

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.09.007

渤海湾盆地惠民凹陷滚动背斜与顶部垮塌断层形成的构造物理模拟

汤梦静¹, 王毛毛^{2*}, 贾红义¹, 王衍迪², 闫兵²TANG Mengjing¹, WANG Maomao^{2*}, JIA Hongyi¹, WANG Yandi², YAN Bing²

1. 中国石化胜利油田有限公司物探研究院, 山东 东营 257022;

2. 河海大学海洋学院, 江苏 南京 210098

1. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257022, Shandong, China;

2. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China

摘要:伸展盆地中发育的复杂断裂体系的结构样式、形成过程及成因机制一直是含油气盆地分析中的难点。利用构造物理模拟方法,研究了渤海湾盆地惠民凹陷典型剖面中滚动背斜与顶部垮塌断层的发育过程与形成机制。通过设计 2 组对照实验(E1 和 E2),分别研究了惠民凹陷中拆离断层和内部注陷断裂对上盘褶皱和断裂结构影响和控制机制。其中,E1 为预设断层模型,主要模拟弯曲的宁南拆离断层;E2 实验采用双底板相对伸展模型和预设正断层模型相结合的方案,主要考虑了伸展盆地中后期次级注陷的活动。构造物理模拟 E1 实验再现了渤海湾盆地惠民凹陷滚动背斜与顶部垮塌断层的形成过程,表明宁南断层实际控制了上盘一级褶皱的形态和次级断裂体系的发育。顶部垮塌断层体系由顺向和反向正断层构成,总体为不对称的结构特征,新发育的共轭断层具有同期的活动性,随后呈现侧向迁移的规律。断层位移量演化统计表明,实验存在同时活动、呈共轭关系的 2 组破裂面,与伸展楔体预测的 2 组库伦破裂一致,反映其处于或接近临界楔体状态。另一组实验显示,临邑和夏口断层的发育切割了早期形成的顶部垮塌断层,临南注陷开始形成并不断加宽,最终形成的样式与现今构造剖面一致。本次研究对其他类似的伸展断层相关褶皱中的滚动背斜及其相关垮塌断裂发育机制具有一定的启示意义。

关键词:伸展断层相关褶皱;滚动背斜;顶部垮塌断层;构造物理模拟;惠民凹陷

中图分类号:P542 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)09-1505-11

Tang M J, Wang M M, Jia H Y, Wang Y D, Yan B. Analogue modeling of development of rollover anticline and crestal collapse faults of Huimin sag in Bohai Bay basin. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(9): 1505–1515

Abstract: The structure, formation and mechanisms of complex fault systems developed in extensional basins remain a challenging issue in the analysis of hydrocarbon-bearing basins. We used sandbox analogy modeling method to investigate the development and formation mechanism of rollover and crestal collapse faults above typical extensional listric faults in the Huimin depression of the Bohai Bay basin. By designing two sets of controlled experiments(E1 and E2), the influence and control mechanisms of the development of detachment and internal depressional faults in the Huimin Sag were investigated. Analogy experiments E1 reproduce the formation process of rollover and crestal collapse faults in the Huimin Sag, indicating that the Ningnan fault actually controls the morphology of the hanging wall and the development of the secondary fault system. The crestal collapse fault system is asymmetric and is composed of antithetic – and synthetic faults, the newly developed conjugate faults are contemporaneously active, and the fault activity shows a pattern of lateral migration. The statistics of fault displacement indicate that two sets of rupture surfaces are simultaneously active and in conjugate relationship. This is consistent with the Coulomb–Mohr failure criterion within the extensional wedge, indicating that the wedge is at or

收稿日期:2021-07-30;修订日期:2023-01-01

资助项目:中石化胜利油田分公司课题《惠民中央隆起带沙三、四段构造差异性及控藏作用》(编号:YKK2005)

作者简介:汤梦静(1983–),女,硕士,副研究员,从事地质地震综合研究及油藏描述工作。E-mail:tangmengjing.slyt@sinopec.com

* 通信作者:王毛毛(1985–),男,博士,教授,从事含油气盆地构造变形的解释与模拟工作。E-mail:wangmm@hhu.edu.cn

near the critical state. In another set of E2 experiment, the development of the Linyi and Xiakou faults offset the crestal collapse faults formed earlier, and the Linnan depression began to form and widen, eventually forming in a structural pattern consistent with the present-day structural profile. This study reveals the development mechanism of rollover and its associated crestal collapse fault in typical extensional fault-related folds, which has important implications for extensional fault system analysis.

Key words: extensional fault-related folding; rollover; crestal-collapse faults; analogue modeling; Huimin Sag

伸展断层相关褶皱理论 (extensional fault-related folds) 提供了定量约束伸展背景下发育的正断层的位移量、断层形态、褶皱形态之间的几何学与运动学模型。基于地震反射剖面、野外露头、物理模拟和数值模拟方法,国内外学者系统研究了伸展断层相关褶皱的自然实例和理论模型 (Xiao et al., 1992; Shaw et al., 1997; 2005; Khalil et al., 2002; 何登发等, 2005; 贾东等, 2005; 2011; 苏金宝等, 2011; Fossen, 2016; 杨克基等, 2016; 马立成等, 2023)。其主要包含 3 种类型: ①犁式断层相关的滚动背斜; ②上盘断层转折褶皱; ③上盘断层传播褶皱。

砂箱构造物理模拟实验是将自然界中的构造模型按照一定的相似比缩小到实验室尺度,满足几何学、运动学和动力学三方面的相似性,对其构造样式、构造变形过程和动力学机制进行模拟的方法 (Ellis et al., 1988; McClay et al., 1991)。近年来,粒子成像测速 (PIV) 等新技术被引入砂箱物理模拟实验,用来辅助实验现象的定量分析 (Adam et al., 2005; 沈礼等, 2012; Sun et al., 2016)。McClay (1990) 以干性石英砂为材料,对平坦基底滑脱、简单犁式 (simple listric) 和坡-坪式 (ramp-flat) 3 种断层形态控制下的上盘发育过程中的滚动背斜 (rollover) 及其次级断裂的几何形态、演化序列进行了研究,指出底部滑脱层几何样式对上盘的一级构造变形起着决定性作用。

前人研究主要关注伸展断层相关褶皱中同沉积作用、主断面与滚动背斜的几何形态等要素之间的相互关系 (Hamblin et al., 1965; Groshong, 1990; Nunns, 1991; Xiao et al., 1991; 漆家福等, 2003), 对其中背斜顶部垮塌断层的形成及其演变机制研究较少。本次选取渤海湾盆地惠民凹陷中央隆起带一条 NS 向典型构造剖面

为研究对象 (图 1), 主要利用构造物理模拟方法, 研究伸展断层相关褶皱发育过程中上盘垮塌断裂体系发育的结构样式及其演变过程, 探讨其形成的构造应力-应变机制, 揭示滚动背斜及其相关垮塌断裂发育机理, 为寻找油气成藏有利区提供指示意义。

