

苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组断层形成过程 及其砂箱物理模拟

唐旭^{1,2}, 孙永河^{1,3}, 胡慧婷^{1,3}, 于雯泉⁴, 唐海氢⁵

[1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249;
3. 东北石油大学“断裂控藏”CNPC 重点实验室, 黑龙江 大庆 163318; 4. 中国石化 江苏油田分公司 勘探开发研究院,
江苏 扬州 225009; 5. 中国石油 华北油田分公司 第三采油厂, 河北 河间 062450]

摘要:高邮凹陷阜宁组断层发育对凹陷演化过程及油气富集具有重要意义。高邮凹陷东部发育大量多米诺式组合的NW倾向断层,西部发育“V”字型组合的NW及SE倾向的断层,断层发育特征的差异指示断层形成过程不同,不同区带断层形成机制尚不明确。通过三维地震解释、识别不整合面及残余地层,结合位移-埋深曲线分析、构造演化分析,证明了高邮凹陷边界断层在阜宁组为非同沉积断层,对凹陷内部次级断层的形成没有明显控制作用。凹陷东、西部不同组合类型的阜宁组断层均在NW-SE向统一应力场下形成,主要活动时期均为阜宁组沉积末期,在活动性上具有统一性。依据断裂解析结论及相似性原则,设计两组物理模拟实验。实验结果表明,高邮凹陷西部“V”字型断层组合受双侧伸展作用形成,而东部多米诺式断层组合受单侧伸展作用控制,与东部斜坡背景无关。两组实验结果合理地解释了断层组合模式差异性的成因。区域上,戴南组沉积之前高邮凹陷与北部临泽凹陷为同一凹陷,凹陷形态西窄东宽,在伸展变形时期盆地两侧应力向中心传播速度不同,导致不同地区发育不同倾向断层的叠覆区域范围有所差异。

关键词:断层组合样式;断层活动性;形成过程;物理模拟;阜宁组;古近系;高邮凹陷;苏北盆地

中图分类号:TE121.1

文献标识码:A

Fault development and its analogue modeling in the Paleogene Funing Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin

Tang Xu^{1,2}, Sun Yonghe^{1,3}, Hu Huiting^{1,3}, Yu Wenquan⁴, Tang Haiqing⁵

[1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;
2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
3. Laboratory of CNPC Fault Controlling Reservoir, Northeast Petroleum University, Daqing, Heilongjiang 163318, China;
4. Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China;
5. The 3rd Oil Production Plant of Huabei Oilfield Company, PetroChina, Hejian, Hebei 062450, China]

Abstract: The study of fault development characteristics of the Funing Formation in Gaoyou Sag is of great significance to the understanding of the sag evolution and oil-gas enrichment. There are a large number of domino-type faults dipping NW in the east of the sag, and V-shaped faults dipping NW and SE in the west of the sag. The difference in fault development characteristics indicates different fault formation processes, and the fault formation mechanisms in different zones are yet to be clarified. Through three-dimensional seismic interpretation, unconformity and residual stratum identification, combined with displacement-depth curve and structural evolution analyses, it is proven that the boundary faults in the Funing Formation of Gaoyou Sag are non-syn depositional, thus having no obvious control on the formation of secondary faults in the sag. All faults of different assemblages in the east and west of the sag are formed under uniform stress field striking NW-SE, with main activities occurring at the end of the Funing Formation deposition. Two sets of

收稿日期:2019-01-10;修订日期:2021-03-02。

第一作者简介:唐旭(1994—),男,硕士研究生,盆地构造解析。E-mail:415190403@qq.com。

通讯作者简介:孙永河(1979—),男,教授、博士生导师,含油气盆地构造分析及控藏作用。E-mail:syh79218@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572127);国家科技重大专项(2016ZX05006-005)。

physical simulation experiments were therefore designed according to the analytic conclusion of faults and the principle of similarity. The experimental results show that the V-shaped fault assemblage in the west is formed under bilateral extension, while the domino fault assemblage in the east is controlled by unilateral extension and has no link to the eastern slope. The results of the two sets of experiments can reasonably explain the causes of the differential fault assemblage patterns. Geographically, before the deposition of Dainan Formation, Gaoyou Sag was in the same sag with Linze Sag in the north of the basin that is characterized by a narrow west and wide east. During the extensional deformation period, the stress propagation velocity on both sides of the basin to the center was different, leading to the differential overlapping zones with faults striking to various directions in different areas.

Key words: fault assemblage pattern, fault activity, formation process, analogue modeling, Funing Formation, Paleogene, Gaoyou Sag, Subei Basin

高邮凹陷作为苏北盆地探明程度最高的凹陷,其构造演化特征一直是研究焦点^[1-5]。高邮凹陷阜宁组为重要的油气富集层位,其发育的大量断层对油气的运移及圈闭的形成起到了重要作用。前人对于阜宁组断层的研究侧重于断层的几何学特征,然而对于该时期凹陷结构及断层成因机制上,不同观点尚未统一。陈安定^[6]认为高邮凹陷在泰州组-阜宁组沉积期为拗陷结构,吴堡运动使凹陷局部发生剥蚀;能源等^[7]认为高邮凹陷在泰州组-阜宁组沉积期经历拗断-断拗两个阶段;朱光等^[8]、姜芹芹等^[9]认为泰州组-阜宁组沉积期为分散断陷阶段。在阜宁组断裂成因上,朱光等^[8]认为真①、吴①两条边界断裂为两组不同走向的基底断裂复活形成,凹陷内大量断裂也为基底复活产生;吴林和陈清华^[10]认为高邮凹陷基底断裂发育密度低,并将真①、吴①断层合并考虑,认为吴①断层为真①断层的派生断层,活动时期晚于真①断层。对于阜宁组发育的不同组合样式的次级断层成因,前人研究中暂未给出合理解释。本文在高精度三维地震解释资料的基础上,通过对不整合面及残余地层识别,明确了主干边界断层在阜宁组沉积期的活动特征,确定边界断层与次级断层相互作用关系,同时总结了阜宁组断层的几何学特征,并通过断层位移-埋深曲线及生长指数对断层活动规律进行定量表征,厘定断层形成时期,结合物理模拟实验对阜宁组断层的初次活动成因进行验证。

1 区域地质概况

苏北盆地位于扬子板块北缘,自三叠纪开始经历多期次挤压、伸展等构造作用,最终形成中-新生代伸展型盆地^[1-5]。成盆前复杂的构造演化形成大量 NNE-NEE 走向基底断裂,其中规模较大的基底断裂作为凹陷边界断裂,将苏北盆地分割为多个次级凹陷^[9];部

分规模较小的基底断裂在晚期伸展作用下再活动,控制盆地内部次级断层走向和分布^[8]。

高邮凹陷位于苏北盆地南部,北接柘垛低凸起,南临通扬隆起,西至菱塘桥低凸起,东至吴堡低凸起,是典型的单断式凹陷^[11-13](图1)。凹陷内部自南向北可划分为断阶带、深凹带和斜坡带3个次级构造单元。断阶带主要发育于真①与真②断层、吴①与吴②断层之间,断层剖面呈北掉式阶梯状组合;深凹带为真②、汉留断层上盘形成的地堑式构造;深凹带以北为北部斜坡带。本文所研究的阜宁组断层主要发育于斜坡带。

高邮凹陷沉积中生代末期和新生代地层,自下而上沉积泰州组(K_2t)、阜宁组(E_1f)、戴南组(E_2d)、三垛组(E_2s)、盐城组(Ny)和东台组(Qd)。平面上,可依据边界断层走向将凹陷划分为东、西两部分,分别发育 NNE、NEE 走向边界断层(图3)。凹陷演化过程中经历了两期较大规模的抬升剥蚀,分别为吴堡运动和三垛运动^[9]。对应不整合面为阜宁组顶部的 T_3^0 界面及三垛组顶部的 T_2^0 界面^[6],这两大不整合面将凹陷分为上、中、下3层结构,上构造层内地层广泛沉积,整体厚度较稳定,基本不发育断层;中构造层内地层呈南厚北薄的楔形半地堑结构,边界断层控制该时期的沉积中心,盆内发育多组对倾、背倾断层;下构造层地层厚度稳定,断层数量最多,且凹陷东、西部差异明显,西部地层产状接近水平,南倾和北倾断层均有发育,东部地层北高南低,断层主要为北倾。

