

戴黎明,李三忠,楼达等.渤海湾盆地黄骅坳陷应力场的三维数值模拟分析.地球物理学报,2013,56(3):929-942,doi:10.6038/cjg20130321.

Dai L M, Li S Z, Lou D, et al. Numerical modeling on the stress field in the Huanghua depression, Bohai Bay basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(3):929-942,doi:10.6038/cjg20130321.

渤海湾盆地黄骅坳陷应力场的 三维数值模拟分析

戴黎明^{1,2},李三忠^{1,2*},楼达³,索艳慧^{1,2},刘鑫^{1,2},
周立宏³,蒲秀刚³,周淑慧³,余珊^{1,2}

1 海底科学与探测技术教育部重点实验室,青岛 266100

2 中国海洋大学海洋地球科学学院,青岛 266100

3 中国石油大港油田公司,天津 300280

摘 要 采用有限元方法模拟了渤海湾盆地黄骅坳陷的现今应力场特征.模型的构建主要基于黄骅坳陷精细三维地震数据体,包括了七个主要层序底面及近真实的断层产状.根据模拟结果,对比已知油气藏的分布位置和断裂的展布方向,定量分析了黄骅坳陷第一主应力、第三主应力、应力强度以及主应力方向的分布特征,并探讨了影响黄骅坳陷构造特征的主要因素.据此,得出以下认识:1)通过改变模型的边界条件发现,在右旋剪切作用下模型中压性应力场低值区的分布特征及主应力方向分别与黄骅坳陷中已知油藏的分布及断裂展布方向具有较好的对应关系.2)黄骅坳陷内构造样式及其构造应力场方向自北向南存在一定的差异,而造成这种差异的原因与地形的变化、沧东断层空间形态的变化、断层组合样式的变化以及滑脱面的变化密切相关.

关键词 黄骅坳陷,构造应力场,有限元数值模拟,现今,渤海湾盆地

doi:10.6038/cjg20130321

中图分类号 P541, P736

收稿日期 2012-08-06,2012-10-28 收修定稿

Numerical modeling on the stress field in the Huanghua depression, Bohai Bay basin

DAI Li-Ming^{1,2}, LI San-Zhong^{1,2*}, LOU Da³, SUO Yan-Hui^{1,2}, LIU Xin^{1,2},
ZHOU Li-Hong³, PU Xiu-Gang³, ZHOU Shu-Hui³, YU Shan^{1,2}

1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2 Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Qingdao 266100, China

3 Dagang Oil Field Company, Ltd., CNPC, Dagang 300280, China

Abstract The present-day stress field of the Huanghua Depression is analyzed using finite element modeling (FEM). The models are constructed based on 3D seismic data, which consists of bottom surfaces of seven sequences and near-real spatial occurrences of faults in the depression. Comparing with the distribution of oil-gas reservoirs and fault patterns around the area of the reservoirs, we quantitatively explain the distribution characteristics of the first/third

基金项目 国家自然科学基金项目(41190072,41072152)、山东省自然科学基金青年基金项目(ZR2012DQ012)、海洋“863”重点项目(2009AA093401)和中国地质调查项目(1212011120103)联合资助

作者简介 戴黎明,男,1980年生,博士,从事构造地质学及其数值模拟的研究. E-mail:dlming_geo@gmail.com

* **通讯作者** 李三忠,男,中国海洋大学教授,主要从事构造地质、海洋地质研究. E-mail:sanzhong@ouc.edu.cn

principal stresses, stress intensity and direction of principal stresses. Then, the main factors influencing the structural features of the Huanghua Depression are discussed accordingly. The faults in the model are introduced as Coulomb-type frictional zones that refer to contact analysis of FEM. The results are as followed: 1) by adjusting the boundary conditions of the models, we find out that under the left-lateral shearing, the third principal stresses and the orientations of principal stresses show certain correlation with the position of five oil-gas reservoirs and fault strikes in the Huanghua Depression, respectively. 2) There are differences in the structural patterns and the directions of structural stress field of the the Huanghua Depression from north to south, which closely relate to the spatial occurrences of the Cangdong Fault, fault pattern, types and the spatial change of detachment fault.

Keywords The Huanghua Depression, Structural stress field, FEM, Present-day, Bohai Bay Basin

1 引言

黄骅拗陷位于渤海湾盆地的中部(图 1). 与周边拗陷相比,其地壳厚度最薄、新生界最厚,为新生代以来渤海湾盆地的沉积沉降中心,经历了十分复杂的构造演化过程,表现为多幕拉张断陷、抬升-剥蚀以及走滑拉分作用^[1-4]. 现今拗陷内的各种构造样式也记录了多期次构造运动、多成因构造控制下动态发展的组合,而这种构造组合样式对拗陷内构造应力场以及油气资源的分布都起到了显著控制作用. 因此,研究黄骅拗陷构造应力场不但可以了解华北克拉通破坏过程中渤海湾盆地的形成机制^[5-8],而且对指导油气资源的勘探开发也具有重要的实际应用价值.

关于黄骅拗陷及周边区域的地球物理特征^[9-14]、构造演化过程^[1,2,15-17]以及动力学成因机制^[18-20,5]等,前人业已做了大量的工作,而且观点众多. 但本文重点不是通过数值模拟的方法来验证某一种动力学演化过程或成因机制是否正确,而是利用已有的三维地震数据资料拟合出黄骅拗陷近真实的三维几何学结构,并以此为基础探讨黄骅拗陷现今应力场.

数值模拟方法在恢复盆地应力状态及其构造演化过程方面,前人也已做了大量工作. 如, Jarosinski 等^[21]以潘诺尼亚盆地为例利用有限元数值模拟的方法系统论述了盆地构造反转的发生机制. 许忠淮和吴少武^[22]、李乃胜^[23]等则分别利用地震震源机制解和有限元方法得出了东海陆架盆地及其周边地区的应力场的分布特征,并以此为基础探讨了盆地的动力学成因机制. 谭成轩等^[24]、王红才等^[25]以辽河油田为例构建三维有限元模型,来研究地应力与油

气运移间的关系. 王延欣等^[26]则利用有限元方法恢复了二叠纪准格尔地区的主应力方向. 而针对黄骅拗陷,胡才适等^[27]利用有限元方法构建了三维空间模型,并根据各主要构造期次构造运动对拗陷的影响模拟了黄骅拗陷的构造演化过程. 此外,马寅生等^[28]利用光弹实验模拟恢复了黄骅拗陷新生代应力场的演化规律. 上述工作对了解盆地动力学演化过程以及盆地的成因机制起到一定的帮助作用,但是,依然存在一系列的问题. 首先,关于盆地构造演化模型的建立都主要是基于盆地地质条件下的概念模型,没有考虑盆地在演化过程中横向上的不均匀性. 而通过前人的研究成果来看^[29],盆地的横向不均匀性对应应力场分布具有重要的影响,是盆地动力学演化过程中不可忽略的重要因素. 其次,上述模型中断层的设置多采用调节有限单元材料属性(杨氏模量和泊松比)的方法. 虽然该方法能够模拟出断层的一些基本行为,但其依然为一种连续性模型,没有考虑断层的不连续性对盆地内应力场分布的影响. 因而,上述模型多为探讨性的理论模型,没有真实的反映出盆内的真实几何结构和构造特征(如,地形的起伏,断层空间形态伴随深度以及走向上的变化等),因此,这些模拟结果在实际应用中还存在一些不足. 由此可见,在对黄骅拗陷进行数值模拟分析时,通过拟合出近真实的三维空间结构是十分必要的,其对于了解盆地内应力场的分布以及油气运聚规律具有重要作用.

