

杨海盟,邹娟,马士磊,等.苏北盆地高邮凹陷汉留断裂带应力场数值模拟及断层成因分析[J].地球科学与环境学报,2018,40(6):746-756.

YANG Hai-meng, ZOU Juan, MA Shi-lei, et al. Numerical Simulation of Stress Field and Fault Genesis Analysis of Hanliu Fault Zone in Gaoyou Sag of Subei Basin, China[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 746-756.

苏北盆地高邮凹陷汉留断裂带应力场 数值模拟及断层成因分析

杨海盟¹,邹娟²,马士磊³,赵宗波¹,卢宁宁⁴

(1. 中国石化中原油田分公司采油三厂,河南 清丰 457000; 2. 中国石油冀东油田分公司
勘探开发研究院,河北 唐山 063004; 3. 西北大学 地质学系,陕西 西安 710069;
4. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,天津 300452)

摘要:在地质、地震、测井等资料的基础上,运用平衡剖面技术、断层落差法和构造应力场数值模拟技术分析苏北盆地高邮凹陷汉留断裂带断层成因机制。结果表明:高邮凹陷汉留断裂带主要发育 NEE、近 EW、NW 向断层,断层组合样式在平面上为平行式、斜交式和羽状,在剖面上为阶梯状、“Y”字形和复“Y”字形;阜宁期 SSE 倾向断层发育,三垛期次级断层发育;阜宁期汉留断裂带中、南部平面剪应力为负值,控制发育 NEE 向断层,北部为正值,控制发育近 EW 向断层,剖面上研究区剪应力为负值,控制断层倾向 SE;三垛期汉留断裂带北部和南部部分地区平面剪应力为负值,控制发育 NEE 向断层,中部为正值,控制发育近 EW、NW 向断层,剖面剪应力在北部为正值,控制断层倾向 SE,其南部为负值,控制断层倾向 NW。

关键词:应力场;成因机制;断层;构造演化;落差;阜宁期;三垛期;苏北盆地

中图分类号:P554; TE121 文献标志码:A 文章编号:1672-6561(2018)06-0746-11

Numerical Simulation of Stress Field and Fault Genesis Analysis of Hanliu Fault Zone in Gaoyou Sag of Subei Basin, China

YANG Hai-meng¹, ZOU Juan², MA Shi-lei³, ZHAO Zong-bo¹, LU Ning-ning⁴

(1. No. 3 Oil Recovery Plant, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Qingfeng 457000, Henan, China;
2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Jidong Oilfield Company, PetroChina, Tangshan
063004, Hebei, China; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;
4. Drilling and Production Company, CNOOC Energy Technology and Services Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: On the basis of geological, seismic and logging data, the fault genetic mechanism of Hanliu fault zone in Gaoyou sag of Subei Basin was analyzed by applying the equilibrium profile technique, fault throw method and numerical simulation of structural stress field. The results show that the faults of Hanliu fault zone in Gaoyou sag mainly strike NEE, EW and NW, the plane fault combination styles are parallel-aligned, skew-type and pinnate-type, and the profile fault combination styles are ladder-like style, Y-type and multiple Y-type; the faults with SSE-trending develop during Funing period, and the secondary faults mainly develop during Sanduo period; the plane shear stress is negative during Funing period in the middle and southern Hanliu

fault zone, controlling the formation of faults with NEE-striking, while the value is positive in the northern area, controlling the formation of faults with nearly EW-striking, and the profile shear stress is negative in Hanliu fault zone, controlling the formation of faults with SE-trending; the plane shear stress is negative during Sanduo period in the northern and partial southern Hanliu fault zone, controlling the formation of faults with NEE-striking, while the value is positive in the middle area, controlling the formation of faults with nearly EW- and NW-striking, and the profile shear stress is positive in the northern Hanliu fault zone, controlling the formation of faults with SE-trending, while the value is negative in the southern area, controlling the formation of faults with NW-trending.

Key words: stress field; genetic mechanism; fault; tectonic evolution; throw; Funing period; Sanduo period; Subei Basin

0 引言

高邮凹陷是苏北盆地东台坳陷中部的一个次级凹陷,凹陷内部由南向北依次划分为南部断阶带、中部深凹带和北部斜坡带。该凹陷先后经历了仪征运动、吴堡运动、真武运动和三垛运动,沉积了白垩系泰山组,古近系阜宁组、戴南组、三垛组,新近系盐城组及第四系东台组地层。

汉留断裂带位于苏北盆地高邮凹陷东南部,是高邮凹陷主要的油气聚集带之一。汉留断裂带在平面上延伸长度约70 km,宽度约5 km,是发育于真①断层上盘的反向断层,受重力补偿作用形成^[1-2]。沿断裂带自西向东依次发育赤岸、马家嘴、联盟庄、永安和富民等多个油田。凹陷内主要发育NEE向真武断裂带、汉留断裂带和NE向吴堡断裂带,其中吴堡断裂带与真武断裂带构成了高邮凹陷南部主要边界,这两条断裂带对高邮凹陷的构造格局演变和沉积中心迁移具有重要影响^[3-5]。

前人对苏北盆地构造演化进行了研究^[6-8]。张克鑫等认为苏北盆地构造演化先后经历了坳陷式伸展($K_2t-E_1f_1$)、断陷期($E_1f_2-E_1f_4$)、单向伸展转为双向伸展(E_2d-E_2s)、坳陷期(N-Q)^[6];李学慧等运用断层落差法和平衡剖面技术对高邮凹陷南断阶带形成时期和断层活动强弱特征进行了分析^[9-11]。此外,构造应力场数值模拟技术也得到广泛应用^[12-17]。例如,戴俊生等运用该技术分析构造应力对断层的控制作用,在高邮凹陷南断阶东部阜宁期模拟取得了良好的效果^[18];张继标等运用数值模拟技术对各级别断层成因进行探讨,认为真①断层和真②断层发育主要受区域伸展和郯庐断裂带影响,真①断层和真②断层之间的三级断层主要受真①断层派生的古局部构造应力场控制^[19]。汉留断

裂带平面上具有明显的分段特征,剖面上不同断层段的断层组合样式也存在一定的差异^[20]。李鹤永对汉留断裂带西、中、东段断层几何学特征、构造样式、断层活动性等进行研究,认为构造应力场方向的转变和岩浆侵入控制了汉留断裂带自西向东发育的不同构造样式^[21]。目前,通过建立研究区的地质模型和力学模型,利用构造应力场数值模拟技术解释断裂成因机制、预测断层或裂缝的发育是一种比较可靠的断裂成因机制解释方法^[22-24]。因此,本文在分析构造演化和断层活动性的基础上,选取阜宁期和三垛期进行构造应力场数值模拟,从动力学角度分析主体断层成因机制,以期为汉留断裂带油气勘探开发提供借鉴。

