文章编号：1006-6616（2015）01-0038-09

廊固凹陷沙四晚期构造应力场模拟及低级序断层预测

张丹丹，戴俊生，付晓龙
（中国石油大学（华东）地球科学与技术学院，山东 青岛 266580）

摘　要：在了解区域构造背景、分析断层活动特征及构造演化特征的基础上，对廊固凹陷沙四晚期构造应力场进行数值模拟，并对低级序断层发育进行预测。研究结果表明，研究区在沙四晚期活动的主要断层包括大兴断层、半截河断层等 6 条，牛北斜坡构造带与河西务构造带在该时期隆起明显，综合分析可知该时期最小主应力方向为 SE144°—NW324°；低级序断层发育受最小主应力、剪应力等的影响，最小主应力和最大主应力与最小主应力的差值控制断层的优势发育区，平面剪应力控制断层走向，该区主要发育北北东—北东走向的断层；剖面剪应力在大部分区域为左旋，表明断层视倾向以北西向为主。

关键词：廊固凹陷；沙四晚期；构造应力场；数值模拟；低级序断层
中图分类号：P553　　**文献标识码：**A

古构造应力场指某一地质历史时期的构造应力场，它是含油气盆地中现存一切岩体构造变形（包括断裂、褶皱、裂缝、片理等）的直接导致因素，也是地下油气运移的重要动力[1]。构造应力场分析是阐明和解释各种地质构造产生、分布和演化规律的重要途径[2]，对于深入研究大地构造背景、区域构造作用与局部构造的关系，研究裂缝发育、油气运移规律以及力学成因机制等都具有重要意义[3]。前人对于廊固凹陷构造特征、沉积特征、油气分布等方面研究较多，但对于凹陷全区构造应力场研究缺乏。本文以廊固凹陷古近纪沙四晚期构造应力场模拟为例，对凹陷全区进行数值模拟并对低级序断层发育进行预测。

1　区域构造背景

构造应力场的正确计算和分析必须建立在研究区大地构造背景分析、区域构造单元划分和对主要构造格局正确认识的基础之上[4~5]，因此在对研究区进行构造应力场数值模拟之前，需要了解其区域构造背景。

廊固凹陷是渤海湾盆地冀中坳陷西北部的一个次级构造单元，是一个古近纪箕状断陷湖盆[6]。渤海湾盆地以断裂构造为主，正断层是主要的断裂构造[7]，该盆地内的主干伸展断

收稿日期：2014-09-12
基金项目：国家科技重大专项课题“精细油藏描述技术及剩余油赋存方式研究”（2011ZX05011-001）；中国石油华北油田分公司科技项目“冀中富油凹陷二次勘探潜力与方向研究”（HBYT-WTY-2011-JS-303）
作者简介：张丹丹（1989-），女，山东临沂人，硕士研究生，研究方向构造地质学，E-mail：dd1126. happy@163. com

层走向为北北东—北东向，表明盆地总体伸展方向为北西西—北西和南东东—南东向[8]；而冀中坳陷位于渤海湾盆地的西北部，其构造格架是新生代的伸展构造系统，在古近纪伸展作用过程持续发育[9]（见图 1）。据此可知，伸展构造对廊固凹陷的形成与演化起主导控制作用。

