

松辽盆地王府断陷边界正断层 差异变形特征及成因机制

张希晨¹, 刘晓波¹, 杜长江¹, 周丹妮², 李强¹, 张宏祥³, 梁琰¹, 李磊¹

1. 中国石油 东方地球物理公司 物探技术研究中心, 河北 涿州 072750;

2. 中国石油 辽河油田分公司 勘探开发研究院, 辽宁 盘锦 124010;

3. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

摘要: 为揭示松辽盆地王府断陷正断层的差异变形特征, 深化对边界正断层变形机理的规律性认识, 在构造解析及断层差异性分析的基础上, 结合构造物理模拟在“连续正演”和“控制变量”方面的优势, 探讨边界正断层差异变形的控制因素和成因机制。研究表明: (1) 根据断层活动强度划分为 4 个区域构造演化阶段, 王府西边界正断层活动性最强, 但由北至南断层倾角逐渐增大, 并且在局部呈现“上凸”形态。(2) 综合构造物理模拟和实际地质背景表明, 边界正断层形态受控于岩性横向变化、同构造沉积作用和基底先存凸起等 3 个主要因素。边界正断层若同时发育在不同岩性的地层中, 或者伴随强烈的同构造沉积作用, 都会导致倾角发生改变; 此外, 断层延伸到坚硬的基底凸起附近会改变延伸趋势, 绕过其顶端继续传播, 导致在局部出现“上凸”形态。

关键词: 边界正断层; 差异变形; 构造物理模拟; 控制因素; 王府断陷; 松辽盆地

中图分类号: TE121.2

文献标识码: A

Differential deformation characteristics and genetic mechanism of boundary normal faults in Wangfu Fault Depression, Songliao Basin

ZHANG Xichen¹, LIU Xiaobo¹, DU Changjiang¹, ZHOU Danni²,

LI Qiang¹, ZHANG Hongxiang³, LIANG Yan¹, LI Lei¹

1. Research & Development Center, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou, Hebei 072750, China;

2. Exploration and Development Research Institute, Liaohe Oilfield Company, PetroChina, Panjin, Liaoning 124010, China;

3. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

Abstract: In order to reveal the differential deformation characteristics of the Wangfu Fault Depression in Songliao Basin and study the regularity of the deformation mechanism of boundary normal faults, this paper, based on the structural analysis and fault differential analysis, discusses the controlling factors and genetic mechanism of differential deformation of boundary normal faults in combination with the advantages of tectonophysical simulation in “continuous forward modeling” and “control variables”. The results show that: (1) According to the intensity of fault activity, four regional tectonic evolution stages can be divided. The boundary normal faults in the west of Wangfu Fault Depression is the most active, but the dip angle of the faults gradually increases from north to south, showing a “convex” shape locally. (2) Combining tectonophysical simulation with actual geological background, it is showed that the shape of boundary normal fault was controlled by three main factors, including lateral lithologic change, syntectonic sedimentation and pre-existing uplift of basement. If boundary normal faults are developed in strata with different lithology at the same time, or accompanied by strong syntectonic sedimentation, the dip angle will change. In addition, the extension of the fault near the hard basement bulge will change its trend and continue to spread around the bulge top, resulting in the local appearance of “uplift”.

Key words: boundary normal fault; differential deformation; tectonophysical simulation; controlling factors; Wangfu Fault Depression; Songliao Basin

收稿日期: 2022-08-29; 修订日期: 2023-03-07。

作者简介: 张希晨(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事盆地构造变形和地震解释研究。E-mail: zhangxichen01@cnpc.com.cn。

基金项目: 中国石油集团科学研究与技术开发项目“地震处理解释关键新技术研究与智能化软件开发”(2021ZG03)资助。

伸展断层作为构造地质研究中最为基础的类型之一,与沉积层序和成藏特征密切关联^[1-3]。自 20 世纪以来,对于边界正断层等伸展断层的研究,以 Coulomb-Mohr 破裂准则、滑动摩擦定律、Anderson 断层模式等传统构造理论为指导,利用高精度几何类地震属性、平衡恢复、物理模拟、数值模拟、地层年代学等技术手段,众多学者先后围绕伸展背景下的断层样式、组合类型、发育模式和演化机理等方面开展了大量理论探索和实例分析^[4-5]。

在发育模式方面,BYERLEE^[6]研究发现应力场的改变导致不同力学性质的地层产生“变形不协调效应”;TONG 等^[7-8]提出“广义断层模式”,表明基底早期构造对断层的分布与演化具有控制作用,可以做出相对准确的预测,并在渤海湾盆地南堡凹陷和北部湾盆地涠西凹陷等地区得到验证。在演化机理方面,漆家福等^[9-10]对伸展盆地的基本类型进行划分,剖析了边界正断层及其相关盆地形成的理论模型;桂宝玲^[11]在渤海湾盆地廊固凹陷的研究中认为,边界正断层横向上的分段性与下伏古构造有关。此外,在构造模拟方面,MARTIN 等^[12]利用离散元数值模拟,反映不同地层强度下正断层的差异变形,揭示了正断层在脆性-韧性复合地层中的发育规律;冯阵东等^[13]通过物理模拟实验,调整伸展环境下边界正断层倾角和受力边界等因素,对比不同的影响效果。

另外,在传统边界正断层的解析过程中,大多讨论断层发育的力学环境,实验验证较少。而且,在模拟实验方面,边界断层大多以预置的先存条件

为主,其他可变性综合因素对于断层的影响作用疏于探讨,特别是基底结构、沉积充填等因素对同期边界断层形态的反作用尚未获得足够关注。本文以构造物理模拟为主要技术手段,重点对松辽盆地王府断陷——中生代含油气半地堑的边界断层控制因素进行综合研究,在王府西边界断层解析的基础上,进行差异性分析,充分发挥构造物理模拟在“连续正演”和“控制变量”方面的优势,探讨边界正断层的控制因素和成因机制。

1 地质背景

研究区王府断陷地理位置处于吉林省松原市东南部,构造上位于松辽盆地东南部的东部断陷带(图 1a)。中—新生代松辽盆地经多期挤压隆升与伸展断陷形成大型叠合盆地,发育 19 个断陷,王府断陷作为其中之一,自中生代开始发育断陷湖盆,其构造运动与盆地演化具有一致性^[14-17]。断陷西侧以王府西断层为界,断层活动引起的构造沉降和地层沉积对断陷影响显著,边界断层控制下的烃源岩和储层分布也存在差异,严重制约着中生界致密气勘探和井位部署^[18-21]。

受燕山运动第 II 幕影响,晚侏罗世松辽地区进入同裂陷阶段^[21-22],王府断陷深部岩浆上涌、地壳隆升,大规模、多期次的火山喷发,形成隆洼相间的巨厚火山岩基底(图 1b)。晚侏罗世—早白垩世浅层地壳在引张作用下开启伸展断陷活动^[23-24],在西部边界形成王府西断层,而东部地层发生掀斜抬升,遭受剥蚀形成的沉积物充填于王府西边界断层