1 地质背景

渤海湾盆地发展历经 3 个阶段: 裂陷启动阶段 (65~42 Ma), 盆地整体变形以兰聊断层为界, 以西区域为 NW—SE 向伸展, 以东区域为近 NS 向伸

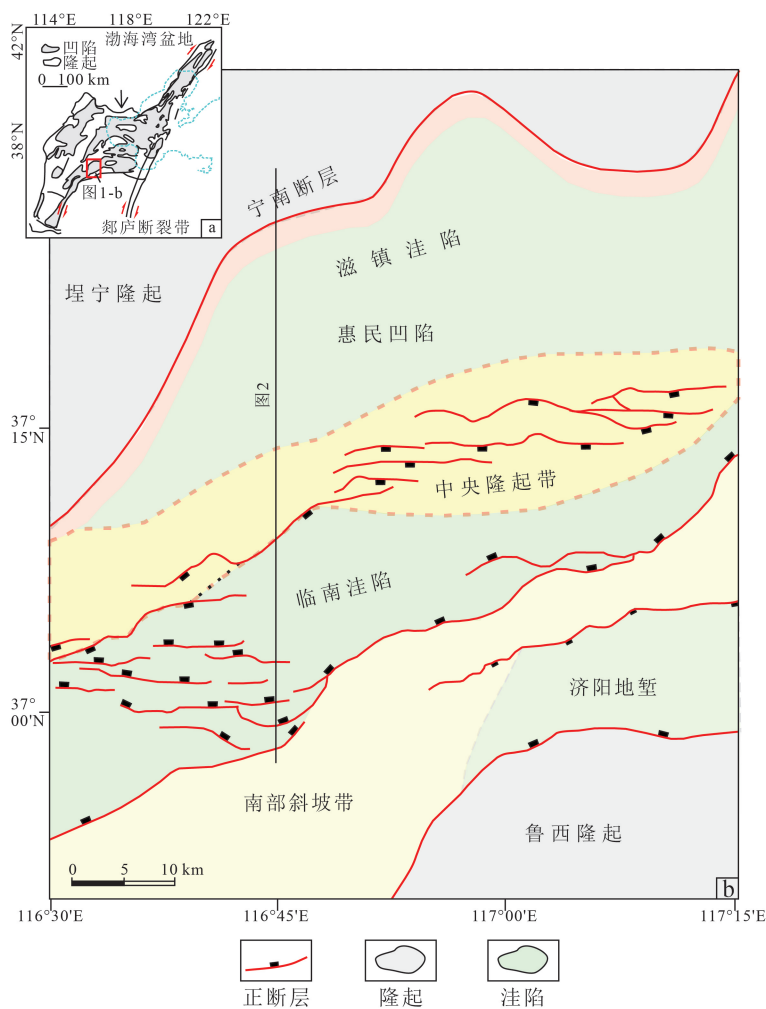


图 1 渤海湾盆地 (a) 与惠民凹陷 (b) 构造纲要图

Fig. 1 Structural outline map of Bohai Bay basin and Huimin sag

展,伸展速率总体为 $0.1 \sim 0.2 \text{ cm/a}$; 裂陷高峰阶段 ($42 \sim 32.8 \text{ Ma}$), 盆地进入广泛裂陷阶段, 伸展速率为 $0.2 \sim 0.4 \text{ cm/a}$, 西部以 NNW—SSE 向伸展, 兰聊断层以东区域大部分以 SE 向运动为主; 坳陷阶段 ($32.8 \sim 0 \text{ Ma}$), 盆地整体进入 NS 向或 NW—SE 向伸展阶段, 盆地伸展速率为 $0 \sim 0.1 \text{ cm/a}$ 。兰聊断层以东区域主要经历了近 NS 向伸展, 如在济阳坳陷内部发育的断裂以 NE—SW 向和近 NW 向延伸为主 (Zhu et al., 2020) (图 1)。古近纪, 惠民凹陷经历了 NS 向伸展作用, 盆地内的 NEE 向基底断裂处于

有利伸展方向, 进而大量复活并持续强烈活动, 表现出以伸展分量为主、走滑分量为辅的张扭构造特征。前人通过对惠民凹陷中临邑断层和夏口断裂的断距统计表明, 其倾滑分量远大于走滑分量 ($>3:1$), 说明盆地变形仍以拉张为主 (封东晓, 2015)。

惠民凹陷北部边界发育控盆断裂的宁南断层, 南部表现为地层超覆关系, 总体盆地构造样式符合半地堑式结构 (李德生, 1980; 陆克政等, 1997; Wang et al., 2020) (图 2、图 3)。宁南断层的主断面表现

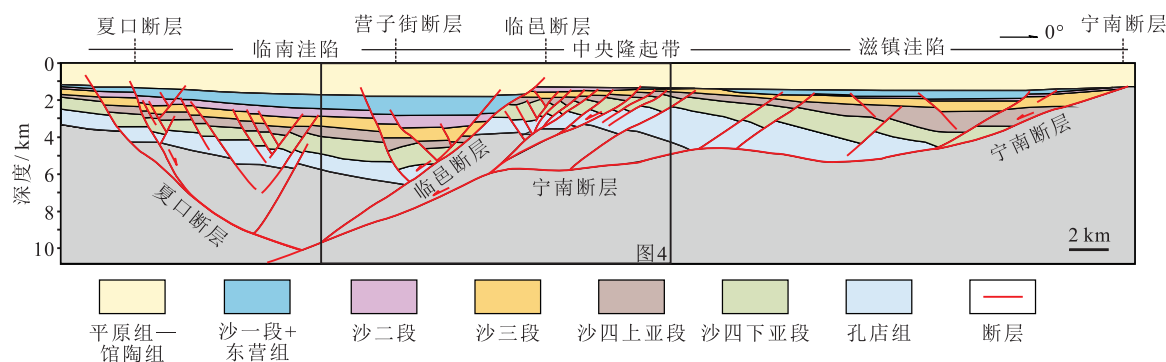


图 2 惠民凹陷典型构造剖面 (据封东晓, 2015 修改)

