



地质学报
Acta Geologica Sinica
ISSN 0001-5717, CN 11-1951/P

《地质学报》网络首发论文

题目: 渤海湾盆地南堡凹陷构造成因解析:来自地震资料解释与三维砂箱物理模拟实验的启示
作者: 王于恒, 于福生, 宋璐, 王丹丹, 赵宝银, 齐伊犁, 孟令箭
DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024031
收稿日期: 2024-01-15
网络首发日期: 2024-11-04
引用格式: 王于恒, 于福生, 宋璐, 王丹丹, 赵宝银, 齐伊犁, 孟令箭. 渤海湾盆地南堡凹陷构造成因解析:来自地震资料解释与三维砂箱物理模拟实验的启示 [J/OL]. 地质学报. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024031>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

渤海湾盆地南堡凹陷构造成因解析：来自地震资料解释与三维砂箱物理模拟实验的启示

王于恒^{1,2)}, 于福生^{*1,2)}, 宋璐³⁾, 王丹丹⁴⁾, 赵宝银⁵⁾, 齐伊犁^{1,2)}, 孟令箭⁵⁾

1) 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京, 102249;

2) 油气资源与工程全国重点实验室, 中国石油大学(北京), 北京, 102249;

3) 中国石油集团工程研究院有限公司, 北京, 102206;

4) 河北省地质矿产勘查开发局第五地质大队, 河北唐山, 063000;

5) 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北唐山, 063000

内容提要: 裂陷盆地形成过程受多因素制约, 如基底先存构造、沉积物质能干性、裂陷期次与裂陷方向, 最终会形成多组走向不同, 规模各异的断裂系统, 组成多种构造样式。这无疑使盆地构造解析变得极为困难, 本文通过三维地震资料解释与对照组构造物理模拟实验, 重现多因素影响下东营组以来南堡凹陷南北向伸展形成演化过程。研究表明: ① 南堡凹陷是发育在先存构造基底条件下的多期裂陷产物。最终在明化镇组形成南北分区变形, 东西分段相连, 上下分层变形的构造格局。② 凹陷南部的先存古隆起影响均匀分布的伸展变形, 北部形成分段相连的网状交织式新生断裂系统, 南部先存构造再活化形成东西两侧弧形雁列式继承断裂系统。多期异向裂陷过程中形成的北东向先存断层是制约晚期断层定向排列的重要因素。③ 韧性滑脱层是增强断层相互作用的关键物质因素, 促进了孤立断层彼此连接, 形成东西向分段连接的正断层组合, 断层通过自身的弯曲容纳由先存构造导致的斜向伸展位移。

关键词: 渤海湾盆地; 先存构造; 韧性滑脱层; 构造物理模拟实验; 南堡凹陷

渤海湾盆地位于北部古亚洲洋构造域、南部特提斯洋构造域和东部太平洋构造域的中心(漆家福等, 1995; Allen et al., 1997; 李三忠等, 2004)。由于古亚洲洋、太平洋和特提斯洋三大构造域的先后或同时作用, 先后经历了复杂的构造格局重组、构造机制转换、构造性质变革等(李三忠等, 2010; Qi and Yang, 2010; Li et al., 2012; 何登发, 2022)。目前, 渤海湾盆地在新生代的两期构造旋回是主流观点: 古近系裂谷期与新近系以来的热沉降期(漆家福等, 1995; Allen et al., 1997; 童亨茂等, 2013; 梁杰等, 2014; Yu and Koyi, 2016), 每个构造旋回又可细分为不同的次级阶段。始新世(~65 Ma)盆地沉积主要受 NE 向同沉积断层控制, 形成孤立式的

半地堑结构; 渐新世(~28.5 Ma)以来则主要受到东西向的控陷断层影响, 逐渐演化为多个完整的, 广泛分布的地堑结构, 在中新世(~23.8 Ma)以后大范围沉降形成统一的沉积中心。最终盆地在上新世(~14.8 Ma)伸展构造再活化, 浅层断裂非常发育。因此, 盆地主要被解释为始新世的 NW-SE 向裂陷, 渐新世晚期进入 N-S 向裂陷, 中新世热沉降拗陷乃至上新世的 N-S 伸展构造再活化的多期异向伸展模型。

而盆内南堡凹陷的构造成因已进行过大量研究, 前人提出过诸如拉分伸展型凹陷(周海民等, 2000)、伸展挤压交替的复杂凹陷(石振荣等, 2000)、受北东向右旋走滑体系控制的走滑性质凹陷(徐

注: 本文为国家自然科学基金面上项目(编号 41472116)和中国石油天然气股份有限公司冀东油田分公司勘探开发研究院项目(编号 JDYT-2017-JS-308)联合资助的成果。

收稿日期: 2024-01-15; 改回日期: 2024-04-03; 责任编辑: 刘俊来; 责任编辑: 蔡志慧。

作者简介: 王于恒, 男, 博士研究生, 主要从事构造地质学方面的研究。E-mail: 2021310017@student.cup.edu.cn。

* 通讯作者: 于福生, 男, 教授, 博士生导师, 主要从事构造地质学方面的研究。E-mail: fushengyu@cup.edu.cn。

引用本文: 王于恒, 于福生, 宋璐, 王丹丹, 赵宝银, 齐伊犁, 孟令箭. 2024. 渤海湾盆地南堡凹陷构造成因解析: 来自地震资料解释与三维砂箱物理模拟实验的启示. 地质学报, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024031.

Wang Yuheng, Yu Fusheng, Song Lu, Wang Dandan, Zhao Baoyin, Qi Yili, Meng Lingjian. 2024. Genesis analysis of the Nanpu sag, Bohai Bay basin: Insights from seismic data interpretation and 3D sandbox analogue modelling. Acta Geologica Sinica.

安娜等,2008)、南北向持续伸展模型(周天伟和翟瑞国,2008)、燕山期走滑成盆模型(董月霞等,2008)、受控于边界条件的单期裂陷产物(周天伟等,2009)、两期伸展变形叠加模式(童亨茂等,2013)及多期变形叠加(梁杰等,2014)等多类成因模式。近年来,随着盆地的运动学模型观点逐渐统一,南堡凹陷也已被公认的多期异向伸展模型合理解释。在凹陷内部主干断裂活动性研究也大多支撑该观点,如边界西南庄及柏各庄断层活动性控制凹陷沉积过程(姜华等,2010;史冠中等,2011;孙思敏等,2016;童亨茂等,2018a,2018b;Zhao Rui et al.,2019;刘可行等,2020),高柳高北断层生长连接过程及分段性(姜华等,2009;蔡蕊和刘浩,2013),1号、4号断裂带的演化过程(刘露等,2022),2号、3号断裂带成因分析(黄浩天,2019;杨荣超等,2022)及同沉积断层体系及沉积厚度分析(梁杰等,2014)。因此,本研究不再针对具体断裂带活动性及构造演化过程进行分析,而是沿用前人观点。

现今的研究结果都是基于地震解释总结而来,集中在构造演化的定性研究中。然而凹陷呈现南北分区变形的构造差异,北部为北东向分段相连的断裂系统,南部则存在弧形帚状构造带。构造差异的控制因素尚不明确,缺乏系统的构造模拟实验,探讨

裂陷盆地形成过程中的关键主控因素。笔者在三维地震资料解释基础上,总结凹陷分区分期构造变形的特征,建立初始地质模型,进而设计等比例对照组模拟实验,讨论裂陷盆地的形成演化。研究证实:南堡凹陷南部发育的四个先存构造是导致分区变形的关键条件,沙河街组厚层泥岩充当了理想的滑脱层,导致帚状构造带和分段连接的断层系统形成。

1 地质背景

南堡凹陷是位于渤海湾盆地北部的一个典型的湖相裂谷盆地(图1a),总面积约1932 km²。地层主要为北部断陷,向南地层逐渐超覆沉积。其北部为燕山山脉,南部为沙垒田凸起,东西两侧分别与渤中凹陷和歧口凹陷直接相连。南堡凹陷主要为新生代沉积地层,前新生代地层经历印支期(T末期)南北向挤压及燕山期末期(K₂末期)的挤压阶段(漆家福等,2003)。两期构造叠加下,在新生界变形前便形成局部高部位潜山,地层暴露剥蚀后分布不均,仅在局部地区发育。新生代地层自下而上细分为始新统沙河街组(Es)、渐新统东营组(Ed)、中新统馆陶组(Ng)、上新统明化镇组(Nm)以及上覆的第四系(图1c)。沉积地层主要分布在受北东向和东西向断层控制的次级地堑或半地堑组合中。始新世的沉