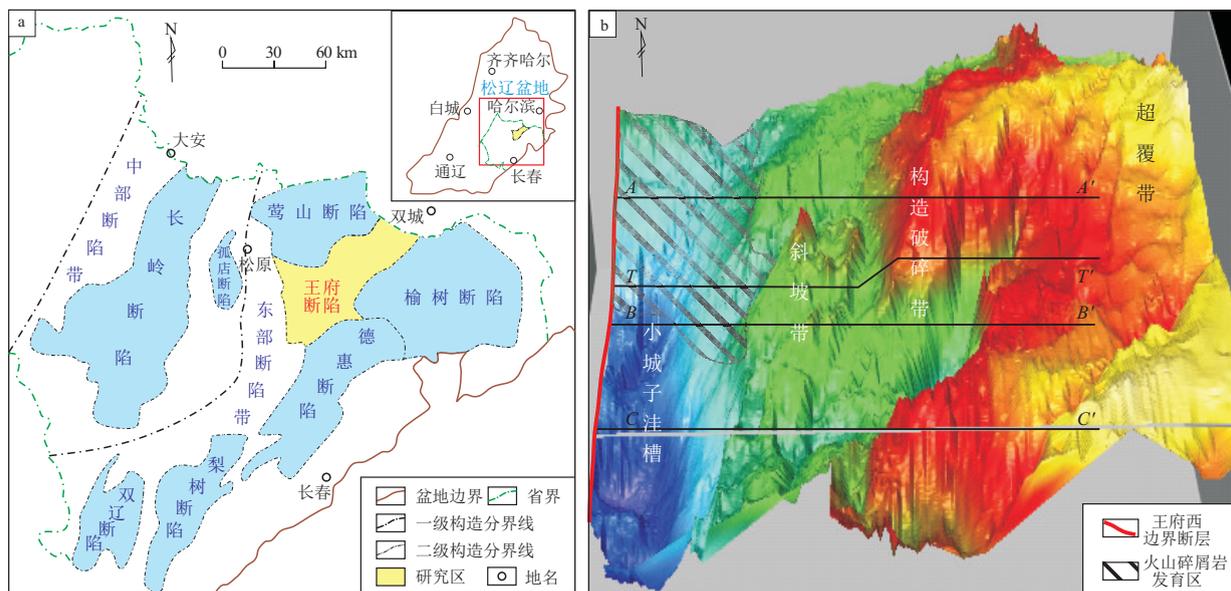


图 1 松辽盆地王府断陷地理位置(a)和火山岩基底地貌恢复(b)

Fig.1 Geographical location of Wangfu Fault Depression, Songliao Basin (a), and geomorphic restoration of volcanic basement (b)

控制的小城子洼槽,形成了以下白垩统沙河子组(K_1sh)为主的陆源碎屑地层^[25],断陷的火山岩基底和沉积盖层构成明显的“二元地层组合”^[26]。

火山岩基底主要由安山岩、流纹岩和火山碎屑岩组成,其中火山碎屑岩集中在小城子洼槽北部。上覆的下白垩统沙河子组(K_1sh)为断陷作用剧烈活动下发育的地层,由底至顶可细分为沙一段(K_1sh^1)、沙二段(K_1sh^2)和沙三段(K_1sh^3),形成于扇三角洲和湖泊为主的沉积环境^[27]。由于基底地形及构造沉降不均衡,沙河子组在西部小城子洼槽分布最厚,在中、东部地区普遍遭受剥蚀而减薄,该层系上部为灰色砂砾岩与深灰色泥岩互层,中部为深灰色至黑色泥岩,夹杂砂砾岩,下部发育一套煤层,与下伏火山岩基底呈整合—角度不整合接触。

2 中生代断层差异变形

王府断陷中生代断层展布规律和演化期次尚处于探索阶段,断层控制下致密气藏展现出良好的勘探前景,明确断层变形特征及其与储层的相关性成为勘探研究的必要前提。通过对不同区段的构造样式和变形强度进行对比分析,表明近南北向的王府西边界断层级别最高、断距最大,其上盘的沉降活动最强,对上盘小城子洼槽的形成起决定性作用,构造沉降—沉积中心沿边界断层分布,洼槽内地层厚度最大;在远离边界断层区域东部,主要发育断距较小的次级断层,断距及断层活动性相对较小,地层厚度向东减薄,经过断陷期掀斜抬升以及后期叠加改造作用,小规模断层数量众多,地层破碎且连续性变差,构造变形主要受各级断层活动性的控制。

通过对中生界典型地质剖面进行平衡恢复(图2),结合松辽盆地东南部的变形时间^[25, 28],并综合考虑基底顶部的火石岭组二段火山碎屑岩(J_3hs^2),可建立中生代4个构造演化阶段:初始断陷、强烈断陷、弱断陷和萎缩断陷,形成主体构造格局,总伸展率约12%,后期的新生代变形在此基础上叠加改造。不同期次的构造变形控制着烃源岩和储层的发育,与烃源岩成熟演化密切相关,与含油气系统具有良好的时空耦合关系,使断陷拥有良好的油气勘探潜力。

然而,王府断陷中生代断裂变形在南北向存在差异性(图3)。王府西边界断层在北段倾角较小而形态平缓,向南倾角变大且形态更陡,断层面在局部位置呈现出“上凸”形态(图3a和图3c虚线内),而断层下盘为致密坚硬的火山岩基底。另一

个方面,断层断距自北向南不断变大,沉降中心的地层厚度也不断增加,且具有明显的同构造沉积特征,沉降中心向南也逐渐靠近王府西边界断层,表明王府西边界断层活动性和构造沉降作用向南逐渐增强。

综合王府断陷的差异构造特征,引起关注的是王府西边界断层在南北走向上的断层形态变化。北部断层面倾角较小而平缓,向南倾角逐渐增大而变陡。同时,断层在局部呈现“上凸”形态(图3a和图3c虚线内)。断层现今的构造特征来源于其形成演化时期的边界条件,结合区域地质背景和前人对断层演化的认识^[4-13],可能与之相关的地质特征主要体现在以下3个方面:(1)基底岩性变化:小城子洼槽北部基底主要由火山碎屑岩组成,而南部基底主要发育安山岩和流纹岩^[21]。由北至南不同的基底岩性导致包括内摩擦角在内的力学性质有所差异,这是否影响断层形态?(2)同构造沉积强度变化:洼槽内的地层厚度向南不断增加,表明同构造沉积作用向南逐渐增强,是否对生长断层的形态产生影响?(3)基底凸起:王府断陷基底顶部由流纹岩等相对致密坚硬的火山岩相互叠置组成,火山岩体顶面凹凸不平^[19-21],特别是在火山通道顶部发育半球状凸起,古地貌也显示小城子洼槽基底面存在大量基底凸起构造。然而现有的地震资料品质较差,难以对下伏火山岩体进行精准识别。中生代构造活动使断层穿过基底向上传播,现今断层面在局部位置呈现“上凸”形态,是否与火山岩基底凸起有关?

为了验证断层形态与同构造沉积作用、基底凸起以及基底岩性变化的相关性,下文首先通过构造物理模拟实验并结合构造解析,开展边界正断层形态差异的控制因素研究。

3 边界正断层控制因素模拟

3.1 实验设计

自19世纪以来,满足相似性条件的构造物理模拟一直广泛应用于板块构造和含油气盆地构造研究,模拟复杂背景下的实际地质变形过程^[29-35]。构造物理模拟实验采用干燥的石英砂等松散颗粒材料,变形特征符合Coulomb-Mohr破裂准则,与真实地层的应力—应变规律相近^[36-37]。本文实验在中国石油天然气集团有限公司油藏描述重点实验室的“三维动态构造控藏物理模拟实验室”完成。基于王府地区断陷盆地基底和沉积盖层的相对差异,对实验模型进行合理简化。在模型底部选