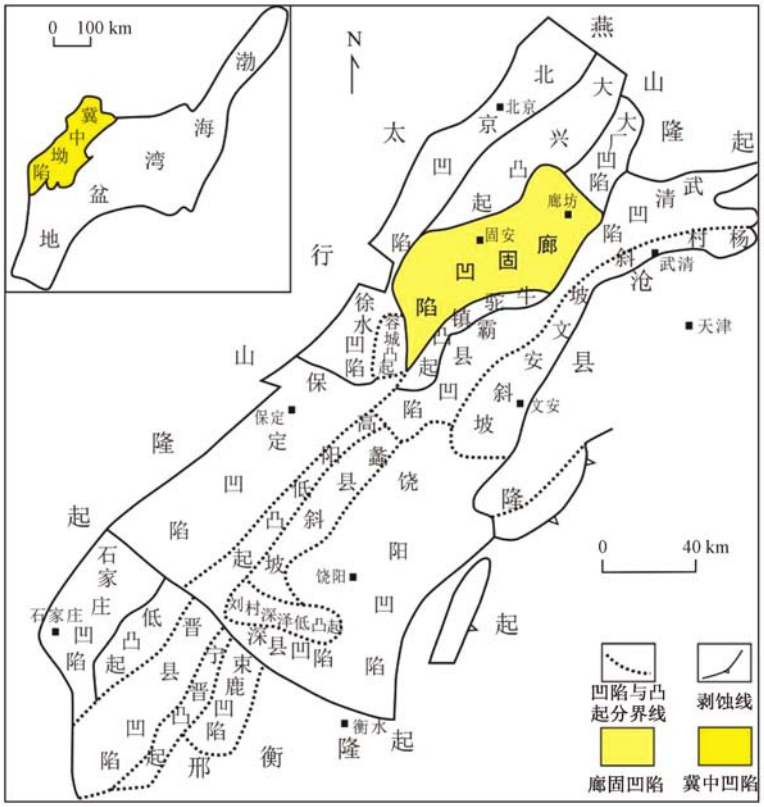


图 1　廊固凹陷区域构造位置[10~11]

Fig. 1　Structural location of Langgu Sag

2　沙四晚期应力场数值模拟

根据前人研究总结出模拟步骤为建立模型、模拟计算和计算结果分析，其中建立正确的地质模型与力学模型是进行应力场数值模拟的关键所在[3,12]。

2.1　地质模型建立

断裂构造是廊固凹陷最重要的构造类型，该区断裂系统复杂，发育多条断层，可分为 4 个级别[13]，其中三级以上生长断层活动时期长、延伸距离远，对应力场分布影响显著，因此在建立地质模型时需要将三级以上生长断层的影响考虑在内。此外，廊固凹陷可分为大柳泉鼻状构造带、河西务构造带、韩村洼槽、桐南洼槽、牛北斜坡构造带与凤河营—侯尚村构造带等二级构造单元[14]（见图 2），各构造带活动对该时期应力场具有非常重要的影响，因此在地质模型中需要考虑活动明显的构造带的影响。

2.1.1　断层的选择

地质模型中应该包括在该时期活动的所有三级以上断层，通过分析廊固凹陷沙四晚期断

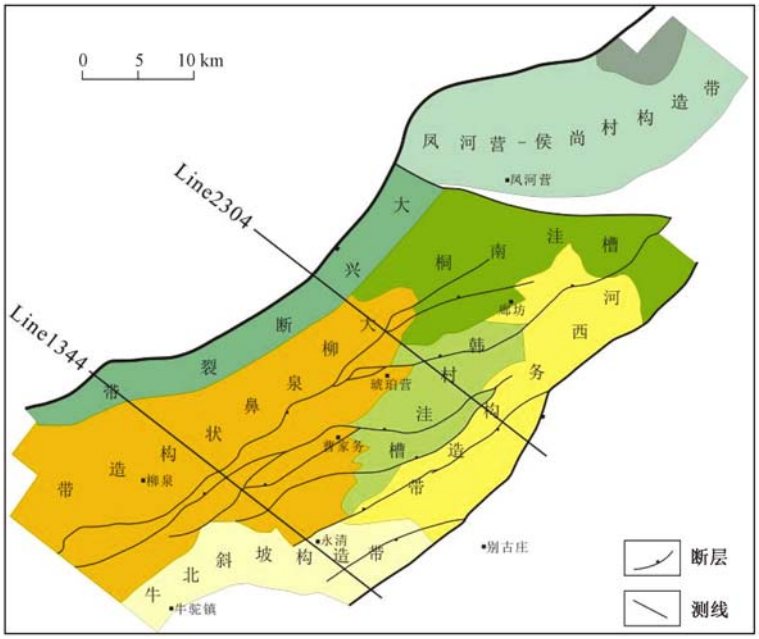


图 2 廊固凹陷构造带分布及地震测线位置（据文献［14］修改）

Fig. 2 The distribution of the structural belts and the position of seismic lines in Langgu Sag