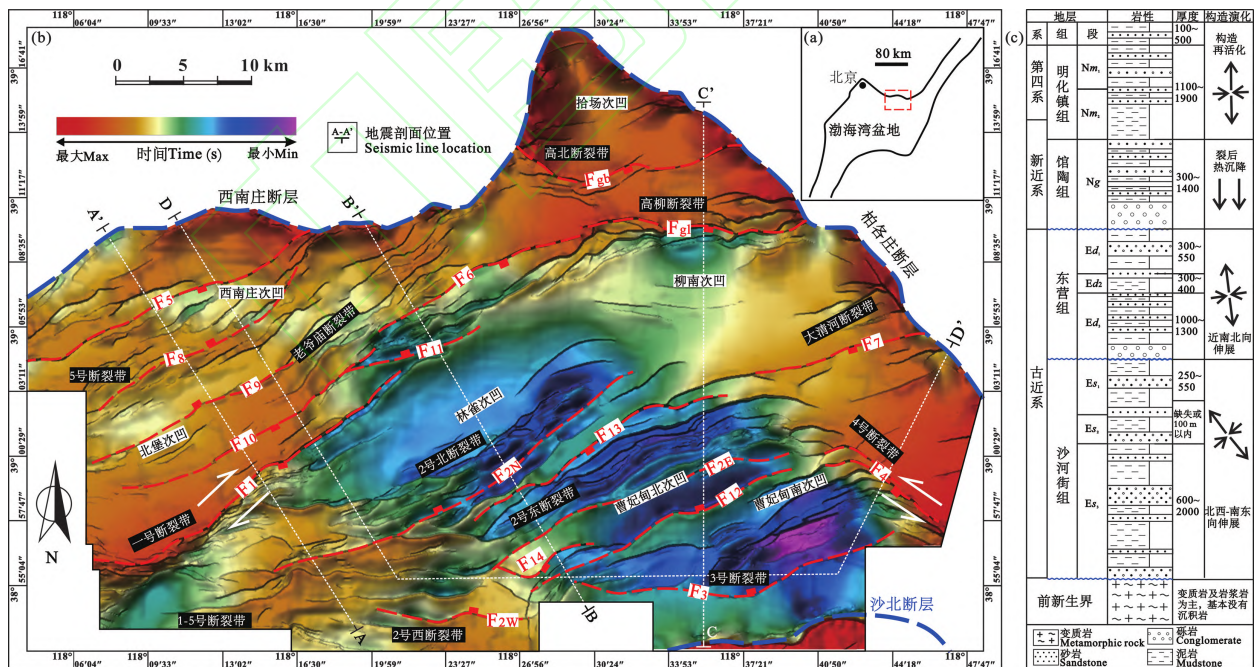


图1 南堡凹陷构造概况图

Fig.1 Overview of the structural features of the Nanpu sag

(a)—区域位置图(Wang Yuheng et al.,2024);(b)—浅层明化镇组底界三维构造图;(c)—地层综合柱状图

(a)—regional location map (Wang Yuheng et al.,2024);(b)—3D structural map of the bottom boundary of the shallow Minghuazhen Formation;(c)—comprehensive stratigraphic column

积环境主要是湖泊相,伴有重力流沉积建造,夹杂有少量的河流和冲积扇沉积。因此也在该时期沉积了大量的泥岩沉积物(姜福杰等,2023),可能是研究区理想的基底滑脱层(1000~2000 m 左右厚度)。而在始新世以后的盆地充填物主要是河流陆源碎屑沉积物,占比极高,盆地全面进入陆相沉积背景。主要层系界面间均有不等厚的底砾岩发育,以馆陶组区域性分布最为明显,标志着期间发生过重大的构造运动。

2 构造变形特征

2.1 凹陷结构特征

三维地震资料解释和编图成果揭示南堡凹陷上新世(16.8 Ma)主要由 NEE 向断层与近 EW 向断层为主,进而控制多米诺式排列的半地堑系统(图 1a)。剖面上总体表现为沙河街期北西断南东超的地层结构,叠加上覆东营期以来北断南超的地层结构,凹陷整体被南北两侧东西走向的边界断层(沙北断层、西南庄断层和柏各庄断层)共同控制(图 2)。但由于主干边界断层的产状及分段活动性质差异,凹陷沉降中心具有持续的迁移过程(姜华等,2010;史冠中等,2011;孙思敏等,2016)。根据凹陷内断裂组合样式和沉积充填特征差异,可将南堡凹陷划分为主要的 12 个断裂带:1 号至 5 号断裂带、1~5 号(1 号与 5 号断裂带夹持的局部隆起区)、老爷庙、高柳、高北及大清河断裂带;断层走向以 NEE、NW 和近 EW 向为主,这些交叉的断裂带共同构成七个次凹的边界,分别是西南庄、北堡、林雀、曹妃甸北、曹妃甸南、柳南及拾场次凹,其中曹妃甸南次凹为最深的负向构造,林雀次凹为面积最大的负向构造(图 1a)。

北东向与南北向地震格架剖面分别揭示南堡凹陷不同区多期构造叠加现象与深浅层断层相互交切关系:凹陷西部(图 2a)具有明显的北断南超地层特征,整体地层沉降受边界西南庄断层控制,5 号断裂带区域的持续伸展导致深层形成上陡下缓的铲式断面,与晚期同倾的次级断层共同组成铲式扇组合,促进裂隙宽度增大,浅层则构成复合“Y”型构造,但都以板式正断层为主,实为主干断层的调节断层;1 号断裂带区域深层呈现掀斜式隆起特征,先存古隆起呈高角度南倾,受其影响的深层断层 F_1 持续活动到晚期,并控制沙河街组以来的沉积,为持续活动型主干断层,晚期斜向伸展导致伴生的一系列次级构造共同构成负花状构造;而断层 F_{1-5} 主要控制前新生

界沉积,形成典型的沉积楔状体,且未有直接通至盖层的新生断层,对于新生界以来的构造活动影响甚小。凹陷中部(图 2b)不再具有明显的北断南超式地层结构,转为两侧边界断层控凹的双断式结构,此时的西南庄断层也已进入东西向中段,控沙河街组沉积微弱(姜华等,2010;孙思敏等,2016;刘可行等,2020);西南庄断层该段已转为坡坪式结构,二级断坡处与主干断层 F_6 直接相连,形成深层坡坪式结构,浅层复合“Y”型组合, F_6 与 F_{11} 断层组成的地堑内部存在多条次级调节断层,共同分担了大量的伸展位移;2 号东断裂带与 2 号北断裂带在浅层分别构成两个地堑结构,但在深层实则相互交叉形成地垒结构,最终形成典型的“X”型组合(穆立华等,2018),因此构造成因近似,故按位置划分为 2 号断裂带的次级单元,为区分诱发浅层变形区的不同进而分述(图 4a),2 号断裂带的深层断层均控制新生界组以来沉积(穆立华等,2018;杨荣超等,2022),且也具有明显的基底高程差异,为先存古隆起诱发的长期活动断层; F_3 断层处呈现明显的掀斜隆起,也为先存古隆起,但在浅层由于断层的分段性,基底断层活动性不显著(图 5c)。凹陷东部(图 2c)柏各庄边界断层不再控陷,东营组以来沉积主要由高柳断层控制(姜华等,2009;姜华等,2010;史冠中等,2011;刘可行等,2020),整体仍为双断式结构。高柳断层虽向下切割至基底,但对沙河街组及前新生界地层沉积不起控制作用,为晚期活动断层向下传播型。2 号断裂带此时已呈现明显的复合“Y”型组合,多条次级断层与主干断层 F_{12} 、 F_{2E} 、 F_{13} 及 F_4 共同构成渤海湾盆地浅层典型的“背形负花状构造”(刘晓峰等,2010;穆立华等,2018)。主干断层 F_3 此时可见长期活动特征,持续控制新生界地层沉积,为先存古隆起诱发的长期活动断层。

横跨研究区各大断裂带的地震-地质综合剖面展示南堡凹陷区域结构(图 3),显著存在三期不整合界面,其中馆陶—东营组间的削截不整合(图 3c),东营组—沙河街组的超覆不整合(图 3d)及沙河街界—中生界的超覆不整合(图 3e),证实该区新生界重要的三期构造运动。剖面清晰展示出南堡凹陷新生界变形前的五个先存古隆起(图 3b),其中,基底古隆起诱发形成的断层 F_1 、 F_{2W} 、 F_3 及 F_4 在新生界始终保持着较强的活动性,且与浅层断层的形成直接相关,是重要的先存基底断层。而 F_{1-5} 断层则仅在深层发育,晚期不再活化。结合前人区域构造演化研究,南堡凹陷新生界自下而上经历了三期