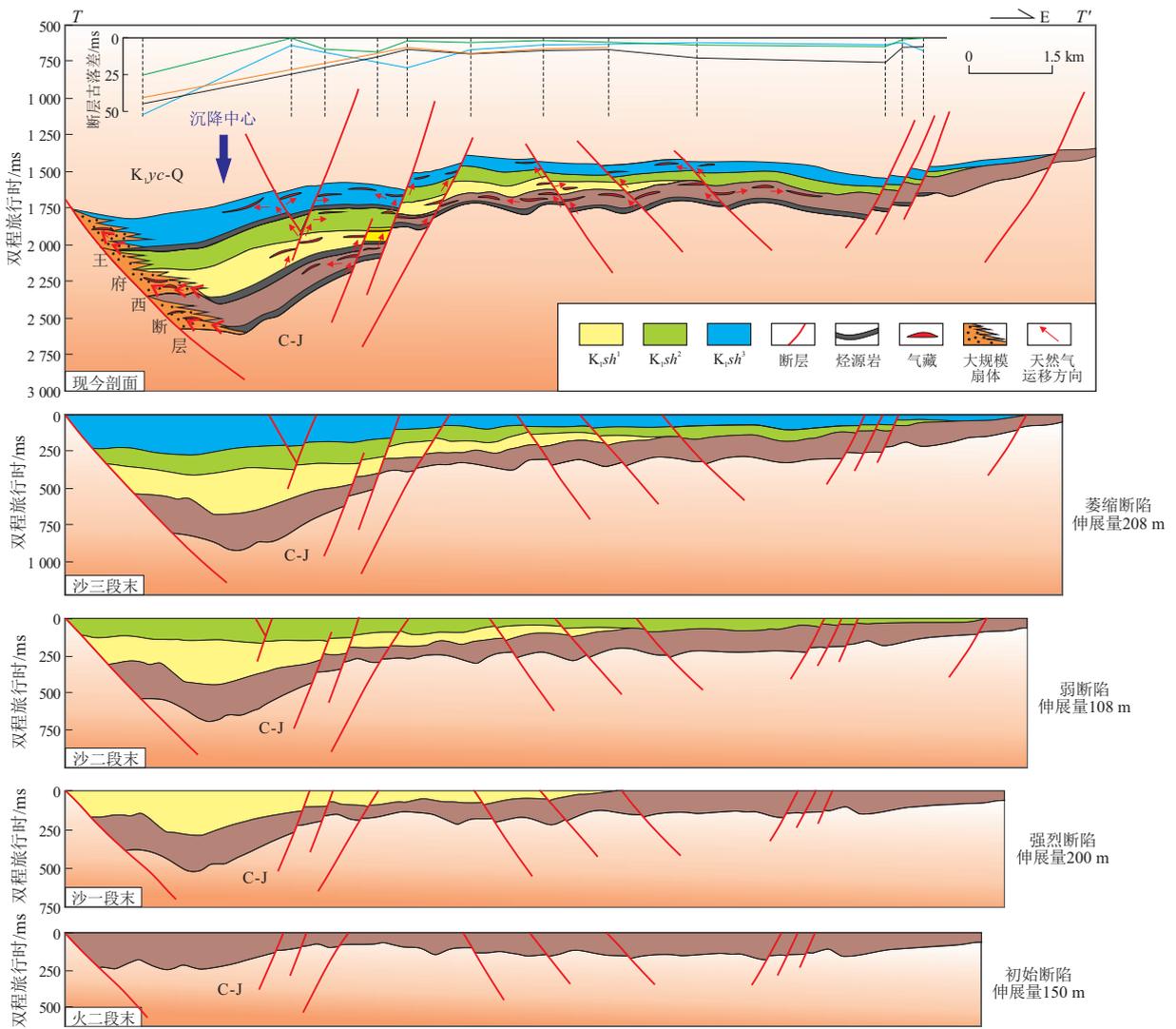


图 2 松辽盆地王府断陷典型剖面构造演化和油藏剖面
测线位置见图 1。

Fig.2 Structural evolution and reservoir profile of typical profile in Wangfu Fault Depression, Songliao Basin

用 $6\ \mu\text{m}$ ($\pm 0.5\ \mu\text{m}$) 粒径的高岭土铺设基底部分,其上铺设 $120\sim 180\ \mu\text{m}$ 粒径的石英砂作为盖层部分,基底和盖层在宏观尺度上分别简化为均一地层,由于石英砂抗张强度为 0,内摩擦角为 31° 左右,内聚力仅为 $90\ \text{Pa}$ ^[38-39],而高岭土内聚力高达 $1.47\times 10^4\ \text{Pa}$ ^[40],相比于石英砂更加致密,基于高岭土和石英砂的力学性质差距,可分别模拟基底和沉积盖层^[41],从而满足基底地层强度远大于沉积盖层的实际地层特征。

为了揭示王府西边界断层形态的控制因素,基于“控制变量、对比分析”的研究思路,共设计 3 组砂箱实验模型,每个模型的地层均分为基底和盖层 2 个部分,基底模拟材料为高岭土,盖层模拟材料为石英砂,分别模拟王府断陷的火山岩基底和沙河子组沉积盖层。根据不同的实验目的,各模型具有不同的边界条件。其中模型①为普通伸展模型,

不设置特殊影响因素,用于和其他模型形成对比。模型②为同构造沉积伸展模型,在模型①的基础上定时添加新的石英砂层,用于研究同构造沉积作用对断层形态的影响。模型③为基底凸起伸展模型,用于研究基底先存凸起对断层形态的影响,实验过程中重点关注边界断层倾角和形态变化,不同模型的参数设置详见表 1。最后验证实验可重复性。

在各模型具体设置方面,实验模型的初始长度为 $30\ \text{cm}$,宽度为 $30\ \text{cm}$ (图 4),底界采用刚性无收缩基底,左侧为可发生定向移动的活动挡板,在精确定速马达的控制下匀速向左拉伸,在活动挡板底部固定一块长度为 $10\ \text{cm}$ 的硬塑料薄板与其同时活动,薄板摩擦力向左拖拽底层砂箱物质,引起顶层物质向下陷落并向左侧扩展,是近似模拟伸展断陷作用和地堑发育的有效手段^[42]。砂箱内最大差异位移量出现在底部活动薄板上方,易于在模型左

