

文章编号: 1006-6616 (2002) 03-0219-10

黄骅拗陷新生代构造应力场演化的光弹模拟 与石油地质条件分析

马寅生¹, 曾庆利¹, 张 兴²

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 中国石油天然气集团公司, 北京 100274)

摘要:在构造演化分析的基础上对黄骅拗陷的新生代构造应力场演化进行了光弹实验模型, 认为黄骅拗陷新生代最大主应力方向具有从 NNE 向挤压向 NE、NEE 向转变的右旋特征, 构造应力场方向的右旋转变控制着断层的活动与拗陷的形成, 使得早期(孔店期、沙河街期)以引张形式活动的断裂到晚期(东营期及其以后)逐渐转变为以走滑形式活动, 促成了多期构造叠加, 形成了多种圈闭类型, 为油气成藏富集创造了有利条件。

关键词:构造应力场; 黄骅拗陷

中图分类号: P554

文献标识码: A

0 引言

黄骅拗陷位于华北克拉通北部, 燕山造山带以南, 沧县隆起以东, 埕宁隆起以西, 总体呈 NE-SW 向展布, 东部延伸入渤海, 面积 17000km², 其中陆地部分 12000km²。黄骅拗陷是中国东部渤海湾新生代盆地一级拗陷^[1~5], 其新生代的构造演化是中国东部新生代盆地演化的缩影, 它形成演化过程中的应力场演变, 记录了中国东部新生代构造应力机制的演化过程。

黄骅拗陷新生代构造演化的光弹实验模拟, 旨在重现盆地演化过程中应力场演化, 揭示盆地的构造发展史, 进而探讨黄骅拗陷形成演化的动力学机制。同时, 由于黄骅拗陷是我国的油气生产基地, 通过研究盆地构造应力场的演化过程, 也可为盆地的油气勘探和开发提供依据。

1 黄骅拗陷地质概况

1.1 黄骅拗陷的形成和演化

收稿日期: 2002-03-29

作者简介: 马寅生 (1962-), 男, 研究员, 主要从事构造地质、石油地质、地应力和区域稳定性等方面的研究。

注: 本文是国家自然科学基金项目 (49972076) “华北新生代构造应力机制与盆地演化” 的阶段性研究成果。

黄骅拗陷是以前新生界为基底的新生代拗陷。盆地前新生代地层有太古宇、元古宇、古生界和中生界,太古宇和古元古界变质岩构成其结晶基底,中—新元古界、古生界和中生界为结晶基底的沉积盖层。

黄骅拗陷新生代从始新世开始接受沉积,沉积地层由老至新依次为:古近系孔店组、沙河街组、东营组,新近系馆陶组、明化镇组和第四系平原组(表1)。经历了古近纪断陷和新近纪-第四纪拗陷两大发育阶段。

1.1.1 古近纪断陷期

黄骅拗陷古近系沉积巨厚,沉积物在平面上的分布受拗陷边缘长期发育的同沉积断裂控制。内部各沉积凹陷又受次级同沉积断裂控制,形成一系列半地堑、地垒相间排列的古构造地貌格架。一般沉积中心、沉降中心一致,均位于同沉积断裂下降盘一侧,沿NE向区域构造走向分布,发育时间有早有晚。

断陷初期(始新世孔店期),在中生代长期侵蚀准平原化的基础上,一些NNE向同沉积断裂开始发育,主要在孔店地区形成一些相互分隔的半地堑式洼地,沉积了厚达2500m的以红色粗碎屑为主的沉积物。其特征是沉积范围小,厚度大,火山岩及蒸发岩发育。

渐新世早期(沙河街组第三段),NNE向同沉积断裂活动加剧,断陷活动加强,各凹陷沉积水域逐渐贯通,断陷发育进入扩张期。发育一套厚400m~1500m的多旋回暗色砂、泥岩沉积。沉积相带、沉积厚度受边界同沉积断裂及内部同沉积断裂控制,总体上,拗陷西北侧陡、深、沉积厚,东南侧缓、浅、沉积薄。拗陷南区,即港西隆起以南地区,沉积、沉降速度与北区相比相对较小,粗碎屑沉积物相对较少,呈现明显的南北分区特征。

