油的活化能小于成气的活化能(成油平均活化能小于 197 kJ/Mol,成气活化能小于 210 kJ/Mol),但都比通常有机质成烃的活化能低。正是由于板桥凹陷沙一中受细菌强烈改造过的有机质具有偏低的成烃活化能,才能在较低的温度下生成未熟—低熟油。研究表明,镜质体富氢亦可导致反射率受到抑制<sup>[12]</sup>。板桥凹陷沙一中泥岩形态显微组分(不包括矿物沥青基质)总量为 2.9%~4.0%,显微组分的相对组成以镜质组(约占 30%~50%)和壳质组(约占 10%~40%)为主,含相当数量的腐泥组(5%~20%),唯惰性组含量甚低(<10%)。其中“壳质组+腐泥组”富氢组分相对含量大多接近或超过 50%,总体上呈现型有机质的特征<sup>[17]</sup>,好于其它各个层位。如果  $R_o$  的梯度变化确实和活化能差异或原始富氢程

度有关,则沙一中应具有高的  $R_o$  梯度,而不是相反。板深 35 井的有机质热演化异常显然不是有机质活化能变化或镜质体原始富氢程度差异造成的。

理论上和实际观测都表明地下深处的流体是运动的,并可能对热对流产生重要影响。板深 35 井源岩的成熟度异常与活动热流体引起的热演化异常明显不同。板深 35 井地温梯度没有发生明显的变化(图 3),与地下水注入区出现的低地温梯度和低  $R_o$  梯度明显不同。

$R_o$  分段的另一个可能的原因是热导率的差异,如果板深 35 井的  $R_o$  梯度变化确实和热导率差异有关,则热导率差异必非常大。但板深 35 井各层位均为碎屑岩,除沙一中外砂泥比变化不大(图 3),热导率的差异并不大。因此地层热导率的差异不可能是该井有机质成熟度异常的主要原因。消除了其他因素的可能后,造成该井有机质热演化异常的唯一可能原因是压力的作用,这可从段 1 和段 3 位于超压带内得到证实。

#### 4 超压抑制作用的产生条件

有机质热演化反应是一个体积膨胀的过程,根据 Le Chatelier 定律,压力的增大将抑制有机质的成熟作用。异常高压至少在快速沉降盆地中普遍发育<sup>[5,19]</sup>,压力对有机质的抑制作用确实在实验模拟和实地观测中得到证实。然而,在世界许多沉积盆地中,超压发育,但是有机质的演化却没有受到抑制。显然,压

力对有机质热演化和油气生成的抑制作用是有条件的。以板深 35 井为例, 2 000 m 以下各段都处于超压带内, 但段 2、段 4 和段 5 具有常规的  $R_o$  梯度, 而段 1 和段 3 的有机质演化却明显的受到超压的抑制。

郝芳<sup>[20]</sup>等根据异常压力发育时期将异常压力分为两种: 早期发育超压在有机质未成熟或低熟阶段由于快速增载引起, 晚期发育超压在源岩已达到相对较高的成熟度以后才发育, 并且未发现晚期超压对有机质热演化有明显的抑制作用, 说明超压的早期发育可能对有机质的超压抑制作用至关重要。

有证据表明板桥凹陷的超压是早期成因的, 虽然段 1~段 5 都处于超压环境, 但段 1、段 3 表现出明显的超压抑制, 而段 2、段 4 和段 5 为正常的  $R_o$  梯度, 说明并非所有早期发育的异常压力均对有机质热演化产生明显的抑制作用, 异常压力的早期发育并不是引起热演化抑制的充分条件, 板桥凹陷超压抑制作用的发生是有其特定的地质条件的。根据板深 35 井的实际资料, 板深 35 井 3 600 m 以浅生产指数 PI ( $PI = S_1 / (S_1 + S_2)$ ) 随深度增加变化不大, 表明为一开放的系统, 低分子量烃类大多散失, 只保留了较高含量的高分子量烃类, 表现为  $S_2$  含量高, 而  $S_1$  含量很低; 3600 m 以深随着深度的增加生产指数 PI 逐步增大, 表明板深 35 井深部为一封闭的超压环境, 生成的烃类更多得保留在源岩中, 因而  $S_1$ 、 $S_2$  含量都较高(图 3)。在此基础上, 对各  $R_o$  梯度段加以对比可以看出, 深部段 3 低  $R_o$  梯度段对应高 TOC、 $S_2$ 、 $S_1$  含量段, 段 4、段 5 高  $R_o$  梯度段对应低 TOC、 $S_1$  和  $S_2$  含量段, 说明超压的抑制作用是“高原有机质丰度和高有机质热演化产物的滞留”共同造成的; 浅部情况有所不同, 段 1 和段 2 为半封闭系统, 由于低分子量烃类的散失, 超压对有机质演化的抑制作用表现为低  $R_o$  梯度段对应高 TOC、 $S_2$  含量段与低  $S_1$  含量段, 但在低分子量烃类大量散失之前, 低  $R_o$  梯度段也应与高 TOC、 $S_2$ 、 $S_1$  含量段对应, 也能说明超压的抑制作用是“高原有机质丰度和高有机质热演化产物的滞留”共同造成的。