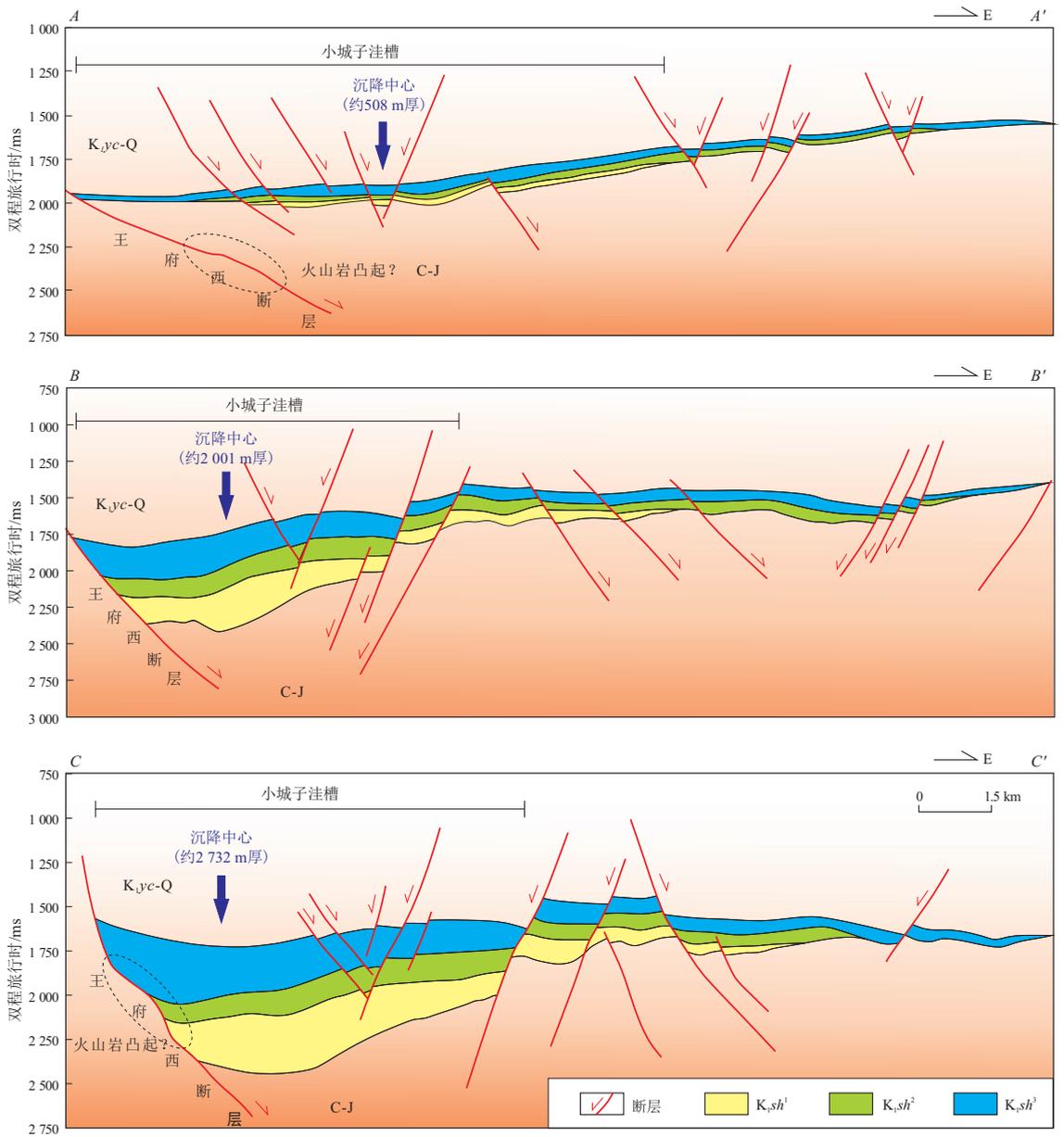


图3 松辽盆地王府断陷由北至南连续地质剖面
测线位置见图1。

Fig.3 Continuous geological profile from north to south of Wangfu Fault Depression, Songliao Basin

表1 构造物理模拟实验模型参数

Table 1 Parameters of tectonophysical simulation experiment models

模型序号	基底材料	基底厚度/cm	盖层材料	盖层厚度/cm	其他因素
①	高岭土	4	石英砂	2	无
②	高岭土	4	石英砂	2	同构造沉积
③	高岭土	3	石英砂	3	基底先存凸起

侧形成边界主干断层。虽然右侧刚性基底摩擦过大,会增加右侧次级断层的规模而造成一定误差,但不影响左侧边界正断层发育。由于研究区不存在大规模塑性地层,可以不考虑地层的黏性和伸展速度对变形过程的影响,所有模型的伸展速度统一设置为 0.002 mm/s,最终伸展率为 12%,与实际

伸展率保持一致。实验过程中在模型侧面设置高清相机,间隔固定时间记录模型剖面的变形特征。

3.2 实验结果

3.2.1 普通伸展模型

模型①(普通伸展模型)由底至顶分别铺设 4 cm厚的高岭土层和2 cm厚的石英砂层,模拟基

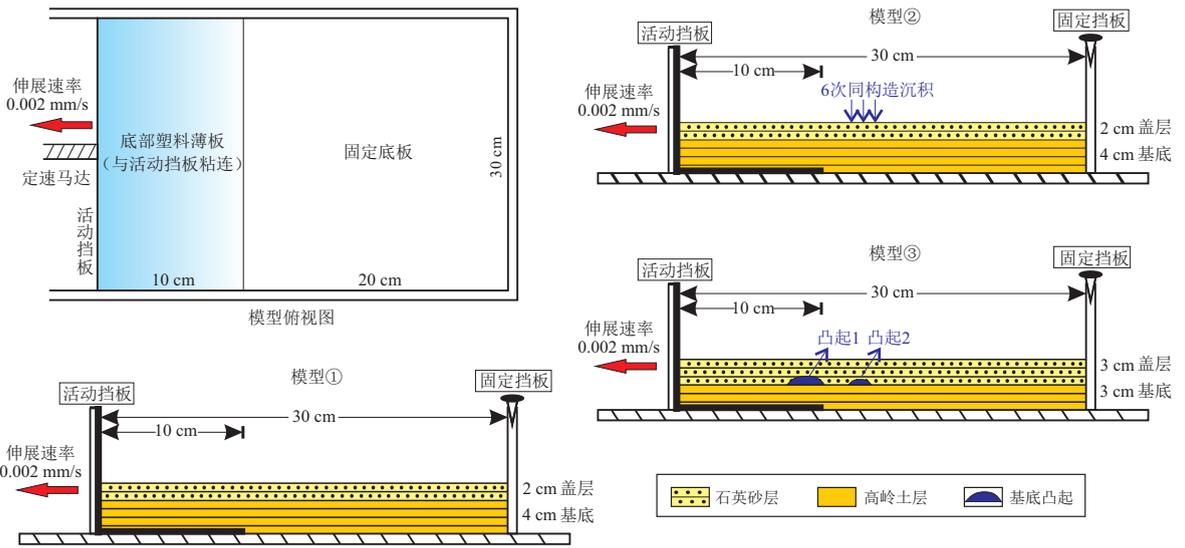


图 4 构造物理模拟实验初始模型

Fig.4 Schematic diagram of initial models of tectonophysical simulation experiments

底地层的高岭土层刚性较强、密度较大,其厚度远大于顶部刚性较弱、密度较小的石英砂层(图 5)。随着左侧活动挡板连同活动底板向左匀速拉伸,当伸展率达到 3% 时,在模型基底部分的左侧率先发育 1 条边界正断层 F_1 并向上传播,在其上盘陆续派生出若干同向或者反向的次级正断层,在同一构造应力场的递进伸展作用下,断层持续两端延伸加长,不同规模断层所夹持的断块随之下沉并发生旋转,模型中部出现断陷盆地的雏形。此时边界正断层 F_1 的倾角为 47° ,随着伸展变形不断加剧, F_1 倾角呈线性逐渐降低,直至伸展率达到 12% 时, F_1 的

倾角降低为 44° 。由此推测在相同的伸展背景下,边界正断层的倾角呈线性逐渐降低,在后续实验中该参数仍然呈现相同趋势。

3.2.2 同构造沉积伸展模型

模型②(同构造沉积伸展模型)由底至顶分别铺设 4 cm 厚的高岭土层和 2 cm 厚的石英砂层,与模型①地层的分布结构相同,为了模拟王府断陷进入断陷期后发生不同程度的同构造沉积作用,尤其是在后期发生广覆式沉积,因此当伸展率每增加 2%,在模型②顶部筛入少量不同颜色的松散石英砂直至断陷被填平补齐,并在最后一个伸展阶段全区铺设 1 cm 厚的同沉积砂层(图 6)。