层活动特征可知，在该时期活动的三级以上断层（见图 3）包括：大兴断层（一级断层），桐柏镇断层（二级断层）以及安 29 井断层（永清断层）、半截河断层、安 36 井断层和别古庄西断层（三级断层）。本文根据上述断层的走向、倾向、倾角、延伸长度等信息建立断层的地质模型。

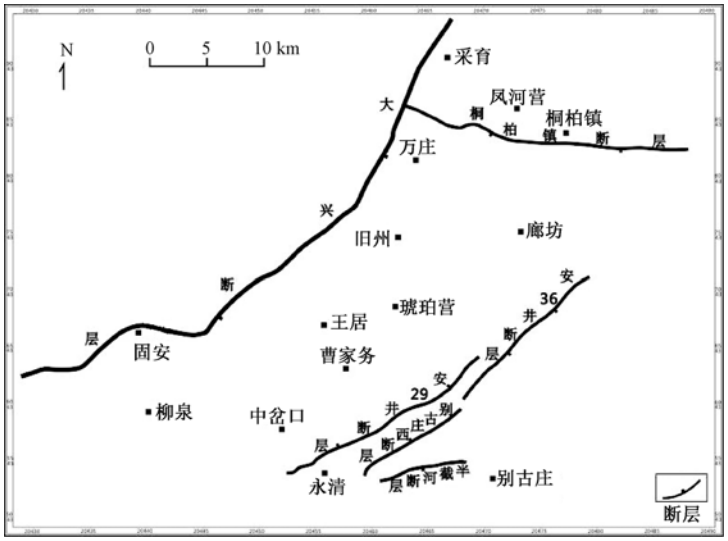


图 3 廊固凹陷沙四晚期主要断层平面分布

Fig. 3 Planar distribution of the main faults in the late sedimentary period of Es_4 in Langgu Sag

2.1.2 构造带的确定

通过构造演化剖面可分析构造的形成与演化，本次研究中采用旋转法编制构造演化剖

面。根据区域构造运动及各演化剖面分析可知，研究区东南部的牛北斜坡构造带与河西务构造带在沙四晚期隆升明显，对研究区内断层的形成具有较大影响，因此需要在模型中建立这 2 个构造带。

由上述分析可知，所建立的廊固凹陷沙四晚期地质模型应包括 6 条生长断层和 2 个构造带，忽略其他不重要的因素，地质模型如图 4 所示。

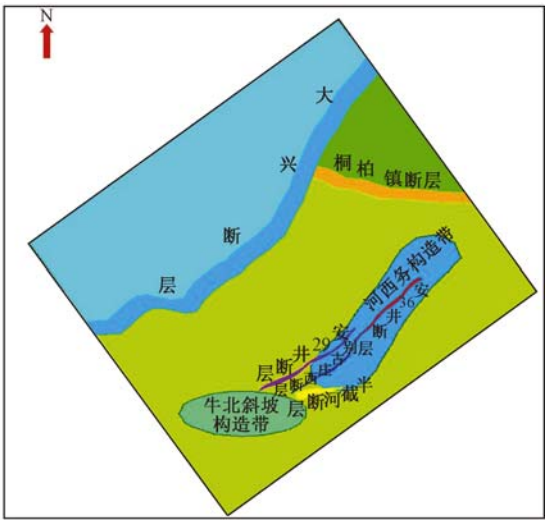


图 4　廊固凹陷沙四晚期地质模型

Fig. 4　A geological model in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

2.2　力学参数选择及单元划分

所建立的地质模型中主要地质单元包括断层与地层，且断层整体强度要小于连续地层，因此要赋予断层及地层不同的弹性模量、泊松比等力学参数。本文力学参数的选取主要参考前人实验测试结果及测井数据等，最终确定的力学参数见表 1。

表 1　廊固凹陷沙四晚期应力场模拟力学参数

Table 1　Mechanical parameters in stress field simulation in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