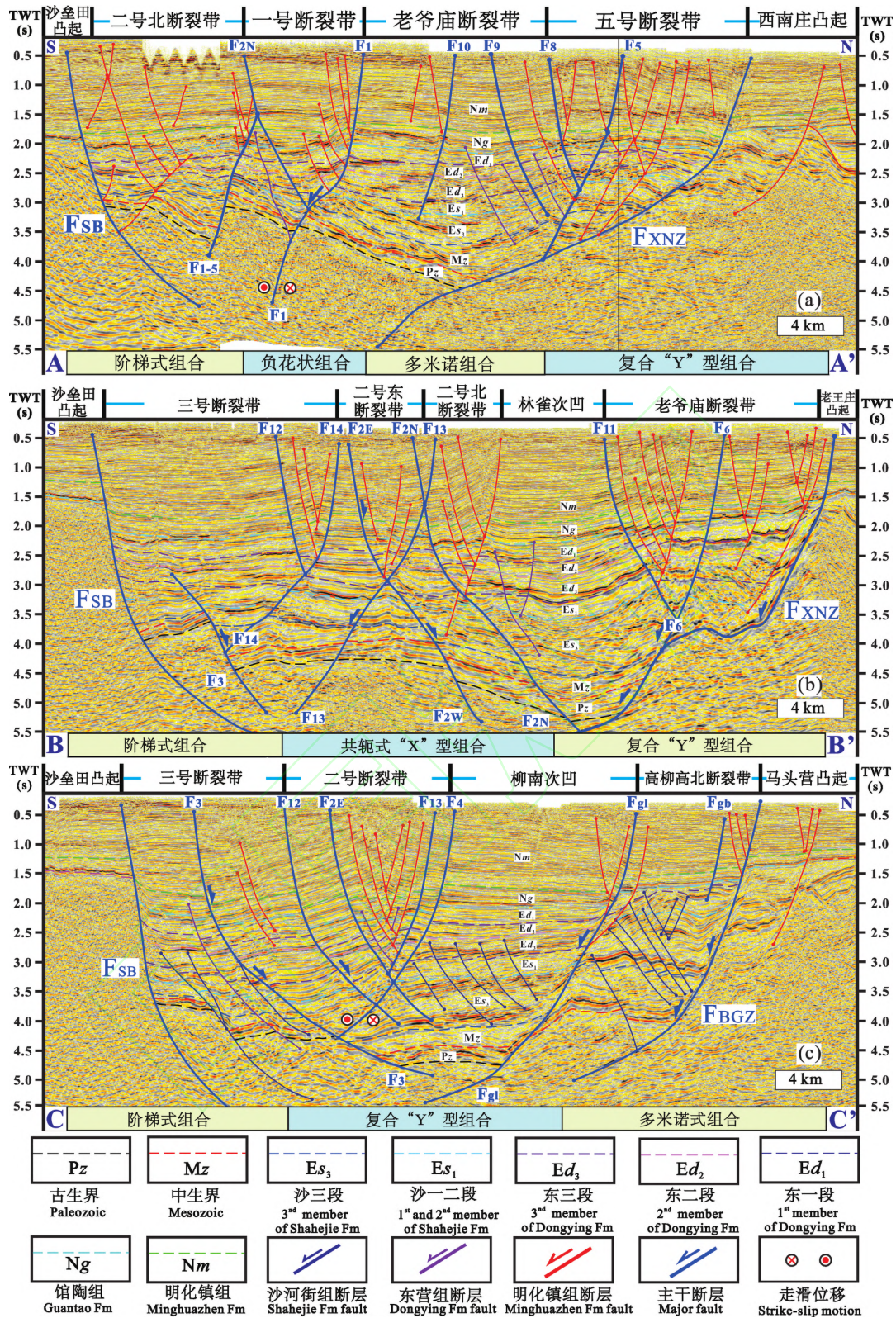


图2 南堡凹陷构造变形特征格架剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 2 Structural deformation framework profile of the Nanpu sag (profile location shown in Fig. 1b)

(a) —西部构造特征, 北断南超的地层特征和铲式扇构造样式; (b) —中部构造特征, 双断式结构和共轭X型构造样式; (c) —东部构造特征, 背形负花状构造样式

(a) —western structural features; shovel-shaped fan structure; (b) —central structural features; conjugate X-shaped structure; (c) —eastern structural features; antiform negative flower structure

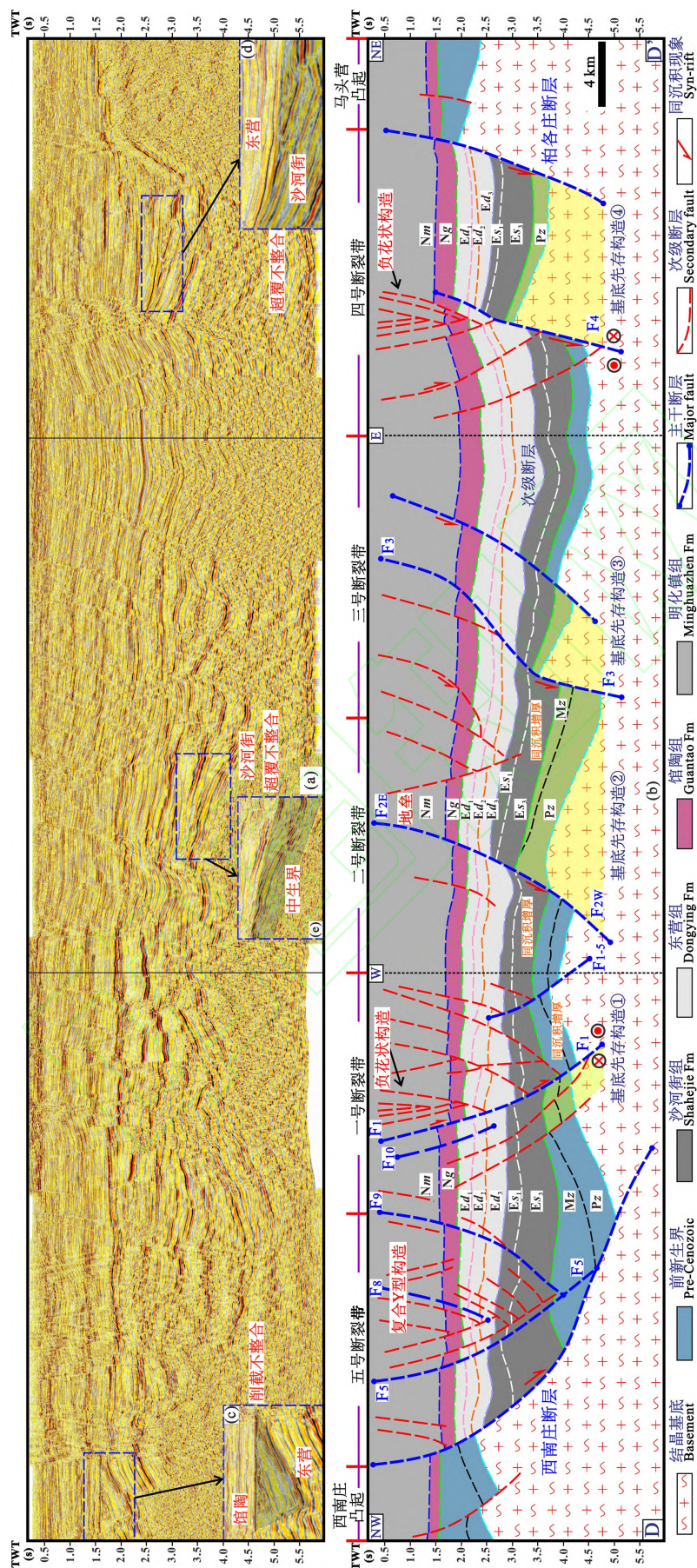


图3 南堡凹陷综合地震-地质联合剖面图(测线位置见图1b)

Fig.3 Comprehensive seismic-geological cross-section of the Nantao sag (survey line location shown in Fig.1b)

(a)—原始地震剖面; (b)—地质模式剖面; (c)—馆陶-东营期不整合界面; (d)—东营-沙河街期不整合界面; (e)—新生界底部不整合界面

(a)—original seismic profile; (b)—geological model profile; (c)—Guantao-Dongying unconformity interface; (d)—Dongying-Shahajie unconformity interface; (e)—unconformity at the base of the Cenozoic

裂隙,一期拗陷:沙河街期北西南东向伸展的强裂陷期,东营期近南北向伸展的弱裂陷期,馆陶期的区域热沉降拗陷阶段乃至明化镇期的构造再活强化裂陷期(童亨茂等,2013;梁杰等,2014;冯建伟等,2017;童亨茂等,2018a;刘露等,2022)。