地震剖面显示(图2),在高邮凹陷西部,阜宁组产状趋近于水平,地层厚度基本保持一致;东部阜宁组产状逐渐转为倾斜,地层厚度变化不大,直到北部高部位阜宁组厚度减薄,这与阜宁组沉积后吴堡运动造成的局部剥蚀有关。该时期地层为全凹陷近等厚广泛沉积,标志着阜宁组沉积期高邮凹陷处于相对稳定的沉积环境,构造运动不强烈,边界大断层(真①、吴①断层)在这一时期活动不明显。

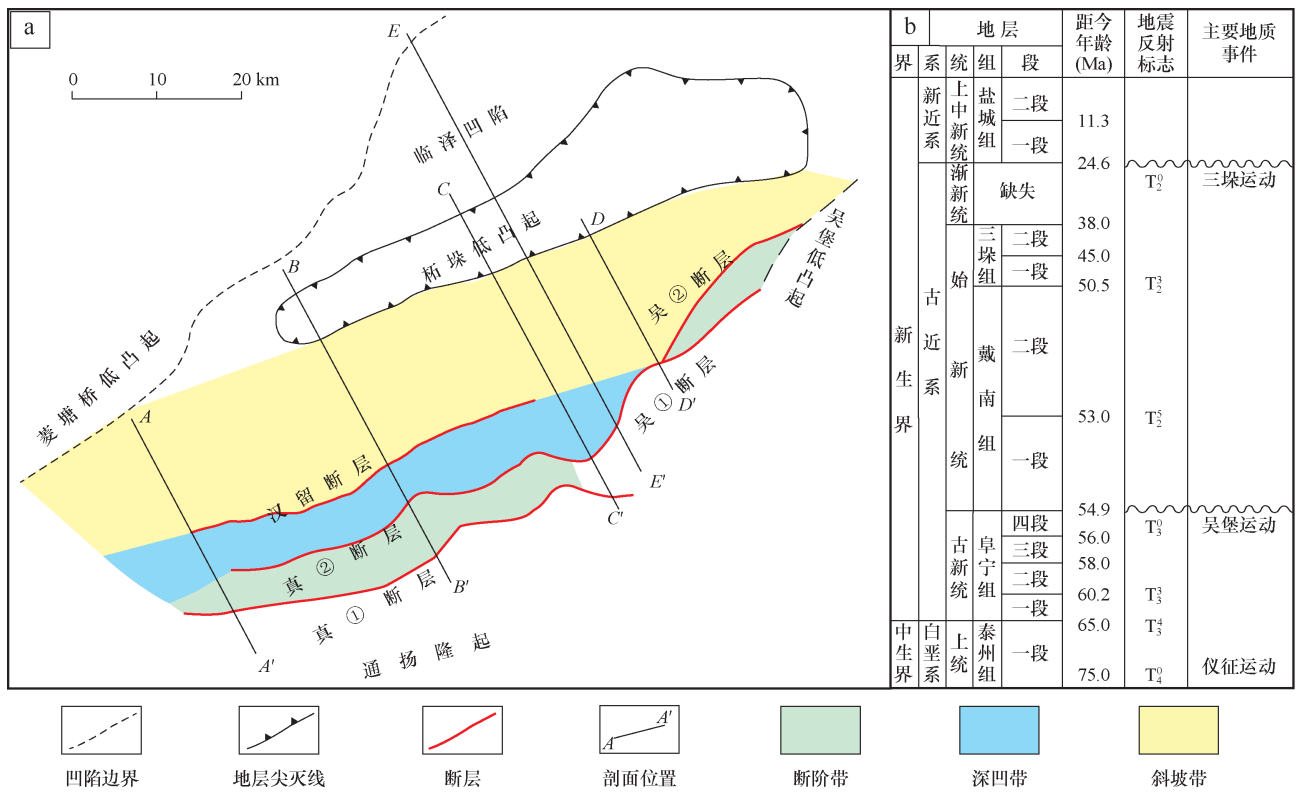


图1 高邮凹陷构造简图(a)及地层柱状图(b)
Fig. 1 Structure diagram (a) and stratigraphic column (b) of Gaoyou Sag

2 阜宁组断层发育特征和活动规律

2.1 断层发育特征

高邮凹陷全区阜宁组发育约 900 条断层,断层发育最为密集(图 3)。南侧边界断层为真①和吴①断层。其中真①断层大致可分为两段,西段断层走向近 EW 向,东段断层走向有一定偏转,但整体保持 NEE-NE 走向;吴①断层在平面走向上也有一定偏转,整体为 NE-NNE 走向。吴①断层端部与真②断层弧形连接。除去边界断层及控陷断层,其余阜宁组断层具有发育数量多、平面延伸短、发育密度大的特点。这些断层整体走向为 NE-NEE,局部地区发育近 EW 向断层;平面延伸长度在 10 km 以下的断层发育数量众多,延伸长度 10 km 以上断层发育较少;由于深凹带的影响,凹陷西部断层发育密度相对较小,约为 0.18 条/km²,东部斜坡区断层发育密度大,约为 0.24 条/km²。断层主要为平行式平面组合,局部地区发育帚状、网状、斜交及弧形连接式组合,这些组合模式在高邮凹陷东部、西部均有发育,平面分带特征不明显。

在断层剖面形态上(图 2),控凹边界断层为自西向东倾角逐渐增大的铲式正断层,其余阜宁组断层大

多数为平直的板式正断层,由于斜坡影响,东部断层倾角略低于西部。断层倾向上,凹陷东部 NW 倾向断层占主导,西部发育 NW 倾向和 SE 倾向断层。阜宁组断层大部分位于 T₃⁰ 反射层之下,有少量断层切穿 T₃⁰ 反射层,延伸至上部戴南、三垛组。断层剖面组合样式具有明显分区性,多米诺式组合主要发育于凹陷东部,而凹陷西部则发育多组对倾式“V”字型组合。为了探究不同区域断层组合样式差异性的成因,需要在运动学上对断层进行进一步剖析,同时需明确边界断层在阜宁组沉积期的活动规律,确定边界断层与阜宁组其他断层的相互作用关系。

2.2 边界断层活动性

一般而言,断陷盆地的边界断层具有发育规模大、断层断距大、活动时间长的特征。断陷期边界断层的同沉积活动控制着凹陷整体形态,且对凹陷内部次级断层的产状也有一定影响。判断边界断层的同沉积活动时期,主要依据各时期沉积地层结构特征,以及该时期断层上盘地层厚度是否大于下盘地层厚度两方面分析。但造成断层上盘厚度大于下盘的原因也可能与剥蚀作用有关,若断层在地层沉积后发生活动,同时断层下盘地层遭受较大剥蚀,此时形成的剖面结构与断层同沉积活动形成的剖面结构基本一致。因此,判断边