沙河街组二段—一段沉积时进入断陷发育的稳定期。此时,同沉积断裂的方向有所改变,以NE向同沉积断裂为主,沉积盆地的水域逐渐达到了最大范围,沉积物的南北分区性更为明显。南区,沙二段—沙一段沉积厚度一般小于300m,不少地区缺少沙二段沉积。岩性以暗色泥质岩、浅色粒屑灰岩为主。北区,沉积较厚,大于1000m。以暗色砂、泥岩为主,具多旋回砂泥组合特征。

渐新世晚期(东营期),同沉积断裂活动减弱,断陷发育进入衰减期。沉积、沉降以歧口凹陷为中心,向外减薄、变粗。但仍具有南北分区特点。南区沉积厚度一般小于500m,以暗色泥质沉积为主;北区沉积厚度大于1000m,由两套砂岩段夹泥岩段组成。古近纪末盆地反转,整体抬升遭受剥蚀,断陷活动结束。

1.1.2 新近纪—第四纪拗陷期

新近纪—第四纪,渤海沿岸古近纪形成的一系列大型湖泊均已消失,在统一大沉降的背景下,黄骅拗陷融入到大的渤海湾盆地之中,与渤海沿岸各断陷区同步进入拗陷发育阶段,成为渤海湾盆地的沉降中心之一。

表1 黄骅拗陷新生代地层划分表

Table 1 Cenozoic strata of Huanghua depression

界	系	统	组	
新 生 界	第四系		平原组	
		新近系	上新统	明化镇组
	中新统		馆陶组	
	古近系	渐新统		东营组
			沙河街组	沙一段
				沙二段
		沙三段		
		始新统	孔店组	
	古新统			
前新生界				

1.2 黄骅拗陷断裂

黄骅拗陷的断裂构造包括拗陷的边界断裂及内部断裂，从方向上主要可分为 NNE，NE，近 EW 和 NWW 向 4 组（图 1）。

黄骅拗陷的边界断裂有沧东、滦河，埕西三条断裂，分别是黄骅拗陷与沧县隆起、燕山褶皱带和埕宁隆起的分界断裂，它们都是在基底断裂的基础上发展起来的拗陷期同生断裂，具有多期活动性质，在前新生代表现为逆断层，新生代先以正断层方式后为张剪性方式活动，控制着拗陷的形成及演化。

黄骅拗陷内部的 4 组断裂：①近 EW 向的有黄骅、歧东断裂；②NWW 向的有县东、羊三木、吕桥、海河、汉沽断裂；③NNE 向的有徐杨桥西、黑龙江东、赵北、茶淀、涧南、大神堂断裂；④NE 向的有灯明寺，乌马营，孔东，孔西，赵家堡，北大港，南大港，海 1，海 2 断裂。它们是在基底断裂基础上发展起来的同生断裂或与基底断裂活动有关，控制着拗陷内部次级沉积凹陷和沉积建造的发育。

虽然黄骅拗陷新生代的断层活动总体上以 NE 向断裂的伸展活动为主，但在新生代不同时期同沉积断裂的走向出现有规律的变化（图 2），始新世孔店组沉积期同沉积断裂总体方向为 NNE 向（图 2C），渐新世沙河街组沉积期同沉积断裂方向转变为 NE 向（图 2B），中新世馆陶组沉积期进一步演化为 NEE 向（图 2A）。拗陷后期第四纪时期的断裂活动较弱，以拗陷沉降为主，活动方式一直延续至今。