自伸展率为 2% 开始,边界正断层 F_2 及其上盘的一系列次级正断层陆续形成,随着新加入的同沉积石英砂层不断将下沉的断陷盆地填平补齐,上覆砂层的重力负载也不断增大,各级别断层的生长发育难以如同之前模型向上通至表层,大多消失于同沉积层之下,当伸展率达到 10% 时,同沉积层全区覆盖,各级别断层的活动性进一步减弱,不再形成新的断层。早期被填入的同沉积层持续下沉变形的同时,又不断遭受新的同沉积层覆盖,逐渐被埋入断陷盆地底部,在顶部相应产生新的空间,各阶段同沉积层厚度最大的位置则代表构造沉降中心,反映该处构造沉降作用最强。与其他实验结果不同的是,当伸展率最终达到 12% 时,沉降中心并未出现在断陷盆地的中心位置,而是位于边界断层 F_2 和次级正断层 F_{2-1} 之间,表明同构造沉积条件下沉降中心与边界断层的相关性更强。值得关注的是,该模型各阶段的边界断层倾角均大于其他的实

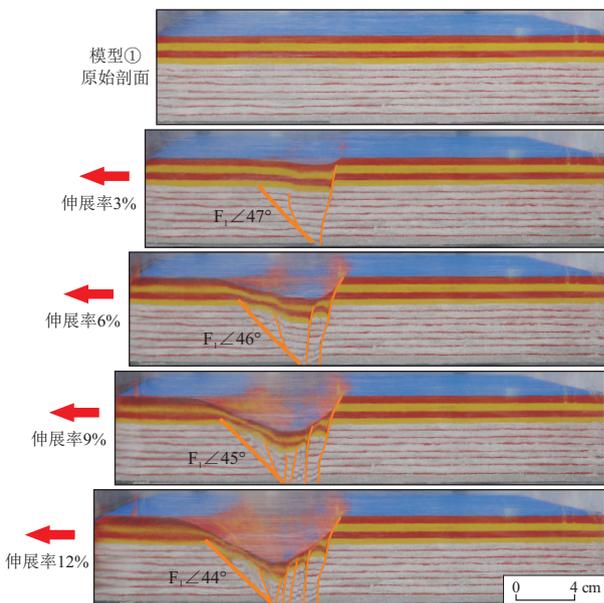


图 5 模型①的模拟实验过程剖面
 $F_1 \angle 44^\circ$ 表示边界断层倾角

Fig.5 Profiles of simulation experiment process of model 1

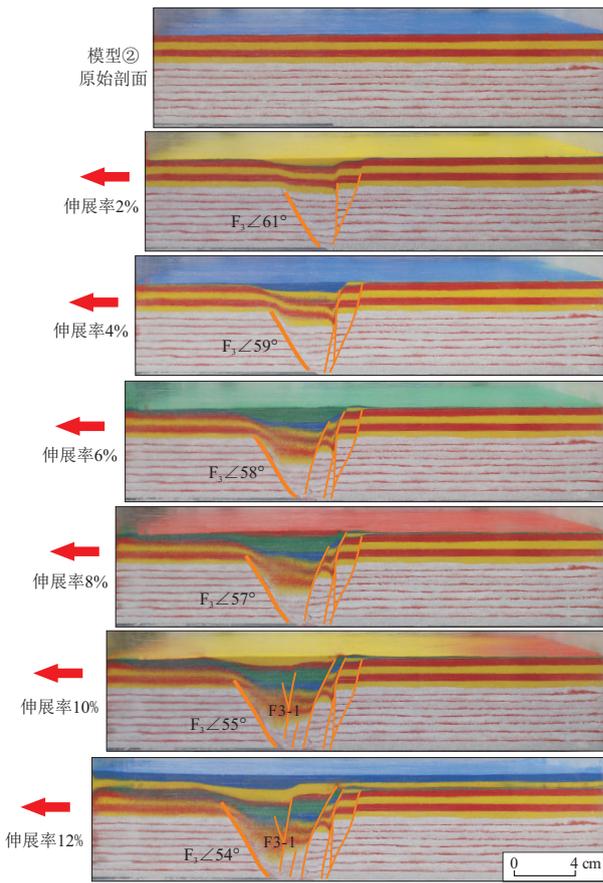


图 6 模型②的模拟实验过程剖面
 $F_2 \angle 57^\circ$ 表示边界断层倾角

Fig.6 Profiles of simulation experiment process of model 2

验模型。

3.2.3 基底凸起伸展模型

模型③(基底凸起伸展模型)由底至顶分别铺设 3 cm 厚的高岭土层和 3 cm 厚的石英砂层,基底与盖层厚度均等,选定可能发育边界断裂的位置,用与基底材料相同的高岭土预设 2 个先存丘状凸起于基底顶部,凸起高度分别为 1 cm 和 0.5 cm,以此模拟先存基底凸起对断裂变形的作用,其他条件不变(图 7)。

当伸展率达到 3% 时,边界断层 F_3 沿基底活动底板向上传播至模型左侧的预设凸起。当伸展率达到 6% 时,边界断层 F_3 完全切穿凸起并传播至表层,基底凸起被边界断层 F_3 一分为二,其中断层下盘的残留凸起由于致密坚硬,其性质与周围较为松散的上覆石英砂层存在差异,致使边界断层 F_3 在凸起附近呈现“上凸”的形态,在后续变形过程中“上凸”形态持续存在并且更加明显;而断层上盘的破碎凸起在强烈的断陷作用下不断沉降,落入凹陷底部仍然成为基底的突出部分,导致上覆石英砂层在构造沉降过程中发生弯曲,形成与之相关的

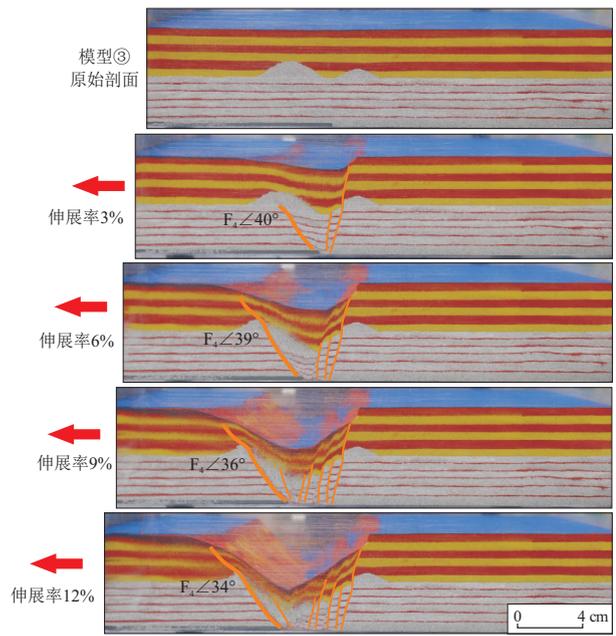


图 7 模型③的模拟实验过程剖面
 $F_3 \angle 34^\circ$ 表示边界断层倾角

Fig.7 Profiles of simulation experiment process of model 3

“上凸”形态。同时,先存凸起作为构造薄弱带,使周缘地层能够在较小的应力差异下优先产生构造变形,并导致凸起上覆石英砂层和下伏高岭土层发育数量更多的次级正断层。由此推测,先存基底凸起构造无论是发育在断层附近还是沉降至凹陷内部,都会影响断陷内的构造几何学、运动学特征。

综合多组模拟实验进行对比分析,各模型的边界断层倾角大小及其演变各不相同,同构造沉积作用和先存基底凸起对边界断层形态具有不同的影响效果。通过统计模型左侧边界正断层的最小倾角(图 8),可见各模型结果在整体上存在较大差距,其中同构造沉积作用下发育的边界断层倾角最大,先存基底凸起附近的断层倾角最小。在破裂后的伸展递进变形过程中,虽然各模型的边界正断层均呈现出倾角减小的趋势,但上述断层形态差异取