Fig. 2 Typical structural profile of Huimin sag

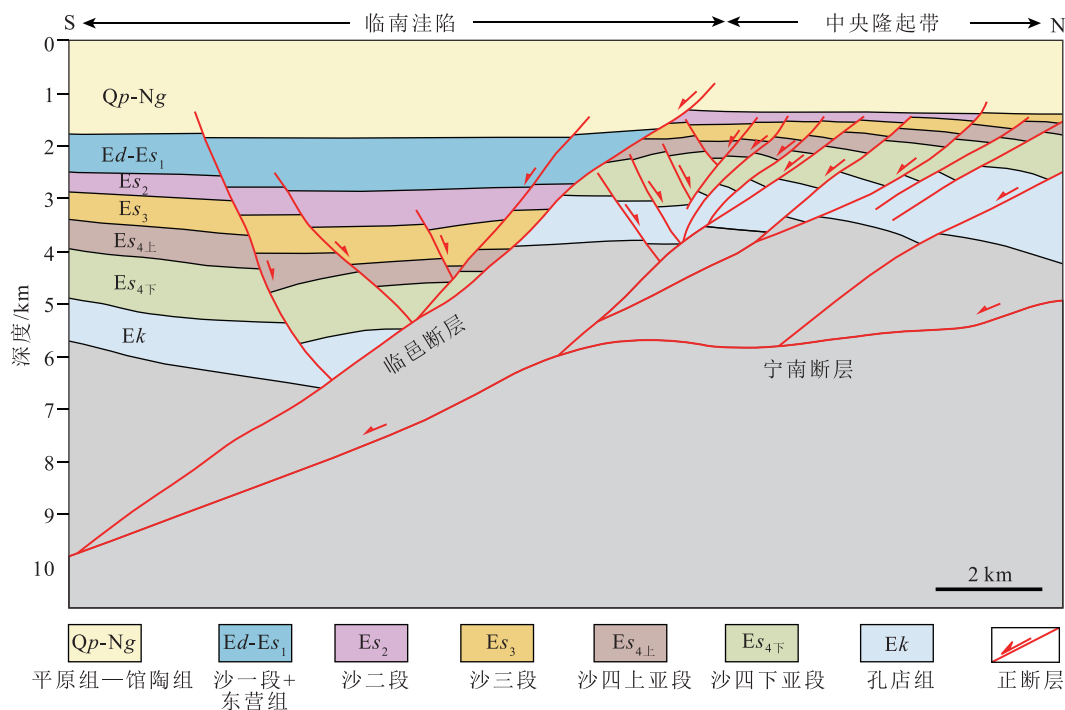


图 3 惠民凹陷盘河构造南部典型构造剖面

Fig. 3 Typical structural profile of the southern Panhe structure in Huimin sag

为上部、下部较陡,而中部相对变缓或上凸的特征,表现出伸展断层的“断坡-断坪-断坡”的特征。惠民凹陷内部发育的 NEE 走向的临邑断层和夏口断层,分别构成临南凹陷的北部和南部边界。临邑断层沿 EW 向延伸约 65 km,由 11 条次级 NE 向和 EW 向断裂体系构成。临邑断层北侧为上升盘,构成中央隆起带,南侧为下降盘,构成临南洼陷。临南洼陷内部发育一系列与临邑断层相连接的反倾正断层(封东晓,2015)(图 3)。惠民凹陷构造剖面的演化模式如图 4 所示,孔店期—沙四期以宁南断层的剧烈活动为主,形成对应的上盘半地堑同构造沉积,而从沙三期—东营期开始,由临邑断层和夏口断层构成的临南洼陷开始快速形成。

宁南断层的上盘褶皱样式总体符合滚动背斜的基本特征(图 2),临邑断层以北的上盘变形总体上表现为一个宽缓的不对称的背斜构造样式。该滚动背斜由滋镇洼陷与中央隆起带两部分构成。在控盆断层的活动期间,滋镇洼陷的快速沉降与中央隆起带部分的隆升是同时发生的。滋镇洼陷部位的孔店组—沙三段厚度向宁南断层方向逐渐加厚,表明其沉积于主断裂活动剧烈期间。而中央隆起带由 2 组倾向相反的分支正断层组成,这些正断层向下逐渐收敛于一条主干正断层并与宁南断层相交会。总体上,盘河南部区的中央隆起带断裂构造表现为不对称的结构特征:左侧部分的分支断裂表现为相对高倾角、数量少的特征,而右侧部分的分支断裂体系表现为相对低倾角、数量多的特征。

前人利用古落差、地层年龄等约束,系统研究了宁南断层与临邑断层的断裂活动性历史。宁南断层尽管存在东西差异性,但断裂活动从古近纪开始快速生长,到沙四期达到峰值(260~270 m/Ma),随后在沙三期—沙二期逐渐衰弱,西段在沙一期之后基本不活动。而临邑断层在古近纪早期活动性较弱,断层活动速率小于 50 m/Ma,到沙三组—沙二组沉积期间断层快速生长(约 100 m/Ma),随后在新近纪逐渐衰减(封东晓,2015)。研究表明在宁南断层的快速衰退至停止阶段,临邑断层则表现为快速生长阶段,2 条断层的活动性呈现出差异性。

2 构造物理模拟实验方案

为实现伸展构造中主滑脱断层的模拟,前人采用的设置方法有双底板相对伸展模型和预设断层

模型(McClay,1990)。在双底板相对滑动模型中,正断层是通过 2 块底板相对滑动伸展石英砂产生的,正断层产状受石英砂的物理性质决定(Del et al.,2019)。而在预设正断层模型中,正断层产状是固定的斜面或曲面限定的(McClay,1990)。

本次研究采用双底板相对伸展模型和预设断层模型相结合的方案,用来解决宁南断层和临邑断层 2 条主干正断层对惠民凹陷构造发育的控制作用(图 5)。宁南断层作为惠民凹陷底部的犁式断层,是惠民凹陷伸展构造变形的主控断层。因此,在实验设置中,砂箱右侧固定的犁形模块用以模拟宁南断层的下盘构造,其上覆盖聚乙烯塑料布用来模拟宁南断层。其中,聚乙烯塑料布共分为上、下 2 层,下层从犁形块体顶端铺设至牵引端并固定,用以模拟宁南断层。临邑断层作为惠民凹陷的内部次级断裂,控制了临南洼陷的形成与沉降。在实验设置中,上层塑料布较短,当下层塑料布被固定时,2 层塑料布之间形成相对滑动,产生速度不连续界线,可以用来模拟凹陷内部断层的活动(表 1)。

本次设计了 2 组对比模拟实验 E1 和 E2:E1 为简单犁式断层实验,主要考察一般条件下犁式控盆边界断层对上盘地层变形与断裂发育的影响(图 5);E2 实验主要针对盘河地区南部的构造特征而设计,采用双底板相对伸展模型和预设正断层模型相结合的方案(图 5)。

本次采用的实验材料为粒径 60~80 目(0.2~0.3 mm)的纯石英砂,并采用彩色石英砂作为标志层,方便观察地层变形和变位,测量断层位错量。模型与自然界的长度相似比为 $L^* = 10^{-6}$ (即实验中 1 cm 代表自然界 1 km),即将伸展断层的主滑脱层设置在 10 cm 深处。实验中第一阶段伸展量为 10 cm,第二阶段伸展量为 10 cm,代表自然界总伸

表 1 实验材料与相似系数

Table 1 Experimental materials and similarity coefficient

物理量	地质原型 (n)	实验模型 (m)	相似比例 (m/n)
上地壳岩石密度(ρ_s)	2400 kg/m ³	1400 kg/m ³	0.6
内聚力(C_s)	10~20 MPa*	50~100 Pa**	6×10^{-6}
长度(l)	1 km	1 cm	10^{-5}
重力加速度(g)	9.81 m/s ²	9.81 m/s ²	1