1 断层特征

汉留断裂带西部断层分叉发育,形成了NEE向正断层和一系列次级断层组成的复杂断裂带(图1)。断层级别上,汉留断裂带属于高邮凹陷内部二级断层,其余NNE向断层属于三级断层,南部NNW向断层划为四级断层,主断层之间小断层划为五级断层。平面上,最北部一条断层西部走向NEE,东部走向近EW,转折处发育一条次级断层,往南3条主断层走向NEE,汉留断裂带次级断层走向以NNW为主,发育断层组合样式有平行式、羽状和斜交式。剖面上,NEE向主断层切割古近系,倾向SSE,倾角约40°,呈阶梯状展布,并且发育“Y”字形和复“Y”字形断层组合。断层性质和构造样式表明研究区断层在以伸展作用为主的应力场作用下形成。

1.1 构造演化剖面分析

平衡剖面经众多学者研究^[25-27],技术和理论日趋完善。本文采用旋转法^[28],遵循剖面中层长守恒的原则,将相当点归位,进行构造演化分析。

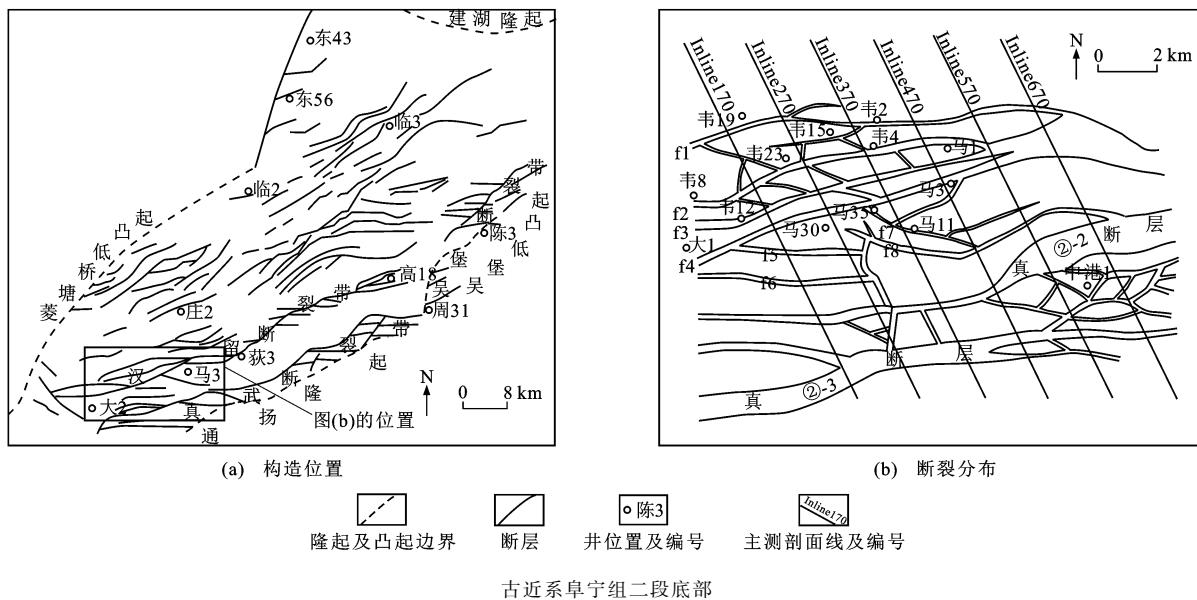


图 1 苏北盆地高邮凹陷汉留断裂带构造位置与断裂分布

Fig. 1 Structure Position and Fault Distribution of Hanliu Fault Zone in Gaoyou Sag of Subei Basin

由 Inline570 构造演化剖面(图 2)可以看出,阜宁期汉留断裂带断层发育,断层倾向 SE, 真武断裂带断层强烈活动, 断层倾向 NW。戴南期汉留断裂带断层继续发育, 断层活动性增强, 派生次级断层; 真武断裂带断层持续强烈活动, 中部地层水平沉积。三垛期汉留断裂带断层持续强烈活动, 次级断层较发育; 真武断裂带经历断层活动性由强变弱的过程。盐城期至今, 断层微弱活动后停止。

结合大地构造背景,将汉留断裂带构造演化分为4个阶段:阜宁期断层发育弱活动阶段;戴南期断层较强活动阶段;三垛期次级断层发育逆牵引形成阶段;盐城期至今稳定沉降阶段。

1.2 断层落差分析

大量的钻井资料表明,戴南组和三垛组地震反射界面标定较准确,断层落差计算数据较可靠,但阜宁组钻井揭示较少且地震反射杂乱,因此,断层落差数据根据现有资料大致推测得到。

断层落差法是定量分析断层活动性的常用方法^[29-30]，即通过加密地震测线，统计覆盖研究区12条地震解释剖面各条断层上、下盘地层厚度之差，并绘制断层落差直方图(图3)。

由图3可知：阜宁期断层活动性强烈，阜二期f4断层开始活动，阜四期f1、f3断层形成；戴南期f1、f3断层活动性增强，f4断层持续强烈活动，f2断层形成；三垛期f1、f2、f3断层活动性最强，垛二期f3断层落差约170 m，f4断层活动性在三垛期呈断崖式减弱。综上所述，研究区主断层在阜宁期发育，三

2 构造应力场数值模拟

断层活动受控于构造应力场,因此,研究构造应力场对于油气运聚具有重要意义^[31-32]。由构造演化剖面和断层落差分析可知,阜宁期和三垛期断层发育。本文运用 Ansys 软件建立有限元地质力学模型进行构造应力场数值模拟,以此来解释断层发育特征及成因机制等。