2.2 多期构造变形过程

南堡凹陷断裂活动主要集中在始新世早期(43 Ma)和中新世晚期(14.8 Ma),断层又可根据切割层位与控陷特征,分为基底卷入式和盖层滑脱式两种类型。基底卷入式是断层持续活动延伸至浅层,与新生盖层断层直接相连,具有继承性和新生性双重特征(图2和图3中蓝色断层)。盖层滑脱式组合则是新生盖层断层垂向生长,向基底延伸持续切割下覆地层,断距表现为上下相同,一般切割不深,在馆陶组滑脱,一般为阶梯式组合。深浅层构造特征迥异,深浅层断裂系统在空间上都具有分带性(图4,图5),在时间上具有继承性,既存在继承性持续发育特征(先存构造影响),也发育晚期受应力场旋转影响下的新生性构造。多期构造活动均发育正断层,主要是NE、NNE、NW和近EW的四组断裂带,自下至上规模逐渐减小,但断层数量发散式增多体现为断距较小,断层延伸距离减短,晚期断层多以叠接形态连接过渡,而非早期单一持续的大规模断层。

深层(沙河街组底界,43 Ma)断裂走向玫瑰花图揭示该期裂陷方向为NW-SE向(图4a),主要形成一系列NE向正断层以及部分NW向的变换断层(F_4),基底共有90条断层,其中, F_1 、 F_{2W} 、 F_3 及 F_4 为先存古隆起诱发的长期活动断层, F_5 及 F_6 则为响应区域应力场形成的新生断层段,而其余断层如 F_{2N} 、 F_{2E} 、 F_{13} 及 F_{14} 在早期均没有控陷作用,是晚期构造活动,使断层向下再活动切割至基底形成。中层(东营组底界,28.5 Ma)断裂走向玫瑰花图揭示该期裂陷方向已发生顺时针旋转,成为NNW-SSE向(图4b)。断层数量与密度进一步增加(208条),此时 F_1 断层充当东西向新生正断层的变换断层,老爷庙和5号构造带已演化为北东走向雁列式断层带;以 F_{2W} 、 F_{2N} 、 F_3 和 F_{13} 为主干断层,分别形成一系列发散式的东西向次级断层,构成网状交织式断裂系统;4号构造带由单一主干断层开始向北发散式分叉增生,已有马尾式雏形(刘露等,2022;Wang Yuheng et al., 2024)。浅层(明化镇组底界,14.8 Ma)断裂走向玫瑰花图揭示该期应力场进一步顺时针旋转,裂陷方向近N-S向(图5a),断裂展布明显受深层断裂系统控制,凹陷结构呈现NEE走向,具

有南北分区变形,东西分段连接的特征(图5b)。北部主要以北东东走向的5号断裂带及老爷庙断裂带共同过渡至东西走向的高柳高北断裂带,断层间基本以软连接(转换斜坡)相连,虽不是硬连接模式,但其走向、倾向、断层性质及剖面形态(图2,图3)均证实是具有相近成因的一类断裂系统。而南部则是以张扭变形为主要特征的1号和4号断裂带,每个张扭断裂带都由多条雁列式断层段组成,形成线性端部。1号断裂带呈现帚状组合特征,次级断层依次向南西叠置,自北向南逐渐紧密收敛成线性端部。4号断裂带呈现马尾式组合,次级断层依次向南东叠置,自北向南逐渐紧密收敛为线性端部。其次级断层的弯曲方向指示了他们的运动方向,1号断裂带为右旋走滑,4号断裂带为左旋走滑(童亨茂等,2013;刘露等,2022)。二者相比,1号断裂带的主走滑断层即线性段延伸距离相对更大,发散端规模相对更小,因此走滑分量更大。两者均是东营期以来南北向伸展作用于先存构造之上再活化的产物。1号与4号断裂带间夹持区域为南堡凹陷浅层主要沉积中心,受深部断层走向控制,主要呈现NEE走向。2号东与2号西断裂带分别是完整的地堑组合,而2号西断裂带则是依次北掉的阶梯式组合。2号东与3号断裂带分别与4号断裂带弧形相连,彼此交织连接。

可按时空关联性划分为四个不同性质的断裂系统(图5b):南堡北东走向继承性断裂系统(I)、北堡—老爷庙北东走向新生性断裂系统(II)、近东西走向新生性断裂系统(III)、柏各庄—4号北西走向继承性断裂系统(IV),每个断裂系统包含若干个子断裂系统。继承性断裂系统由新生界明显活动的主干断层与其所控制的浅层次级断层(主要在东营期、明化镇期活动)组成,主干断层受先存古隆起诱发形成;新生性断裂系统主要由东营期、明化镇期活动的主干断层和其所伴生的次级断层组成,断层可能向下切割至基岩地层,但并不是沙河街期便活动。断裂系统以近似构造样式的断层组合为准,各断裂系统特色鲜明,在相同应力背景及构造演化中,形成不同的构造组合样式(图2b),没有先存构造的晚期新生伸展区形成了共轭式的复合Y型构造或称为快速裂陷下的塌陷构造(II断裂系统),先存构造与早期裂陷方向小角度相交的地区则在晚期伸展中形成了典型的负花状样式,体现张扭构造组合(I和IV断裂系统),而无先存构造或两期裂陷方向大高度相交的地区则在晚期伸展变形中形成了垒堑式伸展变形

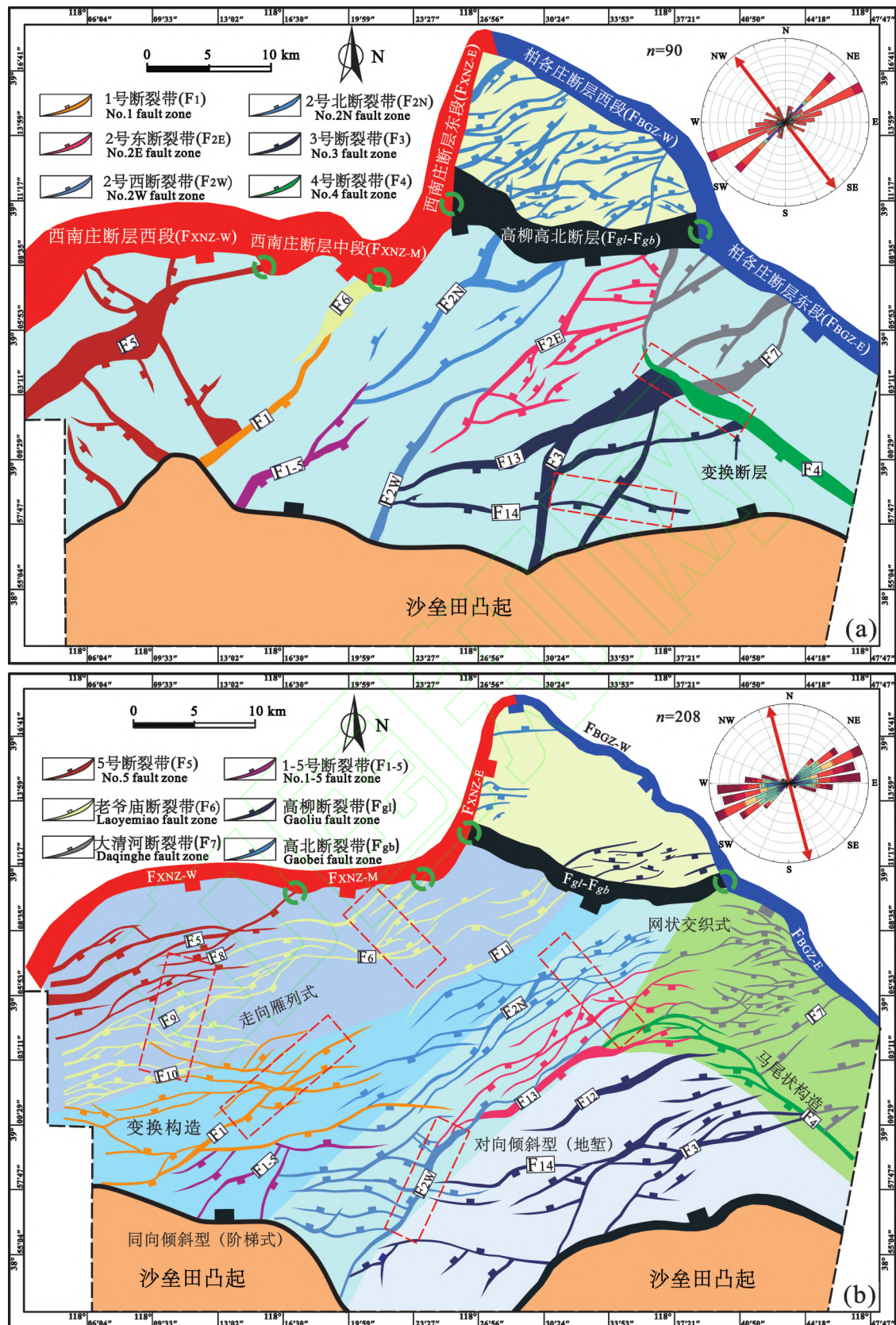


图4 南堡凹陷深层断裂系统图

Fig.4 Deep fault system of the Nanpu sag

(a)—沙河街组底界断裂系统;(b)—东营组底界断裂系统

(a)—fault system at the bottom of the shahejie formation; (b)—fault system at the bottom of the dongying formation