通过对板深 35 井有机质演化过程的分析表明  $R_o$  随深度的变化是异常复杂的, 除温度、时间外, 超压是影响  $R_o$  演化的重要因素。在超压早期发育的情况下原始有机质丰度和有机质热演化产物的滞留是影响超压对有机质抑制作用的重要因素。

## 5 异常压力对有机质的抑制作用的石

## 油地质意义

压力是控制沉积盆地各种化学过程的重要因素, 超压盆地具有与一般盆地明显不同的石油地质特点:

(1) 由于压力的抑制作用, 有机质的成熟速率大大减缓, 如果段 1 的  $R_o$  梯度类似段 2, 则低熟烃源岩的厚度将会减少 280 m, 段 3 的  $R_o$  梯度类似段 4, 成熟烃源岩的厚度将会降低 500 m。和通常情况下相比, 低熟烃源岩和成熟烃源岩的厚度合计增加了 780 m, 烃源岩的深度也相应增加了 780 m, 从而增加了有效源岩的层位和体积, 使油气的勘探范围得到了极大的扩展。尽管这样的类比不一定符合地质实际, 但同过计算还是能够反映出压力对有机质抑制作用在扩展深层油气勘探领域方面的显著作用。

(2) 无论原油类型和加热速率, 当温度大于 160 时, 油很可能会裂解。但是油是否会裂解取决于具体的地质条件。在超压环境下成烃的活化能加大, 成气的活化能比成油的活化能大, 干酪根结构趋于稳定, 并与岩石矿物结合更为紧密, 油气会保存到更高的温度和成熟阶段。因而在超压盆地中, 由于异常压力的抑制作用, 液态石油可以在明显高于石油“死亡”线的温度下稳定存在。板桥凹陷板深 35 井钻探也证实, 地层埋深在 4 719.6~4 743.9 m, 地温达 173, 压力系数为 1.62, 仍有凝析油产出。

(3) 现在寻找石油特别是天然气, 已扩展到了沉积盆地的深层, 储层的问题越来越重要。由于超压对有机质演化的抑制作用, 加之超压分担了上覆沉积物的部分重量, 和通常情况下同样深度相比, 化学成岩作用、机械压实作用均较弱, 因此在深层可有较好的物性。板桥凹陷岩石类型主要为低成分成熟度和结构成熟度的长石砂岩, 由于异常压力的作用, 深度即使大于 5 000 m, 最大孔隙度仍达 10.6%, 平均孔隙度 7.5%, 表明在 5 000 m 左右仍具备形成工业价值储层的基本条件<sup>[6,21,22]</sup>, 对深层勘探具有重要的指导意义。

### 参考文献(References)

- 1 Mönthieux M, Landais P, Durand B. Comparison between extracts from natural and artificial maturation series of Mahakam delta coals. *Organic Geochemistry*, 1986, 10: 299~311
- 2 Braun R L, Burnham A K. Mathematical model of oil generation, degradation and expulsion. *Energy Fuels*, 1990, 4: 132~146
- 3 Cecil B C, Stanton R W, Robbins E I. Geologic factors controlling coalification and hydrocarbon maturation, *AAPG Bulletin*, 1977, 61: 775