注:* 数据据 Handin,1966; ** 数据据 Krantz,1991

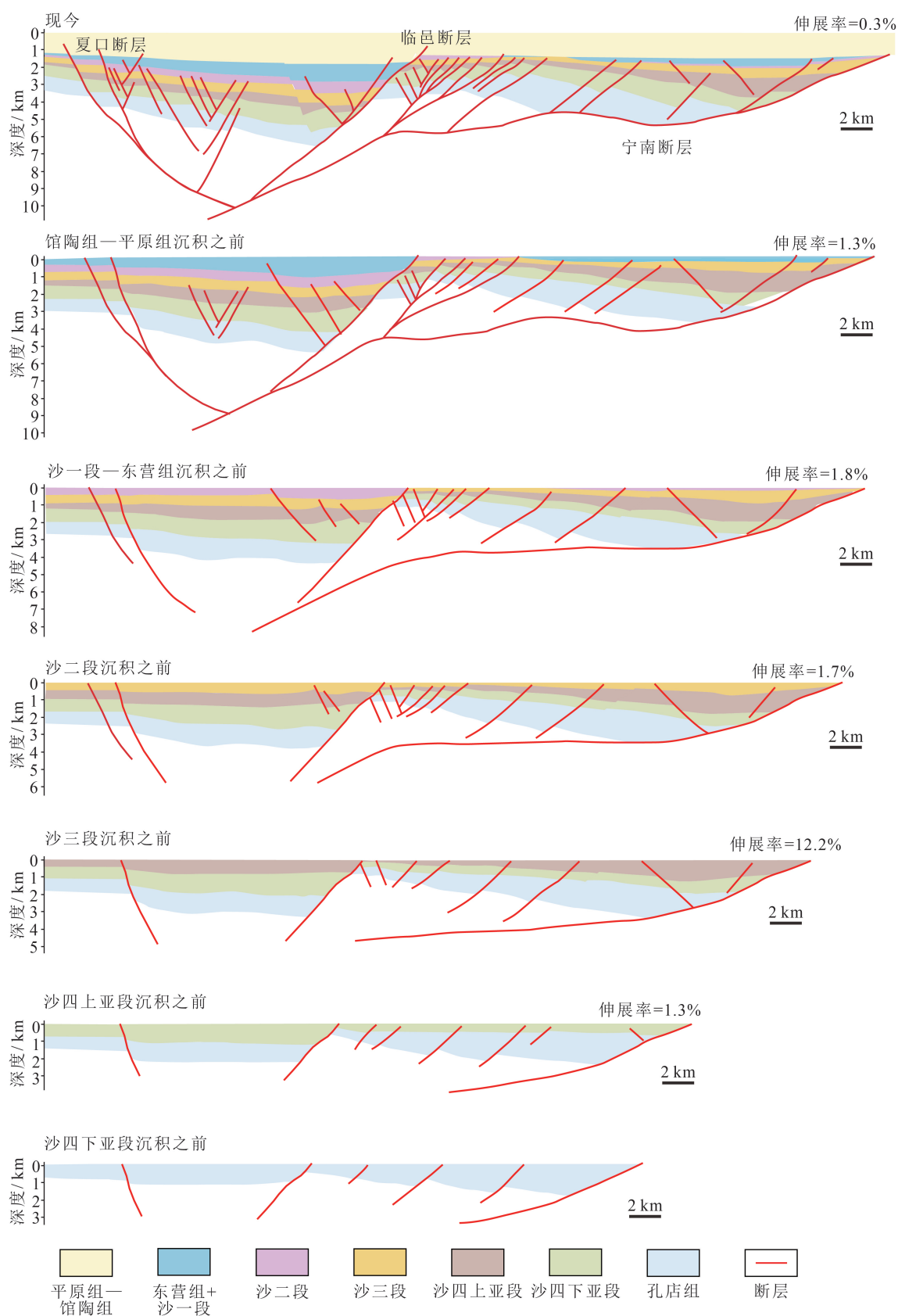


图 4 惠民凹陷典型地质平衡剖面演化模式图

Fig. 4 Balanced cross section of typical profile in Huimin sag

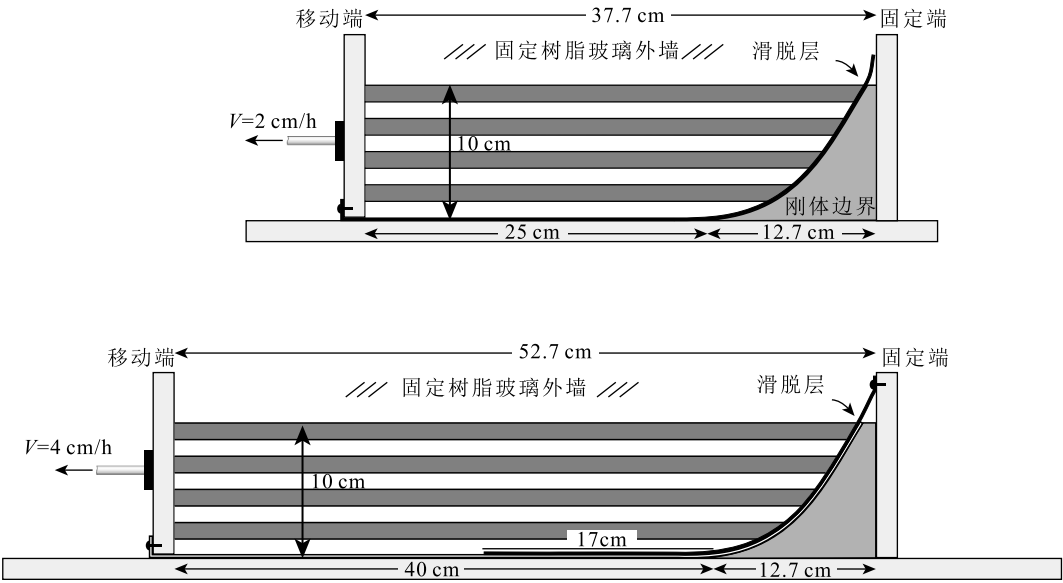


图 5 E1 和 E2 的实验设计方案
Fig. 5 Experimental setup for E1 and E2

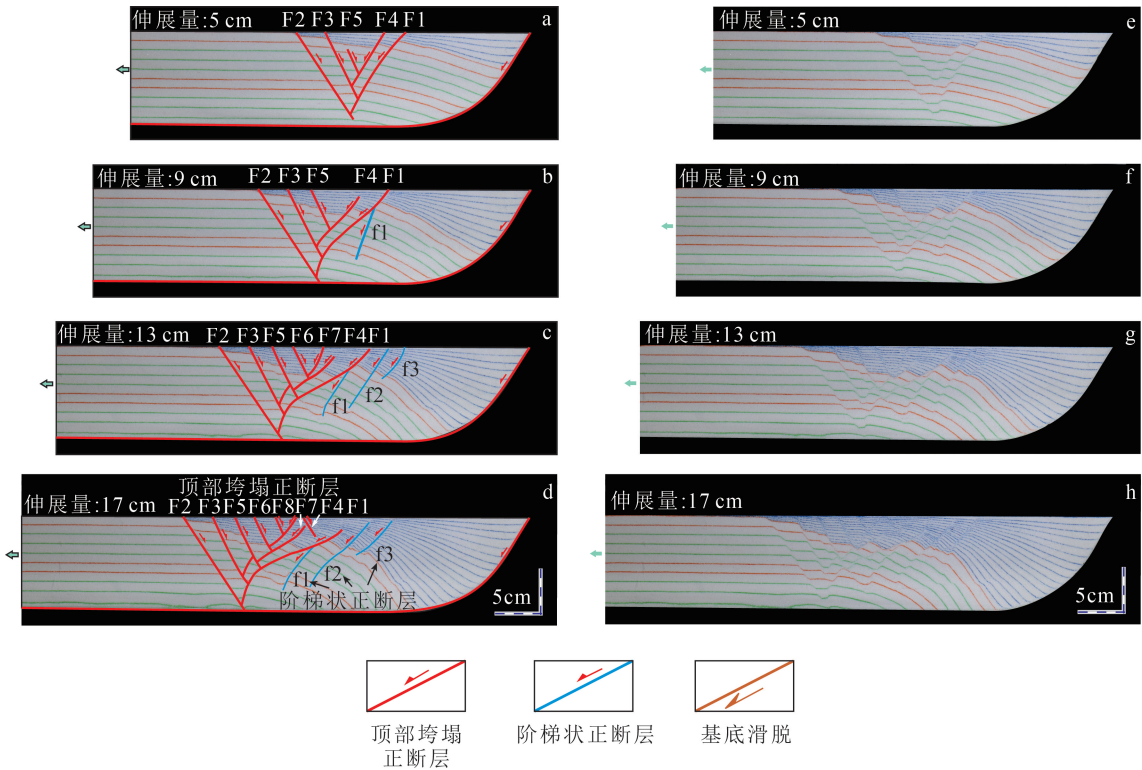


图 6 构造模拟实验 E1 结果(a~d 为解释版本;c~h 为未解释原图)
(绿色、橙色线为基底地层,蓝色线为同沉积地层)

Fig. 6 Results of analogue modeling experiment E1

展量为 20 km。在仅使用石英砂等颗粒材料,而不使用硅胶等塑性材料的实验中,构造变形特征受变形速率的影响很小,因此通常不考虑速率相似比

(Krantz, 1991)。

2.1 E1 实验设置

该实验模型由 1 cm 厚、30 cm 宽的 10 层白色、

彩色石英砂交替铺设而成,长度范围在 25~37.5 cm 之间,随左侧犁式断层长度变化而变化。实验模型总长度为 37.7 cm。右侧断层设置为简单的犁式断层模型,具体设计如图 5 所示,在实验过程中右侧模块保持固定状态。分布在犁式断层模型上方与石英砂下方的是聚乙烯塑料布,模拟滑脱层。填充于整个模型内部的为粒径 60~80 目的白色、彩色石英砂。其中实验开始前的白色、绿色、橙色石英砂模拟地质作用开始前的基底地层,实验开始后的白色、蓝色石英砂模拟同沉积作用形成的生长地层。实验照片(顶面、侧面)每 30 s 拍摄一次,同沉积每 30 min 进行一组。共进行 20 组同沉积。该实验拉伸速率为 2 cm/h,总拉伸量为 21 cm。

2.2 E2 实验设置

该实验初始设置由 1 cm 厚、30 cm 宽的 10 层白色、彩色石英砂交替铺设而成。砂箱初始长度为 25 cm,最终长度增加至 42.5 cm。右侧断层设置为简单的犁式断层模型,具体设计如图 5 所示,在实验过程中右侧断壁保持固定状态。分布在犁式断层模型上方与石英砂下方的是 2 层聚乙烯塑料布,用于模拟滑脱层。其中长布在底层,紧贴模型与试验台基底;短布在长布之上,紧贴砂体。短布上端于实验装置左侧自然放置,下端沿模型坡面下放至模型曲面与试验台基底切线右侧 4 cm 处终止,并使其在实验拉伸量进行至 10 cm 时固定。