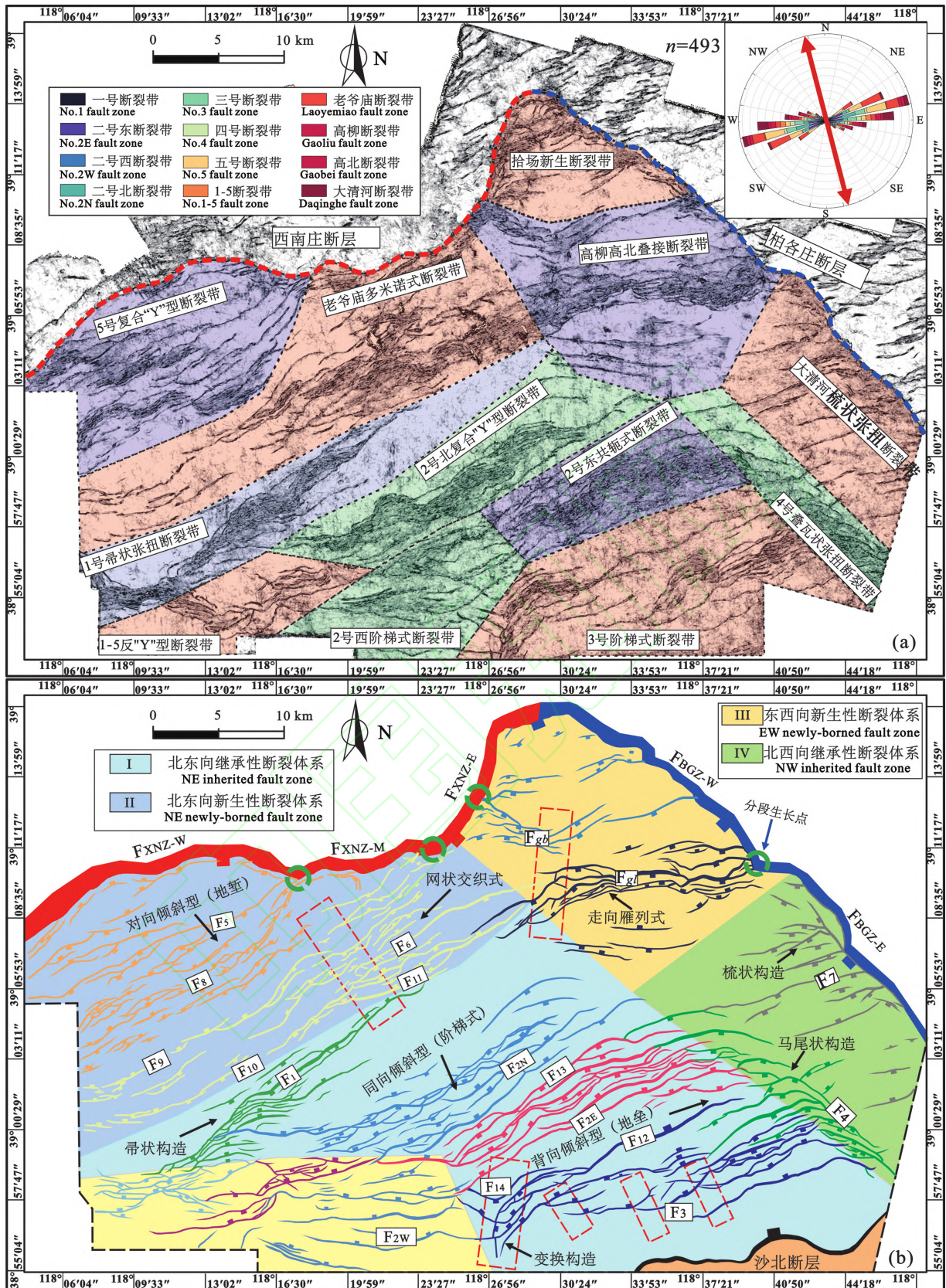


图5 南堡凹陷浅层断裂系统图

Fig. 5 Shallow fault system of the Nanpu sag

(a)—600 ms 相干属性切片图;(b)—明化镇组底界断裂系统图

(a)—600 ms coherence attribute slice; (b)—fault system at the bottom boundary of the Minghuazhen Formation

组合(Ⅲ号断裂系统)。

3 实验设计

砂箱模拟实验被研究人员当做构造演化重要的正演手段。它被用来总结普适性的构造变形过程与机制,进而得出可推广的规律。同样也可以在已建立的地质模型基础上,改变关键控制因素用来验证建立的构造模型合理性(Myra and K., 1997; Withjack and Callaway, 2000; Schellart and Lister, 2005; Zwaan et al., 2016)。前人提出过强制性先存构造(Morley et al., 2004; Morley, 2010),即属于潜山或古隆起这些洼中隆类型的局部高部位影响后期断裂系统的形成,另一种则是先存的构造薄弱面(Zwaan et al., 2016; Deng et al., 2018),指基底存在的截然破裂面,可理解为变形发生前已有的断层面或隐伏破裂面,力学性质上为一相对薄弱带。

南堡凹陷新生界经历过多期异向伸展变形,笔者在实验时简化该模型,根据地震剖面形态及断层活动性质将诱发 F_1 、 F_{2w} 、 F_3 及 F_4 断层形成的先存古隆起划分为强制性先存构造。在模拟实验中仅考虑这四个强制性先存构造,但未设置如 F_{1-5} 、 F_5 、 F_6 、 F_7 等响应 NW-SE 伸展时的先存构造薄弱面。针对东营期以来南北向伸展的构造变形过程进行模拟实验,在保证基础物质条件相同的同时,进行不同预设条件下的对照组实验。通过变形结果的对比进而找寻凹陷构造变形的成因。

3.1 几何学特征相似

几何学相似是由保证相同的地层比例与相同规格的预设边界条件进行的。基底采用刚性材料保证凸起上覆地区不发生变形。钢板之上采取 0.5 mm 厚的橡皮以保证上覆砂层均匀的伸展变形。预设的特殊边界与南堡凹陷边界保持等比例的几何学参数。北部边界采取长为 60 cm,宽为 15 cm 的不规则弧形用以模拟西南庄和柏各庄断层的几何形态。南部边界采取长为 60 cm,宽为 12 cm 的连续波浪状用以模拟沙北断层(图 6a)。预设凸起边界底部通过 α -氰基丙烯酸乙酯与橡皮布紧密粘连,用以保证形变区为凸起间夹持区域。总体模型长宽均采取 1:10000 的等比例进行设计。基于钻井与地震层序的厚度统计,我们将南堡凹陷地层等比例的细分为: $Es_3:Es_1:Ed_3:Ed_2:Ed_1:Ng:Nm_2:Nm_1$ 。同时模拟实验的砂层铺设也采取相同比例的厚度(图 6d)。即等比例的,1 cm 砂层代表 1 km 的沉积

地层。

模型 1 与模型 2 区别在于基底先存构造的设置,在模型 2 中橡皮上放置先存古隆起,该古隆起与地震解释结论近似(图 6b)。先存古隆起由两部分组成,分别是刚性底板(铝塑板)与上覆聚氨酯泡沫板盖层组成(总厚度为 1.5 cm)。其中 F_1 与 F_4 先存构造相对规模更大,同时与伸展方向保持 45° 夹角, F_2 、 F_3 先存构造则保持 60° 夹角(图 6c)。

模型 2 与模型 3 区别在于基底滑脱层的设置,在模型 3 铺设地层中采取 1 cm 厚硅胶层作为沙河街期厚层泥岩滑脱层,相应的,保持 Es_3 总厚度为 2 cm,由 1 cm 硅胶与 1 cm 砂层组成,进行对照组模拟实验(图 6c)。

3.2 运动学特征相似

基于地震资料解释与已有研究成果,模拟实验的进行过程与构造演化期次和强度一致。东营期三期伸展用以保持东营期的同沉积过程,馆陶期铺砂静置用以保持热沉降过程,晚期采取强裂陷过程用以模拟明化镇期构造再活化过程(详细参数见表 1)。该过程保证了实验的运动学相似性。各个模型中的伸展量及相对伸展率均保持相同,避免伸展位移差异影响实验结论。

表 1 南堡凹陷构造模拟实验运动学设置

Table 1 Kinematic settings for the structural analogue modelling in the Nanpusag

变形阶段	伸展阶段 运动方向	总伸展量 (cm)	总砂层厚度 (cm)
模型 1、模型 2、 模型 3	石英砂均匀基底、预设先存构造、 先存断层及先存构造		
1	南北向	2.0	2.5
2	南北向	2.5	3.3
3	南北向	3.5	3.7
4	沉降阶段	—	4.3
5	南北向	4.5	5.1
6	南北向	7	5.7