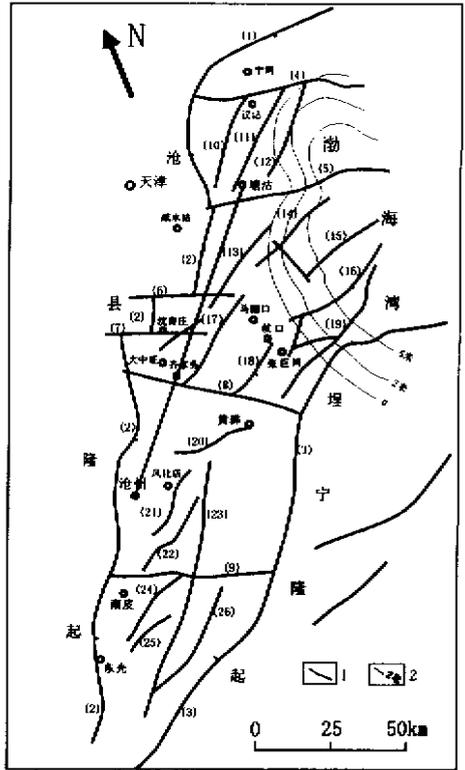


图 1 黄骅拗陷构造纲要图

Fig.1 Tectonic sketch map of the Huanghua depression

- 1. 断裂及编号；2. 海岸线
- (1) 滦河断裂；(2) 沧东断裂；(3) 埕西断裂；(4) 汉沽断裂；(5) 海河断裂；(7) 县东断裂；(8) 吕桥断裂；(8) 羊三木断裂；(9) 南皮—乌北断裂；(10) 茶淀断裂；(11) 大神堂断裂；(12) 涧南断裂；(13) 大张坨断裂；(14) 白水头断裂；(15) 歧东断裂；(16) 赵北断裂；(17) 北大港断裂；(18) 南大港断裂；(19) 羊二庄断裂；(20) 黄骅断裂；(21) 孔西断裂；(22) 孔东断裂；(23) 徐杨桥西断裂；(24) 乌马营断裂；(25) 灯明寺断裂；(26) 黑龙江东断裂

2 光弹实验模拟的原理和方法

模拟实验是以相似理论为依据，在实验室内用一种人工产生的科学现象去模仿另一种存在于自然界或工程技术领域中的科学现象的实验方法^[6,7]。被模仿的体系称为“原型”，用来模仿“原型”的实验体系称为“模型”。研究某一特定模型在实验过程中的发展变化，与原型进行对比和分析，以求得原型在运动中的表现和规律性，这就是模拟实验的目的。

光弹实验是由光学和弹性理论相结合的，用以对研究对象进行应力分析的实验方法。它是将光弹性材料做成研究对象的相似模型，用仪器测定出模型在相似载荷作用下光学性质的

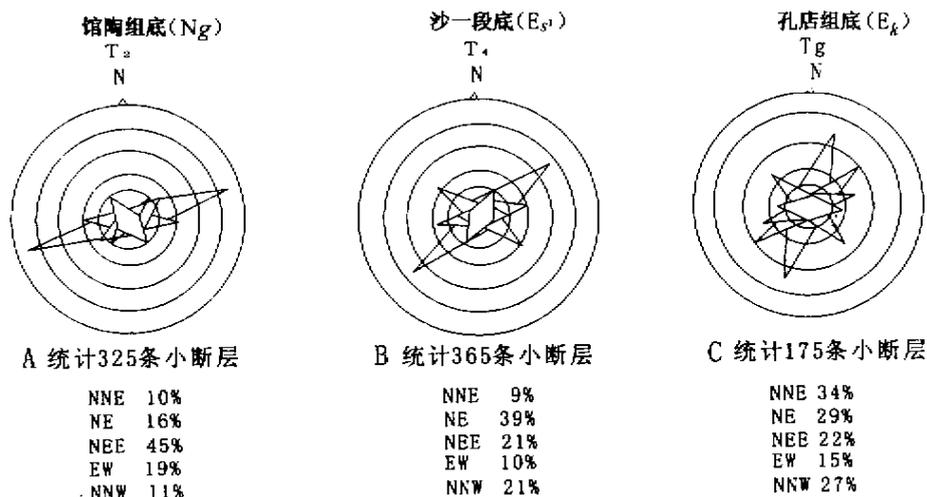


图2 黄骀坳陷古近纪—新近纪不同时期断裂方向玫瑰图

Fig.2 Rose diagram of faults in different stages of paleogene-Neogene in Huanghua depression

变化，以达到分析研究对象中应力分布的实验方法。

2.1 实验方法

实验时首先要建立所研究问题的地质模型，然后再根据地质模型和相似理论将光弹性材料制作成研究对象的相似模型，进而按照一定的边界条件进行加载，测定出模型在该边界条件下的应力分布，以达到分析该地质问题的构造应力场的目的。