地质单元	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m^{-3})
地层	2.6	0.15	2350
断层	2.2	0.20	2320

运用 ANSYS 软件将地质模型中不同的地质单元赋予不同的力学参数，选取 solid 45 单元，对模型进行网格单元划分。为提高计算精度，一般划分断层的网格相对较细，最终共划分出 114959 个单元，参与运算的节点有 27753 个，其中断层单元 25287 个。

2.3　加力方式及边界条件确定

2.3.1　*确定应力场方向*

统计廊固凹陷沙四晚期断层的走向，并绘制断层走向玫瑰花图（见图 5）。由图 5 可知，该时期断层走向均为北东向，集中在 NE54°左右，且该区断层均为正断层，因此其最小主应力（张应力）方向与断层走向垂直，为 SE144°—NW324°；此外根据区域构造背景可知，该区处于伸展应力场环境中，水平方向均为张应力，因此其中间主应力方向应与最小主应力垂直，为 SW234°—NE54°，而最大主应力为垂向的重力。

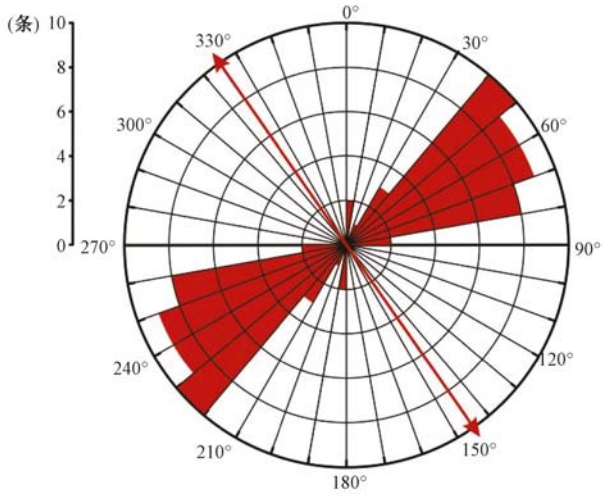


图 5 廊固凹陷沙四晚期断层走向玫瑰花图

Fig. 5 The fault strike rose diagram in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

2.3.2 *确定应力场大小及边界条件*

结合前人研究，通过反复加载试验，最终确定在模型南东边界面上施加 SE144°—NW324°向 45 MPa 张应力；在与之垂直的 2 个边界面上施加 3 MPa 张应力；此外，由于牛北斜坡构造带与河西务构造带隆起明显，分别在其底面施加 2 MPa 的上拱力，重力则由 ANSYS 程序自动生成（见图 6）。

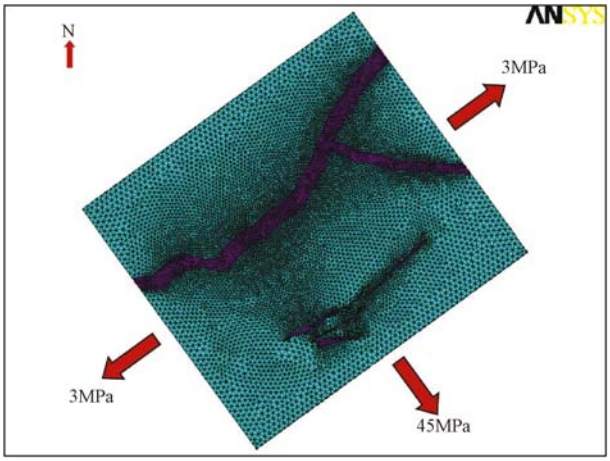


图 6 廊固凹陷沙四晚期受力示意图

Fig. 6 The schematic diagram of force in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

为满足有限元分析计算要求，需要对模型施加一定的约束条件。通过综合地质分析，多次调试后确定在模型底面（不包括构造带的底面）施加 Z 方向约束，在北西边界面上施加 X、Y 方向约束。