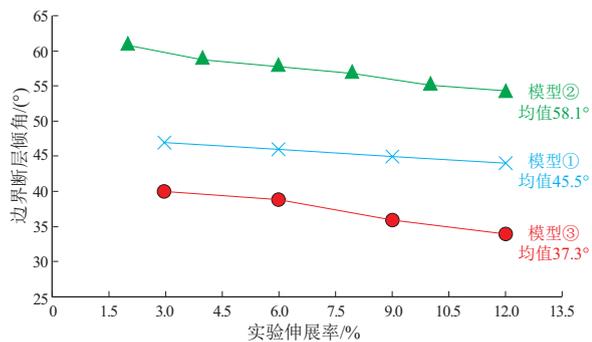


图 8 各模型边界断层倾角演化趋势
 Fig.8 Trend map of fault dip angle in the experiment models

决于生长发育时期的不同背景。

4 边界正断层形态差异成因机制

4.1 岩性横向变化

不同岩性具有不同的力学性质,前人围绕断裂变形与岩性的相关性开展了大量工作,特别是“安德森断层应力模型”揭示了在不同应力状态下,断层产状与岩石力学性质的定量关系^[41],在伸展背景下正断层的剪裂角与岩石内摩擦角呈负相关:岩石内摩擦角越大,正断层的剪裂角越小,断层倾角越大。结合王府断陷小城子洼槽的基底岩性,在断陷作用开始前,大规模、多期次的火山喷发形成了多种岩性横向变化的基底结构,南部基底主要发育致密坚硬的安山岩和流纹岩,北部基底主要由火山碎屑岩组成(图 1b)。根据岩石力学特征,南部基底岩石的内摩擦角远大于北部,结合“安德森断层应力模型”进行推断,岩石的内摩擦角越大则发育正断层的剪裂角越小,导致南部基底发育的正断层倾角应当大于北部。此外,已有研究也表明常温、常压条件下中酸性岩浆岩剪裂角约为 $10^{\circ} \sim 25^{\circ}$,而普通碎屑岩约为 $20^{\circ} \sim 45^{\circ}$ ^[41],符合王府西边界断层的倾角变化规律。因此,区域边界正断层倾角变化受控于基底岩性变化。

同一期构造背景下的断层可能发育在多种岩性的地层中,例如松辽盆地在中生代经历了多期岩浆活动,后期的沉降—沉积作用又使碎屑物在地形低洼处就近堆积,大规模的岩浆岩地层与沉积岩地层在横向上交替分布比较普遍,在王府断陷以外的其他伸展断陷区域,边界断层解析也应考虑岩性横向变化的影响。此外,我国中、西部前陆冲断带由于挤压变形强烈,深部老地层被抬升至浅层,新地层和老地层在横向上也存在较大的岩性变化,由于挤压后的应力松弛等原因也会在局部形成伸展构造背景^[14-15],除了岩浆岩和沉积岩之间的差异,晚期陆相碎屑岩和早期海相碳酸盐岩的力学性质也明显不同,大规模边界正断层若发育在由不同岩性组成的地层中,可能也会导致断层形态出现差异。

4.2 同构造沉积作用

前人研究显示,同构造沉积作用广泛存在于各类伸展断陷盆地,并反作用于同期构造变形过程^[38-39]。以王府断陷为例,连续剖面显示南部沉积地层厚度最大,同构造沉积作用大于地层较薄的北部。结合实验结果,模型②(同构造沉积伸展模型)的边界断层倾角在各阶段均大于其他模型,相比于其他控制因素,同构造沉积作用对边界断层倾

角影响较大。这可能是由于同构造沉积作用在边界正断层上盘增加了下伏地层的载荷,在底部转为向两侧膨胀的力,抑制了断层按照正常的趋势变缓。王府断陷南部沉积地层厚度最大,因此强烈同构造沉积作用可能是王府西边界断层变陡的重要原因。因此,王府西边界断层下降盘的同构造沉积作用不仅受控于断层活动,还能反作用于断层形态并影响断层倾角,同构造沉积作用越强烈,边界正断层倾角越大而变陡。

我国不同类型的伸展断陷盆地均存在同构造沉积现象^[43],表现为同一地层厚度发生变化、发育滚动背斜等特征,不同地区的同构造沉积强度也有差异,但是对断层形态的影响研究较少。本文研究揭示了同构造沉积作用对于边界正断层的反作用,对油区构造解析及构造控藏分析具有一定的借鉴意义。在我国东部的渤海湾盆地、松辽盆地等大型含油气盆地中,不同期次的边界正断层能够控制烃源岩和储层的发育,与烃源岩成熟演化密切相关,与含油气系统的时空匹配关系更是非常关键,类似地区的断层解释及演化恢复,应考虑同构造沉积作用使边界正断层倾角变大造成的影响效果。

4.3 基底凸起

岩浆活动广泛发育于我国各大含油气盆地,并参与到盆地构造演化过程中^[9-11,15,44-47]。随着盆地勘探逐渐精细化,深层构造模型的建立为浅层构造解析提供更加丰富可靠的依据,盆地基底可能影响晚期构造的几何学、运动学特征^[43,48]。然而,与断层形态相关的火山岩基底凸起尚未获得足够的关注。侏罗纪时期,王府断陷大规模、多期次岩浆活动致使火山岩基底地貌凹凸不平,上覆沉积地层和晚期构造发育在许多致密坚硬的火山岩凸起之上^[24],但现有的地震资料品质较差,难以对火山岩体进行有效识别,地质剖面却显示,王府西断层的断面在局部位置呈现出“上凸”形态(图 3a 和图 3c 虚线内)。结合模型③(基底凸起伸展模型)的边界断层演化规律,表明边界断层若延伸到相对坚硬的基底凸起,则会受其阻挡而改变延伸趋势,断层顶端绕过凸起后继续向上传播,因此基底先存凸起可以成为改变断层形态的合理因素。据此推测王府西边界断层在延伸过程中很可能遭遇此类火山岩凸起,无法将凸起切割而“绕行”,才导致断层在局部明显突变而呈现出“上凸”形态,而凸起或许位于断层弯曲部位的下盘。

在我国许多复杂构造带,早期岩浆活动在深部形成先存凸起,周缘断裂的形态很可能与之密切相

关^[49]。例如准噶尔盆地石炭系火山岩广泛分布,其中准噶尔盆地南缘于晚古生代时期曾出现伸展构造背景,石炭系火山岩凸起边缘发育二叠纪断陷的边界正断层^[50],从地震资料上判断断层纵向可能为“上凸”形态,限于地震资料品质及缺乏井资料验证,暂无法证实该观点。本次边界断层研究中所获规律,从侧面证实了这一解释方案。本文揭示了基底先存凸起对周缘断层形态的特殊影响,丰富了先存凸起构造对晚期变形的复杂性认识,对此类地质背景下的断层解析具有一定的借鉴意义。断层发育形态可能还存在其他影响因素,笔者将会持续关注。

5 结论

(1)根据断层活动强度可以划分为4个构造演化阶段:初始断陷、强烈断陷、弱断陷和萎缩断陷。近南北向的王府西边界断层活动性最强,但在走向上存在差异性,北部断层倾角较小而平缓,向南倾角逐渐增大而变陡。另外,断层在局部呈现“上凸”形态。

(2)综合构造物理模拟和实际地质背景表明,边界正断层形态受控于岩性横向变化、同构造沉积作用和基底先存凸起等3个主要因素,边界正断层若同时发育在不同岩性的地层中,或者伴随强烈的同构造沉积作用,都会导致断层倾角发生改变。此外,断层若延伸到坚硬的基底凸起附近会改变延伸趋势,绕过其顶端继续传播,导致在局部呈现出“上凸”形态。边界正断层形态或许还存在其他影响因素,有待于继续探讨。

参考文献:

[1] 单俊峰,陈昌,周晓龙,等.辽河坳陷安一大注断裂带新生代构造演化及油气成藏[J].特种油气藏,2021,28(6):11-19.
SHAN Junfeng, CHEN Chang, ZHOU Xiaolong, et al. Cenozoic tectonic evolution and hydrocarbon accumulation of Taian-Dawa Fault Zone, Liaohe Sag[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(6):11-19.