(1) 地质模型的建立：地质模型的建立主要根据研究区的地质情况而定。一般是直接把研究区的地质构造图缩小到光弹仪的量程以内即可，必要时作适当简化。

(2) 实验模型的制作：实验的光弹性材料是以 E44-6101 型环氧树脂为基体，顺丁烯二酸酐为固化剂，邻苯二甲酸二丁酯为增塑配制而成的。其重量比如下：

环氧树脂：顺丁烯二酸酐：邻苯二甲酸二丁酯 = 100:30:5

在制作模型时，首先将环氧树脂、顺丁烯二酸酐和邻苯二甲酸二丁酯按上述比例配好，搅匀，注入特制的模具内，在烘箱中恒温 65℃ 左右，固化 28 小时，称为一次固化。待材料不发粘时进行脱模，得到半固化的光弹性板材。用改装了的医用手术刀将该地区的断层线刻划到板材之上，然后把上述板材放入烘箱，以每小时 10℃ ~ 15℃ 升温至 115℃，恒温 4 ~ 5 小时，再以每小时 5℃ ~ 6℃ 降温至 60℃，将烘箱断电，使其自由降温至常温，进行二次固化。最后对四周余量进行加工，即可得到实验所用的模型。

由于加工成型的模型中，有较大的初应力（特别是刻划的断层处）。需要对模型进行退火，以清除其中的初应力。将加工成型的模型放入甘油中在烘箱内加热至 120℃，恒温 2 小时，然后每小时 5℃ 降温，即可退去模型内的初应力。如果一次退火的效果不满意，还需要进行二次退火，其方法相同。

模型成型后，模型的断裂侧向不连续，断层面相接触，有较好的传力性能。

(3) 实验过程：实验时，分别将模型置于万能材料实验机上，使其按选定的边界条件加均布载荷，于光弹仪上分别摄取等色线图，得到该模型的等色线条纹图案。并在光弹仪确定模型内各断裂的受力方式。

2.2 实验原理和计算公式

根据二维应力光学定律：

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf}{t}$$

其中： t 为模型厚度 (cm)；

f 为光弹性材料材料条纹值 (kg/cm 条)；

n 为等色线条纹级数；

σ_1 、 σ_2 分别为平面上的最大主应力和最小主应力。

当实验模型做好后， f 和 t 为常数，差应力 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 或最大剪应力 $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 与条纹级数成正比。因此光弹实验的等色线条纹图案直接反映差应力或最大剪应力的分布。

进一步求解模型内各点的主应力 (σ_1 和 σ_2) 的方法很多，有剪应力差法、迭代法等等。求解各断裂端点上的应力状态，可采用断裂力学中 Westergaard 函数的解析解来计算。

由于控制断裂尖端邻域应力场强弱程度的主要特征量是应力强度因子，根据 Westergaard 函数，平面问题断裂尖端附近 (r/a) $\ll 1$ ，领域内应力分量的普遍表达式为：

$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_1 \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) - K_2 \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \right) \right] - \sigma_{ox}$$

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_1 \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) + K_2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta \right]$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[K_1 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2} \theta + K_2 \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2} \theta \right) \right]$$

其中 K_1 为 I 型断裂的应力强度因子 (kg/cm^{3/2})； K_2 为 II 型断裂的应力强度因子 (kg/cm^{3/2})； σ_{ox} 是修正项 (kg/cm²)。

2.3 实验结果

光弹实验所得到的最基础成果是一套反映不同应力状态的由不同级数的等色线条纹组成的等色线图案，据此我们可以对实验模型和实验对象进行应力分析。

根据二维应力—光学定律，等色线条纹级数与主应力差 ($\sigma_1 - \sigma_2$) 或最大剪应力 ($\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$) 成正比。也就是说，光弹实验的等色线就是等主应力差线或等最大剪应力线，不同级数的等色线组成的等色线图案是模型内主应力差或最大剪应力的等值线图。等色线图案可以直接反映模型内主应力差或最大剪应力的大小分布。除此之外，根据光弹实验的等色线图案我们还可以直接判断模型内各断裂的受力状态。在模型内各断裂上的等色线图案，特别是各断裂端点上的等色线图案有三种类型：