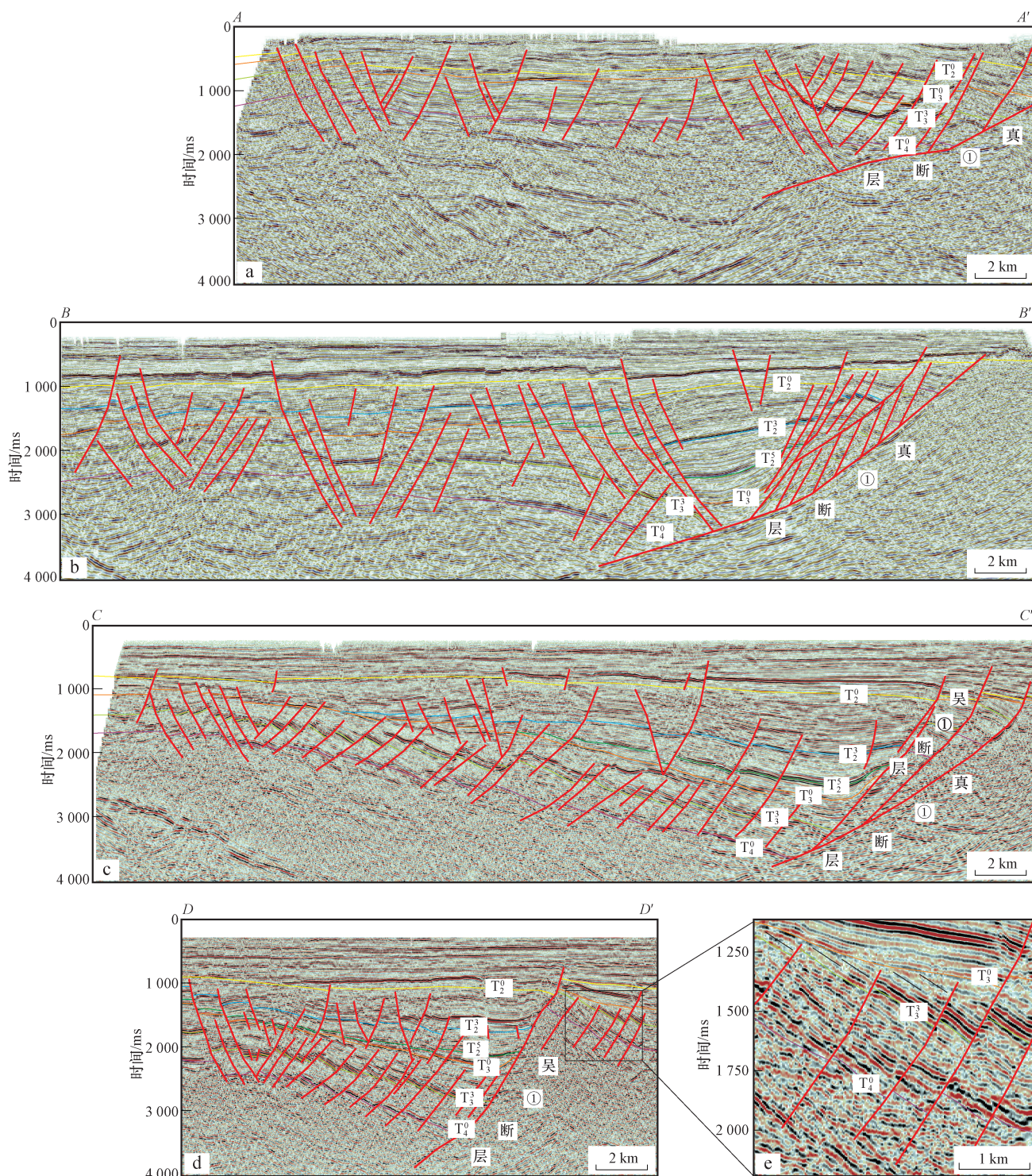


图2 高邮凹陷地震解释剖面对比

Fig.2 Section correlation of seismic interpretations in the Gaoyou Sag

a—d. 高邮凹陷自西向东不同位置地震解释剖面; e. DD'地震剖面吴①断层下盘局部放大

界断层是否为同沉积断层, 还需考虑剥蚀作用的影响。

高邮凹陷东部边界断层为吴①断层, 断层下盘泰州、阜宁组厚度明显小于上盘(图2c, d)。对DD'剖面局部放大(图2e), 可识别到断层下盘阜宁组与上覆地层呈明显角度不整合接触, 剥蚀作用强烈, 这说明吴①

断层在阜宁组沉积期为非同沉积断层。将吴①断层两盘地层对比发现, 断层两盘的次级断层在形态、断距、组合样式上基本一致, 为同一条件下形成, 吴①断层对次级断层的影响较小。阜宁组沉积后吴①断层发生活动, 使下盘地层遭受剥蚀, 剥蚀作用由东向西逐渐增

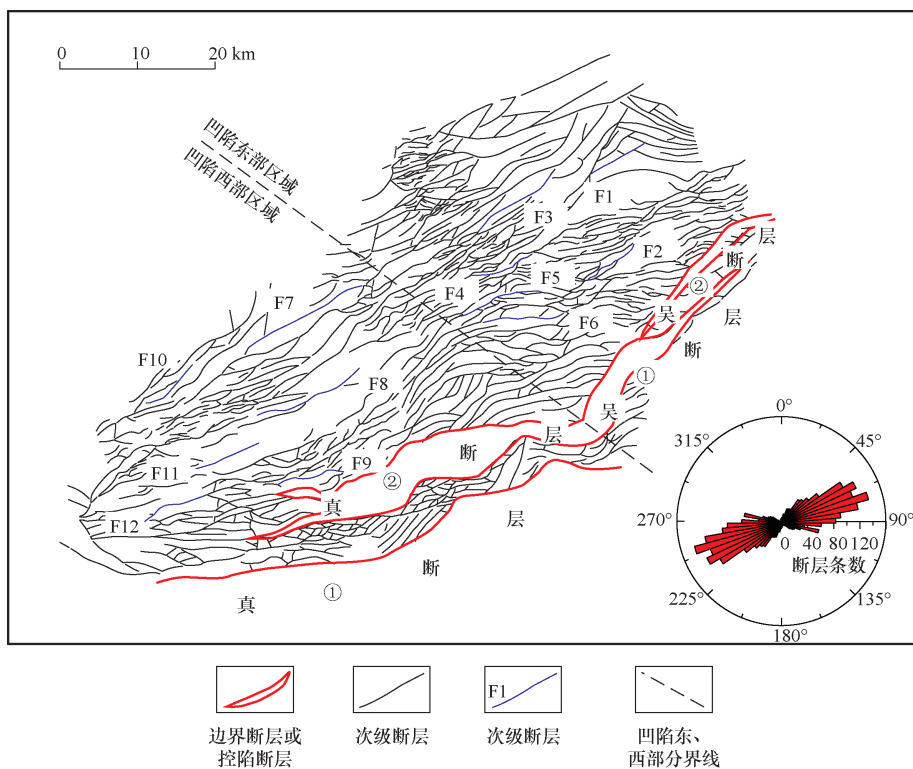


图3 高邮凹陷 T_3 反射层(阜宁组一段顶部)断裂分布及断裂走向统计

Fig. 3 Fault distribution and strikes on T_3 layer (top of the first member of the Funing Formation) in Gaoyou Sag

强,断层下盘残余地层厚度逐渐减薄。

高邮凹陷西部边界断层为真①断层,通过 AA'剖面(图 2a)可知,真①断层倾角较低,可能为三叠纪挤压时期形成的逆冲基底断裂,在处于伸展环境的阜宁组沉积期,断层发生拆离滑脱作用,水平断距较大,但对凹陷结构影响较小。为了进一步探究凹陷不同地区演化的差异性,在凹陷东、西部选择两条典型剖面对泰州、阜宁组沉积期编制构造演化剖面,明确凹陷演化过程(图 4,图 5)。

高邮凹陷东部断层相对密集。沉积初始时期,有少量先存断层。阜宁组沉积后,断层增多,随后经历一期快速伸展变形时期,产生大量 NW 倾向断层;在吴堡运动时边界断层快速活动,断层下盘遭受剥蚀,同时凹陷东北部发生抬升,部分地区出露地表,遭受剥蚀,此凸起便为柘垛低凸起。在柘垛低凸起南部,所有断层倾向均为 NW 向,多条断层构成多米诺式断层组合。凹陷内也发育 SE 倾向断层,在柘垛低凸起以北。因而此时期趋向于全凹陷均匀伸展,边界断层强活动时期为其他断层形成之后,为非同沉积活动。

与东部相比,高邮凹陷西部断层发育相对较为稀疏,泰州组沉积后存在部分小而少的断层,这些断层为盆内先存基底断层;阜宁组沉积后,产生部分新生断层,断层倾向为 NW 和 SE 向,在局部地区出现断层搭