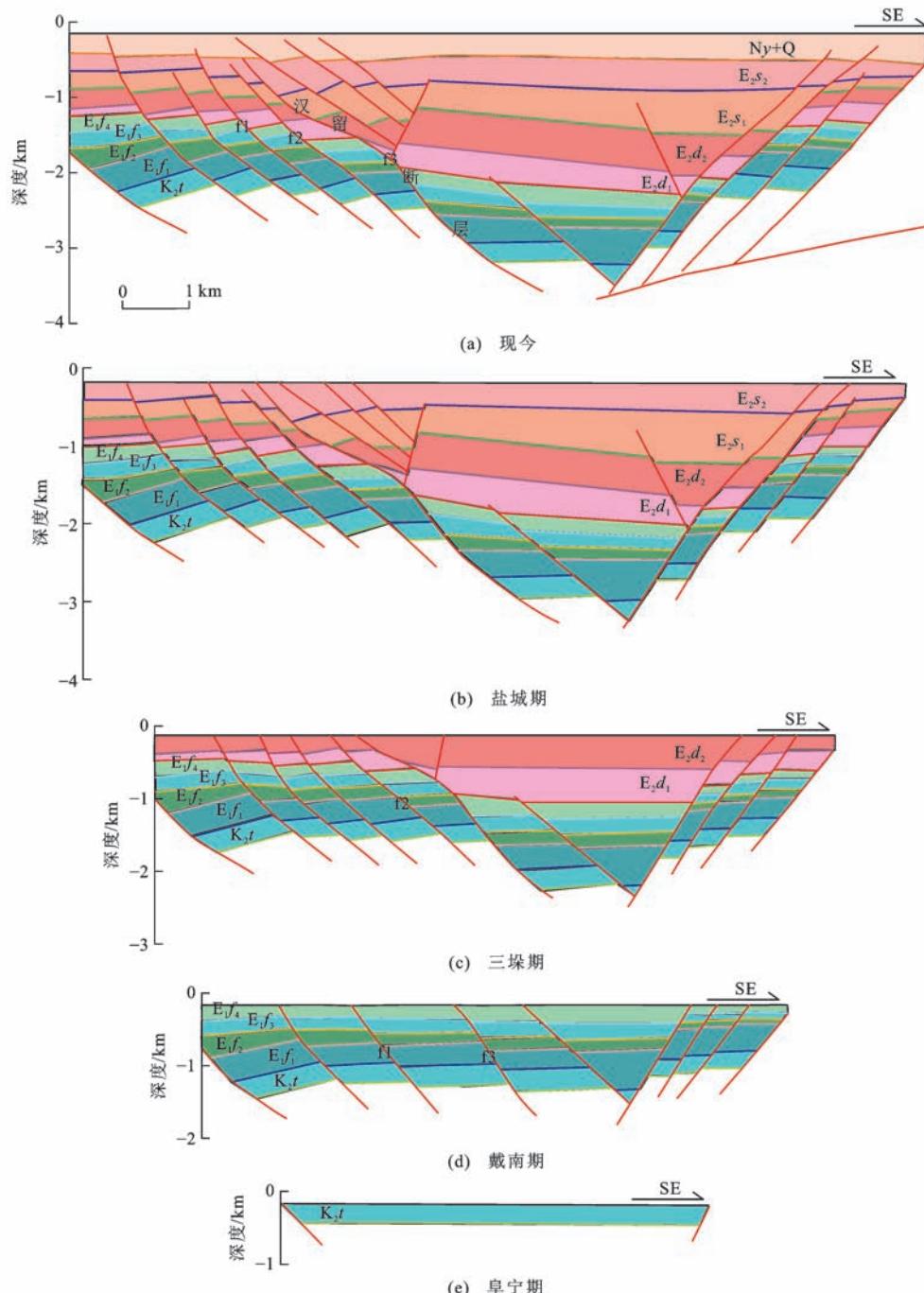
2.1 构造应力场方向

共轭节理、共轭断层面、断层产状、擦痕、褶皱及缝合线等构造形迹都可以作为判断构造应力场状态的依据^[33]。由阜宁期和三垛期断层走向玫瑰花图(图4)可知:阜宁期断层走向总体近EW向,判断阜宁期最小主应力方向近SN向;三垛期断层发育方向近EW向,三垛期最小主应力方向为近SN向。

2.2 模型建立与加载

阜宁期地质模型的建立主要参考了阜宁组二段底面构造图,选择真①断层作为先存断层,综合地质资料、地震剖面解释结果和古构造恢复结果,设置真①断层走向为 83° ,倾角为 13° ,阜宁组厚度为3 000 m[图5(a)]。

不同构造单元力学性质有所差异,一般断裂带较正常沉积地层单元强度更弱^[34-35]。本文将不同地质单元赋予不同的岩石力学参数,参数大小参照文献[18]和[19](表1)。采用Solid45单元进行网格划分,共划分出61 939个单元,参与运算的节点共



Q为第四系;Ny为新近系盐城组;E₁f₁为阜宁组一段;E₁f₂为阜宁组二段;E₁f₃为阜宁组三段;E₁f₄为阜宁组四段;E₂d₁为戴南组一段;E₂d₂为戴南组二段;E₂s₁为三垛组一段;E₂s₂为三垛组二段;K₂t为泰山组

图2 Inline570 构造演化剖面
Fig. 2 Tectonic Evolution Profiles of Inline570

表1 不同地质单元岩石力学参数

Tab. 1 Rock Mechanical Parameters of Different Geological Units

参数	泊松比	弹性模量/GPa	密度/(kg·m ⁻³)
地层	0.15	28	2 210
断层	0.20	22	2 200

12 667个。综合断层平面展布和其他地质因素的影响,确定阜宁期主拉张方向为SN,次拉张方向为EW。

由于难以得知阜宁期实际构造应力场的大小,模拟过程中外力通过类比施加虚拟值来实现,在符合客观规律的前提下,模拟结果便可与实际构造应力场足够接近,而构造应力场的变化趋势则是完全相同的。经过不断调整模型加载方式,选择最合理