第一种类型：称 I 型条纹，其特征是等色线条纹分布近对称于断裂走向，它既可以由垂直于断裂走向的压应力作用而形成，又可以由垂直于断裂走向的张应力作用而产生。区分断裂是受压应力还受张应力，可以用针刺法在光弹仪上进行鉴别。

第二种类型：称为 II 型条纹，其特征是等色线条纹主轴与断裂走向平行。它们的形成是断裂受剪应力作用的结果。

第三种类型：称为复合型条纹，其特征是等色线条纹既不对称于断裂走向，也不平行于断裂走向。它们的形成是断裂既受剪应力、又受压应力或张应力作用的结果。区别断裂是受张剪应力还是受压剪应力作用，也是用针刺法下光弹仪上进行鉴别。

因此,根据断裂上的等色线条纹类型,我们就可以确定出各断裂的应力状态。

3 黄骅拗陷构造应力场光弹实验模拟

3.1 实验方案及边界条件

模拟实验是以前拗陷期的地质构造为背景,采用不同方案模拟黄骅拗陷新生代不同时期的应力场,进而揭示黄骅拗陷演化过程中的应力场演化。由于黄骅拗陷的形成演化主要受同期断裂活动控制,考虑到拗陷演化不同时期同沉积断裂方向的变化特征,在实验中分别采用 NNE-SSW (N20°E)、NE-SW (N45°E) 及 NEE-SWW (N70°E) 三种方式作为实验模型的边界受力条件,分别模拟拗陷演化过程中的应力场特征。

3.2 地质模型选取

如前所述,黄骅拗陷构造演化主要受同期断裂活动控制。因此,地质模型的选取中把地质模型简化为有若干断裂的均质体,主要研究断裂活动对构造演化和构造应力的影响。在充分考虑拗陷的三条边界大断裂及拗陷内部的 23 条主要断裂的基础上,通过分析南皮—乌北断裂、羊三木断裂、吕桥断裂、埕西断裂盐山带、沧东断裂沈青庄带沉积体系与断裂发育的配置特征后,对断裂作了一定的修改和补充(图 1)。

3.3 黄骅拗陷构造应力场光弹模型结果

3.3.1 NNE 向挤压 (NW 向拉张) 下的结果

在 NNE—SSW 向外力作用下,实验所获得的应力大小和断裂受力方式如图 3,图中应力由小到大共分为 1, 2, 3, 4 级,箭头标定了断裂的受力方向及状态。可以看出南部区受力强度大,且沧东断裂(2)^①南段、徐杨桥西断裂(23)、黑龙村东断裂(26)主要受张应力作用,其活动为形成沧东箕状断陷盆地创造了良好的地质条件。埕西断裂(3)受拉张剪切应力作用;羊三木断裂(8)、海河断裂(5)、汉沽断裂(4)主要受挤压应力作用;灯明寺断裂(25)、南皮—乌北断裂(9)、孔东断裂(22)、孔西断裂(21)、南大港断裂(18)、北大港断裂(17)、赵北断裂(16)、歧东断裂(15)、白水头断裂(14)、大张坨断裂(13)、润南断裂(12)、大神堂断裂(11)、茶淀断裂(10)均表现为左旋剪切;沧东北段断裂(2)受左旋挤压应力。在 NNE 挤压外力的作用下,南部区产生了较强的引张作用,容易形成拉张盆地,同时全区大量的剪切断裂的活动为形成二级构造单元(即局部构造)创造了条件。这种地质背景与南部有孔店组,而中、北部区缺失孔店组的实际是吻合的;钻井揭示南部区孔店组厚度达 2000m,中、北部区未见该组地层。

3.3.2 NE 向挤压 (NW 向拉张) 下的结果

NE 向挤压外力作用下实验所得的应力大小及断裂受力方式如图 4,由图看出:全区断裂除南皮—乌北断裂(9)、黄骅断裂(20)、羊三木断裂(8)、海河断裂(5)、汉沽断裂(4)等近东西向受压剪应力作用外,其他断裂均受引张或引张剪切应力作用,特别是中南部区的北大港(17)、羊二庄(19)、歧东(15)等断裂的张应力值已达 4 级。这种全区受引张或引张剪切应力作用的结果,使沙河街组沉积期成为全区最大的沉降期。钻探揭示沙河街组沉积范围广,遍布全区,厚度大,歧口凹陷中该组沉积厚达 3000 米^[1]。