接现象,多条对倾断层在局部构成“V”字型对倾组合。从 AA'演化剖面上看(图 5),在凹陷北部,SE 倾向断层数量要大于 NW 倾向断层;而在凹陷南部,NW 倾向断层数量要大于 SE 倾向断层。真①断层活动性较弱,对凹陷结构影响较小。

通过上述分析可知,高邮凹陷在阜宁组沉积期近似于自由边界伸展,边界断层对凹陷内次级断层的形成及演化不起到决定性作用。因此,为明确不同区段断层组合模式的差异性,应对凹陷东、西部次级断层进行运动学分析,探究不同区段断层活动性是否存在差异,明确断层形成演化历史及成因。

2.3 断层运动学特征

位移-埋深曲线及生长指数是识别断层活动时期及断层垂向生长性的有效手段^[14-15]。不同类型断层在曲线上会显示出不同形态。单一期次持续活动断层的位移-埋深曲线显示为“C”型形状(图 6a₂),而多期次活动断层的活动期之间存在静止期,此时的位移-埋深曲线有明显近垂直段(图 6a₄)。当断层活动时,生长指数大于 1,生长指数越大断层活动性越强;断层静止时,生长指数等于 1。本文断层位移-埋深曲线及生长指数的数据是基于精细地震解释成果,对各个地震反射标志层及典型反射轴进行数据读取。对凹陷

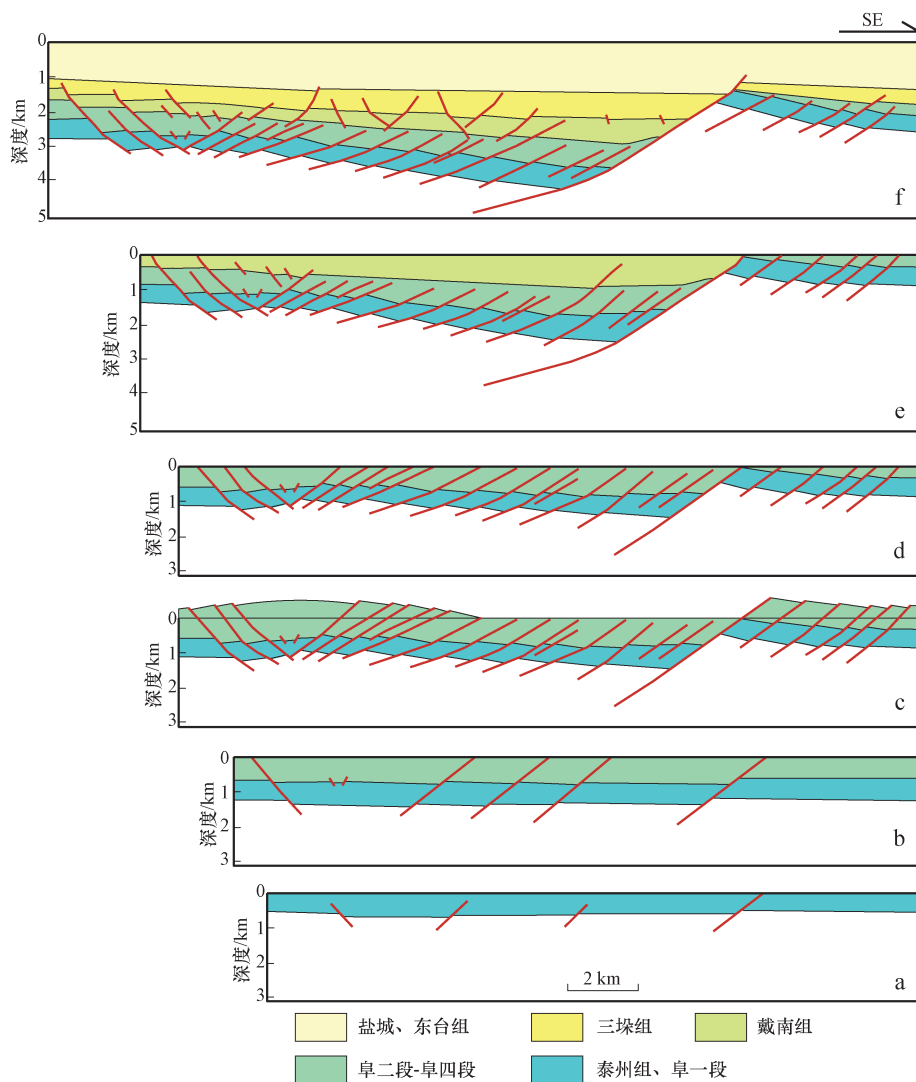


图4 高邮凹陷东部DD'测线构造演化剖面

Fig. 4 Structural evolution section of seismic line DD' in eastern Gaoyou Sag

a. 泰州组、阜一段沉积后; b. 阜二段-阜四段沉积后; c. 阜四段变形后; d. 阜四段剥蚀后; e. 戴南组沉积后; f. 现今;

内部分阜宁组内断层(平面位置见图3)进行活动性分析,探究不同组合类型之间断层活动性是否存在差异。

F1—F6 断层发育于凹陷东部区域,通过断层位移-埋深曲线(图 6b₁—b₆)可知,各断层曲线形态为“C”型,为单一期次活动断层,由断层生长指数可确定各断层阜宁组沉积期活动强烈。其中 F3—F6 断层自北向南地势逐渐降低,但各断层活动性依然保持一致,说明凹陷东部断层活动性不受控于斜坡背景。而凹陷西部区域“V”字型组合的断层断穿层位更多,活动时期更长,在戴南、三垛组沉积期依然具有较强活动性,如 F7—F11 断层(图 6b₇—b₁₁)。由断层生长指数可知,断层初次活动时期为阜宁组沉积期,这与该时期凹陷东部断层活动性具有一致性。

对比凹陷不同区域断层的活动特征可知,高邮凹陷在泰州组沉积期构造环境稳定,新生断层较少,直至

阜宁组沉积期构造活动强烈,在凹陷全区产生大量新生断层。不同区域新生断层组合样式有所差异,但断层平面走向均以 NE 为主,说明该时期凹陷各区域均受 NW—SE 方向伸展应力场控制。

3 物理模拟实验

3.1 实验模型设计

前人通过物理模拟实验已经证明,若在斜坡背景下进行伸展,会形成一系列顺向断层^[16],而高邮凹陷东部阜宁组断层均为反向断层,因此斜坡背景不是高邮凹陷东部产生大量反向断层的成因,即斜坡的形成不会早于断层形成时期。基于这一认识,结合前文对断层活动性和活动规律解析,设置两组自由边界物理模拟实验。