- 4 McTavish R A. Pressure retardation of vitrinite diagenesis, offshore north-west Europe. *Nature*, 1978, 271: 648 ~ 650
- 5 Price L C, Wenger L M. The influence of pressure on petroleum generation and maturation as suggested by aqueous pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 1992, 19: 141 ~ 159
- 6 李会军,程文艳,张文才,等. 深层异常高压条件下碎屑岩成岩作用特征初探. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6): 28 ~ 31 [ Li Huijun, Cheng Wenyan, Zhang Wencai, *et al.* An approach to the diagenesis of clastic rocks under abnormal high temperature and pressure. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(6): 28 ~ 31 ]
- 7 李洪香,任继红,马建英,周静. 异常高孔隙流体压力与碎屑岩深部油气藏. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6): 5 ~ 8 [ Li Hongxiang, Ren Jixiong, Ma Jianying, Zhou Jing. Abnormal high pore fluid pressure and deep oil and gas pool of clastic rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(6): 5 ~ 8 ]
- 8 游俊,郑浚茂,周建生. 深部地层异常压力与异常孔隙度及油气藏的关系. *中国海上油气(地质)*, 1997, 11(4): 249 ~ 253 [ You Jun, Zheng Junmao, Zhou Jiansheng. The relationship between abnormal pressure and abnormal porosity and hydrocarbon reservoir in the deep strata. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 1997, 11(4): 249 ~ 253 ]
- 9 田克勤,于志海,冯明,等. 渤海湾盆地第三系深层油气地质与勘探. 北京:石油工业出版社, 2000 [ Tian Keqin, Yu Zhihai, Feng Ming, *et al.* *Oil-gas Geology and Exploration in Lower Tertiary Deep Formation of Bohaiwan Basin*. Beijing: Petroleum Industry Press, 2000 ]
- 10 Price L C, Barker C E. Suppression of vitrinite reflectance in amorphous rich kerogen - a major unrecognized problem: *Journal of Petroleum Geology*, 1985, 8: 59 ~ 84
- 11 Price L C, Clayton J L. Reasons for and significance of deep, high-rank hydrocarbon generation in the south Texas Gulf Coast. *Gulf Coast SEPM Foundation Annual Research Conference Proceeding*, October 1, 1990. 105 ~ 137
- 12 Hao Fang and Chen Jianyu. The cause and mechanism of vitrinite reflectance anomalies. *Journal of Petroleum Geology*, 1992, 15: 419 ~ 434.
- 13 Person M, Carven G. Hydrologic constraints on petroleum generation within continental rift basins: theory, and application to the Rhine graben. *AAPG Bulletin*, 1992, 76: 468 ~ 488
- 14 Law B E, Nuccio V F, Barker C E. Kinky vitrinite reflectance well profiles: evidence of paleopore pressure in low-permeability, gas-bearing sequences in Rocky Mountain foreland basins. *AAPG Bulletin*, 1989, 73: 999 ~ 1010
- 15 Decker A D, Horner D M. Source rock evaluation: a method of predicting dominant reservoirs: SPE/DOE Joint Symposium on low-permeability Reservoirs Proceedings, 1987. 297 ~ 306.
- 16 Wang T, Zhong N, Hou D, Huang G, Yu Z, *et al.* On bacterial role in hydrocarbon generation mechanism, Banqiao Sag, Science in China (Series B), 1995, 38(9): 1123 ~ 1134
- 17 陈恭洋,王湘平,王铁冠,等. 板桥凹陷低熟烃源岩的压实特征与油气初次运移. *江汉石油学院学报*, 1999, 21(1): 5 ~ 8 [ Chen Gongyang, Wang Xiangping, Wang Tieguan, *et al.* Compaction and Primary Hydrocarbon Migration of Immature Source Rocks in Banqiao Depression. *Journal of Jianghan Petroleum Institute*, 1999, 21(1): 5 ~ 8 ]
- 18 卢双舫,刘晓艳,付晓泰,等. 未熟-低熟油生成机理的化学动力学研究及其初步应用. *沉积学报*, 2001, 19(1): 130 ~ 135 [ Lu Shuangfang, Liu Xiaoyan, Fu Xiaotai, *et al.* Chemical kinetics study on the generation mechanism of immature to low mature oil and its initial application. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(1): 130 ~ 135 ]
- 19 Hunt J M. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG Bulletin*, 1990, 74: 1 ~ 12
- 20 Hao Fang, Overpressure retardation of organic-matter maturation and petroleum generation: a case study from the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, South China Sea. *AAPG Bulletin*, 1995, 79: 551 ~ 562
- 21 游俊,郑浚茂. 黄骅坳陷中北区深部储层物性影响因素分析. *现代地质*, 1999, 13(3): 350 ~ 354 [ You Jun & Zheng Junmao. Factors of affecting the reservoir physical properties of deep strata in the Huanghua Depression. *Geoscience*, 1999, 13(3): 350 ~ 354 ]
- 22 陈纯芳,赵澄林,李会军. 板桥和歧北凹陷沙河街组深层碎屑岩储层物性特征及其影响因素. *石油大学学报(自然科学版)*, 2002, 26(1): 4 ~ 7 [ Chen Chunfang, Zhao Chenglin, Li Huijun. Physical properties of reservoir and influencing factors of deep burial clastic rocks in Banqiao-Qikou sag. *Journal of Petroleum University*, 2002, 26(1): 4 ~ 7 ]

## Overpressure Retardation of Organic Matter and Its Significance for Petroleum Geology

LI Hui-jun<sup>1</sup> WU Tai-ran<sup>1</sup> HAO Yin-quan<sup>1</sup> ZHANG Xiu-zhu<sup>2</sup> MA Zong-jin<sup>3</sup>

1(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100083)

2(Dagang Oil Field Corporation, CNPC, Tianjin 300280)

3(Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029)

**Abstract** Overpressure developed in Banqiao Sag, Eastern China, and obvious overpressure retardation of organic-matter maturation was found in Well BS35. Such an organic-matter maturity anomaly is distinctly different from those caused by variation in activation energies, conductivity contrasts, and hydrologic effects. Overpressure retardation has been proven to be conditional through integrated organic geochemical and geologic research, early developed overpressure, high original TOC contents of source rocks and the retention of the pore fluids (including products of organic-matter maturation reactions) in the source rocks are three important factors affecting overpressure retardation of organic-matter maturation, and overpressure retardation of organic-matter maturation is quite important for clearly understanding petroleum exploration during deep burial in overpressured sedimentary basins.

**Key words** Banqiao Sag, overpressure, retardation,  $R_o$  value