3.3 动力学特征相似

动力学相似性由实际地层性质和模拟所用的材料近似的力学特性而保持(Zwaan et al., 2016; Yu and Koyi, 2016)。如岩石内聚力与内摩擦系数在模型与自然界保持相同的规格,平均 40° 的内摩擦角,0.84 的内摩擦系数是上地壳岩石性质的普适参数,而在模型所选的石英砂保持 36° 的内摩擦角与 0.73 的内摩擦系数接近实际地质情况。相应的,碎屑沉积物的剪切强度和密度分别为 10 MPa 和 2550 kg/m³,模型中的内聚力约为 100~140 Pa,密度约为 1550 kg/m³,硅胶其粘度为 1.2×10^4 Pa·s,密

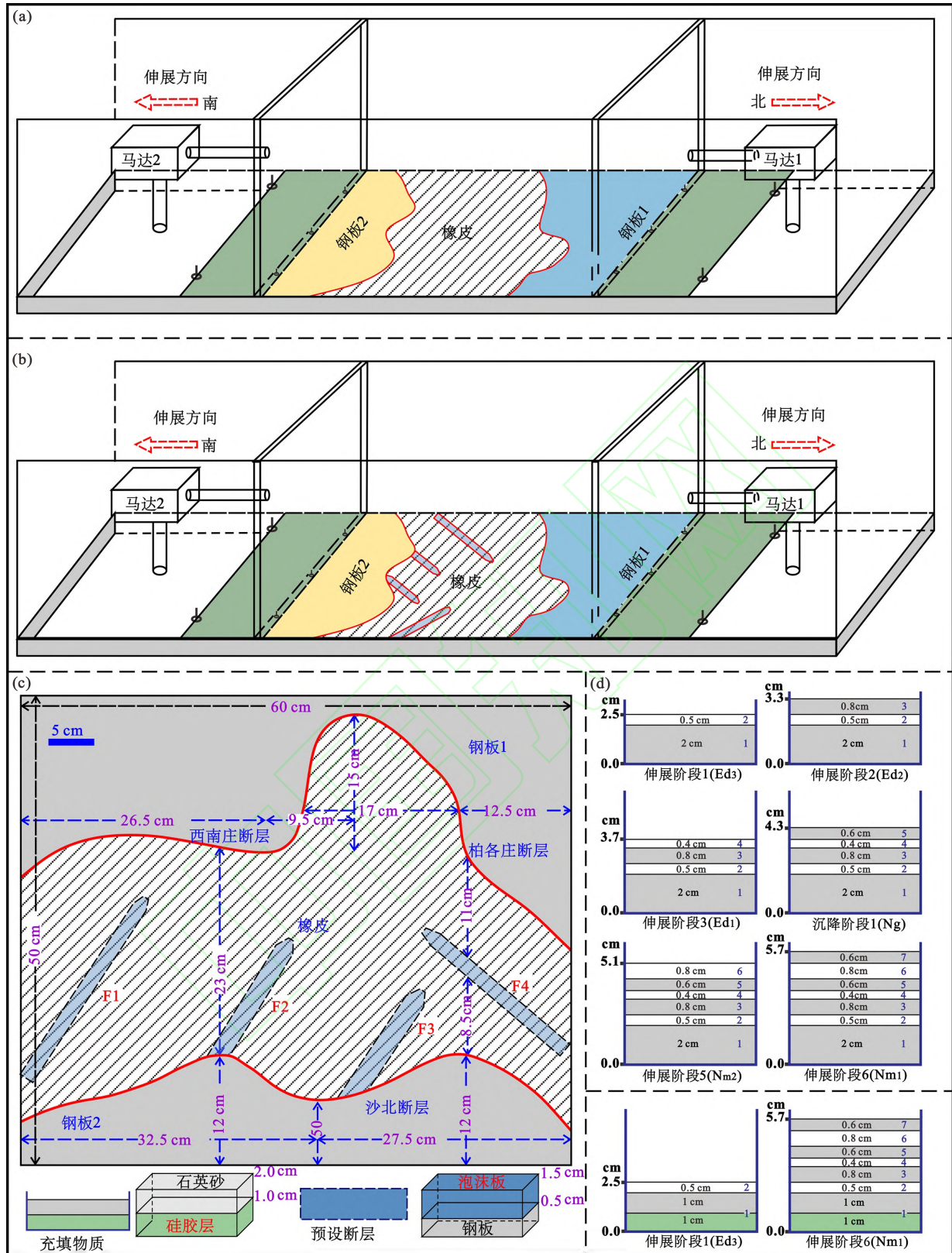


图6 构造物理模拟实验模型设计

Fig. 6 Design of the structural physical simulation experiment model

(a)—模型1几何学特征;(b)—模型2及3几何学特征;(c)—模型参数平面详图;(d)—砂层铺设序列

(a)—geometric characteristics of Model 1;(b)—geometric characteristics of models 2 and 3;(c)—detailed plan view of model parameters;(d)—sand layer deposition sequence

度约为 929 kg/m^3 。硅胶在低应变速率下所表现为牛顿流体性质,因此常被用来模拟上地壳中的塑性变形(详细参数见表 2)。因此笔者采取等比例的材料性质以保证砂箱模拟实验接近真实的地质过程。

实验结束后铺设 1 cm 厚层灰砂用以表明现今第四系的沉积盖层,未经强烈构造活动,对砂箱结果均匀浇水后静置 24 h 以保留砂箱内部变形,进行砂箱三维切片研究。

表 2 南堡凹陷构造模拟实验的比例参数

Table 2 Scale parameters of the structural analogue modelling in the Nanpusag

比例参数	模型	自然	模型与自然比值
长度 l (m)	0.01	500	0.5×10^{-5}
石英砂密度 ρ (kg/m^3)	c. 1450	c. 2700	0.54
硅胶密度 ρ (kg/m^3)	c. 929	c. 2200	0.42
硅胶粘度	c. 1.2×10^4	c. 10^{-17} — c. 10^{-19}	$10^{13} - 10^{15}$
重力加速度 g (m/s^2)	9.81	9.81	1
内摩擦角 ($^\circ$)	c. 36	c. 40	0.9
内摩擦系数 (μ)	0.73	0.84	0.86
内聚力 τ_0 (Pa)	100~140	10^7	$(1.0 \sim 1.4) \times 10^{-5}$

4 实验结果

该系列实验分别按照断层的组合样式,先存构造所引发的伴生构造及相对沉降区、隆起区及阶梯式正断层组成的缓坡带进行了分类,相同颜色标注的断层表明其隶属于同一断裂系统内,各图件图例具有互通性,更便于对比理解。

4.1 模型一实验结果

未预设任何条件下的模型 1 平面模拟结果显示(图 7),东营组三期弱伸展时仅有边界断层活动,而与伸展方向近平行的西南庄断层北段不活动,内部基本没有新生断层或因伸展量较小,基本保持隐伏状态(图 7a~c)。随着伸展量进一步增大,在明一段沉积时的构造变形逐渐显著(图 7d,阶段 5),该期南部形成弧形地堑系统,北部则分别在两侧形成孤立式地堑系统。直至明二段沉积时的伸展量达到顶峰(7 cm),该期断裂系统在内部广布式发育(图 7e,阶段 6),断层以均匀的东西走向为主,仅在预设凸起边界处出现一定北西向断层,共同组成地堑 7 与地堑 8(图 7f);整体构造变形以分段连接的垒堑式组合为主,以南北边界围限所形成的正断层扩展时,形成了独立的地堑系统。随着地层厚度与伸展量的持续增大,地堑宽度进一步扩展(安德森模式下 60° 正断层倾角不变,厚度增大则正断层持续向外扩展),背向倾斜的地堑边界又组成共轭式地堑边界,最终形成垒堑交织式的盖层构造格局(图 7f)。主要控边断层进一步生长导致控边断层规模持续增大,对倾的地堑边界则以阶梯式缓坡带逐步分担位移量,成为走向上大致平行、倾向上整体一致的次级正断层,最终作为对倾调节断层(图 7f)。

垂向切片揭示了砂箱内部结构,紧邻预设基底的边界断层倾角较陡(70° 以上),往往伴随着一系列对倾的低角度正断层(60° 左右)。但边界地堑往往都是沉积中心,或形变量最大的地区(图 8e 中的地堑 2,地堑 7),内部虽有一定的沉积中心(地堑),但规模普遍较小。正断层断距具有一定的下大上小特征,但断面普遍较为平直,没有明显的地层旋转与楔状同沉积增厚。与伸展方向高角度相交的预设边界活动极为微弱,形成狭窄陡倾的地堑组合(图 8e、f 中的地堑 8),倾向位移量极小。正断层均匀分布在模型内部,而非集中于预设边界,是自基底均匀变形的结果。