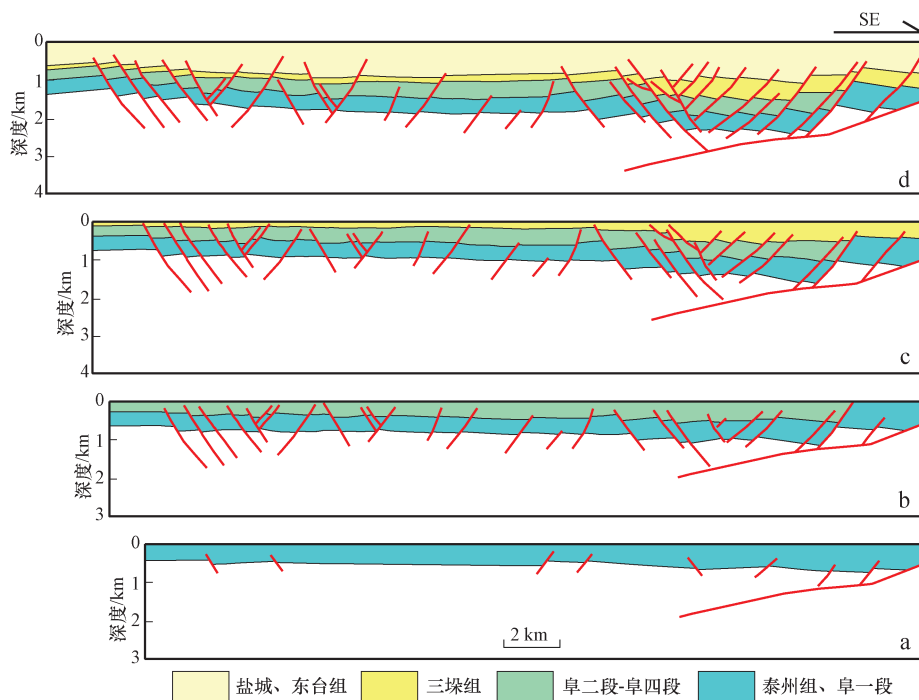


图5 高邮凹陷西部AA'测线构造演化剖面

Fig. 5 Structural evolution section of seismic line AA' in western Gaoyou Sag

a. 泰州组、阜一段沉积后; b. 阜二段-阜四段沉积后; c. 三垛组沉积后; d. 现今

构造物理模拟实验广泛应用于盆地的构造研究,能有效地模拟出构造变形的过程^[17-23]。针对不同先存构造,国外学者已进行多组物理模拟。McClay^[21]对不同形态边界断层开展一系列物理模拟实验;Buchanan和McClay^[24]采用先存构造研究多米诺式断层反转作用;McClay和White^[25]对裂谷进行三维物理模拟。然而前人的研究成果并不能完全适用于本地区,并且先存断层控制产生的盆地形态与高邮凹陷阜宁组形态不符,这也说明了针对阜宁组演化阶段,可设计为无先存边界断层的自由边界。本实验采用长200 cm,宽20 cm,高30 cm的砂箱物理模拟实验装置,砂箱前、后两侧为固定挡板,左、右两端为活动挡板,可利用计算机内置软件操纵活动挡板,使挡板前进或后退。两端活动挡板可独立运行。两组实验均采用橡胶板作为基底,两端与活动挡板固定,在实验过程中均匀传递伸展变形。实验材料为无内聚力的干燥石英砂,平均粒径约为100 μm 。在实验模型基底之上铺设10 cm厚砂层,同时用染色石英砂铺设标志层,便于观察实验现象。该实验基于砂箱物理模拟中的相似性原理,在各实验参数选择上均与实际地区具有较好对应,确保实验结果的可信度(表1)。

由断层活动性分析可知,阜宁组沉积期次级断层的形成不受边界断层控制。不同区域的次级断层走向、活动时期一致,区域应力场方向也保持一致。实验

设计中采用控制变量法,将先存构造与区域应力场方向两组变量统一,只改变伸展模式,设置两组自由边界,伸展模式不同的对比实验(图7)。实验组1为一端固定、另一端后退的单侧伸展模型,实验组2为两端均后退的双侧伸展模型,具体实验参数见图7。实验过程中每间隔2 min用相机拍照,记录模型伸展变形过程。为了排除偶然因素影响,每组实验均重复两次以上,保证实验结果的可重复性。

3.2 实验过程及结果

实验组1模拟结果显示(图8),在伸展变形的初始阶段,在伸展端附近地层略微倾斜,同时形成少量产状平直的反向正断层。当伸展量逐渐增大(10 cm),模型内部产生大量反向断层,且越靠近伸展端,断层形成越早,累计断距越大。多条新形成的反向断层构成多米诺式断层组合。模型继续伸展至实验结束(15 cm),断层数量继续增加,所有断层均保持一定活动性,靠近伸展端的部分断层剖面形态由平直式转为铲式。持续伸展作用造成地层旋转、减薄,越靠近伸展端地层旋转减薄特征越强烈,导致固定端地势略高于伸展端。

实验组2模拟结果显示(图9),在伸展变形的初始阶段(5 cm),实验模型内部暂无断层产生;当伸展量逐渐增大(10 cm),在两侧的伸展端附近地层发生

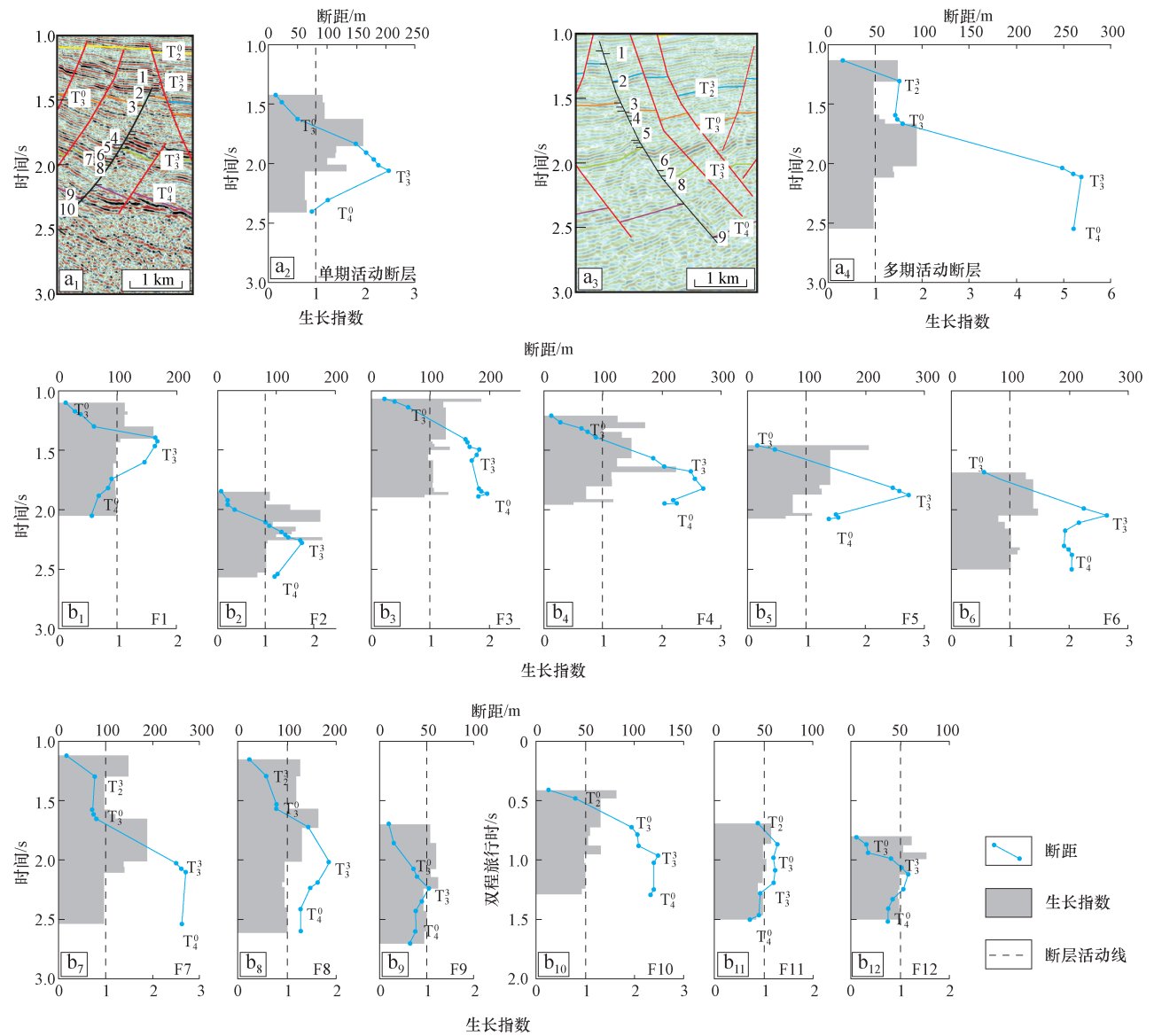


图6 高邮凹陷断层位移-埋深曲线及生长指数

Fig. 6 Fault displacement-depth curves and growth index in the Gaoyou Sag

a₁. 典型单期活动断层地震剖面, 数字编号为断层两盘可对比的反射轴编号; a₂. 图 a₁ 中断层位移-埋深及生长指数图; a₃. 典型多期活动断层地震剖面, 数字编号为断层两盘可对比的反射轴编号; a₄. 图 6a₃ 中断层位移-埋深及生长指数图; b₁—b₁₂. 断层 F1—F12 位移-埋深曲线及生长指数图(断层平面位置见图 3)