3.3.3 NNE 向挤压 (NNW 向拉张) 下的结果

① (2) 表示图 1 中沧东断裂的编号,下同。

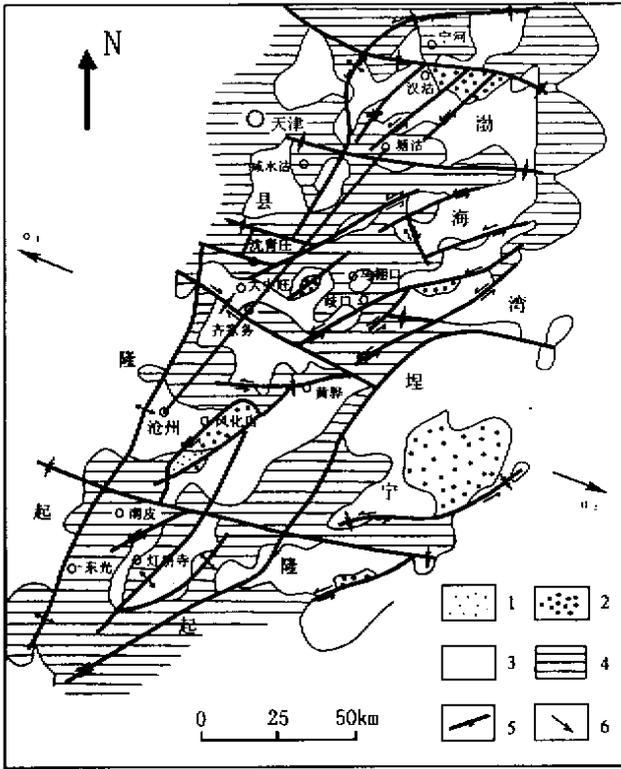


图 3 黄骅拗陷 NNE 向挤压下应力状态

Fig.3 Stress state of NNE trend compression in Huanghua depression

1. 应力值一级；2. 应力值二级；3. 应力值三级；4. 应力值四级；5. 断裂；6. 外力方向

NEE 向挤压外力作用下，实验的应力大小和各断裂受力方式如图 5，由图看出：原主要断裂，如沧东（2）、徐杨桥西（23）、埕西（3）等断裂的左旋引张剪切，均已变为右旋剪切，引张力已消失。南皮—乌北（9）、黄骅（20）、羊三木（8）、海河（5）、汉沽（4）等断裂的引张力也消失，NE 向断裂均已受右旋剪应力作用。南部区灯明寺（25）、孔东（22）、孔西（21）等断裂，中部区的南大港（18）、北大港（17）、赵北（16）、歧东（15）、白水头（14）、大张坨（13）等断裂也受右旋引张剪切应力的作用，中部南大港（18）、白水头（14）、沈青庄、齐家务—沧州一带应力维持在 3~4 级，其他地区应力都已降低，这种应力场背景反映该区大的断陷期已接近尾声，继之而来的是以水平剪切为主的构造运动，导致走滑断裂及其伴生构造的发育。

4 构造应力场演化与石油地质条件分析

模拟实验的结果表明，黄骅拗陷孔店期受 NNE—SSW 向的挤压（NNW—SSE 向的伸展）应力作用，拗陷南区伸展作用较强；沙河街期受 NE—SW 向挤压（NW—SE 向伸展）应力作用，整个拗陷伸展作用比较均匀；东营期及其以后受 NEE—SWW 向挤压（NNW—SSE 向伸