2.4 计算结果分析

模拟计算运用 ANSYS 软件，通过不断更改加力方式及边界条件，输出与实际资料最为相符的平面最小主应力等值线及方向矢量图、平面剪应力等值线、差应力等值线等成果图

件，并对结果进行分析。

模拟结果显示，廊固凹陷在沙四晚期最小主应力均为张应力（正值为张应力），在断层及构造带附近出现高值，而在断层内部出现低值（见图 7a）；最大主应力以压应力（负值）为主，仅在构造带周围与断层内部出现张应力（见图 7b）；平面剪应力均为负值，表明为右旋剪应力（见图 7c）。

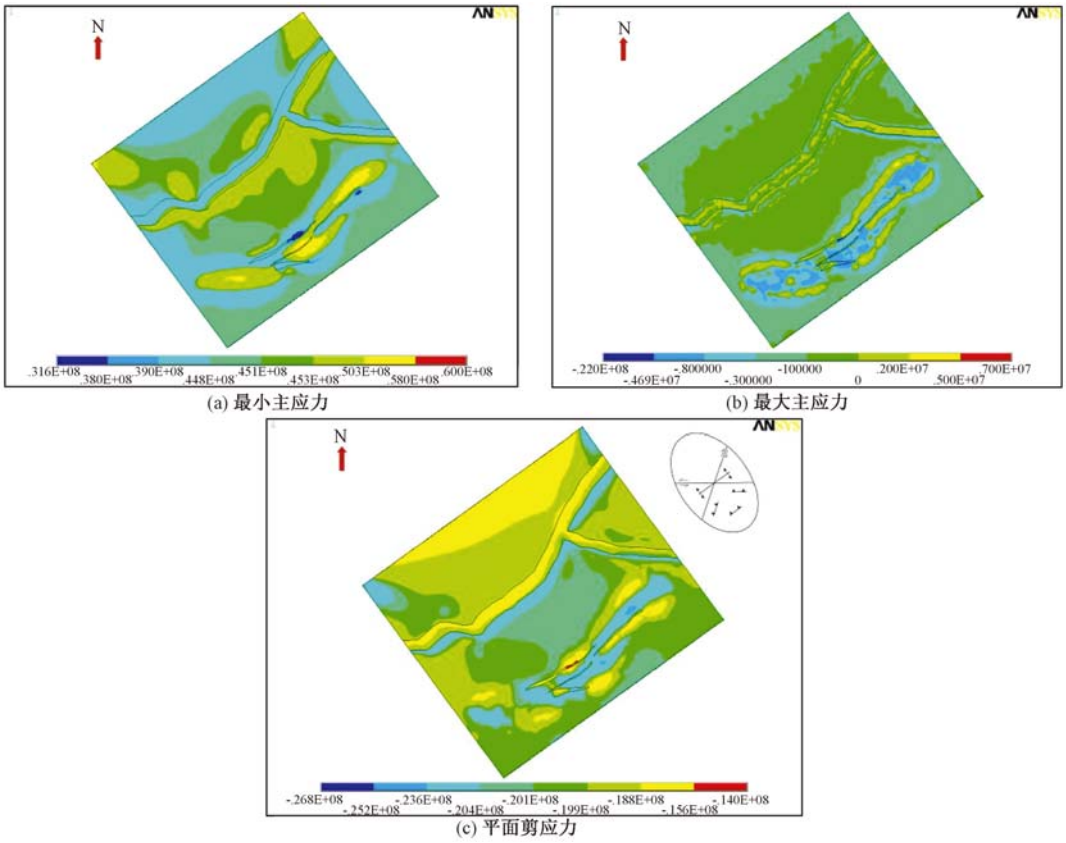


图 7　廊固凹陷沙四晚期构造应力场分布

Fig. 7　Distribution of tectonic stress in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