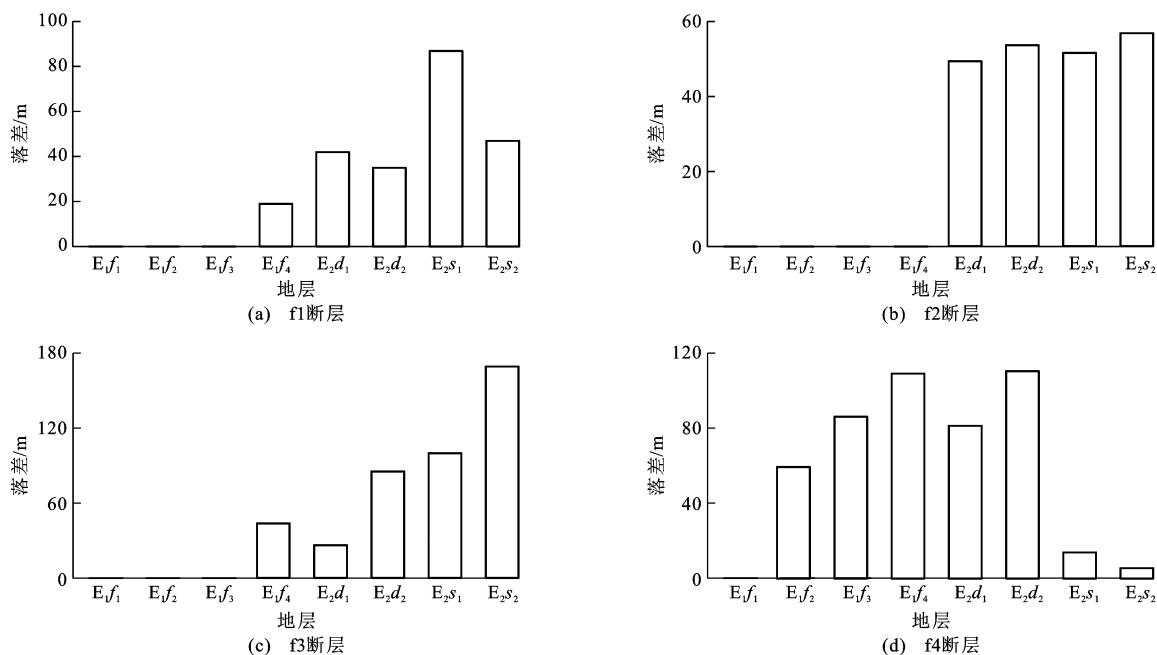


图 3 断层落差柱状图

Fig. 3 Histograms of Fault Throw

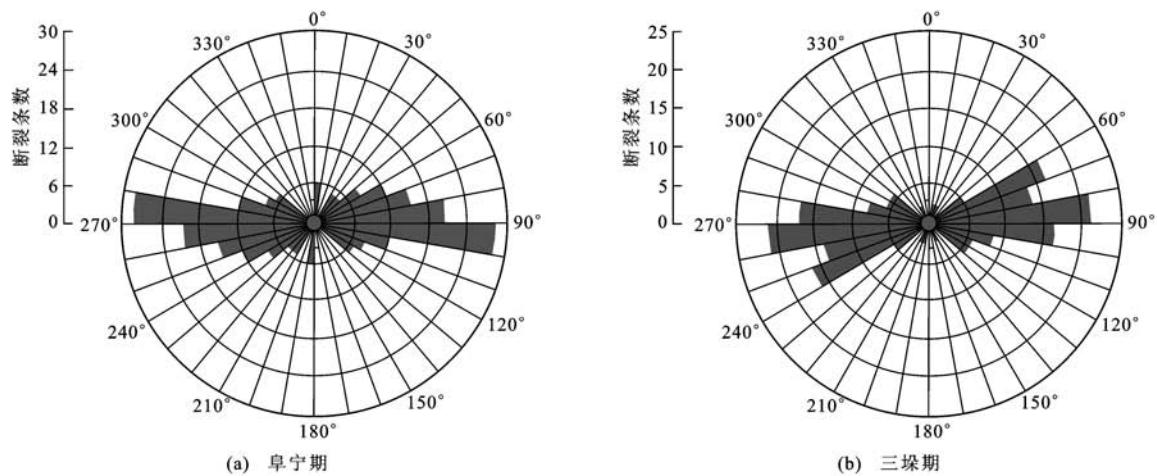


图 4 阜宁期和三垛期三、四级断层走向玫瑰花图

Fig. 4 Strike Rose Diagrams of the Third and Fourth Faults During Funing Period and Sanduo Period



图 5 阜宁期和三垛期地质模型

Fig. 5 Geological Models During Funing Period and Sanduo Period

的加载方式,即施加 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 重力,在北边界施加 10 MPa 拉张力,同时,为满足有限元分析要求,在北边界施加 z 方向约束,南边界施加 y 方向约束,真①断层及上升盘底面施加 z 方向约束。

汉留断裂带三垛期地质模型的建立是以三垛组一段底面构造图为基础,将 f1、f2、f3、f4 和真②断层等设为先存断裂,断层倾向及倾角根据地质和地震资料确定,综合古构造恢复结果,将三垛组厚度设置为 2 000 m[图 5(b)]。根据断层的岩石力学参数(表 1),采用 Solid45 单元进行网格划分,共划分出 48 171 个单元,参与运算的节点共 17 177 个。经过不断模型加载,最终确定施加 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 重力,在南、北边界施加 6 MPa 拉张力,为满足有限元分析要求,在真②、韦 5 断层底面及上升盘底面施加 z 方向约束,西边界施加 z 方向约束。

2.3 模拟结果

阜宁期模拟结果[图 6(a)]显示,最小主应力基

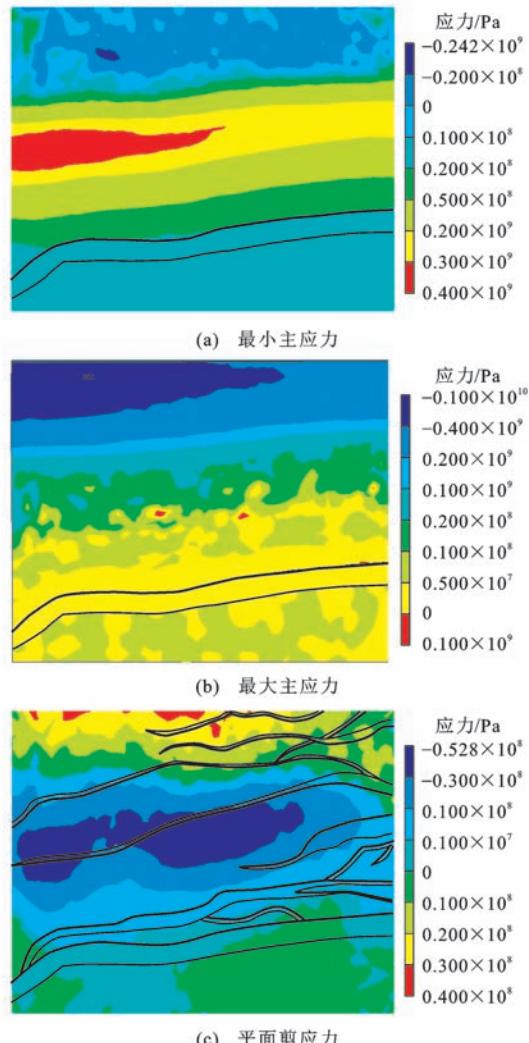


图 6 阜宁期应力分布

Fig. 6 Stress Distributions During Funing Period

本为正值,向南、北两侧呈条带状递减,方向整体为近 SN 向。最大主应力全为负值,高值区位于研究区北部,向南部呈带状递减[图 6(b)]。平面剪应力在研究区南部为负值,北部为正值[图 6(c)]。

三垛期模拟结果显示,最小主应力基本为正值,在南、北两处各有一个高值,分别向南、北两侧呈条带状递减,方向整体为近 SN 向[图 7(a)]。最大主应力几乎全为负值,在中部最大主应力值最高,向两侧递减[图 7(b)]。平面剪应力北部为负值,南部局部区域也为负值,中部为正值[图 7(c)]。