2 地质背景

黄骅拗陷的东西边界分别为羊二庄断裂和沧东断裂(图 1). 其中,羊二庄断裂新生代地层内为一条呈 NNE 展布的西倾高角度走滑断层,在拗陷的古

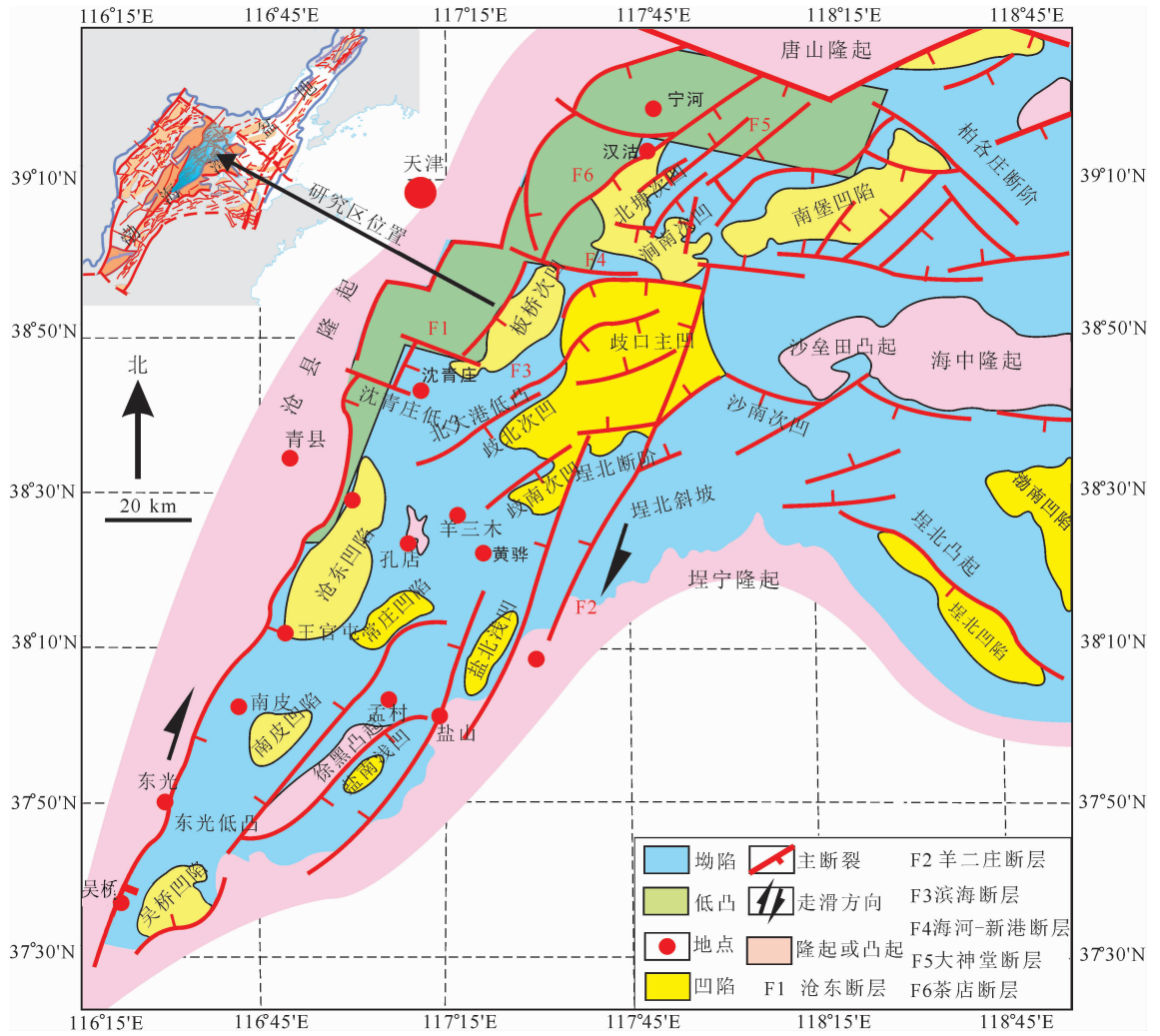


图 1 黄骅拗陷构造和大地构造位置图(据李三忠等^[5]、李明刚等^[17]修改)

Fig. 1 Tectonic and structural map of the Huanghua Depression(after Li et al. ^[5], Li et al. ^[17])

生界基底内则表现出负花状的典型走滑特征^[1]。羊二庄断裂向南与兰考—聊城断裂侧接,可认为是南部兰考—聊城断裂向北的拓展,而向北则与北部的沙西断层侧接。这三条断裂在平面上呈右阶雁列式排列,统称兰聊断裂带,将黄骅拗陷与埕宁隆起和沙田隆起分隔开,而在纵向上兰聊断裂带为西倾的铲式拆离断层^[30],羊二庄和沙西断层皆为西倾的高角度正断层,但在深部,三者有合并为同一条走滑断裂的趋势^[5]。沧东断裂为黄骅拗陷的西边界,结构较为复杂、沿走向空间分段性明显,以沈青庄低凸起和海河—新港断层为界可划分出西南、中部和东北三段。其中,西南段为 NE 向的坡坪式正断层,断距较大。中部段则呈 NE 向锯齿状展布,这种断裂组合样式可能是早期右阶雁列式正断层发生硬连接而形成的追踪张。东北段以海河—新港断层为界从板桥次凹西部的 NE 向突然偏转为北塘次凹西部的 NW 向,至北塘次凹北侧又偏转为北东向^[17,18]。通过层析成

像^[31]、现今该区地震的震源深度^[32-33]以及大量地震剖面解释结果^[1,17]发现,沧东断层向下延伸和其他断裂归并到一个统一的滑脱面,该滑脱面深约 15~20 km,可分为三个台阶,其上盘发育有多米诺式的掀斜地块。

关于黄骅拗陷新生代盆地的形成,前人观点较多。漆家福等^[8]认为坡坪式沧东断层的伸展作用影响了拗陷的沉积建造及构造样式,从而控制了黄骅拗陷新生代拗陷的形成。任建业等^[1]认为以兰考—聊城断裂带和郟庐断裂带为边界的斜向拉张导致了黄骅拗陷新生代盆地的形成。而李三忠^[5]则认为黄骅拗陷是兰聊—沧东断裂带内部断陷,受西界基底中的沧东断裂系和东界兰考—聊城—羊二庄断裂系控制,构成了可以和中国东部重要的北北东向郟庐断裂带相提并论的重要断裂带^[34]。

黄骅拗陷新生代沉积了孔店组、沙河街组、东营组、馆陶组、明化镇组以及第四系六套地层。其中,在

古近纪沉积的孔店组地层主要发育在坳陷南部,表现为由河流-冲积相至深湖相,再至冲积相的旋回特征^[17].与孔店组相似,沙河街组至东营组同样也为一个大的沉积旋回,在沙四至沙一期表现为受主要断裂控制的湖盆扩张阶段,坳陷北部发育了河流-冲积相地层,而坳陷南部沉积了湖相碳酸盐岩和泥岩地层^[35],在东营期黄骅坳陷明显发生萎缩,该期次地层下部为深湖相,而上部为河流-冲积相.进入新近系,馆陶组、明化镇组以及第四系地层广泛沉积于歧口凹陷,以河流相为主.

3 模型的构建

有限元模型主要是基于黄骅坳陷精细的三维地

震数据体而构建的(图2).为了减小边界效应对模拟结果的影响,模型设计的范围较大,长约200 km,宽约100 km,这包括了整个歧口凹陷,南堡凹陷的一部分,沧县隆起的一部分和埕宁隆起的一部分,其中歧口凹陷中还包括了歧南、歧北、板桥、北塘四个次凹和歧口主凹.模型中最厚处约为40 km(黄骅坳陷周边隆起区),凹陷内平均厚度约为28~32 km.从上至下分为7层,内部包括了明化镇组、馆陶组、东营组、沙河街组一段、沙河街组二段、沙河街组三段和沙河街组四段七个重要的构造界面.

断裂是影响区域构造应力场分布特征的主要因素之一^[29],而这一影响会伴随断层倾向、倾角以及走向的变化而变化,因此,在盆地构造演化过程中,断层几何形态的变化不但能够影响区域沉积沉降中

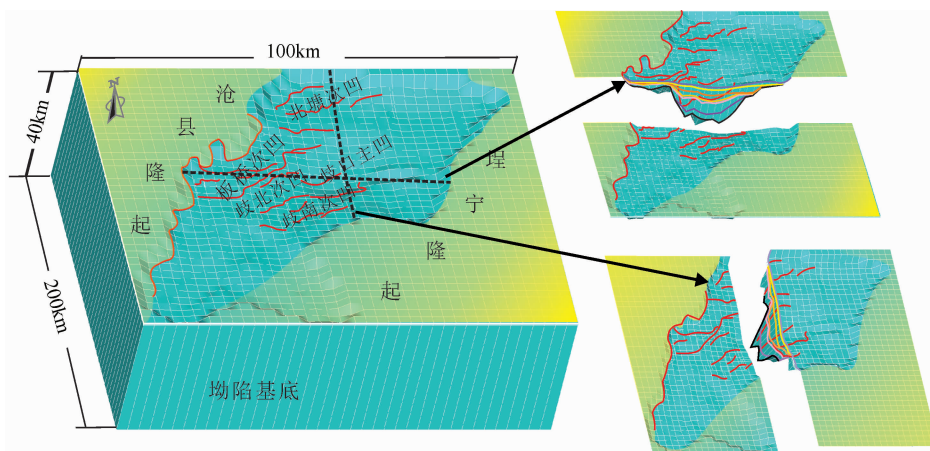


图2 黄骅坳陷的三维结构模型

(为了便于观看,模型纵向上拉伸了3倍(以下同),但在模拟过程中完全按歧口凹陷的真实空间结构进行计算)

Fig. 2 3D model of the Huanghua Depression

(For easy observation, the 3D model has been extended three times in vertical, but the structures of the model is completely based on the structures of the Huanghua Depression in the process of calculation)

心的迁移等,而且还对油气的圈闭、运移和保存起到了重要的控制作用.而黄骅坳陷是渤海湾盆地的沉降中心之一^[5],自中生代以来断裂活动强度大,频率高,断裂十分发育.坳陷内断层按走向上可划分为北东向-北北东向、近东西向两组.其中北东向-北北东向断层最为发育,多为正断层,力学性质表现为张扭性.而东西向断层主要位于歧口主凹以北的地区.本文选取了18条主要的断裂构建出黄骅坳陷的断裂系统空间形态图(图3).这18条断层的构建完全依据三维地震资料的解释成果,没有进行任何简化处理.因此,在该种条件下模拟出的结果更能够反映出黄骅坳陷的应力状态,在此基础上推断出的油气运移趋势也更加准确可靠.