3　低级序断层预测

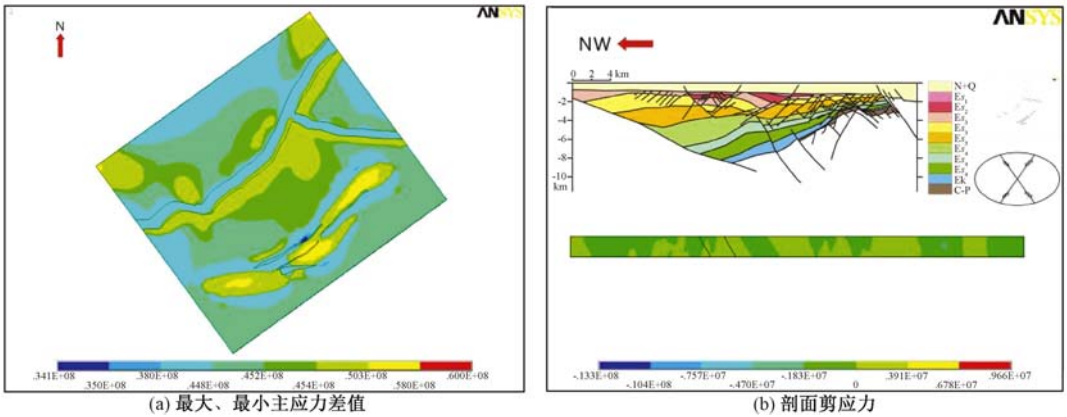
断层的产生是岩石受力发生破裂的结果。廊固凹陷沙四晚期发育的断层均为正断层，正断层形成过程中潜在破裂面上的正应力由最大主应力与最小主应力的差值造成，而该区最大主应力由上覆岩层重力引起，一般分布较稳定，因而潜在岩石破裂面上正应力的变化应该主要由最小主应力的变化引起，故此可以用最小主应力和最大最小主应力差值来解释低级序断层的优势发育地区[15~16]，用平面剪应力解释低级序断层的优势走向，用剖面剪应力解释低级序断层的优势视倾向。

3.1　断层平面分布规律预测

根据模拟结果可知，最小主应力高值区主要集中在 2 个位置，即大兴断层附近以及凹陷东南部构造带和三级断层附近（见图 7a）。高值区代表断层活动区，与实际地质资料吻合，

表明构造应力场对断层发育具有明显的控制作用，且高级别断层对低级别断层的发育具有较大的影响。

廊固凹陷沙四晚期最大主应力与最小主应力的差值高值区分布在构造带及高级别断层附近（见图 8a），与最小主应力高值区的分布基本一致。根据库仑破裂准则，差应力值越高，越容易发生破裂，越有利于断层发育，因此高值区为断层发育的优势区域，这与实际地质解释结果一致。



(a) 最大、最小主应力差值 (b) 剖面剪应力

图 8 廊固凹陷沙四晚期最大与最小主应力差值及剖面剪应力

Fig. 8 Difference between the minimum and maximum principal stresses and the profile shear stress in the late sedimentary period of Es_4 of Langgu Sag

由平面剪应力模拟结果分析可知，该时期平面剪应力均为负值（见图 7c），负值代表右旋剪应力，在右旋平面剪应力环境中具有右旋性质的一组断层发育程度高，因此可根据平面剪应力的性质解释断层的走向。根据平面应变椭圆分析，在此应力影响下，该区主要发育北北东—北东向断层。

3.2 剖面分布规律预测

通过分析剖面剪应力可预测低级序断层的视倾向。在廊固凹陷中部区域切一条南东—北西向剖面，模拟结果显示，该区剖面剪应力大部分地区为左旋（正值），右旋（负值）分布范围较小（见图 8b）。根据应变椭圆可知，左旋剪应力作用下主要发育北西倾向断层，因此该区断层视倾向以北西向为主，仅在剖面东南部地区发育南东倾向断层，这与地震剖面解释结果一致。

4 结论

廊固凹陷断裂系统复杂，发育大量断层，除三级以上主要断层外，在断层与构造带周围发育大量低级序断层。根据断层活动特点及构造演化剖面分析，可确定沙四晚期地质模型中断层及构造带分布。构造形迹分析显示，廊固凹陷沙四晚期最小主应力方向为 SE144°—NW324°。