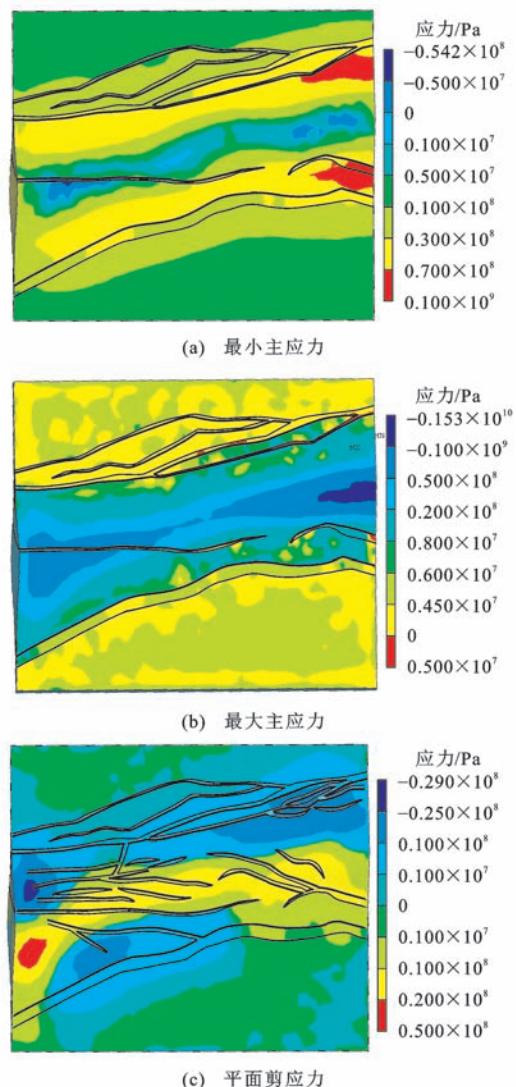


图 7 三垛期应力分布

Fig. 7 Stress Distributions During Sanduo Period

2.4 应力场分布对断层的控制

2.4.1 主差应力对断层的控制

戴俊生等研究发现,构造应力场对断层控制作用明显^[18,36-38]。构造应力场数值模拟中涉及的张破裂计算通常采用格里菲斯准则,剪切破裂计算通常

采用库仑-莫尔准则^[39-40]。研究区发生的破裂主要是剪切破裂,根据库仑-莫尔准则^[40], $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) / (2\sin(2\alpha))$,其中, τ 为主差应力, σ_1 、 σ_3 分别为最大、最小主应力, α 为破裂面法线与最大主应力间的交角,岩石剪切破裂程度随主差应力增大而增大^[36]。

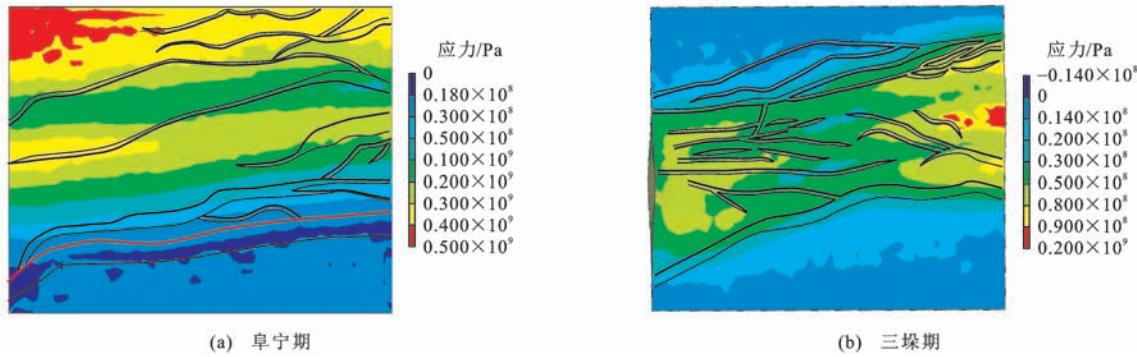


图 8 主差应力与断层展布

Fig. 8 Distributions of Main Differential Stress and Fault

2.4.2 平面剪应力对断层走向的控制

平面应变椭圆往往显示两组共轭剪切破裂线^[41]。平面剪应力的分布情况通常使左旋、右旋两组断层发育程度不同,一般以一种旋向的断层发育为主。

阜宁期平面应变椭圆长轴为 NNW—SSE 向,

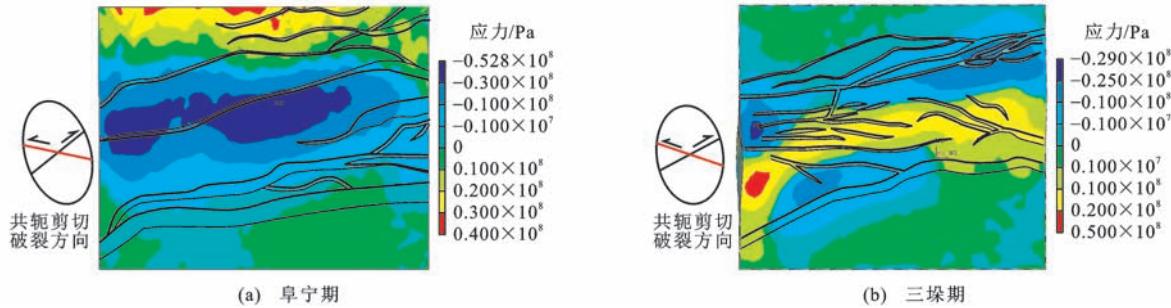


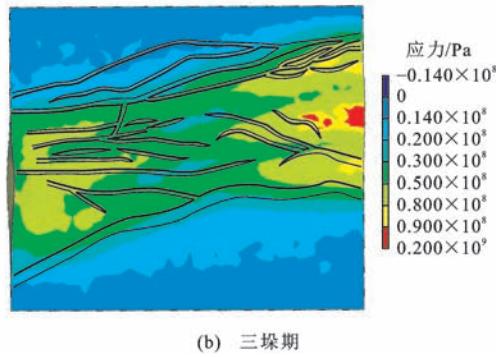
图 9 平面剪应力与断层展布

Fig. 9 Distributions of Plane Shearing Stress and Fault

2.4.3 剖面剪应力对断层倾向的控制

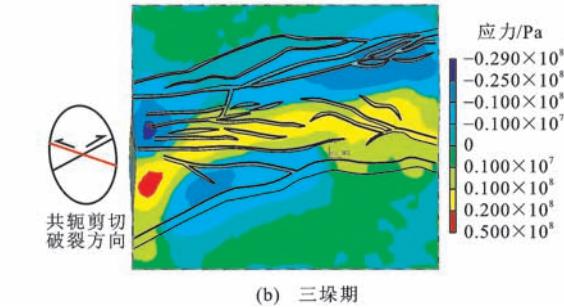
戴俊生等指出在剖面应变椭球中,剪切破裂线可以代表断层的视倾斜线,从而确定断层倾向^[28]。阜宁期剖面剪应力长轴为 NW 向,为张应力方向,短轴为重力方向,该时期 NW—SE 向剖面北部剪应力为负值,受右旋控制发育 SE 倾向断层,南部剪应力为正值,控制发育 NW 倾向断层(图 10),与地震剖面解释一致。三垛期剖面剪应力在北部为正值,控制发育 SE 倾向断层,南部变成负值,控制发育 NW 倾向断层,往南在真②断层南部剖面剪应力为正值,控制发育 SE 倾向断层(图 11),与地震解释剖面一致。

汉留断裂带阜宁期主差应力呈带状分布,大 1 井附近出现高值区,北部高值区发育两条 NE 向断层[图 8(a)]。三垛期主差应力在中部较高,向东、西侧主差应力变大,岩石剪切破裂强度大,发育了一系列低级序断层[图 8(b)]。



(b) 三垛期

短轴为 SWW—NEE 向,右旋破裂线为 NEE 向,控制中、南部发育 NEE 向断层,左旋破裂线为近 EW 向,控制最北部区域形成近 EW 向断层[图 9(a)]。三垛期受平面应变椭圆的控制,在北部和南部部分区域受右旋控制发育 NEE 向断层,在中部区域受左旋破裂控制发育 NW 向断层[图 9(b)]。