4.2 模型二实验结果

预设先存构造的模型 2 平面模拟结果显示,在东营组三期弱伸展时,断层活动微弱(图 9a~c),但东三期变形(图 9a,阶段 1)受先存构造影响,盖层已开始变形。随着上覆同沉积的增厚,盖层变形微弱,仅以凸起边界发育有一定的弧形地堑系统或孤立地堑(图 9d)。直至晚期明一段时才形成了一系列断层系统,盆地整体结构基本保持不变,同样由阶梯式正断层构成的缓坡带发育在边界凸起周围(图 9f 的地堑 1 北部)。但在基底先存构造的影响下,在南部出现大量走向不同的正断层,如地堑 2、3 的边界断层及地堑 1 西部的断层(图 9e、f)。南部设置的先存构造限制了局部应变,使得延伸距离较远,发育良好的正断层集中生长在模型北部,形成狭窄地堑结构。最终形成北部断层东西分段相连,垒堑紧密对立,南部断层走向各异,弧形垒堑共存的盖层差异变形格局(图 9e、f)。

实验结束后的切片揭示了内部变形特征,正断

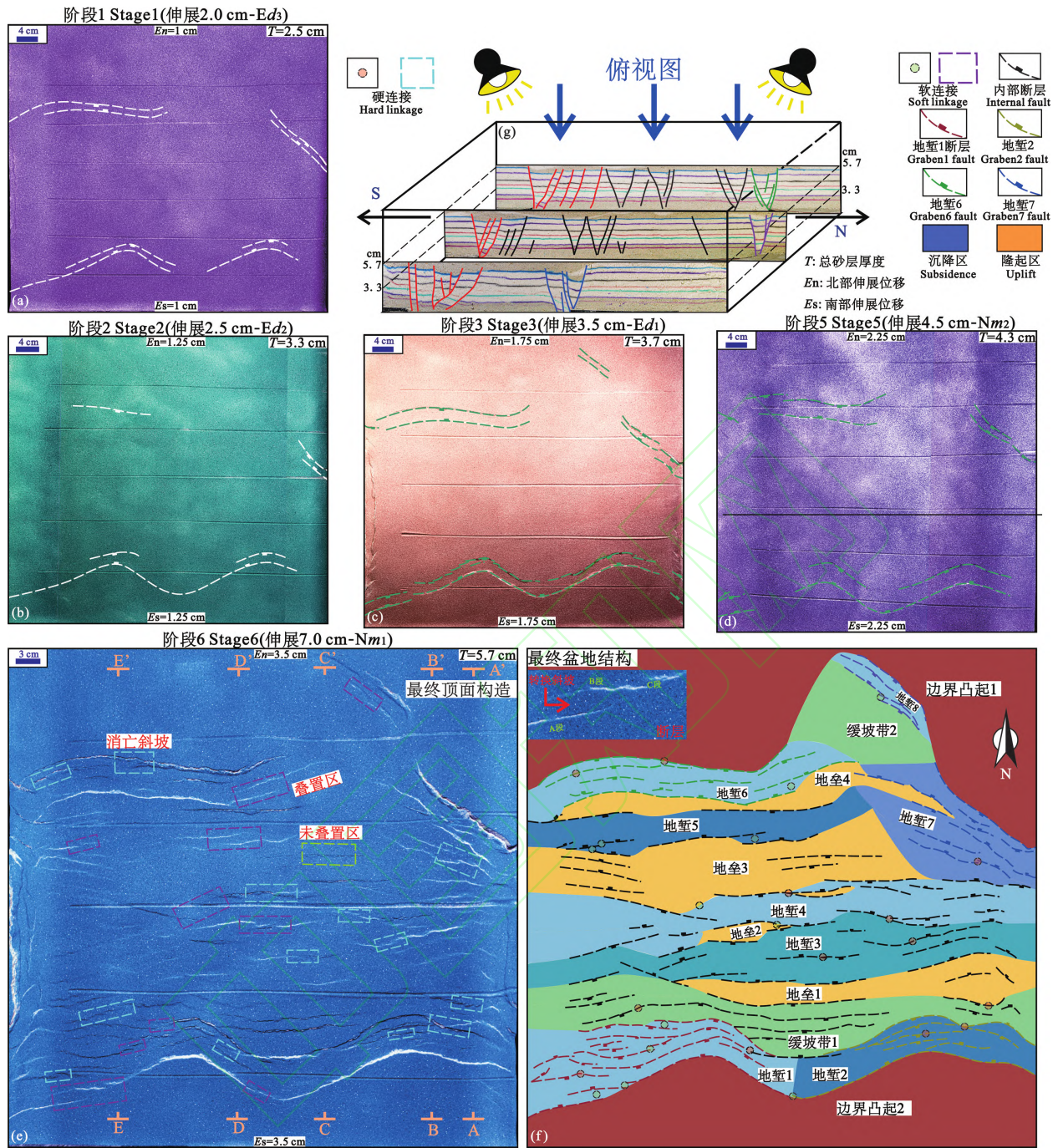


图7 模型1模拟平面结果

Fig. 7 Plane results for Model 1

(a)— Ed_3 变形结果;(b)— Ed_2 变形结果;(c)— Ed_1 变形结果;(d)— Nm_2 变形结果;(e)— Nm_1 变形结果(f)—最终盆地构造纲要图;(g)—三维模型示意图

(a)— Ed_3 deformation results; (b)— Ed_2 deformation results; (c)— Ed_1 deformation results; (d)— Nm_2 deformation results; (e)— Nm_1 deformation results; (f)—final basin structural outline; (g)—3D model schematic

层断距呈现明显的下大上小继承性发育特征,尤以盆地边界的主干断层为主要标识(图10中的箭头指示)。先存构造影响新生断层产状,倾角陡立近乎 75° (图10a)。新生断层会沿先存构造的两侧同时持续发育,即沿先存构造强制性的形成地垒构造(图

10a),但受限于多幕裂陷发育过程,盖层变形不强烈,平面现象相对不明显。预设北东走向的1~3号断裂带活动较弱,先存构造的端部限制了中部地堑的发育(图10)。显然断层的发育是具有趋势性的,总是沿着最容易发生破裂的位置开始(Morley,

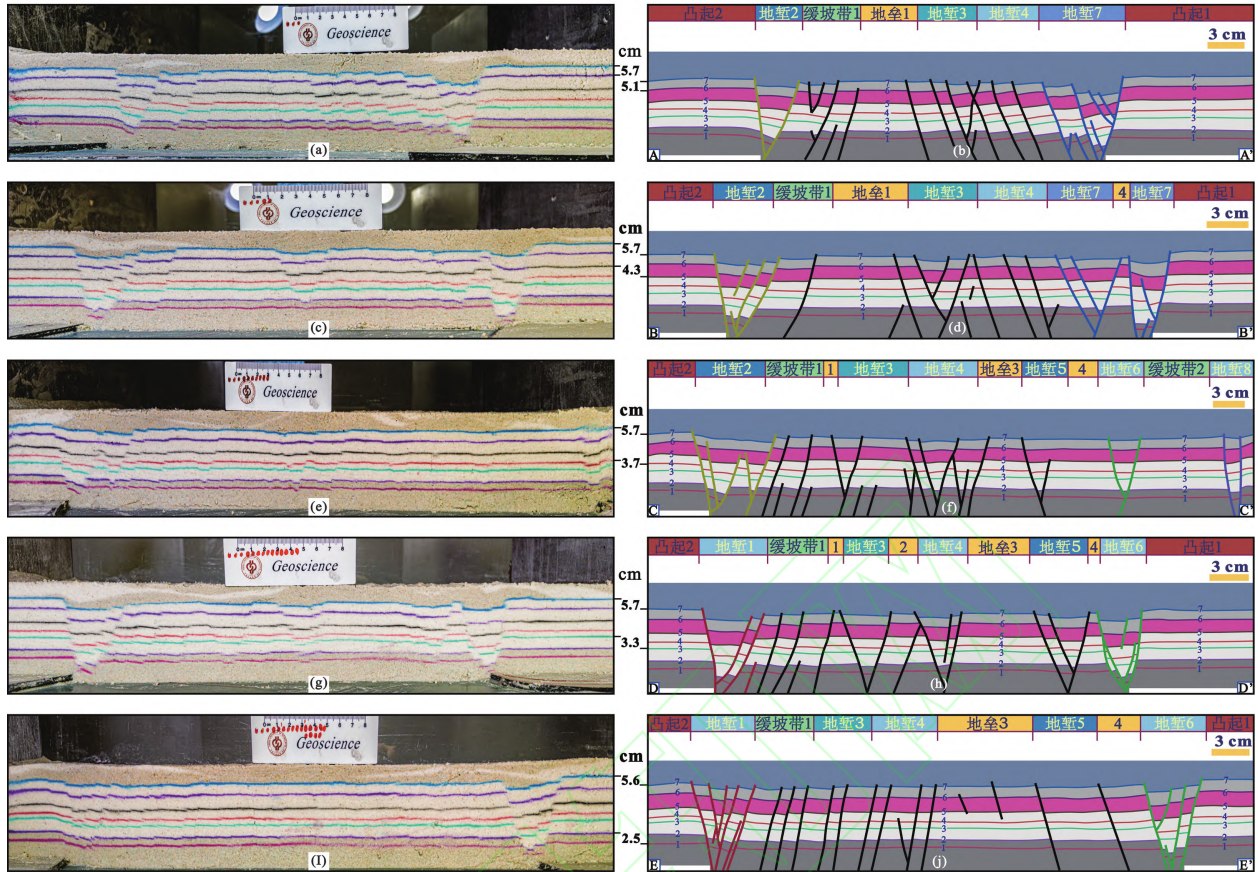


图8 模型1实验切片(测线位置见图7e)