实验的地层设置为粒径 60~80 目的白色和彩色石英砂。其中实验开始前的白色、绿色、橙色石英砂模拟地质作用开始前的生长前地层,实验开始后的白色、蓝色石英砂模拟同沉积作用形成的生长地层。实验照片(顶面、侧面)每 20 s 拍摄一次,同沉积每 15 min 进行一组。共进行 20 组同沉积。该实验拉伸速率为 4 cm/h,总拉伸量为 21 cm。

3 实验结果

3.1 简单犁式(E1)实验结果

模型 E1 展示了简单犁式断层边界条件下,上盘滚动背斜和垮塌断层的发育过程。如图 6 所示,断层代号 F1~F8 代表断层形成的先后顺序。在伸展初期(伸展量 $E=3$ cm),上盘地层首先形成 2 个共轭正断层 F1 和 F2,以及内部 2 个断层 F3 和 F4(图 6-a)。其中,F1 和 F2 构成了后续垮塌断裂体系的边界断层,而其内部发育低序级的正断层 F3~F8。

随着伸展的进行(伸展量 $E=5\sim7$ cm),断层 F3 和 F4 向下延伸并交会,内部更低序级的断层 F5 开始形成并与 F4 相交。而在 F1 断层下盘,一些阶梯状左倾断层($f1\sim f3$)开始形成,且这些断层侧向依次向右上倾方向扩展。顶部垮塌断层与阶梯状正断层构成了简单犁式断层上盘的 2 种主要构造样式。

顶部垮塌断层由顺向(antithetic fault)和反向(synthetic fault)正断层构成,表现出不对称的结构特征:左侧断层数量较多并表现出高倾角的特征,而右侧断层数量较少,且随着伸展的进行而逐渐变缓。这一断层倾角变化的过程反映了由犁式断层造成的上盘滚动背斜发育过程中的地层旋转效应。图 7 展示了实验过程中主要断层 F1~F5 断层位移量的演化特征。统计表明,F2~F5 断层都表现出断层位移量先增加后逐渐稳定的特征,而 F1 断层表现出位移量持续增加的特征。顶部垮塌部位 2 个边界断层 F1 和 F2,表现出截然不同的演化特征:F1 与 F2 几乎同时形成,但是随着伸展过程的持续进行,F1 断层呈现出持续生长的特征,F2 则迅速达到稳定阶段,并随上盘地层向左迁移而不再活动。

3.2 两阶段伸展(E2)实验结果

模型 E2 展示了两阶段伸展背景下的犁式断层活动及其对上覆断裂和地层变形的影响。如图 8 所示,F1~F7 代表断层形成的先后顺序。早期阶段的演化模型展示了上盘滚动背斜垮塌正断层的形成与演化过程。实验共产生了 2 组倾向相反的正断层体系,其中 F1、F4、F5、F8 为与主拆离断层同向倾斜的断层,而 F2、F3、F6、F7 为与主拆离断层反向倾斜的断层。