(b) 三垛期

3 结语

(1) 汉留断裂带主要发育 NEE、近 EW、NW 向断层,断层走向具有明显的分区性。断层组合样式在平面上为平行式、斜交式和羽状,在剖面上为阶梯状、“Y”字形和复“Y”字形。古近纪以来,汉留断裂带西部构造演化经历了阜宁期断层发育弱活动阶段,戴南期断层较强活动阶段,三垛期次级断层发育逆牵引形成阶段,盐城期至今稳定沉降阶段。构造演化剖面和断层落差表明,阜宁期 SSE 倾向断层发育,三垛期构造活动强烈,次级断层发育。

(2) 阜宁期最小主应力基本为近 SN 向张应

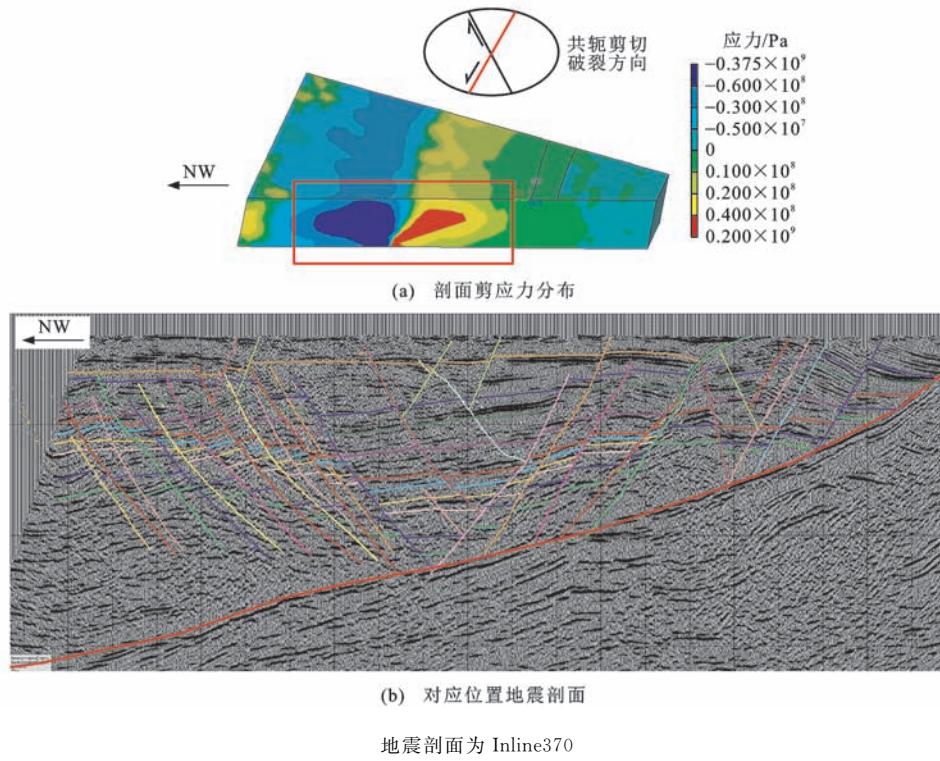


图 10 NW—SE 向剖面中阜宁期剖面剪应力与对应位置地震剖面

Fig. 10 Shear Stress Distribution of NW-SE Profile During Funing Period and Seismic Profile of Corresponding Location

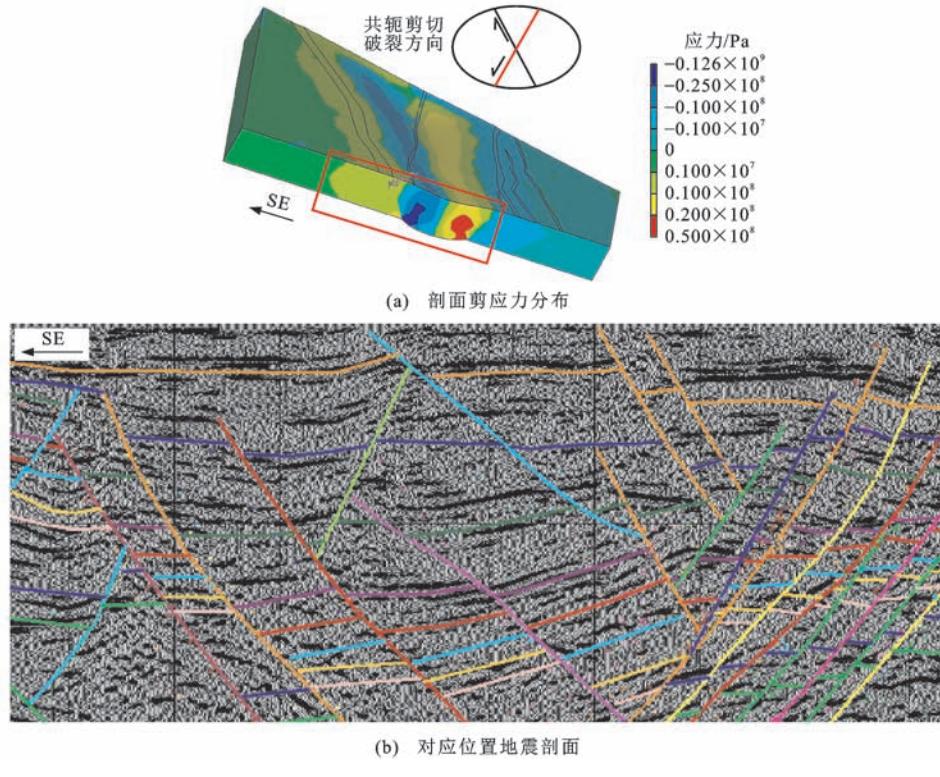


图 11 NW—SE 向剖面中三垛期剖面剪应力与对应位置地震剖面

Fig. 11 Shear Stress Distribution of NW-SE Profile During Sanduo Period and Seismic Profile of Corresponding Location

力, 北部主差应力高值区断层发育; 平面剪应力在中、南部为负值, 控制发育 NEE 向断层, 北部为正

值, 控制发育近 EW 向断层; 剖面剪应力负值区断层倾向 SE。

(3)三垛期最小主应力基本为近 SN 向张应力,中部主差应力高值区次级断层发育;北部和南部部分地区平面剪应力为负值,控制发育 NEE 向断层,中部为正值,控制发育近 EW、NW 向断层;剖面剪应力在北部为正值,控制 SE 倾向断层,其南部为负值,控制 NW 倾向断层,真②断层南部剖面剪应力为正值,控制 SE 倾向断层。

参 考 文 献 :

References :