[2] 刘欢,许长海,申雯龙,等.东海丽水凹陷构造转移带特征及其油气地质意义[J].油气地质与采收率,2021,28(4):12-22.
LIU Huan, XU Changhai, SHEN Wenlong, et al. Characteristics of transfer zones in Lishui Sag, East China Sea and its significance for petroleum geology [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(4):12-22.

[3] 王东晔.临南地区扭张构造形成机制及其控藏作用[J].油气地质与采收率,2021,28(2):60-67.
WANG Dongye. Formation and evolution of transensional structure

and its hydrocarbon accumulation control in Linnan area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2):60-67.

- [4] BRAUN J, BATT G E, SCOTT D L, et al. A simple kinematic model for crustal deformation along two- and three-dimensional listric normal faults derived from scaled laboratory experiments[J]. Journal of Structural Geology, 1994, 16(10):1477-1490.
- [5] 单帅强,何登发,方成名,等.渤海湾盆地冀中坳陷高阳低凸构造特征及成因机制[J].石油实验地质,2022,44(6):989-996.
SHAN Shuaiqiang, HE Dengfa, FANG Chengming, et al. Structural characteristics and genetic mechanism of Gaoyang Low Uplift in Jizhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6):989-996.
- [6] BYERLEE J. Friction of rocks[J]. Pure and Applied Geophysics, 1978, 116(4/5):615-626.
- [7] TONG Hengmao, YIN An. Reactivation tendency analysis: a theory for predicting the temporal evolution of preexisting weakness under uniform stress state[J]. Tectonophysics, 2011, 503(3/4):195-200.
- [8] TONG Hengmao, KOYI H, ZHAO H, et al. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models [J]. Tectonophysics, 2014, 626:197-212.
- [9] 漆家福,杨桥.伸展盆地的结构形态及其主控动力学因素[J].石油与天然气地质,2007,28(5):634-640.
QI Jiafu, YANG Qiao. Structural styles of extensional basins and their main controlling factors of dynamics[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5):634-640.
- [10] 漆家福,杨桥.陆内裂陷盆地构造动力学分析[J].地学前缘,2012,19(5):19-26.
QI Jiafu, YANG Qiao. Dynamic analysis of continental rifting basin[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5):19-26.
- [11] 桂宝玲.伸展盆地构造几何学、运动学:以渤海湾盆地廊固凹陷为例[D].北京:中国地质大学(北京),2011.
GUI Baoling. The structural geometry and kinematics of extensional basin: an example from Langfang-Gu'an Depression, Bohai Gulf Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2011.
- [12] SCHÖPFER M P J, CHILDS C, WALSH J J. Localisation of normal faults in multilayer sequences [J]. Journal of Structural Geology, 2006, 28(5):816-833.
- [13] 冯阵东,戴俊生,张继标,等.伸展构造物理模拟中存在的问题及解决办法[J].中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(3):7-11.
FENG Zhendong, DAI Junsheng, ZHANG Jibiao, et al. Problems and solutions in physical simulation of extensional structures[J]. Journal of China University of Petroleum, 2011, 35(3):7-11.
- [14] 侯贵廷,钱祥麟,蔡东升.渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J].北京大学学报(自然科学版),2001,37(6):845-851.
HOU Guiting, QIAN Xianglin, CAI Dongsheng. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6):845-851.
- [15] 周建波,张兴洲,马志红,等.中国东北地区的构造格局与盆

- 地演化[J].石油与天然气地质,2009,30(5):530-538.
- ZHOU Jianbo, ZHANG Xingzhou, MA Zhihong, et al. Tectonic framework and basin evolution in Northeast China[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(5): 530-538.
- [16] 刘伟,唐大卿,陈明月,等.松辽盆地南部孤店断陷断裂构造特征及演化[J].断块油气田,2022,29(6):816-823.
- LIU Wei, TANG Daqing, CHEN Mingyue, et al. Fault structure characteristics and evolution in the Gudian Fault Depression, southern Songliao Basin [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2022, 29(6): 816-823.
- [17] 邓铭哲,左宗鑫,邱岐,等.松辽盆地南部梨树断陷正断层演化特征[J].石油实验地质,2021,43(2):288-296.
- DENG Mingzhe, ZUO Zongxin, QIU Qi, et al. Normal fault evolution in Lishu Fault Depression, southern Songliao Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 288-296.
- [18] 李建忠,郑民,张国生,等.中国常规与非常规天然气资源潜力及发展前景[J].石油学报,2012,33(S1):89-98.
- LI Jianzhong, ZHENG Min, ZHANG Guosheng, et al. Potential and prospects of conventional and unconventional natural gas resource in China [J]. Acta Petroli Sinica, 2012, 33(S1): 89-98.
- [19] 蒋飞,李忠诚,程日辉,等.王府断陷小城子气田火石岭组气藏天然气成藏模式及富集规律[J].天然气工业,2016,36(10):46-55.
- JIANG Fei, LI Zhongcheng, CHENG Rihui, et al. Natural gas accumulation models and enrichment patterns of the Huoshiling Fm reservoirs in the Xiaochengzi Gas Field, Wangfu Fault Depression, Songliao Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(10): 46-55.
- [20] 潘红卫,石存英,王晶森,等.王府断陷天然气藏的识别[J].石油地球物理勘探,2012,47(S1):97-102.
- PAN Hongwei, SHI Cunying, WANG Jingmiao, et al. Gas reservoir identification in Wangfu Fault Depression [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(S1): 97-102.
- [21] 王玉学,张为民,丛玉梅,等.王府断陷断裂特征及其对深层火山岩气藏的控制作用研究[J].岩石学报,2018,34(7):2189-2199.
- WANG Yuxue, ZHANG Weimin, CONG Yumei, et al. The fault characteristics of the Wangfu Fault Depression and its controlling effects on deep-seated volcanic gas reservoir [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(7): 2189-2199.
- [22] 张君峰,徐兴友,白静,等.松辽盆地南部白垩系青一段深湖相页岩油富集模式及勘探实践[J].石油勘探与开发,2020,47(4):637-652.
- ZHANG Junfeng, XU Xingyou, BAI Jing, et al. Enrichment and exploration of deep lacustrine shale oil in the first member of Cretaceous Qingshankou Formation, southern Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 637-652.
- [23] WANG Pujun, CHEN Shumin. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China [J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(3): 499-523.
- [24] 王璞珺,赵然磊,蒙启安,等.白垩纪松辽盆地:从火山裂谷到陆内拗陷的动力学环境[J].地学前缘,2015,22(3):99-117.
- WANG Pujun, ZHAO Ranlei, MENG Qi'an, et al. The Cretaceous Songliao Basin: dynamic background from volcanic rift to interior sag basin [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 99-117.
- [25] 黄翠叶,申维.松辽盆地东南隆起区深层断陷的构造特征及其对油气勘探的意义[J].地质通报,2007,26(7):841-848.
- HUANG Cuiye, SHEN Wei. Structural characteristics of deep fault depressions in the southeastern uplift area of the Songliao Basin, China and their significance for petroleum exploration [J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(7): 841-848.
- [26] GUO Zhanqian, WANG Xianbin, LIU Wenlong. Reservoir-forming features of abiogenic origin gas in Songliao Basin [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1997, 40(6): 621-626.
- [27] 赵志魁,张金亮,赵占银,等.松辽盆地南部坳陷湖盆沉积相和储层研究[M].北京:石油工业出版社,2009.
- ZHAO Zhikui, ZHANG Jinliang, ZHAO Zhanyin, et al. Reservoir sedimentology in southern Songliao Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [28] 葛荣峰,张庆龙,王良书,等.松辽盆地构造演化与中国东部构造体制转换[J].地质论评,2010,56(2):180-195.
- GE Rongfeng, ZHANG Qinglong, WANG Liangshu, et al. Tectonic evolution of Songliao Basin and the prominent tectonic regime transition in eastern China [J]. Geological Review, 2010, 56(2): 180-195.
- [29] KRANTZ R W. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures [J]. Tectonophysics, 1991, 188(1/2): 203-207.
- [30] SCHELLART W P. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling [J]. Tectonophysics, 2000, 324(1/2): 1-16.
- [31] 李强,柳广弟,宋泽章,等.川中古隆起北斜坡构造演化及其对震旦系—寒武系油气成藏的控制[J].石油实验地质,2022,44(6):997-1007.
- LI Qiang, LIU Guangdi, SONG Zezhang, et al. Influence of tectonic evolution of the northern slope in the central Sichuan paleo-uplift on the Sinian-Cambrian hydrocarbon accumulations [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(6): 997-1007.
- [32] 罗群,王仕琛,贾春,等.断控气藏的动态成藏物理模拟与启示:以柴达木盆地西北地区典型气藏为例[J].石油实验地质,2022,44(5):790-803.
- LUO Qun, WANG Shichen, JIA Chun, et al. Physical simulation of dynamic accumulation of fault-controlled gas reservoirs and its implications: a case study of typical gas reservoirs in northwestern part of Qaidam Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(5): 790-803.
- [33] 吴宇翔,柳保军,张春生,等.珠江口盆地白云凹陷古近纪挠曲缓坡带三角洲沉积过程响应水槽模拟[J].石油实验地质,2022,44(3):476-486.
- WU Yuxiang, LIU Baojun, ZHANG Chunsheng, et al. Flume simulation of response of deltaic sedimentary process to Paleogene flexural gentle slope belt in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea [J]. Petroleum Geology &