数值模拟结果显示，廊固凹陷在沙四晚期最小主应力均为张应力，最大主应力以压应力为主，平面剪应力均为右旋剪应力。

低级序断层平面分布受控于最小主应力、最大与最小主应力差值以及平面剪应力。研究

区最小主应力、最大与最小主应力差值的高值区均分布在构造带及高级别断层附近，为断层发育的优势区域。在平面剪应力影响下，该区主要发育北北东—北东走向断层。该区剖面剪应力在大部分区域为左旋，表明断层视倾向以北西向为主，这与地震剖面解释结果一致。

参 考 文 献

[1] 孙晓庆. 古构造应力场有限元数值模拟的应用及展望［J］. 断块油气田，2008，15（3）：31～33.
SUN Xiao-qing. Present situation and prospect of application for finite element numerical simulation of palaeotectonic stress fields［J］. Fault Block Oil & Gas Field，2008，15（3）：31～33.

[2] 张胜利. 构造应力场模拟－有限元理论、方法和研究进展［J］. 西北地震学报，2010，32（4）：405～409.
ZHANG Sheng-li. Modeling of tectonic stress field - the theory，method and related research progress of the finite element method［J］. Northwestern Seismological Journal，2010，32（4）：405～409.

[3] 王延欣，侯贵廷，李江海，等. 塔北隆起中西部新近纪末构造应力场数值模拟［J］. 北京大学学报：自然科学版，2008，44（6）：902～907.
WANG Yan-xin，HOU Gui-ting，LI Jiang-hai，et al. Numercial simulation of tenconic stress field at the end of Neocene in the midwest of Tabei Uplift［J］. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2008，44（6）：902～907.

[4] Hou G T，Wang C C，Li J H，et al. Late Paleoproterozoic extension and a paleostress field reconstruction of the North China Craton［J］. Tectonophysics，2006，422：89～98.

[5] Martin A M，Cloeginch S，Vicente G D，et al. Finite-element modeling of Tertiary paleostress field in the eastern part of the Tajo Basin（central Spain）［J］. Tectonophysics，1998，300：47～62.

[6] 宋荣彩，张哨楠，李弢. 廊固凹陷大兴断层对油气分布的控制研究［J］. 天然气工业，2006，26（8）：30～33.
SONG Rong-cai，ZHANG Shao-nan，LI-Tao. Research on the hydrocarbon distribution controlled by Daxing fault in Langgu Sag［J］. Natural Gas Industry，2006，26（8）：30～33.

[7] 戴俊生，陆克政，漆家福，等. 渤海湾盆地早第三纪构造样式的演化［J］. 石油学报，1998，19（4）：16～19.
DAI Jun-sheng，LU Ke-zheng，QI-Jiafu，et al. The evolution of the Paleogene structural styles in Bohai Gulf Basin［J］. Acta Petrolei Sinica，1998，19（4）：16～19.

[8] 漆家福，张一伟，陆克政，等. 渤海湾盆地新生代构造演化［J］. 石油大学学报：自然科学版，1995，19（增）：1～6.
QI Jia-fu，ZHANG Yi-wei，LU Ke-zheng，et al. Cenozoic tectonic evolution in Bohai Bay Basin Province［J］. Journal of the University of Petroleum，China，1995，19（Suppl.）：1～6.

[9] 杨明慧，刘池阳，杨斌谊，等. 冀中坳陷古近纪的伸展构造［J］. 地质论评，2002，48（1）：58～65.
YANG Ming-hui，LIU Chi-yang，YANG Bin-yi，et al. Extensional structures of the Paleogene in the central Hebei Basin，China［J］. Geological Review，2002，48（1）：58～65.

[10] 赵红格，刘池洋. 廊固凹陷的拆离滑脱构造［J］. 西北大学学报：自然科学版，2003，33（3）：315～318.
ZHAO Hong-he，LIU Chi-yang. Detachment gliding structures of Langgu Sag［J］. Journal of Northwest University：Natural Science Edition，2003，33（3）：315～318.