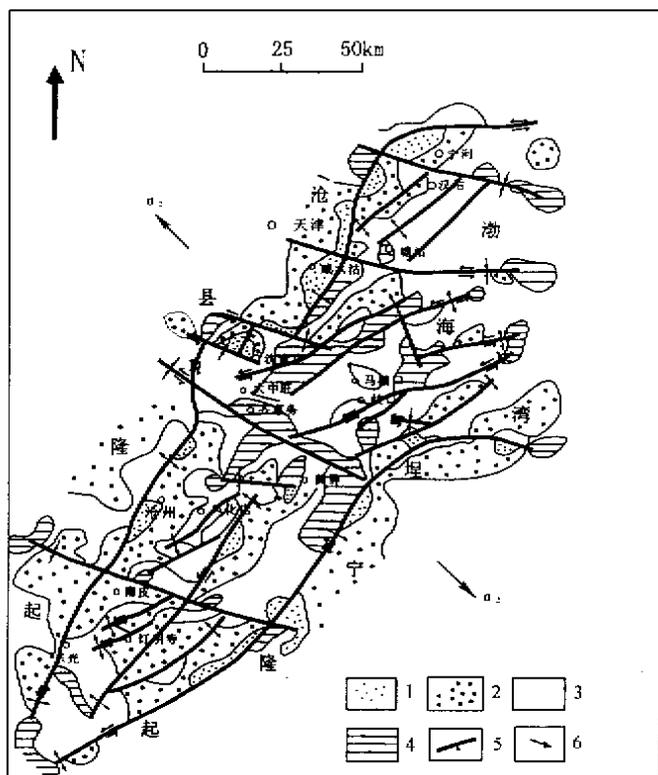


图4 黄骅拗陷 NE 向挤压下应力状态

Fig.4 Stress state of NE trend compression
in Huanghua depression

1. 应力值一级; 2. 应力值二级; 3. 应力值三级; 4. 应力值四级; 5. 断裂; 6. 外力方向

展) 应力作用, 伸展作用开始减弱。模拟实验结果符合最大主应力方向在时间上从 NNE、NE 至 NEE 向右旋演变特征。

孔店组沉积期, 地应力已由中生代末 NW—SE 向挤压转变为 NNE—SSW 向挤压 (NNW—SEE 向伸展), 黄骅拗陷南区边界大断层呈现拉张伸展特征, 沧东断裂下降盘强烈的断陷作用使沿该带沉积了一系列裙边状分布的水下扇沉积体, 特别是沉积了孔二段生、储、盖配套的地层层序。中、北区尚处于地史变革的前夜, 遭受剥蚀。这一时期, 南区的沉积扇体可形成岩性圈闭, 伸展断裂活动可形成断鼻、断块及逆牵引背斜圈闭。中、北区基底还处于差异剥蚀状态, 为形成披覆圈闭和不整合圈闭准备了条件。

沙河街组沉积期, 挤压应力方向向右偏转, NE—SW 向的挤压 (NW—SE 向伸展) 波及全区, 黄骅拗陷中、北区也开始大幅度的沉降, 出现以歧口为中心的区域性断陷发展期, 沉积了沙三段范围广、巨厚的生储油层序列。这一阶段, 全区均可形成岩性、断鼻、断块圈闭, 中、北区沙三段下部可形成古地貌控制的披覆圈闭、地层不整合圈闭。

东营组沉积期及其以后, 挤压应力方向继续向右偏转, 成为 NEE—SWW 向挤压 (NNW—SSE 向伸展)。这一应力作用方式的转变, 一方面使得拗陷继续下沉, 接受沉积; 另一方面, 使得早期的主要断裂活动方式由引张转变为走滑, 伸展作用减弱, 既为断鼻、断块