- [1] 李宝刚. 高邮凹陷断裂调节带发育特征及其石油地质意义[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 19-23, 32.
LI Bao-gang. Development Characteristics of Fault Accommodation Zone and Its Significances of Petroleum Geology in Gaoyou Depression[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2008, 32(1): 19-23, 32.
- [2] 杨海盟. 汉留断裂带构造演化特征研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
YANG Hai-meng. Study on the Tectonic Evolution Characteristics of Hanliu Fault Zone[D]. Qingdao: China University of Petroleum, 2016.
- [3] LIU Y, CHEN Q H, WANG X, et al. Influence of Normal Fault Growth and Linkage on the Evolution of a Rift Basin: A Case from the Gaoyou Depression of the Subei Basin, Eastern China[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(2): 265-288.
- [4] 吴林, 陈清华, 刘寅, 等. 裂陷盆地伸展方位与构造作用及对构造样式的控制: 以苏北盆地高邮凹陷南部断阶带为例[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(1): 29-38.
WU Lin, CHEN Qing-hua, LIU Yin, et al. Extension Direction and Tectonism in Rift Basins and Their Control on Structural Style: A Case Study on the South Fault Terrace in the Gaoyou Sag, Subei Basin [J]. Oil and Gas Geology, 2017, 38(1): 29-38.
- [5] 袁静, 董道涛, 宋璠, 等. 苏北盆地高邮凹陷深凹带古近系戴南组一段沉积格局与时空演化[J]. 古地理学报, 2016, 18(2): 147-160.
YUAN Jing, DONG Dao-tao, SONG Fan, et al. Sedimentary Patterns and Spatiotemporal Evolution of the Member 1 of Paleogene Dainan Formation in Deep Sag of Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(2): 147-160.
- [6] 张克鑫, 漆家福, 任红民, 等. 苏北盆地高邮凹陷断层演化规律研究[J]. 大庆石油地质与开发, 2008, 27(2): 21-24.
ZHANG Ke-xin, QI Jia-fu, REN Hong-min, et al. Study on Faults Evolution in Gaoyou Fault Depression of Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2): 21-24.
- [7] 能源, 杨桥, 张克鑫, 等. 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世—新生代构造沉降史分析与构造演化[J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29(2): 25-32.
NENG Yuan, YANG Qiao, ZHANG Ke-xin, et al. Tectonic Subsidence and Evolution of the Gaoyou Depression in Northern Jiangsu Basin During the Late Cretaceous to the Cenozoic[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29(2): 25-32.
- [8] 陈艳, 张景发, 姜文亮, 等. 苏北盆地重力场及地壳结构特征[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(6): 2295-2303.
CHEN Yan, ZHANG Jing-fa, JIANG Wen-liang, et al. Gravity Field and Characteristics of Crustal Structure in Subei Basin[J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(6): 2295-2303.
- [9] 李学慧. 高邮凹陷南断阶断层活动对油气成藏的控制[J]. 新疆石油地质, 2008, 29(6): 719-721.
LI Xue-hui. The Control Effect of Fault Activity on Hydrocarbon Accumulation in South Terrace of Gaoyou Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2008, 29(6): 719-721.
- [10] 马晓鸣, 戴俊生. 应用落差分析研究高邮凹陷南断阶主控断层[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(4): 31-34.
MA Xiao-ming, DAI Jun-sheng. Study on the Control Faults in South Fault Terrace of Gaoyou Sag by Fault Throw Analysis[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(4): 31-34.
- [11] 马晓鸣, 戴俊生. 高邮凹陷南部断阶带构造演化特征[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 476-479.
MA Xiao-ming, DAI Jun-sheng. Structural Evolution of South Terrace in Gaoyou Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 476-479.
- [12] 丁文龙, 曾维特, 王濡岳, 等. 页岩储层构造应力场模拟与裂缝分布预测方法及应用[J]. 地学前缘, 2016, 23(2): 63-74.
DING Wen-long, ZENG Wei-te, WANG Ru-yue, et al. Method and Application of Tectonic Stress Field Simulation and Fracture Distribution Prediction in Shale Reservoir[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(2): 63-74.
- [13] 丁文龙, 樊太亮, 黄晓波, 等. 塔里木盆地塔中地区上奥陶统古构造应力场模拟与裂缝分布预测[J]. 地质通报, 2011, 30(4): 588-594.

- DING Wen-long, FAN Tai-liang, HUANG Xiao-bo, et al. Upper Ordovician Paleo Tectonic Stress Field Simulating and Fracture Distribution Forecasting in Tazhong Area of Tarim Basin, Xinjiang, China[J]. Geological Bulletin of China, 2011, 30(4): 588-594.
- [14] 刘敬寿,戴俊生,徐珂,等.构造裂隙产状演化规律表征方法及其应用[J].吉林大学学报:地球科学版,2017,47(1):84-94.
- LIU Jing-shou, DAI Jun-sheng, XU Ke, et al. Method for the Characterization of the Evolution of Tectonic Fracture Attitudes and Its Application[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2017, 47(1): 84-94.
- [15] 王冰,刘成林,李宗星,等.柴达木盆地东部中生代以来构造应力场及构造演化[J].地球科学与环境学报,2017,39(1):83-94.
- WANG Bing, LIU Cheng-lin, LI Zong-xing, et al. Tectonic-stress Field and Tectonic Evolution in the Eastern Qaidam Basin Since Mesozoic[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(1): 83-94.
- [16] 商琳,刘晓涵,吴海涛,等.基于构造应力场数值模拟的复杂断块油藏低级序断层预测:以南堡凹陷M区为例[J].地质力学学报,2016,22(2):357-365.
- SHANG Lin, LIU Xiao-han, WU Hai-tao, et al. Forecast of Lower Order Faults in Complex Fault Block Reservoirs by Numerical Simulation of Tectonic Stress Field: Taking M Area in Nanpu Sag as an Example[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(2): 357-365.
- [17] 王珂.塔里木盆地大北气田构造应力场解析与数值模拟[J].地质学报,2017,91(11):2557-2572.
- WANG Ke. Analysis and Numerical Simulation of Tectonic Stress Field in the Dabei Gas Field, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(11): 2557-2572.
- [18] 戴俊生,王霞田,季宗镇,等.高邮凹陷南断阶东部阜宁期构造应力场及其对断层的控制作用[J].中国石油大学学报:自然科学版,2011,35(2):1-5.
- DAI Jun-sheng, WANG Xia-tian, JI Zong-zhen, et al. Structural Stress Field of Funing Sedimentary Period and Its Control on Faults in the East of South Fault Terrace in Gaoyou Sag[J]. Journal of China University of Petroleum: Natural Science Edition, 2011, 35(2): 1-5.
- [19] 张继标,戴俊生,王彤达,等.高邮凹陷南断阶西部断裂特征及其成因机制[J].西安石油大学学报:自然科学版,2012,27(3):29-34.
- ZHANG Ji-biao, DAI Jun-sheng, WANG Tong-da, et al. Characteristics and Genetic Mechanism of the Faults in the West of South Fault Terrace in Gaoyou Sag[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2012, 27(3): 29-34.
- [20] 束宁凯,吴林,汪新文,等.苏北盆地高邮凹陷基底先存断裂成因及其对新生断裂的控制[J].石油实验地质,2017,39(1):8-14.
- SHU Ning-kai, WU Lin, WANG Xin-wen, et al. Origin of Pre-existing Basement Faults and Their Controls on New Fault Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(1): 8-14.
- [21] 李鹤永.高邮凹陷汉留断裂带构造特征及演化[J].复杂油气藏,2017,10(3):1-5,73.
- LI He-yong. Characteristics and Evolution of Hanliu Fault Zone in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(3): 1-5, 73.
- [22] 顾玉超,戴俊生.苏北盆地高邮凹陷深凹带生长断层特征与主控因素分析[J].大地构造与成矿学,2015,39(1):53-61.
- GU Yu-chao, DAI Jun-sheng. Fault Growth and Main Controlling Factors in Deep Area of Gaoyou Sag[J]. Geotectonica et Metallogenesis, 2015, 39(1): 53-61.
- [23] LIU J S, DING W L, YANG H M, et al. Quantitative Prediction of Fractures Using the Finite Element Method: A Case Study of the Lower Silurian Longmaxi Formation in Northern Guizhou, South China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2018, 154: 397-418.
- [24] 冯阵东,程秀申,张宏国,等.构造物理模拟与数值模拟技术的对比与结合[J].地球物理学进展,2014,29(2):706-710.
- FENG Zhen-dong, CHENG Xiu-shen, ZHANG Hong-guo, et al. Comparison and Combination of Structure Physical Modeling and Numerical Simulation Techniques[J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(2): 706-710.
- [25] DAHLSTROM C D A. Balanced Cross Sections[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 1969, 6(4): 743-757.
- [26] 杨海盟,戴俊生,汪必峰,等.牛驼镇凸起发育过程[J].东北石油大学学报,2014,38(6):22-29.
- YANG Hai-meng, DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng, et al. Development Process of Niutuozhen Uplift[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(6): 22-29.
- [27] 胡秋媛,董大伟,赵利,等.准噶尔盆地车排子凸起构造演化特征及其成因[J].石油与天然气地质,2016,37(4):556-564.
- HU Qiu-yuan, DONG Da-wei, ZHAO Li, et al. Tec-