表 1 构造模拟实验模型与实际地区相似性对比

Table 1 Similarity comparison of structural experiment model and natural condition			
物理参数	实际值	模型值	相似系数
重力加速度(g)/(m·s ⁻²)	9.8	9.8	1
变形长度(l)/m	6 500	0.15	0.4×10^{-5}
伸展率/%	25	25	1
岩石密度(ρ)/(g·cm ⁻³)	3.00	2.65	0.89
粘度(η)/(Pa·s)	$10^{17} \sim 10^{21}$	$10^2 \sim 10^3$	$10^{-15} \sim 10^{-18}$
内摩擦角(ϕ)/(°)	31	31	1

轻微旋转,由实验模型两端向中心产生少量反向正断层,断层倾向也由实验模型端部指向中心部位。此阶段的新生断层也为多米诺式组合样式。模型继续伸展至实验结束(15 cm),已形成的断层继续活动,断距持续增大,靠近伸展端的断层发生旋转,断层倾角变低。在实验模型内部还新产生部分与地层倾向相同的断层,与前期形成的断层组成“V”字、“y”字型断层组合。双侧伸展使模型两端地层旋转减薄,越靠近伸展端变形越强烈,而实验模型中部变形最弱,形成局部低凸起。

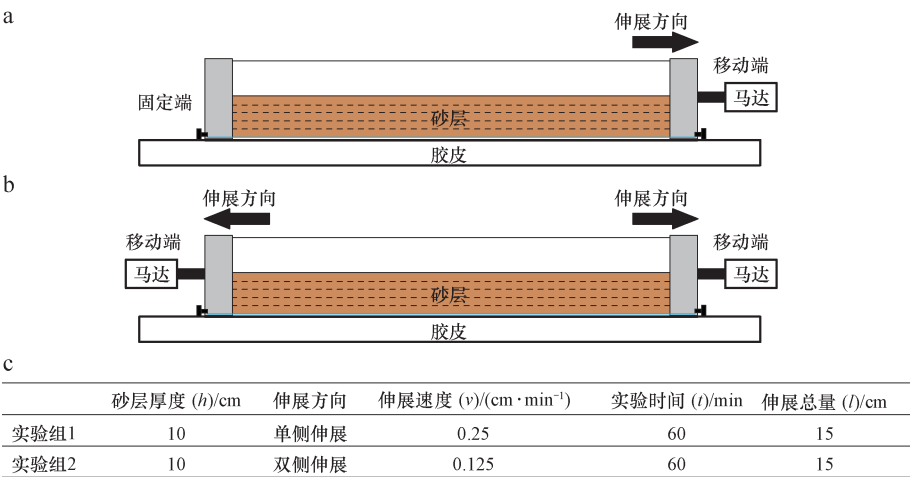


图 7 构造物理模拟实验设计图及相关参数选择

Fig. 7 Analogue modelling design and selection of relevant parameters in experimental group
a. 实验组 1; b. 实验组 2; c. 实验参数选择

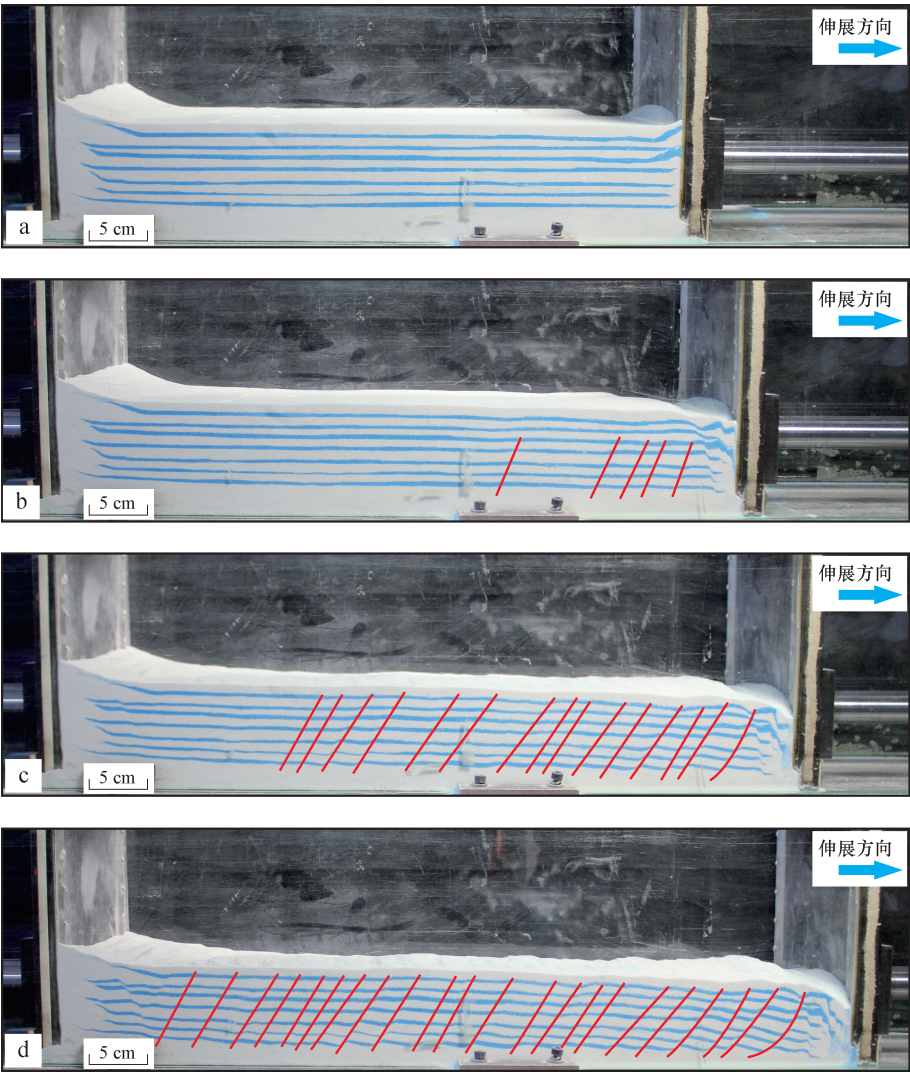


图 8 构造物理模拟实验组 1 伸展变形模拟过程及结果

Fig. 8 Simulation process and results of extensional deformation in experimental group 1

a. 初始沉积; b. 伸展变形初期, 靠近伸展端形成少量平直断层; c. 伸展量持续增大, 断层发育数量逐渐增多;
d. 继续伸展至实验结束, 断层数量继续增多, 靠近伸展端断层变为铲式