由于本文模型为不连续模型,因此,对于18条

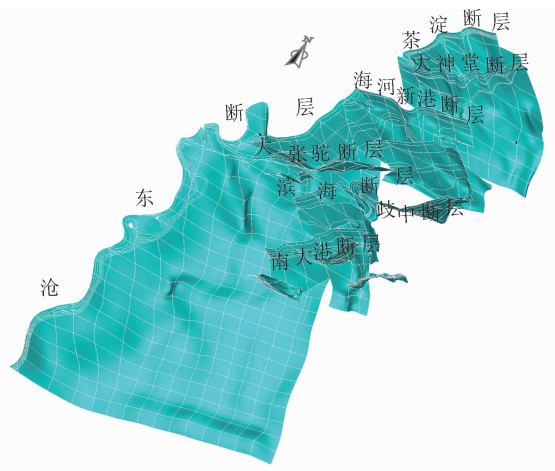


图3 黄骅坳陷模型中断层的空间形态

Fig. 3 Spatial model of faults in the Huanghua Depression

断层在模拟过程中接触行为的判定,使用了库仑摩擦模型^[36-39],其表达式为

$$\tau = \mu p, \quad (1)$$

其中 p 表示断层接触面间的正应力(Pa), μ 表示断层接触面间的摩擦系数. 根据 Kong 等^[40]、Wang 等^[41]数值模拟结果发现,大型走滑断层的摩擦系数一般较小,约为 0.08. 而黄骅坳陷内的基底断裂为兰聊—沧东大型走滑断裂系的一部分^[5],因此在模型中将其摩擦系数统一设置为 0.08. 坳陷基底断层的沉积盖层多以碳酸岩、砂岩或泥岩类为主,断层接触面相对粗糙,因此摩擦系数设置为 0.1.

由于图 2 的模型只考虑在现今地质条件下盆内应力场的分布特征,模拟时间相对较短(约 2 万年)模型厚度相对较薄(平均约 30 km),因此,忽略了盆地长时间构造演化过程中蠕变或松弛以及下地壳和软流圈中粘弹性属性对盆地的影响. 同时,认为黄骅坳陷在纵向上已经充分压实,因此只考虑平面构造应力对坳陷的影响,而忽略重力对其造成的影响. 基于以上两点,在构建黄骅坳陷力学参数模型的过程中只考虑其线弹性行为. 对于各套地层间以及与坳陷基底上的差异,主要通过调节杨氏模量(E)、泊松比(ν)以及地层密度(ρ)来实现(表 1). 其中,沉积盖层中模型参数的选择主要基于安欧^[29]、胡才志等^[27]

表 1 各主要地层力学参数

Table 1 Material properties of major strata in the model

	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	E/Pa	ν
Nm-Ng 地层	1800	1e10	0.23
Ed-Nm 地层	1800	2e10	0.23
S1-Ed 地层	2600	1e10	0.26
S2-S1 地层	2000	1.5e10	0.25
S3-S2 地层	2000	1.5e10	0.26
S4-S3 地层	1800	2.4e10	0.26
盆地基底	2600	2e9	0.28

对地层样品测试分析的结果,具有一定的可信度. 而盆地基底的力学参数主要通过渤海湾地区横波速度和纵波速度间的关系式计算得出^[42].

对于模型边界条件的选择,主要考虑盆地形成现今空间结构的三种观点(图 4). 第一种观点强调黄骅坳陷构造应力场的分布特征明显受北东向边界断层走滑作用的影响^[5]. 因此,在模型中的西边界设置为具有北东向的位移,模型的南北边界和东边界设置为固定边界,模型底边界设置为垂向固定,水平方向为自由边界(图 4a). 第二种观点认为黄骅坳陷是一个张扭性质的盆地,既强调了走滑作用对坳陷的影响,也强调了拉张作用对坳陷的影响^[1]. 基

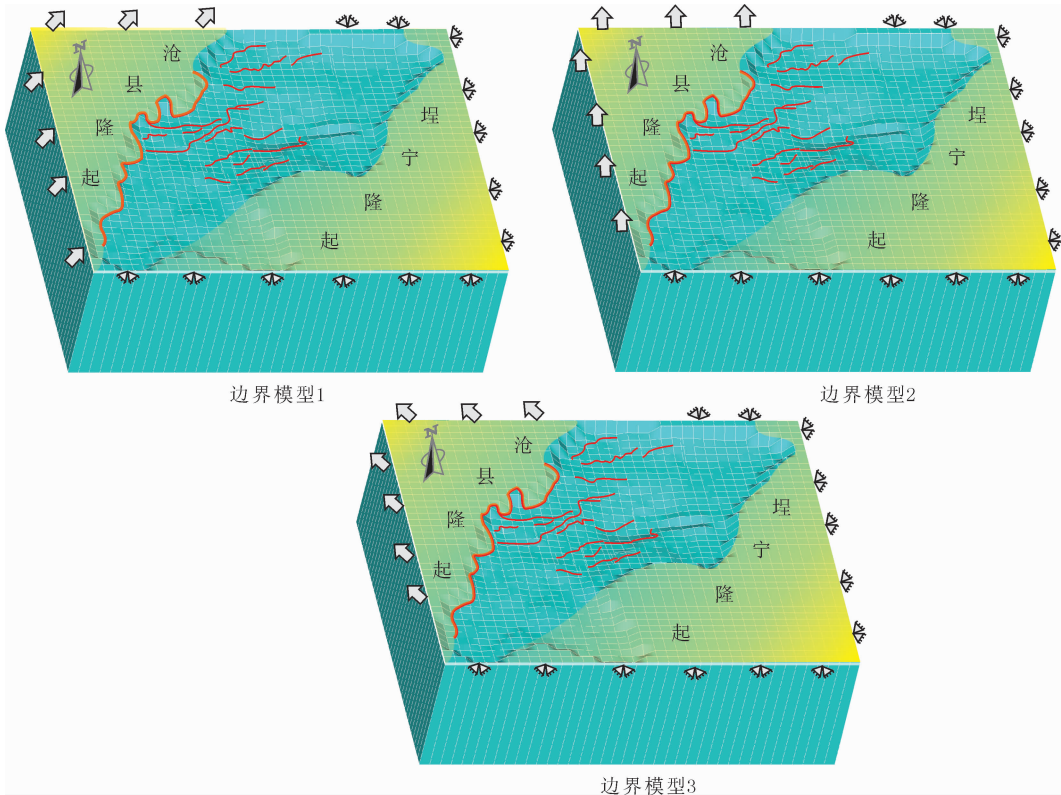


图 4 模型的三种边界条件

Fig. 4 Three kinds of boundary conditions in the model of Fig. 2

于该种观点,模型中的西边界设置为具有正北方向的拉伸位移,模型南北边界和东边界设置为固定边界,模型底边界设置为垂向固定,水平方向为自由边界(图 4b). 第三种观点强调黄骅坳陷的构造应力场主要受沧东坡坪式拆离断层拉张作用的影响,走滑作用只起到调节性作用^[8]. 基于该种观点,模型中的西边界设置为具有北西向的拉伸位移,而模型的东边界和南北两边界设置为固定边界,模型底边界设置为垂向固定,水平方向为自由边界(图 4c).

4 模拟结果

本文选取了三种应力参数,分别为第一主应力、第三主应力以及应力强度来表达黄骅坳陷的应力状态. 其中,据 ANSYS 方法的规定,第一主应力值大于第三主应力值,因此第一主应力的正值可用来描述坳陷的张性应力环境,第三主应力的负值可用来

描述坳陷的压性应力环境. 应力强度则用来描述坳陷中容易产生破裂的区域,对于其表达式可参见戴黎明等^[43]对其的论述. 由于本文模型的地层分层较多,不能将所有结果都展示出来,因此选取了可刻画现今应力场的最为接近的明化镇组地层作为目标层位进行讨论.

4.1 黄骅坳陷第一主应力的分布特征

图 5 为在三种边界条件作用下 Nm 构造界面上第一主应力的分布特征. 从图中可以看到,在 Nm 界面上三种模型的第一主应力的分布特征明显不同. 在第一种边界条件下(图 5a),黄骅坳陷张性应力高值区主要介于沧东断层中段和滨海断层之间,这说明在右行走滑作用下沧东断层空间形态的改变能够导致其上盘地层产生较强的张性应力,而张性应力的分布范围受到滨海断层的限定. 与这两条断层相比,张应力高值区内的大张陀断层对区域应力场分布起到了调解性作用,使得局部区域产生异常