- Experiment, 2022, 44(3): 476-486.
- [34] 徐宏远, 孙玮, 邵红君, 等. 西昌地区米市盆地构造特征及构造演化模拟[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(5): 64-73.
XU Hongyuan, SUN Wei, SHAO Hongjun, et al. Tectonic characteristics and tectonic evolution simulation in Mishi Basin, Xichang area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(5): 64-73.
- [35] 王瑾, 冯建伟, 蒋榕韬, 等. 东营凹陷东辛断裂带联合应力场构造物理模拟[J]. 断块油气田, 2021, 28(1): 78-83.
WANG Jin, FENG Jianwei, JIANG Rongtao, et al. Structural physical simulation of combined stress mechanism of Dongxin fault zone in Dongying Depression[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(1): 78-83.
- [36] LOHRMANN J, KUKOWSKI N, ADAM J, et al. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges[J]. Journal of Structural Geology, 2003, 25(10): 1691-1711.
- [37] LONG Wei, LI Zhongquan, LI Ying, et al. Experimental insights on the structural patterns and their formation mechanisms of the Xujiaweizi Fault Depression in the Songliao Basin[J]. Journal of Earth Science, 2018, 29(2): 369-375.
- [38] 周建勋, 漆家福, 董亨茂, 等. 盆地构造研究中的砂箱模拟实验方法[M]. 北京: 地震出版社, 1999.
ZHOU Jianxun, QI Jiafu, DONG Hengmao, et al. Sandbox simulation method in basin structure research[M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [39] 蔺鹏, 吴胜和, 胡光义. 被动陆缘盆地逆冲、底辟构造对深水区层序结构的控制: 以尼日尔三角洲盆地某深水区为例[J]. 天然气工业, 2022, 42(9): 21-34.
LIN Peng, WU Shenghe, HU Guangyi. Control of thrust and diapir structures on deep-water sequence architectures in passive continental margin basins: a case study on a deep-water zone in the Niger Delta Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(9): 21-34.
- [40] 王心雨. 硝酸镉对高岭土力学及电化学特性影响的试验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
WANG Xinyu. Experimental study on mechanical properties and electrochemical properties of cadmium nitrate contaminated kaolin[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [41] 漆家福, 陈书平. 构造地质学(富媒体)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
QI Jiafu, CHEN Shuping. Structural geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [42] CORVER M P, DOUST H, VAN WEES J D, et al. Source-rock maturation characteristics of symmetric and asymmetric grabens inferred from integrated analogue and numerical modeling: the southern Viking Graben (North Sea)[J]. Marine and Petroleum Geology, 2011, 28(4): 921-935.
- [43] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 1-12.
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 1-12.
- [44] 王绪诚, 陈维涛, 何叶, 等. 珠江口盆地惠西南地区古新世火山机构对有利储层的控制作用[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 466-475.
WANG Xucheng, CHEN Weitao, HE Ye, et al. Control of Paleocene volcanic edifice on favorable reservoirs: a case study of the southwestern Huizhou Sag, Pearl River Mouth Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 466-475.
- [45] 黄芸, 梁舒艺, 杨迪生, 等. 原生韵律型火山岩储层特征及主控因素[J]. 特种油气藏, 2021, 28(6): 54-61.
HUANG Yun, LIANG Shuyi, YANG Disheng, et al. Characteristics and main controlling factors of primary rhyolite volcanic reservoir[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(6): 54-61.
- [46] 宁超众, 李勇, 邓晓娟, 等. 哈拉哈塘地区热液岩溶形成演化与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 399-409.
NING Chaozhong, LI Yong, DENG Xiaojuan, et al. Formation and evolution of hydrothermal karst and hydrocarbon distribution in Halahatang area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(4): 399-409.
- [47] 许廷生. 渤海湾盆地岩浆侵入活动与油气成藏特征[J]. 特种油气藏, 2021, 28(1): 81-85.
XU Tingsheng. Research on the magmatic intrusion and oil and gas reservoir forming characteristics in Bohai Bay Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(1): 81-85.
- [48] 董树文, 张岳桥, 龙长兴, 等. 中国侏罗纪构造变革与燕山运动新诠释[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1449-1461.
DONG Shuwen, ZHANG Yueqiao, LONG Changxing, et al. Jurassic tectonic revolution in China and new interpretation of the Yanshan Movement[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1449-1461.
- [49] WANG Yanjun, JIA Dong, PAN Jianguo, et al. Multiple-phase tectonic superposition and reworking in the Junggar Basin of northwestern China: implications for deep-seated petroleum exploration[J]. AAPG Bulletin, 2018, 102(8): 1489-1521.
- [50] 张希晨, 马德龙, 魏凌云, 等. 准噶尔盆地南缘呼图壁背斜变形机理物理模拟实验[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(1): 120-126.
ZHANG Xichen, MA Delong, WEI Lingyun, et al. Deformation mechanism of Hutubi Anticline in the southern margin of Junggar Basin: insights from physical simulation experiment[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(1): 120-126.

(编辑 韩 或)