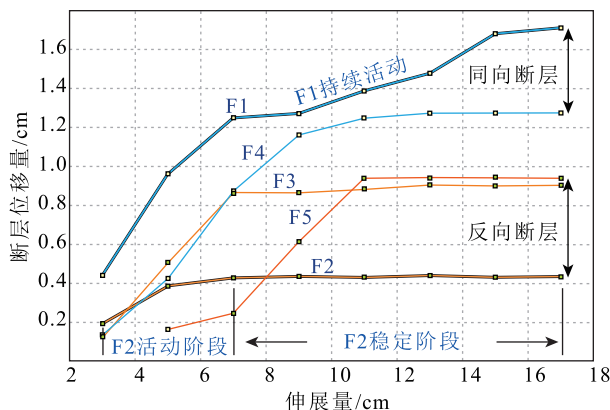


图 7 构造模拟实验 E1 断层位移量统计图

Fig. 7 The statistics of fault displacements in analogue modeling experiment E1

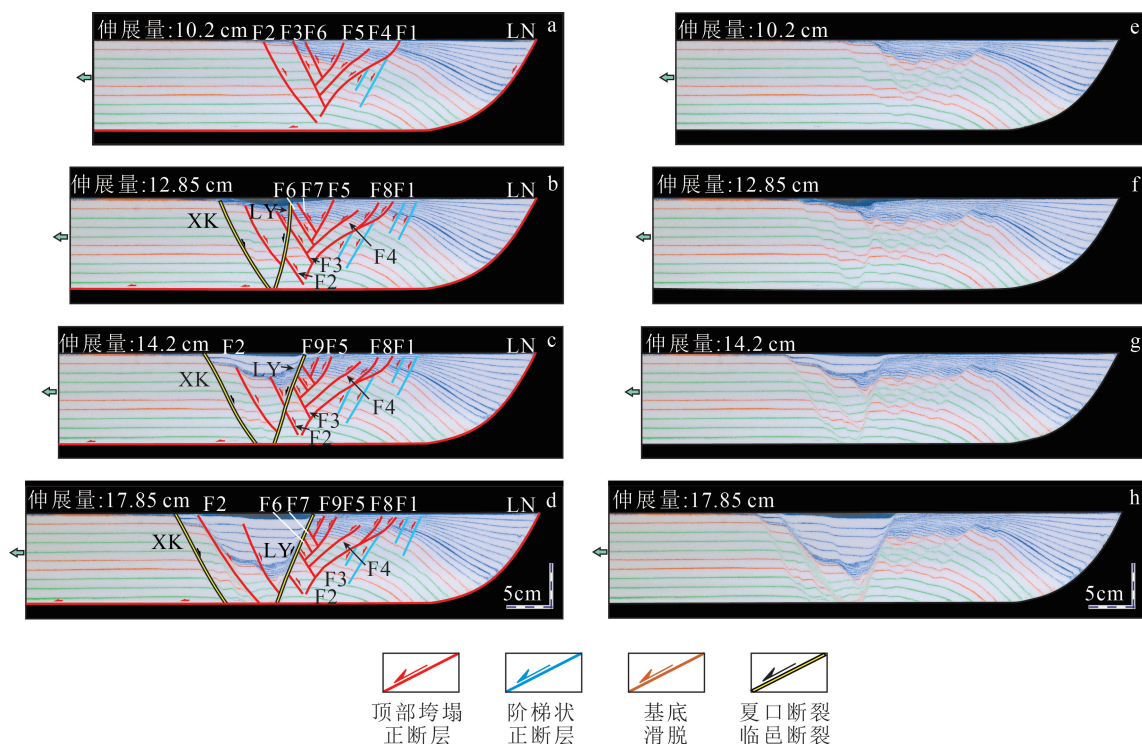


图8 构造模拟实验 E2 结果(a~d 为解释版本;e~h 为未解释原图)

(绿色、橙色线为基底地层,蓝色线为同沉积地层)

Fig. 8 Results of analogue modeling experiment E2

的正断层。F1 与 F2 属于基本同期形成的共轭型正断层,构成了上盘垮塌变形的边界断裂。随着伸展的持续进行,内部不同序级的正断层逐渐形成。值得指出的是,实验结果揭示,在上盘滚动背斜的垮塌区域,靠近核部位置的断层形成时间较晚,并且断层的序级越低其形成的时间越晚。在剖面上,这些不同序级的正断层交互切割,呈现出共轭的构造特征,但其与走滑断层的特征性“花状构造”的形成机制完全不同。

图 8-b~d 展示了第二阶段的结果,此阶段以临邑(LY)和夏口(XK)断裂的活动为主,宁南断层断坡段的活动性逐渐变弱到不活动。如图 8 所示,由夏口和临邑断层组成的共轭正断层围限的临南洼陷随着伸展量的增加而逐渐变宽。总体而言,早期形成的共轭断裂右侧部分的正断层基本不再活动,构造活动主要集中在临南洼陷中。需要注意的是,临邑断层的发育切割了早期形成的滚动背斜相关的共轭断裂体系的左侧部分,包括 F2、F3、F6、F7 等反向断层均遭到了临邑断层的切割。如图 9 显示,这些断层段被切割的位错量随着伸展过程的持续

而逐渐增加。特别地,F2 和 F3 断层在持续伸展的背景下继续活动,断层上端点(tip)向同沉积地层中逐渐生长,其褶皱构造变形与正断层相关的三剪(trishear)变形样式一致。

4 讨论

4.1 构造样式

本次设计 2 组对照实验,研究渤海湾盆地惠民凹陷中伸展滚动背斜顶部断裂结构特征的形成机制。实验 E1 为参考模型,主要分析典型犁式正断层发育过程中的上盘构造变形特征;实验 E2 则考虑了实际地质模型中的临南洼陷(临邑、夏口断层围限)的发育,因此 E2 的实验结果可用来对比临邑断层发育对早期形成构造的改造作用。

从实验结果看,2 组实验(E1 和 E2)都形成了伸展断层相关褶皱中背斜顶部的“垮塌断层”,但是这些断层与走滑断层的“花状构造”无论在概念、变形过程与形成机制上都完全不同。花状构造是走滑断层系中一种特征性构造,一般形成于扭动断裂(wrench fault)变形环境(Sylvester, 1988; Harding,

1990;王义天等,1999)。根据断裂带结构和力学性质差异,可分为正花状构造和负花状构造(图 10)。正花状构造是挤压性走滑断层派生的在压扭性应力状态中形成的构造,在剖面上主要表现为一条陡立的走滑断层向上分叉撒开,由逆断层组成的背冲构造特征。负花状构造是拉张性走滑断层派生的在张扭性应力场中形成的构造,在剖面上表现为似地堑状的多个正断层构成,向下汇聚成为一个陡立的主断层面。

从 E1 和 E2 的实验结果看,剖面上并不发育陡立的主干断层,而是在早期形成 2 条基本对称的共轭正断层。特别强调的是,随着伸展持续进行,上盘顶部垮塌断层内部的断层形态和活动性也存在不对称性演化趋势:左侧断层数量不断增加,但这些断层依次停止活动;右侧断层数量较少,但活动性持续,且断层倾角逐渐变缓(图 6)。因此,实验和实际剖面观测到的断裂体系的形成主要与犁式断层断面倾角变化引起的上盘应变分布变化有关。

本次研究设计的 2 类构造物理模拟实验均为纯伸展设置,并不存在张扭伸展(transpressional tectonics)或纯走滑(pure strike-slip tectonics)的构造变形设置条件(Dewey et al., 1998),因此产生的花状断裂结构显然不能用走滑或张扭断裂机制来解释。后续的构造物理模拟实验,应当考虑惠民凹陷存在一定的张扭构造背景,以及 NE 向先存断层在伸展过程中的活化对于断裂体系形成和演化的影响,重点关注惠民中央隆起带断裂体系在平面和剖面上沿走向的三维构造差异性及其形成机制。