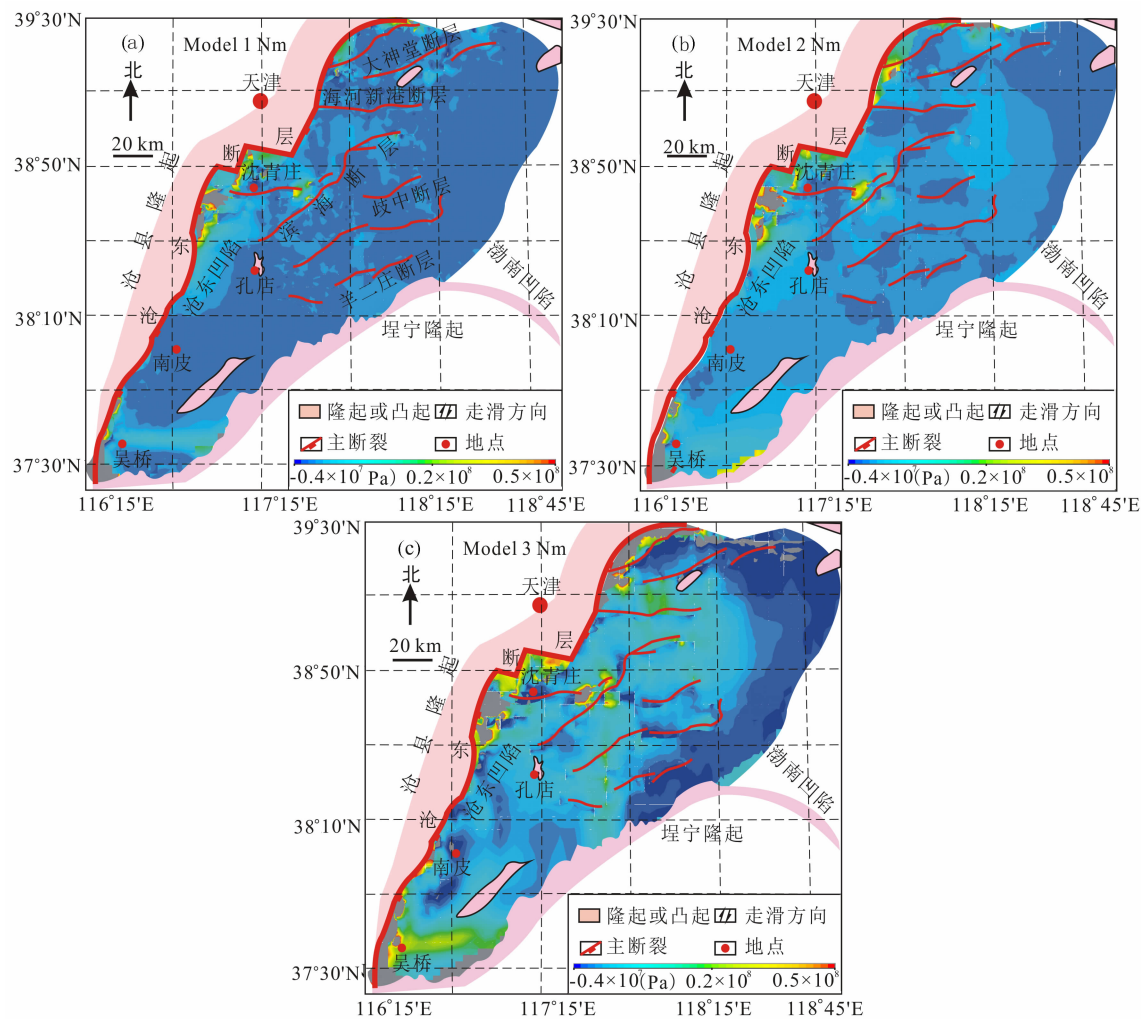


图 5 黄骅坳陷第一主应力的分布特征

Fig. 5 The first principal stress distribution of three models with different boundary conditions

应力.与此同时,在该种边界条件下坳陷内其它区域张应力值变化则不明显.

在第二种边界条件下(图 5b),黄骅坳陷张应力高值区的分布范围不再局限于沧东和滨海两条断层之间,而广泛发育于坳陷南部、板桥次凹、歧北次凹以及北塘次凹中.张性应力低值区分布范围则相对较小,主要集中于 NE 向和 EW 向断层的上盘,其中 EW 向断层应力值分布范围明显要小于 NE 向断层,这说明在 SN 向拉张作用下 EW 向断层的上盘与 NE 向断层相比更容易沿断面向下滑移,这是因为滑移量的大小主要取决于断层走向与边界位移方向的夹角,夹角越大断层上盘下滑量越大、张性应力越小.

当黄骅坳陷受到北西向纯拉张的作用力时(图 5c),坳陷内张性应力的分布呈现出北中强南部弱的特征.其中,在坳陷中部和北部张性应力的分布是弥散性的,广泛发育于各个凹陷中,只是在个别区域的断层上盘出现张应力的低值区(如大张陀断层上盘、歧中断层上盘以及茶店断层上盘),造成该种现象的原因也与断层走向和边界位移的作用方向有关.而与中北部区域相比,坳陷南部的张性应力明显偏弱,这可能与沧东断层滑脱面南北上的差异有关.

4.2 黄骅坳陷第三主应力的分布特征

前文论述了第一主应力的分布特征,从中能够看出三种模型张性应力的分布范围存在一定的差异,而该种差异说明了在不同边界条件作用下坳陷内可能产生张性破裂的区域有所不同.那么三种边界条件又是如何影响黄骅坳陷第三主应力的分布特征的呢?由于第三主应力多为压性应力,而压应力值的高低又与油气聚集的可能方位密切相关^[44-47],因此本文将结合已知油气藏的分布特征来论述三种边界模型间的差异.

从图 6a 可以看到当黄骅坳陷受到右旋剪切作用时, Nm 界面上的第三主应力都为压性应力.而根据压性应力绝对值的高低,可将坳陷大体划分出强、中、弱三个部分.其中,压性应力高值区主要位于以下四个区域:

1)第一个区域由大神堂断层、海河—新港断层以及滨海断层北段所围限,整体呈东西向展布并具有东强西弱的分布特征.可以看到该高值区明显将北塘次凹和其它凹陷分隔开,造成这种现象的原因应该与沧东断层下部滑脱面在北塘次凹消失以及三条断层的分布特征有关^[1].

2)第二个区域东西介于沧东断层的中段和滨海

断层南段之间,而南北介于板桥次凹和沧东凹陷,这种应力分布特征说明沧东断层空间形态上的改变导致了压性应力的增强,而增强的范围受到滨海断层的限定,这与第一主应力的分布特征非常相似.

3)第三个区域位于埕北断阶带的南段,由南大港断层南段和埕北断阶所围限,整体呈 SN 向展布.

4)第四个区域位于坳陷的最南端.与以上四个区域相对,压性应力最弱的区域则主要位于黄骅坳陷内的板桥次凹、歧北次凹、歧南次凹、北塘次凹、歧口主凹、沧东凹陷以及埕北断阶带的北段.

除上述强、弱带以外坳陷内其它区域压性应力值变化不明显,都为中值区.由此可见,在该种边界条件下压性应力的低值区能够形成一系列有利于油气聚集的应力圈闭带,将黄骅坳陷内的一些主要凹陷圈闭其中.通过对比已知油藏的分布特征可以看到,这些由构造应力所圈闭的凹陷都具有较好的油气显示.这说明该种模式的应力状态应可能与现今黄骅坳陷内真实应力分布特征较为吻合.

当黄骅坳陷在斜向拉张作用下时(图 6b),根据第三主应力绝对值的大小可将其划分出强、中、弱三个区域.其中,压性应力的高值区主要位于滨海断层以西的坳陷中部以及坳陷的最南端.与之相对,低值区位于沧东凹陷及其东部地区、歧口主凹内以及埕宁断阶带的东段.除上述区域之外,坳陷内其它区域均为应力中值区.对比已知油藏的分布特征可知,该种应力环境与坳陷真实情况存在较大差异.

当黄骅坳陷在北西向拉张作用下时(图 6c),可以看到 Nm 界面上无论张性应力还是压性应力都广泛发育.因此在坳陷内各构造带内应力区分不明显,无法判断其油气聚集的可能方位.

4.3 黄骅坳陷应力强度及主应力方向的分布特征

在黄骅坳陷内第一主应力和第三主应力的分布特征及所代表的意义各不相同.为了能够描述出两种应力环境的叠加对坳陷的影响,本文采用应力强度来刻画三个主应力的综合作用特征^[43],其应力强度高值区可以说明坳陷中这些区域容易失稳形成断裂,应力强度低值区为相对稳定区域.

图 7 为 Nm 构造界面上三种边界模型的应力强度分布特征.当黄骅坳陷受到右旋剪切作用时(图 7a),应力强度高值区和低值区的分布位置及范围与第三主应力分布特征十分相似,这说明在该种边界条件下压性应力控制了坳陷内断层的产生方位,而对于这些断层的走向可通过主应力方向来判断.从图中可以看到,黄骅坳陷主应力方向自北向南能够