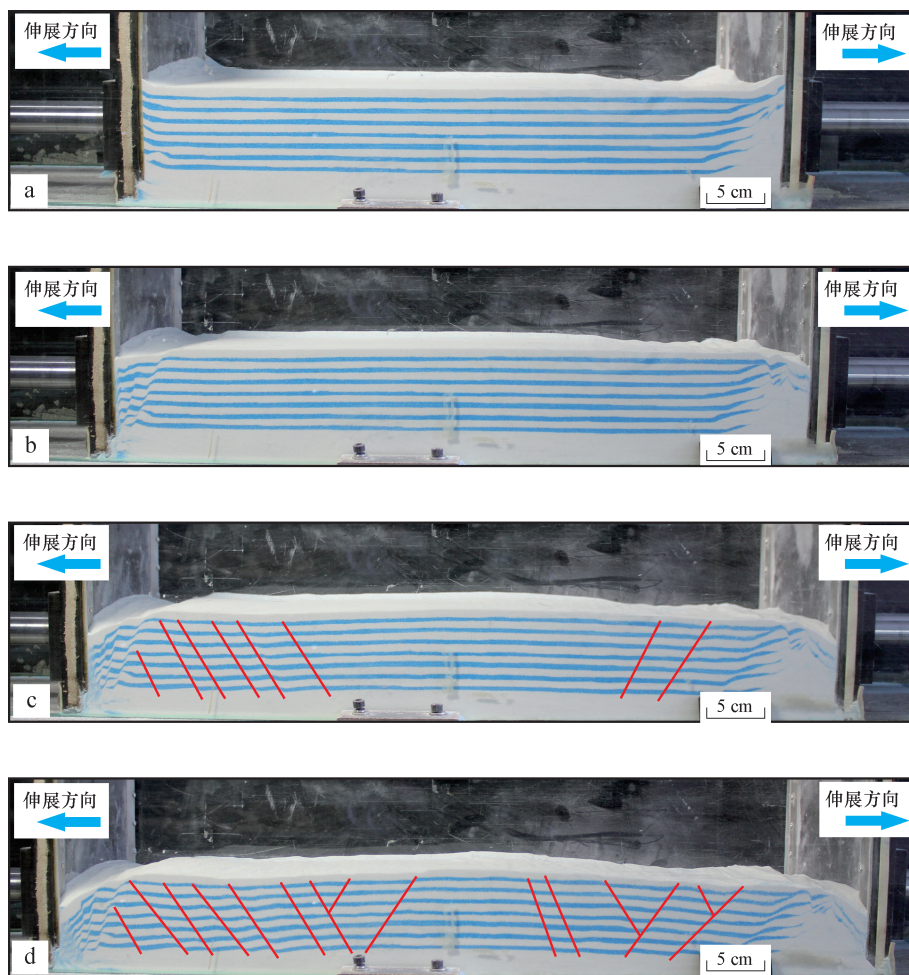


图9 构造物理模拟实验组2 伸展变形模拟过程及结果

Fig. 9 Simulation process and results of extensional deformation in experimental group 2

- a. 初始沉积; b. 伸展变形初期, 未形成新生断层; c. 伸展量增大, 模型两端形成少量平直断层;
d. 继续伸展至实验结束, 断层数量持续增多, 部分断层相互搭接

3.3 实验结果分析

两组对比实验结果显示, 自由边界条件下, 伸展模式的不同会导致断层形成时间、数量和组合样式不同。由于实验只模拟阜宁组沉积期变形特征, 可将现今剖面恢复至戴南组沉积之前, 在与实验结果进行比较。实验组1 实验过程及结果与凹陷东部演化剖面(图4)匹配关系较好, 实际剖面中的断层形态、数量、组合样式, 以及地层旋转特征和地势斜坡特征均与实验现象一致。实验组2 实验过程及结果与凹陷西部演化剖面(图5)匹配关系较好, 实际剖面中断层发育数量少, 断层为“V”字、“y”字型组合的特征在双侧伸展实验中均得到较好验证。实验结果表明, 在自由边界条件下, 通过改变伸展方式, 便可模拟出凹陷内东部、西部不同的断层组合形态, 这与前文分析的边界断层对次级断层的形成没有控制作用的结论相一致。在

NW-SE 向区域伸展应力场下, 凹陷内不同区域表现出的伸展形式不同: 凹陷西部为 NW-SE 双向伸展, 而东部则仅为 SE 方向的单侧伸展。两组对比实验结果充分证实了不同区域伸展方式的差异是造成断层组合样式不同的主要原因。在单侧伸展实验过程中, 地层地势逐渐发生变化, 说明多米诺式断层的形成与地势斜坡背景无关, 结合前人学者早期研究成果^[16], 即可判断出高邮凹陷东部阜宁组断层的形成时期要早于柘垛低凸起形成时期。

4 讨论

物理模拟实验和结果分析证实, 高邮凹陷在阜宁组受 NW-SE 向伸展作用, 但在凹陷内不同位置表现形态不同: 高邮凹陷西部向两端同时伸展, 而东部仅向 SE 方向伸展, 在同一伸展应力作用下, 形成不同的断

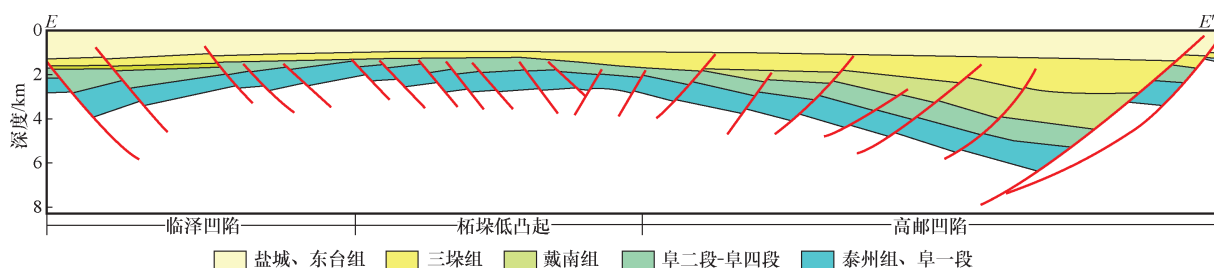


图10 高邮凹陷及临泽凹陷地质结构剖面(据江苏油田,有修改)

Fig. 10 Geological structure section of Gaoyou and Linze Sags (revised according to Jiangsu oilfield)

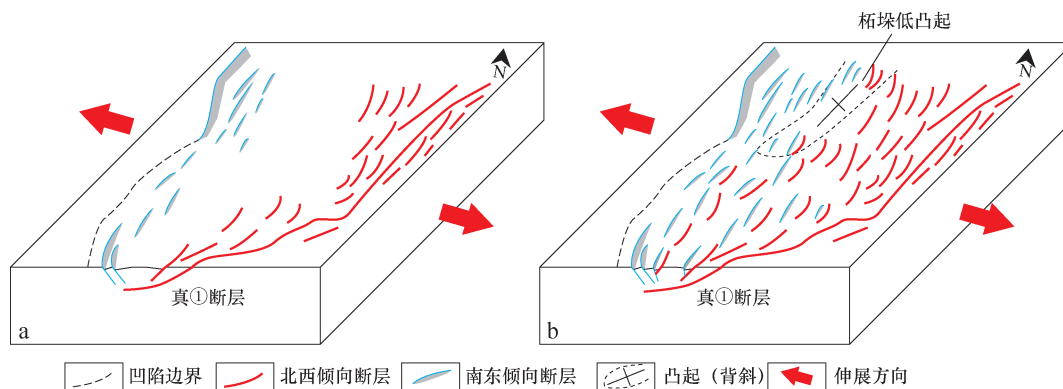


图11 高邮凹陷阜宁组演化模式

Fig. 11 Evolution model of the Funing Formation in Gaoyou Sag

a. 变形初期; b. 变形末期

层组合样式。图10为过高邮凹陷和临泽凹陷的区域地质剖面(位置见图1),剖面西侧临泽凹陷也发育多米诺式反向断层组合,断层倾向与高邮凹陷东部次级断层的倾向相反。由DD'构造演化剖面(图4)可知,柘垛低凸起形成于阜宁组沉积末期的吴堡运动,因此在吴堡运动之前,高邮凹陷与临泽凹陷为同一凹陷,凹陷形态西窄东宽。高邮凹陷东部、临泽凹陷在阜宁组沉积期分别为SE, NW单侧伸展变形,与同时期凹陷西部伸展应力状态一致。在同一伸展背景下,伸展应力由凹陷两端向中心传播,但受凹陷初始形态影响,凹陷西部较为狭窄,应力向中心传播速度快,两端应力在中部交汇,叠覆区域发育对倾断层组合样式;凹陷东部更宽,应力向中心传播速度慢,两端应力未在中部交汇,高邮凹陷和临泽凹陷的断层未出现叠覆,依旧保持初始断层组合样式(图11)。因此高邮凹陷西部断层叠覆范围明显大于东部,东部仅在柘垛低凸起处可识别到少量“V”字型对倾断层组合。