4.2 构造应力场与断裂构造成因

前人通过对惠民凹陷各反射层不同方位断层活动性质的分析,认为其在古近纪断陷盆地发育期间的区域拉伸方向为 SN 向。惠民凹陷古近纪的拉伸应力(σ_3)水平,为 SN 向延伸;挤压(σ_1)应力直立;而中间主应力轴(σ_2)水平,呈 EW 向延伸。尽管在古近纪控盆断层——宁南断层的活动性先强后弱,但整个盆地在区域构造应力场下始终保持 SN 向伸展的特征,构造应力场的方向没有发生变化。在这样稳定的伸展构造应力场下,宁南断层活动导致滋镇洼陷的形成,且由于其深部断层形态的变缓导致上盘地层发生褶皱形成滚动背斜,即惠民中央隆起带(图 4)。

前人研究发现,发育于低角度拆离断层(low-

angle detachment)之上的伸展楔体(extensional wedge)与逆冲构造环境下发育的挤压楔体(compressional wedge)的样式具有相似性,且仅底部的剪切方向相反(Dahlen, 1984;; Xiao et al., 1991)。Xiao et al. (1991)修订了挤压库伦临界楔的理论模型,提出了针对低角度拆离断层之上的伸展楔体的形成机制。理论分析和物理模拟实验证实,伸展楔体与挤压逆冲楔体具有一定的相似性:处于临界状态的楔体在底部拆离断层上稳定滑动而不需要内部的变形。但是,2 类构造楔体从次临界发展成临界状态的变形过程则完全相反:挤压构造楔体通过内部逆冲断层发育,从而增加楔体锥角来达到临界状态;而伸展构造楔体通过内部正断层发育减小楔体锥角,从而达到临界状态。本次 E1 实验产生多组具共轭结构关系的正断层,表明该伸展楔体总体上处于稳定滑动的“临界”状态。反之,如果该伸展楔体处于次临界状态,将发育一系列顺向正断层来减小顶部坡角(α),进而达到临界状态。

如图 11-c 所示,位于应力状态摩尔圆横轴下方的为伸展构造楔体,而上方对应挤压构造楔体。根据库伦破裂准则,楔体中的 2 组滑移线相对最大主应力(σ_1)的方位角为 $\pm(45-\varphi/2)$, φ 为内摩擦角与岩石力学性质有关。本次实验 E1 显示,在初期形成的共轭的 2 组正断层 F1-F2 和 F3-F4 序列,具有同时活动的特征(图 6)。伸展量增加至 9 cm 时,F1

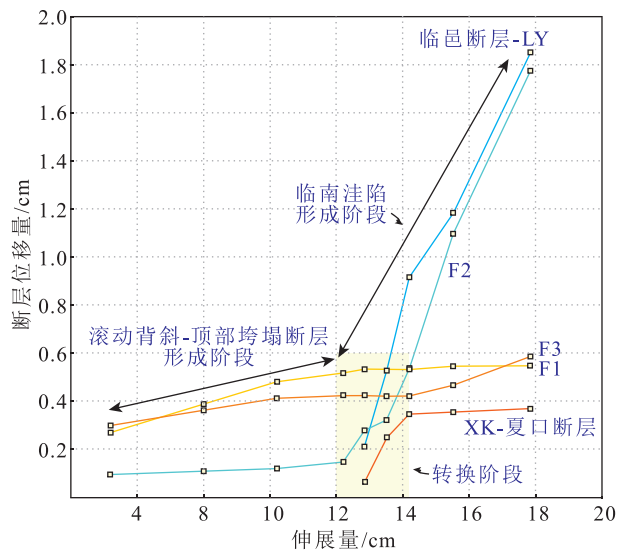


图 9 构造模拟实验 E2 断层位移量演化图

Fig. 9 The statistics of fault displacements in analogue modeling experiment E2

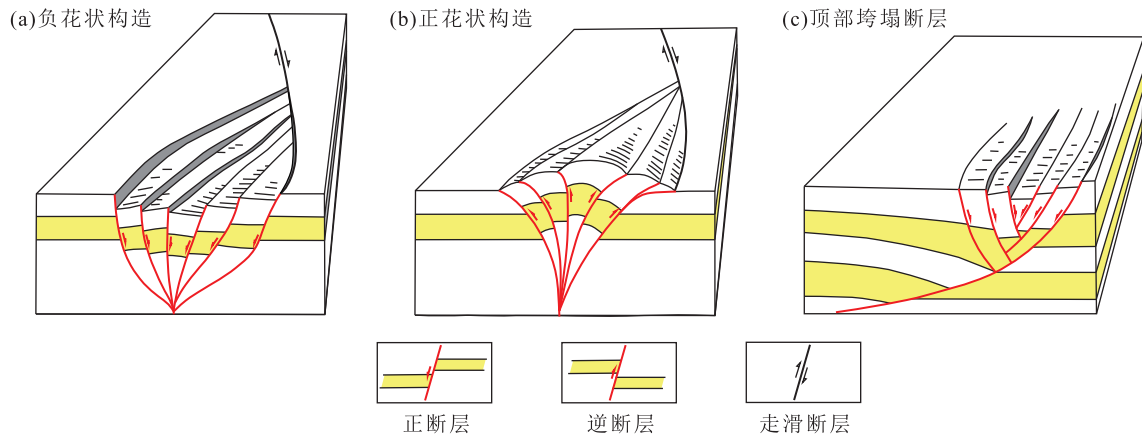


图 10 花状构造与顶部垮塌断层的构造模式图(a、b 据 Fossen, 2016 修改)

Fig. 10 Structural model diagrams of the flower structures and crestal collapse faults

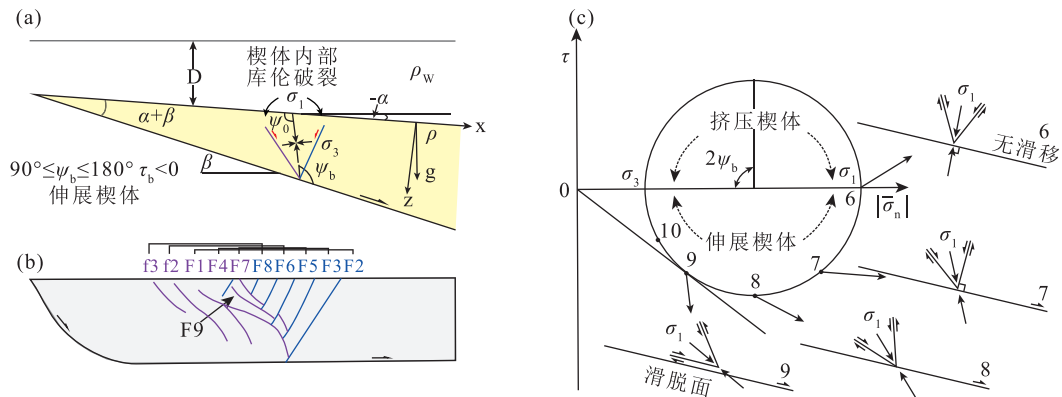


图 11 伸展构造楔体的库伦破裂模型(据 Xiao et al, 1991 修改)