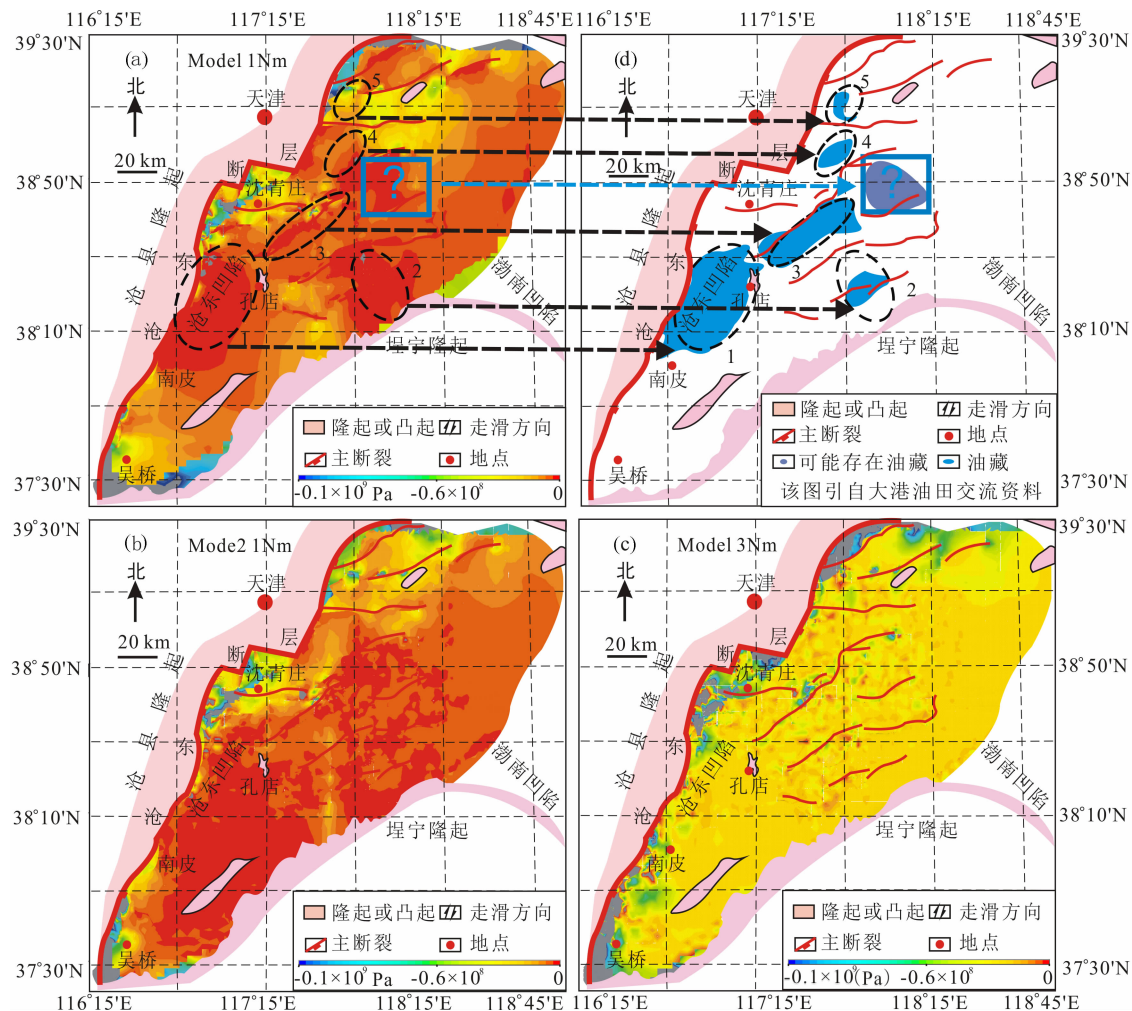


图6 第三主应力分布特征与已知油藏的对比

Fig. 6 The third principal stress distribution of three models compared with the distribution of oil reservoirs in the Huanghua Depression

In the model1, eclipse regions (1,2,3,4,5) with black dash lines show certain correlation with the position of five oil reservoirs in the Huanghua Depression, respectively. Blue rectangle district(?) corresponds to the major QiKou Sag which may be a potential oil reservoir.

发生偏转,根据这种变化可将拗陷划分为四段。

第一段位于黄骅拗陷最北端,介于茶淀断层和大神堂断层之间。在该段第一主应力方向为NW向、第三主应力方向为NE向,根据安德森断裂形成模式可知在该种应力环境下能够形成NNE向或NEE向的走滑断层。

第二段介于大神堂断层和海河—新港断层之间,其第一主应力方向为SN向、第三主应力为EW向,能够形成NNE向或NNW向的走滑断层。

第三段介于海河—新港断层和滨海断层南端点之间,其第一主应力方向为NNW向、第三主应力方向为NEE向,由此能够形成近NE向或近EW向的走滑断层。

第四段为滨海断层以南的部分区域,可以看到在该区主应力方向明显发生了偏转,其中第一主应

力方向由三段的NNW向偏转为NE向,而第三主应力方向则由三段的NEE向偏转为NW向,由此能够形成近NNW向或近NNW向的走滑断层。

通过对比黄骅拗陷明化镇组断裂构造分布能够发现,除第一段以外其它三段模拟出的断层走向与已知断层都具有较好的对应关系,由此可见,模拟结果总体上能够较好地反映出拗陷内现今的应力状态,而对于第一段出现的偏差可能是因为受边界效应影响的结果。

当黄骅拗陷受南北向斜向拉伸作用时,应力强度高值区和低值区的分布位置及范围与第三和第一主应力分布特征都有相似之处,由此可认为区域断层的形成是两者共同作用的结果。而从主应力方向的角度来看,可将拗陷划分为三个区域(如图7b,黑色虚线所隔开的三个区域)。

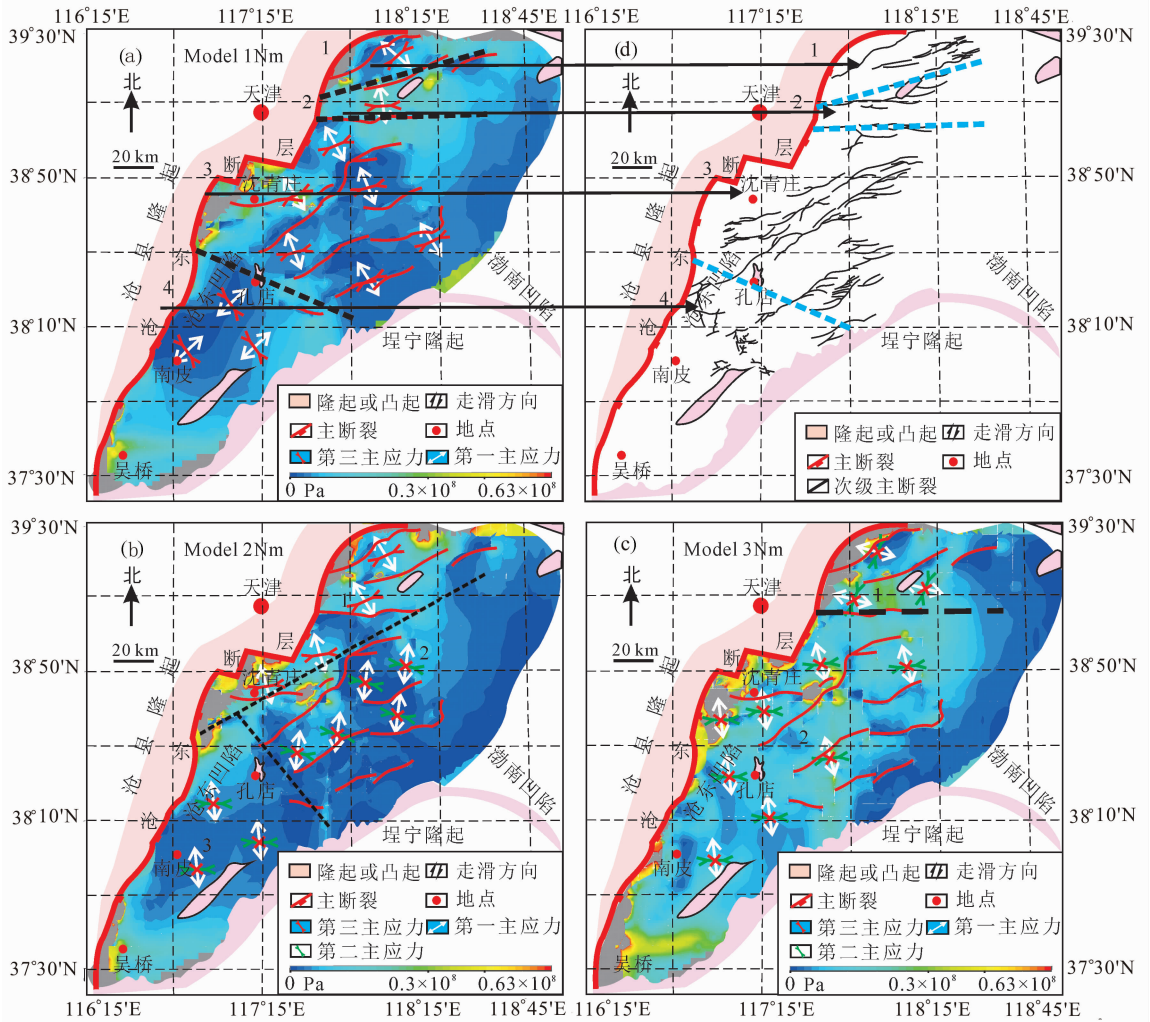


图7 应力强度及主应力方向与明化镇组平面断裂分布特征的对比

Fig. 7 Stress intensity distribution and the directions of principal stress of three models compared with fault distribution in the Minghuazhen Formation

第一区域介于沧东断层和滨海断层之间,其第一主应力方向为NNW向、第三主应力方向为NEE向,由此能够形成近NE向或近EW向的走滑断层。虽然这一模拟结果能与板桥次凹及其周缘断层走向相对比,但是与北塘次凹内的断层相比还是存在一定差异。

第二区域介于滨海断层和南大港断层之间,其第一主应力方向为NE向、第二主应力方向为NW向、第三主应力方向垂直向下,由此能够形成NW向的正断层,这一结果与区域断层走向存在了较大的差异。