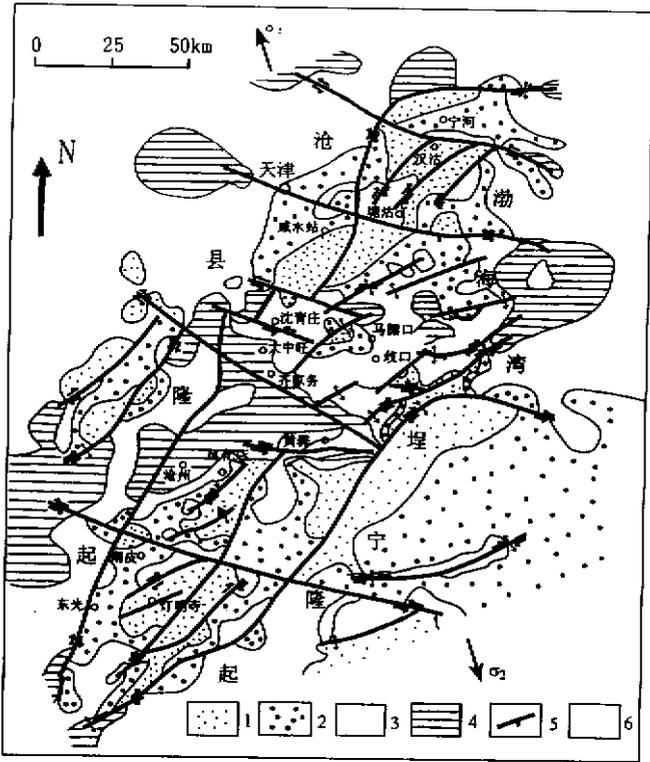


图 5 黄骅拗陷 NEE 向挤压下应力状态

Fig.5 Stress state of NEE trend compression in Huanghua depression

- 1. 应力值一级；2. 应力值二级；3. 应力值三级；4. 应力值四级；5. 断裂；6. 外力方向

圈闭的形成创造了条件，又为已成熟的孔店组和沙河街组油气运移提供了驱动力。

5 结论

(1) 黄骅拗陷新生代最大主应力方向呈现由 NNE 向 NE、NEE 向的右旋转变特征，构造应力场的右旋转变控制着拗陷的形成，应力不均衡作用控制着区域地层分布及其断层的活动与演化。

(2) 黄骅拗陷新生代构造应力场的右旋转变使得早期（孔店期、沙河街期）以引张形式活动的断裂到晚期（东营组及其以后）逐渐转变为走滑形式活动。

(3) 黄骅拗陷构造应力场的转变促成多期构造叠加，形成了多种圈闭类型，为油气成藏富集创造了有利条件。

参 考 文 献

- [1] 大港油田石油地质志编辑委员会. 大港油田 [M], 中国石油地质志, 卷四, 北京: 石油工业出版社, 1991. 436.
- [2] Ma X Y, Wu D N. Cenozoic extensional tectonics in China [J]. *Tectonophysics*, 1987, 133, 243 ~ 255.
- [3] Ye H, Zhang B T, Ma F Y. The Cenozoic tectonic evolution of the great North China: two types of rifting and crustal necking in the great North China and their tectonic implications [J]. *Tectonophysics*, 1987, 133, 217 ~ 227.
- [4] Tian Z Y, Han P, Xu K D. The Meozoic-Cenozoic east China rift system [J]. *Tectonophysics*, 1992, 208, 341 ~ 363.
- [5] 马寅生. 燕山东段—下辽河地区中新代断裂演化与构造期次 [J]. *地质力学学报*, 1999, 5 (3): 33 ~ 39.
- [6] 黄庆华, 马寅生, 李永贤, 王砚庆. 阜新-义县盆地构造演化及应力场光弹性模拟分析 [J]. *中国地质科学院院报*, 第 22 号, 1991.
- [7] 殷秀兰, 李思田, 马寅生, 王砚庆. 莺歌海盆地晚第三纪构造特征的三维泥料模拟实验及其动力学意义 [J]. *地质论评*, 2001, 47 (5): 535 ~ 541.

PHOTOELASTIC EXPERIMENTAL MODELLING OF EVOLUTION OF CENOZOIC TECTONIC STRESS FIELD AND ANALYSIS OF PETROLEUM GEOLOGICAL CONDITION IN HUANGHUA DEPRESSION

MA Ying-sheng¹, ZENG Qing-li¹, ZHANG Xing²

(1. *Institute of Geomechanics, CAGS, Beijing 100081, China;*

2. *Chinese Natural Gas and Petroleum Corporation, Beijing 100000, China*)

Abstract : Based on the analysis of tectonic evolution, photoelastic experimental modelling is operated on the evolution of Cenozoic tectonic stress field in Huanghua depression. It is considered that there is a dextral rotation from NNE- to NE、NEE trend on the evolution of Cenozoic tectonic stress direction in Huanghua depression. It controls the activity of the faults and the formation of the depression, makes the fault-activity transforming from extension in early stage (Kongdian and Shahejie Formation) to strike-slip in later stage (Dongying Formation and after it), facilitates multistage structure superimposed and formed various type traps. All those make an advantage for the hydrocarbon accumulation.

Key words : tectonic stress field ; Huanghua depression