Fig. 11 Coulomb fracture model of extensional structural wedge

断层下盘的断层 f1 开始发育,与 F5 基本同时活动,构成一组共轭破裂断层。随着伸展的持续进行,“阶梯状”正断层 f2、f3 逐渐开始形成,与反向断层 F6、F8 同时活动,断裂结构上呈现共轭关系。构造物理模拟实验展示的这些同时活动的断裂,对应伸展楔体中的一组库伦破裂,如图 11-c 中的 7 和 8。其中,最大主应力方向(σ_1)与 X 轴的夹角为 ψ_0 ,随着 ψ_0 的角度从垂直(90°)逐渐增加,2 组共轭断裂的角度也逐渐发生旋转。大部分的地质实例对应于伸展楔体从 6~8 点的库伦破裂,而在第 9 点中,库伦破裂中的一条断层成为新的滑脱层,另外一条断层则变成逆断层。

本次开展纯伸展性质物理模拟实验,主要是为了分析宁南断层对中央隆起带滚动背斜一级几何形态及其顶部垮塌断层的控制作用及机理。在后续的研究中,可以设置考虑张扭构造性质、先存 NE

向基底断层等因素对惠民中央隆起带帚状断裂体系发育的控制和影响机制。

5 结 论

(1) 物理模拟实验再现了惠民凹陷中滚动背斜与顶部垮塌断层的形成过程,揭示出盆缘犁式拆离断层对上盘构造变形的总体控制作用,以及临邑与夏口断层的发育与临南洼陷的形成过程。

(2) 纯伸展的物理模拟实验显示,滚动背斜顶部垮塌断层发育大量顺向和反向断层,呈现共轭断裂结构特征,类似于惠民凹陷典型剖面中的“花状构造”,但其并非由走滑断裂活动造成。

(3) 实验显示,惠民凹陷典型剖面中早期伸展楔体内部始终存在同时活动、呈共轭关系的 2 组破裂面,与伸展楔体内部的库伦破裂机制一致,表明该伸展楔体接近临界状态。

参考文献

- Adam J, Urai J L, Wieneke B, et al. Shear localisation and strain distribution during tectonic faulting—new insights from granular-flow experiments and high-resolution optical image correlation techniques[J]. *Journal of Structural Geology*, 2005, 27: 283–301.
- Dahlen F A. Noncohesive critical Coulomb wedges: An exact solution[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1984, 89 (B12): 10125–10133.
- Del Ventisette C, Bonini M, Agostini A, et al. Using different grain-size granular mixtures (quartz and K-feldspar sand) in analogue extensional models[J]. *Journal of Structural Geology*, 2019, 129: 103888.
- Dewey J F, Holdsworth R E, Strachan R A. Transpression and transtension zones[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1998, 135 (1): 1–14.
- Ellis P G, McClay K R. Listric extensional fault systems—results of analogue model experiments[J]. *Basin Research*, 1988, 1(1): 55–70.
- Fossen H. *Structural Geology* [M]. Cambridge University Press, Cambridge, 2016.
- Groshong R. Unique determination of normal fault shape from hanging-wall bed geometry in detached half grabens[J]. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 1990, 83(3): 455–471.
- Hamblin W K. Origin of “reverse drag” on the downthrown side of normal faults[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1965, 76(10): 1145–1164.
- Harding T P. Identification of wrench faults using subsurface structural data: criteria and pitfalls[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1590–1609.
- Khalil S M, McClay K R. Extensional fault-related folding, northwestern Red Sea, Egypt [J]. *Journal of Structural Geology*, 2002, 24 (4): 743–762.
- 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: 203–207.
- McClay K R. Extensional fault systems in sedimentary basins: a review of analogue model studies[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1990, 7(3): 206–233.
- McClay K R, Scott A D. Experimental models of hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems[J]. *Tectonophysics*, 1991, 188(1/2): 85–96.
- Nunns A G. Structural restoration of seismic and geologic sections in extensional regimes[J]. *AAPG Bulletin*, 1991, 75(2): 278–297.
- Shaw J H, Hook S C, Sitohang E P. Extensional fault-bend folding and synrift deposition: An example from the Central Sumatra Basin, Indonesia[J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81(3): 367–379.
- Shaw J H, Connors C D, Suppe J. Seismic interpretation of contractional fault-related folds [M]. *American Association of Petroleum Geologists*, 2005.
- Sylvester A G. Strike-slip faults [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1988, 100(11): 1666–1703.
- Sun C, Jia D, Yin H, et al. Sandbox modeling of evolving thrust wedges with different preexisting topographic relief: Implications for the Longmen Shan thrust belt, eastern Tibet [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121: 4591–4614.
- Suppe J. Geometry and kinematics of fault-bend folding [J]. *American Journal of Science*, 1983, 283(7): 684–721.
- Wang D, Wu Z P, Yang L L, et al. Growth and linkage of the Xiakou fault in the Linnan Sag, Jiyang Depression, Eastern China: Formation mechanism and sedimentation response [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 116: 104319.
- Xiao H B, Suppe J. Origin of rollover [J]. *AAPG Bulletin*, 1992, 76(4): 509–529.
- Xiao H B, Dahlen F A, Suppe J. Mechanics of extensional wedges [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1991, 96(B6): 10301–10318.
- Zhu Y B, Liu S F, Zhang B, et al. Reconstruction of the Cenozoic deformation of the Bohai Bay Basin, North China [J]. *Basin Research*, 2020, 33: 364–381.
- 封东晓. 张扭构造的几何学、运动学特征及其石油地质意义[D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2015.
- 何登发, Suppe J, 贾承造. 断层相关褶皱理论与应用研究新进展[J]. *地学前缘*, 2005, 12(4): 353–364.
- 贾东, 陈竹新, 张愷, 等. 东营凹陷伸展断弯褶皱的构造几何学分析[J]. *大地构造与成矿学*, 2005, 29(3): 295–302.
- 贾东, 李一泉, 王毛毛, 等. 断层相关褶皱的三维构造几何学分析: 以川西三维地震工区为例[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 732–740.
- 李德生. 渤海湾含油气盆地的地质和构造特征[J]. *石油学报*, 1980, 1(1): 6–20.
- 陆克政, 漆家福, 戴俊生, 等. 渤海湾新生代含油气盆地构造模式[M]. 北京: 地质出版社, 1997.
- 马立成, 施炜, 李建华, 等. 庐山岩浆核杂岩隆起—快速伸展变形特征和时代[J]. *地质通报*, 2023, 42(4): 589–599.
- 漆家福, 肖焕钦, 张卫刚. 东营凹陷主干边界断层(带)构造几何学、运动学特征及成因解释[J]. *石油勘探与开发*, 2003, 30(3): 8–12.
- 沈礼, 贾东, 尹宏伟, 等. 基于粒子成像测速(PIV)技术的褶皱冲断构造物理模拟[J]. *地质论评*, 2012, 58: 73–82.
- 苏金宝, 朱文斌, 贾东, 等. 伸展断层相关褶皱的几何学分析及其在车镇凹陷中的应用[J]. *地质学报*, 2011, 85(10): 563–1573.
- 王义天, 李继亮. 走滑断层作用的相关构造[J]. *地质科技情报*, 1999, 18(3): 30–34.
- 杨克基, 漆家福, 余一欣, 等. 渤海湾地区断层相关褶皱及其油气地质意义[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(3): 625–636.