- tionic Evolutionary Characteristics and Their Causes of Chepaizi Uplift in Junggar Basin[J]. Oil and Gas Geology, 2016, 37(4): 556-564.
- [28] 戴俊生, 李理. 油区构造分析[M]. 东营: 石油大学出版社, 2002.
- DAI Jun-sheng, LI Li. Structural Analysis of Oil and Gas Field [M]. Dongying: University of Petroleum Press, 2002.
- [29] 卢异, 王书香, 陈松, 等. 一种断裂活动强度计算方法及其应用[J]. 天然气地球科学, 2010, 21(4): 612-616.
- LU Yi, WANG Shu-xiang, CHEN Song, et al. Computing Method About Intensity of Fault Activity and Its Application[J]. Natural Gas Geoscience, 2010, 21(4): 612-616.
- [30] 周从安, 赵利, 孙钰皓, 等. 冀中坳陷宝坻—桐柏镇变换带形成机制与油气意义[J]. 地质力学学报, 2018, 24(3): 293-300.
- ZHOU Cong-an, ZHAO Li, SUN Yu-hao, et al. The Forming Mechanism of the Baodi-Tongbaizhen Transfer Zone in the Jizhong Depression and Its Oil-gas Bearing[J]. Journal of Geomechanics, 2018, 24(3): 293-300.
- [31] 高先志, 李浩, 刘启东. 高邮凹陷断层控油气作用的多样性[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(1): 20-28.
- GAO Xian-zhi, LI Hao, LIU Qi-dong. Various Effects of Faults on Generation, Migration and Accumulation of Oil/Gas in Gaoyou Sag[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2012, 34(1): 20-28.
- [32] 刘敬寿, 杜全伟, 戴俊生. 金湖凹陷阜二段断裂信息特征与油气藏分布[J]. 特种油气藏, 2015, 22(4): 42-45.
- LIU Jing-shou, DU Quan-wei, DAI Jun-sheng. Information Dimension Features of Faults and Reservoir Distribution in Fu 2 Member in Jinhua Sag[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(4): 42-45.
- [33] 戴俊生. 构造地质学及大地构造[M]. 北京: 石油工业出版社, 2006.
- DAI Jun-sheng. Structural Geology and Geotectonics [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006.
- [34] 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[J]. 地球学报, 2002, 23(2): 175-178.
- WANG Hong-cai, WANG Wei, WANG Lian-jie, et al. Three-dimensional Tectonic Stress Field and Migration of Oil and Gas[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2002, 23(2): 175-178.
- [35] 商琳, 戴俊生, 贾开富, 等. 碳酸盐岩潜山不同级别构造裂缝分布规律数值模拟: 以渤海湾盆地富台油田为例[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1260-1267.
- SHANG Lin, DAI Jun-sheng, JIA Kai-fu, et al. Numerical Simulation for the Distribution of Different Levels of Tectonic Fractures in Carbonate Buried Hills: Taking Futai Oilfield in Bohai Bay Basin as an Example[J]. Natural Gas Geoscience, 2013, 24(6): 1260-1267.
- [36] 戴俊生, 邹娟, 赵贤正, 等. 基于应力场模拟解释河西务构造带孔店—沙四期断层特征[J]. 天然气地球科学, 2014, 25(10): 1529-1536.
- DAI Jun-sheng, ZOU Juan, ZHAO Xian-zheng, et al. Fault Characteristics Interpretation of Ek-Es₄ Sedimentary Period in Hexiwu Tectonic Belt Through Stress Field Simulation[J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1529-1536.
- [37] 杨超, 陈清华, 吕洪波, 等. 济阳坳陷晚古生代—中生代构造演化特点[J]. 石油学报, 2008, 29(6): 859-864.
- YANG Chao, CHEN Qing-hua, LU Hong-bo, et al. Late Paleozoic-Mesozoic Tectonic Evolution Features in Jiayang Depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(6): 859-864.
- [38] 李梦萍, 戴俊生, 王硕, 等. 渤南洼陷古近纪早中期应力场数值模拟及其与断层发育的关系[J]. 地质科技情报, 2017, 36(4): 42-48.
- LI Meng-ping, DAI Jun-sheng, WANG Shuo, et al. Tectonic Stress Field Simulation of Early-Middle Paleogene and Its Relationship with Fault Development in Bonan Sub-sag[J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(4): 42-48.
- [39] 冯建伟, 戴俊生, 马占荣, 等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场关系理论模型[J]. 石油学报, 2011, 32(4): 664-671.
- FENG Jian-wei, DAI Jun-sheng, MA Zhan-rong, et al. The Theoretical Model Between Fracture Parameters and Stress Field of Low-permeability Sandstones[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(4): 664-671.
- [40] 戴俊生, 汪必峰, 马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 393-395.
- DAI Jun-sheng, WANG Bi-feng, MA Zhan-rong. Research on Cracking Principles of Brittle Low-permeability Sands[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 393-395.
- [41] HASANPOUR R, CHOUPANI N. Rock Fracture Characterization Using the Modified Arcan Test Specimen[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2009, 46(2): 346-354.