5 结论

1) 高邮凹陷边界断层在泰州组和阜宁组沉积期为非同沉积断层,该时期高邮凹陷接近自由边界伸展。阜宁组沉积期NW-SE向伸展应力场形成大量断层,

不同组合样式的断层初始形成时期具有一致性。

2) 伸展方式的不同是造成高邮凹陷东、西部阜宁组断层模式差异的根本原因。单侧伸展形成大量多米诺式反向断层组合,双侧伸展形成“V”字型对倾断层组合。

3) 在同一伸展背景下,高邮凹陷东部盆地宽,盆地两侧应力向中心传播越慢,仅在盆地中心区可能出现不同倾向断层叠覆现象;西部盆地窄,盆地两侧应力向中心传播越快,不同倾向断层叠覆区域越大。

参 考 文 献

- [1] 肖秋生. 苏北老油田勘探管理工作的实践与认识[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(4): 108-110.
Xiao Qiusheng. The practice and recognition of exploration management about old petroliferous districts in Subei Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(4): 108-110.
- [2] 舒良树, 王博, 王良书, 等. 苏北盆地晚白垩世一新近纪原型盆地分析[J]. 高校地质学报, 2005, 11(4): 534-543.
Shu Liangshu, Wang Bo, Wang Liangshu, et al. Analysis of Northern Jiangsu Prototype Basin from Late Cretaceous to Neogene [J]. Geological Journal of China Universities, 2005, 11(4): 534-543.
- [3] 邱海峻, 许志琴, 乔德武. 苏北盆地构造演化研究进展[J]. 地质通报, 2006, 25(9): 1117-1120.
Qiu Haijun, Xu Zhiqin, Qiao Dewu. Progress in the study of the tectonic evolution of the Subei basin, Jiangsu, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(9): 1117-1120.

- [4] 周冰,金之钧,刘全有,等. 苏北盆地黄桥地区富 CO₂ 流体对油气储-盖系统的改造作用[J]. 石油与天然气地质,2020,41(6): 1151-1161.
Zhou Bing, Jin Zhijun, Liu Quanyou, et al. Alteration of reservoir-caprock systems by using CO₂-rich fluid in the Huangqiao area, North Jiangsu Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(6): 1151-1161.
- [5] 付茜,刘启东,刘世丽,等. 苏北盆地高邮凹陷古近系阜宁组二段页岩油成藏条件分析[J]. 石油实验地质,2020,42(4): 625-631.
Fu Qian, Liu Qidong, Liu Shili, et al. Shale oil accumulation conditions in the second member of Paleogene Funing Formation, Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(4): 625-631.
- [6] 陈安定. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理[J]. 石油与天然气地质,2010,31(2): 140-150.
Chen Anding. Tectonic features of the Subei Basin and the forming mechanism of its dustpan-shaped fault depression[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 140-150.
- [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 Kexin, 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] 朱光,姜芹芹,朴学峰,等. 基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用——以苏北盆地南部高邮凹陷为例[J]. 地质学报,2013,87(4): 441-452.
Zhu Guang, Jiang Qinqin, Piao Xuefeng, et al. Role of basement faults in faulting system development of a rift basin: an example from the Gaoyou Sag in Southern Subei Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(4): 441-452.
- [9] 姜芹芹,周绍荣,朱光,等. 苏北盆地高邮凹陷隐蔽性断层构造特征分析与预测[J]. 地质学刊,2016,40(1): 37-46.
Jiang Qinqin, Zhou Shaorong, Zhu Guang, et al. Structural characteristics and prediction of the concealed faults in the Gaoyou Sag of Subei basin[J]. Journal of Geology, 2016, 40(1): 37-46.
- [10] 吴林,陈清华. 苏北盆地高邮凹陷基底断裂构造特征及成因演化[J]. 天然气地球科学,2015,26(4): 689-699.
Wu Lin, Chen Qinghua. Structural characteristics and evolution of basement faults in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(4): 689-699.
- [11] 漆家福,杨桥,童亨茂,等. 构造因素对半地堑盆地的层序充填的影响[J]. 地球科学:中国地质大学学报,1997,22(6): 603-608.
Qi Jiafu, Yang Qiao, Tong Hengmao, et al. Sequence construction response to tectonic process in extensional half-graben basin[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1997, 22(6): 603-608.
- [12] 王玺,陈清华,朱文斌,等. 苏北盆地高邮凹陷边界断裂带构造特征及成因[J]. 大地构造与成矿学,2013,37(1): 20-28.
Wang Xi, Chen Qinghua, Zhu Wenbin, et al. Structural characteristics and origin of boundary fault belts of the Gaoyou Sag in the Subei Basin[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2013, 37(1): 20-28.
- [13] 周磊,王永诗,于雯泉,等. 基于物性上、下限计算的致密砂岩储层分级评价——以苏北盆地高邮凹陷阜宁组一段致密砂岩为例[J]. 石油与天然气地质,2019,40(06): 1308-1316+1323.
Zhou Lei, Wang Yongshi, Yu Wenquan, et al. Classification assessment of tight sandstone reservoir based on calculation of lower and upper limits of physical properties—A case study of the tight sandstone reservoir in the 1st member of Funing Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(06): 1308-1316+1323.
- [14] 孙永河,李雪松,刘志达,等. 尼日尔三角洲东部斜向背斜形成演化特征[J]. 石油勘探与开发,2018,45(1): 51-61.
Sun Yonghe, Li Xuesong, Liu Zhida, et al. Formation and evolution of oblique anticline at the eastern portion of the Niger Delta[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 51-61.
- [15] Ryan L, Magee C, Jackson A L. The kinematics of normal faults in the Ceduna Subbasin, offshore southern Australia: Implications for hydrocarbon trapping in a frontier basin[J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(3): 321-341.
- [16] Vendeville B C, Cobbold P R, Davy P, et al. Physical models of extensional tectonics at various scales[C]//Coward M P, Dewey J F, Hancock P L. Continental Extensional Tectonics. London: The Geological Society, 1987: 95-107.
- [17] 陈福巨,周建勋,陆克政. 伸展断层系统的砂箱模拟实验[J]. 世界地质,1997,16(3): 13-17.
Chen Fuju, Zhou Jianxun, Lu Kezheng. Sand-box analog models of extensional fault systems[J]. Global Geology, 1997, 16(3): 13-17.
- [18] 童亨茂,孟令箭,蔡东升,等. 裂陷盆地断层的形成和演化——目标砂箱模拟实验与认识[J]. 地质学报,2009,83(6): 759-774.
Tong Hengmao, Meng Lingjian, Cai Dongsheng, et al. Fault formation and evolution in rift basins: sandbox modeling and cognition[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(6): 759-774.
- [19] 史帅雨,余一欣,殷进垠,等. 下刚果盆地盐构造变形特征及其形成机理[J]. 石油与天然气地质,2020,41(5): 1092-1099.
Shi Shuaiyu, Yu Yixin, Yin Jinyin, et al. Deformation characteristics and formation mechanisms of salt structures in the Lower Congo Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 1092-1099.
- [20] 赵利,廖宗廷,徐旭辉,等. 陆内山前冲断结构分带的构造物理模拟实验[J]. 石油实验地质,2019,41(6): 871-878.
Zhao Li, Liao Zongting, Xu Xuhui, et al. Physical modeling of thrusting structure zonation in front of an intracontinental orogen[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(6): 871-878.
- [21] McClay K R, Ellis P G. Analogue models of extensional fault geometries[C]//Coward M P, Dewey J F, Hancock P L. Continental Extensional Tectonics. London: The Geological Society, 1987: 109-125.
- [22] Eisenstadt G, Sims D. Evaluating sand and clay models: do rheological differences matter? [J]. Journal of Structural Geology, 2005, 27(8): 1399-1412.
- [23] 张蕾,王军,张中巧,等. 基于地震物理模拟的三角洲砂体识别及刻画技术[J]. 石油地质与工程,2019,33(1): 30-33.
Zhang Lei, Wang Jun, Zhang Zhongqiao, et al. Identification and characterization of delta sand bodies based on seismic physical simulation[J]. Petroleum Geology & Engineering, 2019, 33(1): 30-33.
- [24] Buchanan P G, McClay K R. Experiments on basin inversion above reactivated domino faults[J]. Marine and Petroleum Geology, 1992, 9(5): 486-500.
- [25] McClay K R, White M J. Analogue modelling of orthogonal and oblique rifting[J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(2): 137-151.