第三个区域位于沧东凹陷以东(包括沧东凹陷),其第一主应力方向为SN向、第二主应力方向为EW向、第三主应力方向为垂直向下,由此只能形成EW向的正断层,这同样与拗陷内的实际断层

走向相区别。

当黄骅拗陷受到北西向拉张作用时(图7c),应力强度分布特征与第一主应力分布特征相一致,说明区内断层的形成主要受拉张作用的影响。而根据主应力方向,以海河—新港断层为界可将拗陷划分为南北两个部分。北部第一主应力方向为NNW向、第二主应力方向为NEE向、第三主应力方向为垂直向下,由此能够形成NEE向正断层,这与区域断层走向存在差异。南部第一主应力方向为NNW向、第二主应力方向为NEE向、第三主应力方向垂直向下,由此能够形成NEE向正断层,这同样与区域断层走向存在差异。

由以上分析可见,在右旋剪切作用下模型中形成的断层走向可能更接近于黄骅拗陷的现今状态,因此第一种边界条件可能较为合理。

5 讨论与结论

关于区域性构造现象的数值模拟分析,前人已做了大量的工作,这包括了对构造变形的数值模拟研究、构造应力场分布特征的数值模拟研究以及地震发生机制的数值模拟研究等^[38-39,43,48-49].这些工作都不约而同的强调了在特定的边界条件下断裂的空间形态、空间组合样式以及地层横向不均匀性对研究区构造应力场的影响.本文模拟结果表明,模型在右旋剪切作用下,无论是压性应力与已知油藏分布特征的对比,还是模拟出的断层走向都与黄骅拗陷现今真实情况具有较好的对应关系,而控制这种应力分布特征的主要因素除边界条件以外,同样与各套地层间地形起伏变化、主要断层的空间形态及组合样式密切相关(图 8).

首先,讨论拗陷内层序底面起伏的变化.从图 6 中可以看到压性应力的低值区主要分布于黄骅拗陷中以断层为边界的地形较低处,如北塘次凹、歧北主凹、板桥次凹等.虽然模拟结果显示这种应力分布特征受控于拗陷内断层的产状,但通过前期大量模拟试验发现模型中仅考虑断层的产状并不能将压性应力低值区准确的定位于几个凹陷处,必须加入地形因素的影响.而且从图 2 中也可以看到黄骅拗陷各主要层序底面起伏非常剧烈,考虑到各套地层及拗陷基底材料性质上的不同,必然会造成拗陷内横向上的不均匀性,因此不同区域构造应力场的分布特征必然不同.

其次,讨论沧东断层形态上的改变.沧东断层中段(青县至板桥)整体为向西凸出的弧形(图 1),因此,造成沧县隆起(基底性质)与黄骅拗陷内沉积地层间形成一个大的齿形接触带.该带影响了区域应

力场的分布特征,这在图 5、6、7 上均有显示,而造成这种影响的原因可从断层上下盘材料性质上的差异得以分析.即,当具有基底性质(吸收应变的能力较弱)的沧县隆起沿沧东断层滑移时,起阻挡作用的拗陷齿形区相对柔软的沉积地层能够吸收较多的应变,致使其应力强度明显提高,并形成了 NEE 向较强烈的挤压和 NNW 较强烈的拉张.而与之相连的拗陷南部(沧东凹陷)和北部(板桥次凹)在此过程中也必然会受到影响,但影响方式却明显不同.北部的板桥次凹由于受到齿形区的推挤作用而表现为 NEE 向的挤压和 NNW 的拉张,但强度与中部相比明显偏弱.与此相对照,南部的沧东凹陷由于受到向齿形区 NEE 向收缩的影响而表现为 NE 向的拉张和 NW 向的挤压.由此可见,正是由于沧东断层空间形态的改变导致了区域间应力场的变化.

然后,拗陷内断层的空间组合样式,这里主要强调两组控制了黄骅拗陷总体应力分布特征的断裂组合.第一组为沧东断层和滨海断层的空间组合,通过对上一因素的论述可知,沧东断层空间形态上的变化导致了其周边区域应力强度值的提高,但这一影响扩张至滨海断层下盘时却嘎然而止,由此造成了断层上下盘张性应力、压性应力以及应力强度上的差异,这为油气资源的聚集提供了良好的构造应力环境,而造成这种应力差异的原因是与 NE 向的沧东断层和滨海断层密切相关的.当黄骅拗陷齿形区域受到沧县隆起推挤作用时,该区域应具有一个 NE 向的位移并带动周缘地层一起运动.但当遇到 NE 向的滨海断层时,由于断层的滑移导致位移无法有效的传递(部分应力被断层的滑移所释放),因此造成滨海断层上下盘应力-应变上的差异.由此可见,沧东断层控制了黄骅拗陷中南部区域应力场的分布,而滨海断层则对这种分布特征起到了限定性

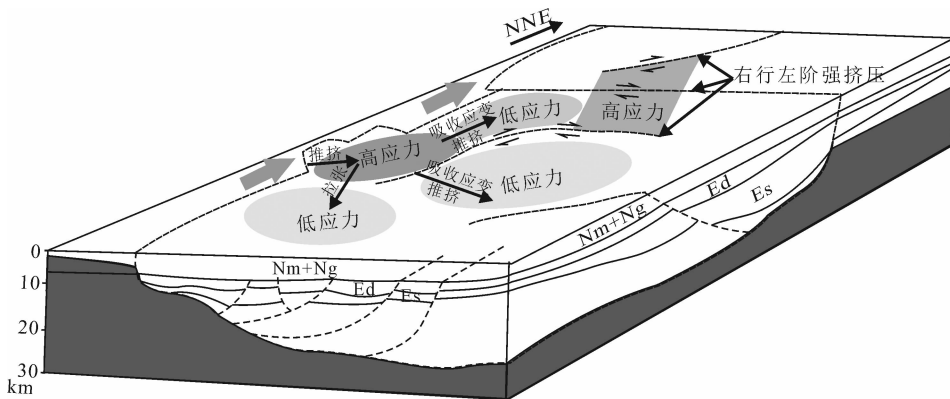


图 8 黄骅拗陷现今构造动力学模式

Fig. 8 Present-day structural model of the Huanghua Depression

作用. 第二组为大神堂断层和海河—新港断层的空间组合. 这两条断层的产状基本类似, 都为近 EW 向 S 倾的正断层, 平面特征表现为左阶雁列式分布. 通过位移矢量的分解可知, NE 向的边界位移可在该区域分解为正 N 向和正 E 向的位移, 其中正 N 向位移可能导致两条断层间的区域性的拉张, 而正 E 向的位移则能够使两条断裂发生右行走滑, 从而形成右行左阶的区域性 EW 向挤压, 当然这种相对较强烈挤压也可能与基底滑脱面在该区域消失有关.

最后, 沧东断层向下延伸的滑脱面对坳陷的影响. 通过北塘次凹与中、南部凹陷应力强度的对比能

够看到, 不含滑脱面的北塘次凹的应力强度平均值明显要大于含滑脱面的中、南部凹陷, 这说明除断层组合样式外滑脱面存在与否同样影响了区域应力场的分布. 而从滑脱面的应力分布特征来看(如图 9 所示), 第三主应力绝对值的低值区主要位于断面北西向的隆起带上, 并将断面分割为南北两部分, 其中南部压性应力较强, 北部较弱, 而北部低值区的上部恰好对应于黄骅坳陷现今的沉积、沉降中心. 应力强度在滑脱面上的区分并不明显(图 9b), 只是在个别区域出现应力强度值的异常. 这种异常可能与滑脱面和上部断层间的相互作用有关, 而对于两者间是

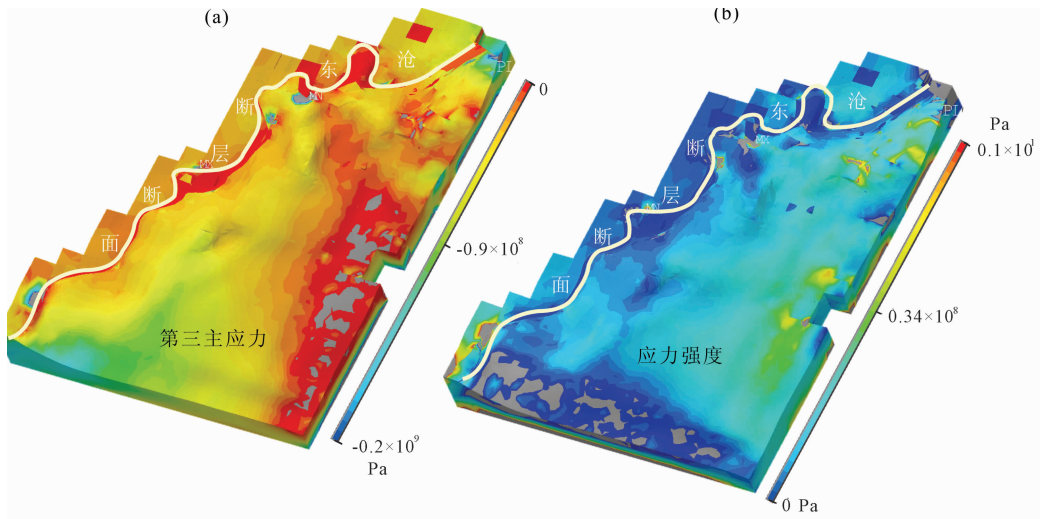


图 9 黄骅坳陷滑脱面上的应力分布特征

Fig. 9 The stress distribution of detachment surface in the Huanghua Depression

如何相互影响的, 未来还须做进一步的工作.