[11] 宋荣彩，周文，董树义，等. 渤海湾盆地廊固凹陷油气分布特征研究［J］. 石油实验地质，2008，30（1）：64～68.
SONG Rong-cai，ZHOU Wen，DONG Shu-yi，et al. The research of oil-gas distribution characteristics in the Langgu Sag of Bohai Bay Basin［J］. Petroleum Geology & Experiment，2008，30（1）：64～68.

[12] 孙宏斌，陈汉林，程晓敢，等. 辽河盆地葵花岛构造裂隙发育的有限元模拟［J］. 地质科学，2004，39（2）：199～200.
SUN Hong-bin，CHEN Han-lin，CHENG Xiao-gan，et al. Finite element simulation of fracture development in the Kuihuadao structure，Liaohe Basin［J］. Chinese Journal of Geology，2004，39（2）：199～200.

[13] 张丹丹，戴俊生，邹娟，等. 冀中坳陷廊固凹陷古近纪断层活动特征［J］. 地质力学学报，2014，20（1）：25～33.
ZHANG Dan-dan，DAI Jun-sheng，ZOU Juan，et al. Research on fault activity in Paleogene of Langgu Sag，Jizhong

Depression [J]. Journal of Geomechanics, 2014, 20 (1): 25 ~ 33.

[14] 田建章, 苏建杰, 辛玮江, 等. 廊固凹陷潜山成藏模拟及油气勘探潜力 [J]. 中国石油勘探, 2012, 17 (6): 53 ~ 57.
TIAN Jian-zhang, SU Jian-jie, XIN Wei-jiang, et al. Buried hill accumulation model and oil and gas exploration potential in Langgu Depression [J]. China Petroleum Exploration, 2012, 17 (6): 53 ~ 57.

[15] 戴俊生, 张继标, 冯建伟, 等. 高邮凹陷真武断裂带西部低级序断层发育规律预测 [J]. 地质力学学报, 2012, 18 (1): 11 ~ 19.
DAI Jun-sheng, ZHANG Ji-biao, FENG Jian-wei, et al. Development law and prediction of the lower-order faults in the west of Zhenwu fault zone in Gaoyou Sag [J]. Journal of Geomechanics, 2012, 18 (1): 11 ~ 19.

[16] 付晓龙, 戴俊生, 张宏国. 汊涧斜坡带阜宁期应力场数值模拟及低级序断层发育规律预测 [J]. 地质力学学报, 2013, 19 (2): 125 ~ 130.
FU Xiao-long, DAI Jun-sheng, ZHANG Hong-guo. Numerical simulation of structural stress field of Funing sedimentary period and prediction of the development law of lower-order faults in Chajian Slope Zone [J]. Journal of Geomechanics, 2013, 19 (2): 125 ~ 130.

NUMERICAL SIMULATION OF STRUCTURAL STRESS FIELD IN THE LATE SEDIMENTARY PERIOD OF Es_4 AND PREDICTION OF THE LOWER-ORDER FAULTS IN LANGGU SAG

ZHANG Dan-dan, DAI Jun-sheng, FU Xiao-long

(*School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao* 266580, *China*)

Abstract: On the basis of the research of structural background, fault activity and structural evolution, the method of numerical simulation of structural stress was applied to simulate the stress distribution in the late sedimentary period of Es_4 in Langgu sag, and the development of the lower-order faults could be predicted. The research showed that the active faults in the late sedimentary period of Es_4 were Daxing fault, Banjiehe fault and so on. Niubei slope belt and Hexiwu structural belt were uplift obviously during this period. The comprehensive analysis indicated that the direction of the minimum principal stress was SE144°-NW324°, the development of the lower-order faults were mainly influenced by the minimum principal stress and the shear stress, et al. The minimum principal stress and the difference between principal stresses (the maximum and minimum principal stress) controlled the advantage area of the fault development. The plane shear stress controlled the fault strike, and its most faults in this area were NNE-NE. The profile shear stress controlled the dip direction, in the main part of this area the profile shear stress was sinistral shear stress, which showed that the dip direction of the most faults was NW.

Key words: Langgu Sag; the late sedimentary period of Es_4; structural stress field; numerical simulation; lower-order fault