由以上分析可知, 地形的变化、沧东断层几何形态的变化、断层组合样式的变化以及滑脱面深度的变化, 这四个变化因素共同作用控制了黄骅坳陷内现今的构造样式, 从而导致了区域应力场的分段性分布特征, 而该种特征对油气的聚集起到了重要的控制性作用. 那么在黄骅坳陷现今油气开采状况下哪些区域又可视为油气藏的潜力区呢? 从本文模拟结果的角度来看, 可能有两个潜力区:

第一个潜力区域主要位于歧口主凹内. 由于歧口主凹的压性应力明显小于周边四个次凹(图 6a), 由此就有可能造成四个次凹内的部分油气在相对较高的压性应力作用下沿滨海断层和歧东、歧中断层发生运移, 从而聚集在歧口主凹中, 形成有利的油气圈闭区.

第二个潜力区域位于埕北断阶带. 虽然在该断阶带内已发现大量的油气藏, 但对比模拟结果(图

6a) 可以发现已知油气藏的分布范围明显小于压性应力低值区的分布范围, 因此可以预测在埕北断阶带内依然具有油气资源的开采价值.

当然, 上述模拟结果中还存在以下两个问题:

第一, 在坳陷南部虽然模拟出的应力场方向与已知断层方向相吻合, 但应力强度却明显偏弱, 并不能促成该方向断层的产生, 而这种偏差形成可能与沧东断层自北向南逐渐生长的演化过程有关, 因此在未来的工作中考虑新生代坳陷的构造演化过程是非常重要的, 而这种演化过程应包括地形的变化以及断层空间形态的变化.

第二, 在模拟过程中没有考虑重力对坳陷的影响, 而重力的影响无时无刻不参与坳陷的构造演化进程, 因此如何模拟出重力对坳陷的影响也是十分必要的.

致谢 中石油大港油田石油勘探开发研究院为本研究提供了可靠的地震数据, 在此表示衷心感谢. 同时感谢两位审稿专家为本文的最终完成提供了宝贵

的修改建议.

参考文献(References)

- [1] 任建业, 廖前进, 卢刚臣等. 黄骅坳陷构造变形格局与演化过程分析. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 461-472.
Ren J Y, Liao Q J, Lu G C, et al. Deformation framework and evolution of the Huanghua Depression, Bohai Gulf. *Geotectonica Et Metallogenia* (in Chinese), 2010, 34(4): 461-472.
- [2] 李三忠, 许淑梅, 单业华等. 渤海湾及邻区构造演化与盆地组合规律. 海洋学报, 2000, 22(增刊): 220-229.
Li S Z, Xu S M, Shan Y H, et al. Tectonic evolution and basin assemblage in the Bohai Bay and its neighbors. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2000, 22(Supplement): 220-229.
- [3] 漆家福, 陆克政, 张一伟等. 渤海湾盆地新生代构造与油气的关系. 石油大学学报(自然科学版), 1995, 19(S1): 7-13.
Qi J F, Lu K Z, Zhang Y W, et al. Relationship between tectonics and hydrocarbon in Bohai Bay Basin province. *Journal of the University of Petroleum, China*. (in Chinese), 1995, 19(S1): 7-13.
- [4] 王光奇, 漆家福, 岳云福. 歧口凹陷及周缘新生代构造的成因和演化. 地质科学, 2003, 38(2): 230-240.
Wang G Q, Qi J F, Yue Y F. Formation and evolution of the Cenozoic tectonics within and surrounding the Qikou Sag. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), 2003, 38(2): 45-50.
- [5] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 2010, 17(4): 64-89.
Li S Z, Suo Y H, Dai L M, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2010, 17(4): 64-89.
- [6] 李三忠, 周立宏, 刘建忠等. 华北板块东部新生代断裂构造特征与盆地成因. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(3): 57-66.
Li S Z, Zhou L H, Liu J Z, et al. Cenozoic faulting and basin formation in the eastern North China Plate. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 2004, 24(3): 57-66.
- [7] 李三忠, 刘建忠, 赵国春等. 华北克拉通东部地块中生代变形的关键时限及其对构造的制约——以胶辽地区为例. 岩石学报, 2004, 20(3): 633-646.
Li S Z, Liu J Z, Zhao G C, et al. Key geochronology of Mesozoic deformation in the eastern block of the North China Craton and its constraints on regional tectonics: a case of Jiaodong and Liaodong Peninsula. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 2004, 20(3): 633-646.
- [8] 漆家福, 杨池银. 黄骅盆地南部前第三系基底中的逆冲构造. 地球科学, 2003, 28(1): 54-60.
Qi J F, Yang C Y. Thrust structure developed in Pre-tertiary basement in south area of Huanghua Basin. *Earth Science-journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2003, 28(1): 54-60.
- [9] 郝天珧, 徐亚, 周立宏等. 前新生代残留盆地宏观分布的综合地球物理研究——以大港地区为例. 地球物理学报, 2008, 51(2): 491-502.
Hao T Y, Xu Y, Zhou L H, et al. Integrated geophysical research on macroscopic distribution of Pre-Cenozoic residual basins——A case in Dagang area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 491-502.
- [10] 周立宏, 李三忠, 赵国春等. 华北克拉通中东部基底构造单元的重磁特征. 地球物理学进展, 2004, 19(1): 91-100.
Zhou L H, Li S Z, Zhao G C, et al. Gravity and magnetic features of crystalline basement in the central and Eastern North China Craton. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(1): 91-100.
- [11] 李志伟, 胥颐, 郝天珧等. 环渤海地区的地震层析成像与壳上地幔结构. 地球物理学报, 2006, 49(3): 797-804.
Li Z W, Xu Y, Hao T Y, et al. Seismic tomography and velocity structure in the crust and upper mantle around Bohai Sea area. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 797-804.
- [12] 徐亚, 郝天珧, 戴明刚等. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究. 地球物理学报, 2007, 50(3): 868-881.
Xu Y, Hao T Y, Dai M G, et al. Integrated geophysics research on distribution of residual basins of Bohai Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 868-881.
- [13] 郝天珧, 杨长春, 刘洪等. 环渤海地区前新生代油气资源的综合地质、地球物理研究. 地球物理学进展, 2007, 22(4): 1269-1279.
Hao T Y, Yang C C, Liu H, et al. Integrated geological and geophysical study for pre-cenozoic hydrocarbon resources in the circum-Bohai area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(4): 1269-1279.
- [14] 黄忠贤, 胥颐, 郝天珧等. 中国东部海域岩石圈结构面波层析成像. 地球物理学报, 2009, 52(3): 653-662.
Huang Z X, Xu Y, Hao T Y, et al. Surface wave tomography of lithospheric structure in the seas of east China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(3): 653-662.
- [15] 祁鹏, 任建业, 卢刚臣等. 渤海湾盆地黄骅坳陷中北区新生代幕式沉降过程. 地球科学-中国地质大学学报, 2010, 35(6): 1041-1052.
Qi P, Ren J Y, Lu G C, et al. Cenozoic episodic subsidence in the middle and north part of Huanghua Depression, Bohai Bay Basin. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)* (in Chinese), 2010, 35(6): 1041-1052.
- [16] 周建生, 杨长春. 渤海湾地区前第三系构造样式分布特征研究. 地球物理学进展, 2007, 22(5): 1416-1426.
Zhou J S, Yang C C. A study of pre-tertiary structural characteristics and evolution in the Bohai bay region. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(5): 1416-1426.
- [17] 李明刚, 漆家福, 杨桥等. 渤海湾盆地黄骅坳陷新生代结构特征及构造动力学模式. 地球科学, 2009, 30(2): 201-209.
Li M G, Qi J F, Yang Q, et al. Cenozoic structure features of Huanghua depression and its structure dynamics model.

- Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2009, 30(2): 201-209.
- [18] 周建勋. 基于平面砂箱实验对黄骅盆地新生代构造成因的新解释. 大地构造与成矿学, 1999, 23(3): 1-7.
Zhou J X. New interpretation on the mechanism of Cenozoic structure in the Huanghua basin, North China: insights from plane sandbox experiments. *Geotectonica Et Metallogenia* (in Chinese), 1999, 23(3): 1-7.
- [19] 孟庆任, 王战, 王翔等. 新生代黄骅坳陷构造伸展、沉积作用和岩浆活动. 地质论评, 1993, 39(6): 535-547.
Meng Q R, Wang Z, Wang X, et al. Tectonic extension, sedimentation and magmatism of the Cenozoic Huanghua Depression. *Geological Review* (in Chinese), 1993, 39(6): 535-547.
- [20] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造. 地质学报, 1983, (1): 22-32.
Ma X Y, Liu H F, Wang W X, et al. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in Eastern China. *Acta Geological Sinica* (in Chinese), 1983, (1): 22-32.
- [21] Jarosinski M, Beekman F, Matenco L, et al. Mechanics of basin inversion: Finite element modeling of the Pannonian Basin System. *Tectonophysics*, 2009, 502(1-2): 121-145.
- [22] 许忠淮, 吴少武. 南海和东海地区现代构造应力场特征的研究. 地球物理学报, 1997, 40(6): 773-781.
Xu Z H, Wu S W. A study on present-day tectonic stress in the southern Yellow Sea and East China sea region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, 40(6): 773-781.
- [23] 李乃胜. 冲绳海槽横断裂初探. 海洋学报, 1990, 12(4): 445-462.
Li N S. Primary study on transverse faults of the Okinawa Through. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1990, 12(4): 455-462.
- [24] 谭成轩, 王连捷, 孙宝珊等. 含油气盆地三维构造应力场数值模拟方法. 地质力学学报, 1997, 3(1): 71-80.
Tan C X, Wang L J, Sun B S, et al. An approach to numerical simulation of 3-D tectonic stress field of the oil-gas-bearing basin. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 1997, 3(1): 71-80.
- [25] 王红才, 王薇, 王连捷等. 油田三维构造应力场数值模拟与油气运移. 地球学报, 2002, 23(2): 175-178.
Wang H C, Wang W, Wang L G, et al. Three dimensional tectonic stress field and migration of oil and gas in Tanhai. *Acta Geoscientica Sinica* (in Chinese), 2002, 23(2): 175-178.
- [26] 王延欣, 侯贵廷, 刘世良等. 准噶尔盆地古生代末大地构造动力学数值模拟. 地球物理学报, 2011, 54(2): 441-448.
Wang Y X, Hou G T, Liu S L, et al. Numerical simulation of tectonic dynamics of the Junggar basin at the end of Paleozoic. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(2): 441-448.
- [27] 胡才志, 曾佐勋, 任建业等. 黄骅坳陷新生代沉降中心迁移: 数值模拟证据. 大地构造与成矿学, 2010, 34(4): 573-584.
Hu C Z, Zeng Z X, Ren J Y, et al. Subsidence center migration of the Huanghua depression in Cenozoic: Evidence of numerical modeling. *Geotectonica Et Metallogenia* (in Chinese), 2010, 34(4): 573-584.
- [28] 马寅生, 曾庆利, 张兴. 黄骅坳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. 地质力学学报, 2002, 8(3): 219-228.
Ma Y S, Zeng Q L, Zhang X. Photoelastic experimental modeling of evolution of Cenozoic tectonic stress field and analysis of petroleum geological condition in Huanghua Depression. *Journal of Geomechanics* (in Chinese), 2002, 8(3): 219-228.
- [29] 安欧. 构造应力场. 北京: 地震出版社, 2008.
An O. Tectonic Stress Field (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2008.
- [30] 漆家福, 王德仁, 陈书平等. 兰聊断层的几何学、运动学特征对东濮凹陷构造样式的影响. 石油天然气地质, 2006, 27(4): 451-459.
Qi J F, Wang D R, Chen S P, et al. Impact of geometry and kinematics of Lanliao fault on structural styles in Dongpu sag. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 2006, 27(4): 451-459.
- [31] 齐诚, 赵大鹏, 陈勇等. 首都圈地区地壳 P 波和 S 波三维速度结构及其与大地震的关系. 地球物理学报, 2006, 49(3): 805-815.
Qi C, Zhao D P, Chen Y, et al. 3D P and S wave velocity structures and their relationship to strong earthquakes in the Chinese capital region. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(3): 805-815.
- [32] Zang S, Yang J. The depth distribution of North China intraplate earthquakes and their physical background. *Seismol. Geol.*, 1984, 6: 67-75.
- [33] 赵燕来, 孙若昧, 梅世蓉. 渤海地区地震参数的修定. 中国地震, 1993, 9(2): 129-137.
Zhao Y L, Sun R M, Mei S R. Relocation of the earthquake parameters in Bohai Sea and its adjacent arrears. *Earthquake Research in China* (in Chinese), 1993, 9(2): 129-137.
- [34] 周立宏, 李三忠, 刘建忠等. 渤海湾盆地前第三系构造演化与潜山成藏模式. 北京: 中国科学技术出版社, 2003.
Zhou L H, Li S Z, Liu J Z, et al. Pre-Tertiary Tectonic Evolution and Buried-Hill Reservoir-Forming Model in Bohai Bay Basin (in Chinese). Beijing: China Science and Technology Press, 2003.
- [35] 蒲秀刚, 周立宏, 周建生等. 歧口凹陷沙一上亚段——东营组沉积体系. 成都理工大学学报(自然科学版), 2009, 36(1): 45-50.
Pu X G, Zhou L H, Zhou J S, et al. Study on the sedimentary system of member 1-S of Shahejie formation and Dongying formation of the Qikou Sag in Bohaiwan basin, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)* (in Chinese), 2009, 36(1): 45-50.

- [36] Wang J, Ye Z R, He J K. Three-dimensional mechanical modeling of large-scale crustal deformation in China constrained by the GPS velocity field. *Tectonophysics*, 2008, 446: 51-56.
- [37] He J K, Chéry J. Slip rates of the Altyn Tagh, Kunlun and Karakorum faults (Tibet) from 3D mechanical modeling. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2008, 274: 50-58.
- [38] 朱守彪, 邢会林, 谢富仁等. 地震发生过程的有限单元法模拟—以苏门答腊俯冲带上的大地震为例. *地球物理学报*, 2008, 51(2): 460-468.
Zhu S B, Xing H L, Xie F R, et al. Simulation of earthquake processes by finite element method; The case of megathrust earthquakes on the Sumatra subduction zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(2): 460-468.
- [39] 戴黎明, 李三忠, 陶春辉等. 印度板块挤压驱动龙门山断裂带活动的三维数值模型. *地球物理学进展*, 2011, 26(1): 41-51.
Dai L M, Li S Z, Tao C H, et al. Three-dimensional numerical modeling of activity of the Longmenshan fault zone driven by the India Plate. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2011, 26(1): 41-51.
- [40] Kong X H, Bird P. Neotectonics of Asia: thin-shell, finite element models with faults // Yin A, Harrison T M eds. *The Tectonics of Asia*. New York: Cambridge University Press, 1996.
- [41] Wang J, Ye Z R. Dynamic modeling for crustal deformation in China; comparisons between the theoretical prediction and the recent GPS data. *Phys Earth Planet Int.*, 2006, 155: 201-207.
- [42] 郑勇, 傅容珊, 熊熊. 中国大陆及周边地区现代岩石圈演化动力学模拟. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 415-427.
Zheng Y, Fu R S, Xiong X. Dynamic simulation of lithospheric evolution from the modern China mainland and its surrounding areas. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2006, 49(2): 415-427.
- [43] 戴黎明, 李三忠, 陶春辉等. 俯冲带耦合作用对苏门答腊地区应变场影响的三维数值模拟. *地球物理学报*, 2010, 53(8): 1837-1851.
Dai L M, Li S Z, Tao C H, et al. 3D numerical modeling of strain field in Sumatra area influenced by the coupling effect of subduction zone. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(8): 1837-1851.
- [44] 于正军, 董冬冬, 余红等. 浊积岩分序级描述技术及其在东营凹陷油气勘探中的应用. *地球物理学进展*, 2012, 27(3): 1086-1093, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.032
Yu Z J, Dong D D, Yu H, et al. The technology of turbidite different-level sequence description and its application to the oil exploration in the Dongying Sag. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2012, 27(3): 1086-1093, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.03.032
- [45] 刘立彬, 李振春. 叠前时间偏移技术在东营凹陷北部陡坡带砂砾岩体成像中的应用. *地球物理学进展*, 2007, 22(5): 1571-1577.
Liu L B, Li Z C. The application of prestack time migration techniques in sandy conglomeratic imaging of abrupt slope in north of Dongying Sag. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(5): 1571-1577, doi:
- [46] 贾红义, 杨长春, 于建国等. 济阳拗陷东营凹陷早始新世构造体制转换与油气成藏. *地球物理学进展*, 2007, 22(4): 1312-1319.
Jia H Y, Yang C C, Yu J G, et al. Structural transition and hydrocarbon accumulation during early eocene in Dongying sag of the Jiyang depression. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2007, 22(4): 1312-1319.
- [47] 陈洁. 济阳孔店构造转型期沉积盆地的特征及勘探意义. *地球物理学进展*, 2004, 19(2): 392-398, doi:
Chen J. Characteristics and prospecting meaning of sedimentary basin in structural transitional stages in Kongdian formation of Jiyang depression. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, 19(2): 392-398, doi:
- [48] 于正军, 董冬冬, 宋维琪, 高艳珂, 吴时国. 相带控制下协克里金方法孔隙度预测. *地球物理学进展*, 2012, (4): 1581-1587, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.04.035 .
Yu Z J, Dong D D, Song W Q, et al. Porosity prediction with co-Kriging method controlled by sedimentary facies. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2012, (4): 1581-1587, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.04.035 45.
- [49] 朱守彪, 张培震, 石耀霖. 华北盆地强震孕育的动力学机制研究. *地球物理学报*, 2010, 53(6): 1409-1417.
Zhu S B, Zhang P Z, Shi Y L. A study on the mechanisms of strong earthquake occurrence in the North China Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6): 1409-1417.
- [50] Zhu S B, Zhang P Z. Numeric Modeling of the Strain Accumulation and Release of the 2008 Wenchuan, Sichuan, China, *Earthquake. B. S. S. A.*, 100(5B): 2825-2839.

(本文编辑 刘少华)