Fig. 8 Experiment slices of Model 1 (survey line location shown in Fig. 7e)

(a, c, e, g, i) — 切片原始形态; (b, d, f, h, j) — 地质模型图

(a, c, e, g, i) — original slice morphology; (b, d, f, h, j) — geological model diagrams

2010; 童亨茂等, 2011; Deng Chao et al., 2018), 因此在先存构造端部优先发育正断层, 而没有先存构造时, 中部正断层也会继续沿东西走向发育。

4.3 模型三实验结果

既存在先存构造也有韧性层的模型3模拟结果显示, 基底滑脱层的存在使得盖层变形更加容易与显著。在东三段变形期(图11a, 阶段1), 沿先存构造出现明显断层, 勾勒出先存构造的外形, 同时还出现一系列次级断层。在后续伸展阶段也同样出现更多的弧形断层, 大致勾勒出中部圆弧状界限(图11c, d)。最终明二段强烈变形后(图11e, 阶段6), 以中部高陡地垒1为界, 南北分区变形最为显著, 南部形成统一完整的弧形垒堑系统, 而北部则表现为阶梯对倾式的正断层组合。

南区为显著的雁列式组合, 断层间彼此叠置。同时各个构造单元间形成了统一的垒堑系统, 各个地堑间通过软连接的形式完成弧形生长过程, 每一段正断层均保持平直走向, 在转换斜坡处发生走向

错动, 断层系统的弧形弯曲来调节南北向伸展所带来的区域应变。与高陡地垒1对应的, 在中部形成了巨大的沉积中心—地堑3, 而该地堑同样表现为弧形过渡式。东西两侧预设的1号、4号先存构造极为发育, 水平标志线错动分别标志着1号断裂带的右旋走滑与4号断裂带的左旋走滑(图11e), 次级断层表现出逐渐向主干断层雁列、叠接、收敛、复合的趋势。走滑分量占主导的特征向北逐渐递减, 形成伸展分量占主导的东西向正断层, 但每根正断层端部走向逐渐改变成为北西或北东向无不标志着此处的剪切变形, 最终形成弧形帚状构造(图11e, f)。此时边界地堑周缘不再发育阶梯式缓坡调节断层, 而由规模更大(断距更大)数量更少的断层取而代之。虽仍起调节作用, 但几何学特征明显改变(图11f的地堑1)。与弧形垒堑交织的南区不同, 北区断层系统均呈规律的东西走向特点, 是南北向应力场直接作用的产物, 强烈的伸展变形使该区内部形成三条狭窄地垒, 此时北部的地堑系统不再孤立, 转

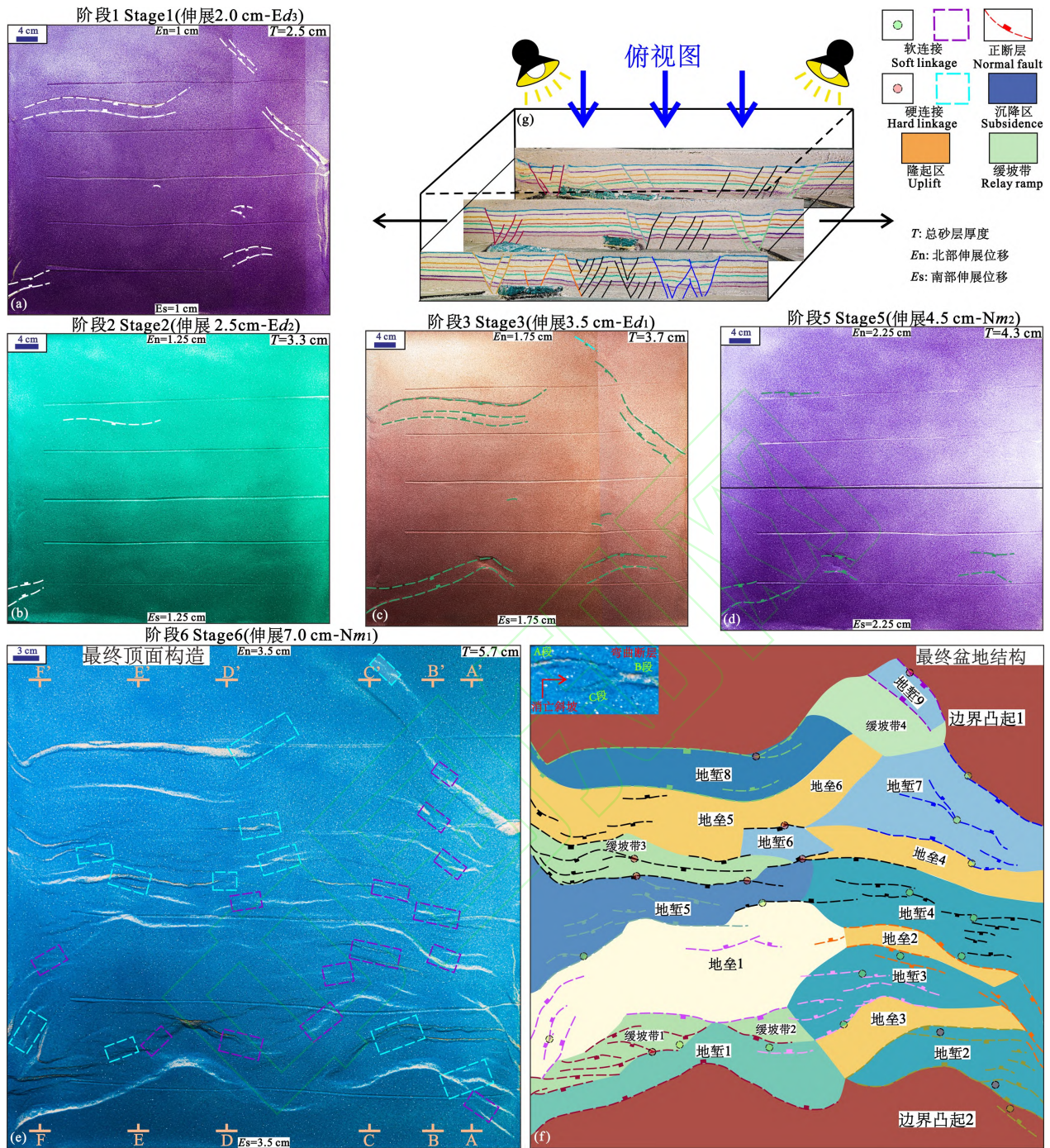


图9 模型2模拟平面结果

Fig. 9 Plane results for Model 2

(a)— Ed_3 变形结果;(b)— Ed_2 变形结果;(c)— Ed_1 变形结果;(d)— Nm_2 变形结果;(e)— Nm_1 变形结果;(f)—最终盆地构造纲要图;(g)—三维模型示意图

(a)— Ed_3 deformation results; (b)— Ed_2 deformation results; (c)— Ed_1 deformation results; (d)— Nm_2 deformation results; (e)— Nm_1 deformation results; (f)—final basin structural outline; (g)—3D model schematic

为直接相连的大型负向构造单元(图 11f 的地堑 7 与地堑 8)。然而相应的,原本预设的北部弧形边界彻底没有活动。

实验结束后的垂向切片,由于基底橡皮布弹性有限,曾发生橡皮绷断砂层塌陷,根据体积守恒思想

在地质模式图已完成修补(图 12)。韧性层带来的简单剪切变形与上拱底辟化使地层发生旋转,此时的正断层不再以简单的基底卷入型板式为主,转而形成铲式或多米诺式的正断层系统。硅胶层上拱还形成了局部的微背斜,周围地层下掉,随着伸展量的

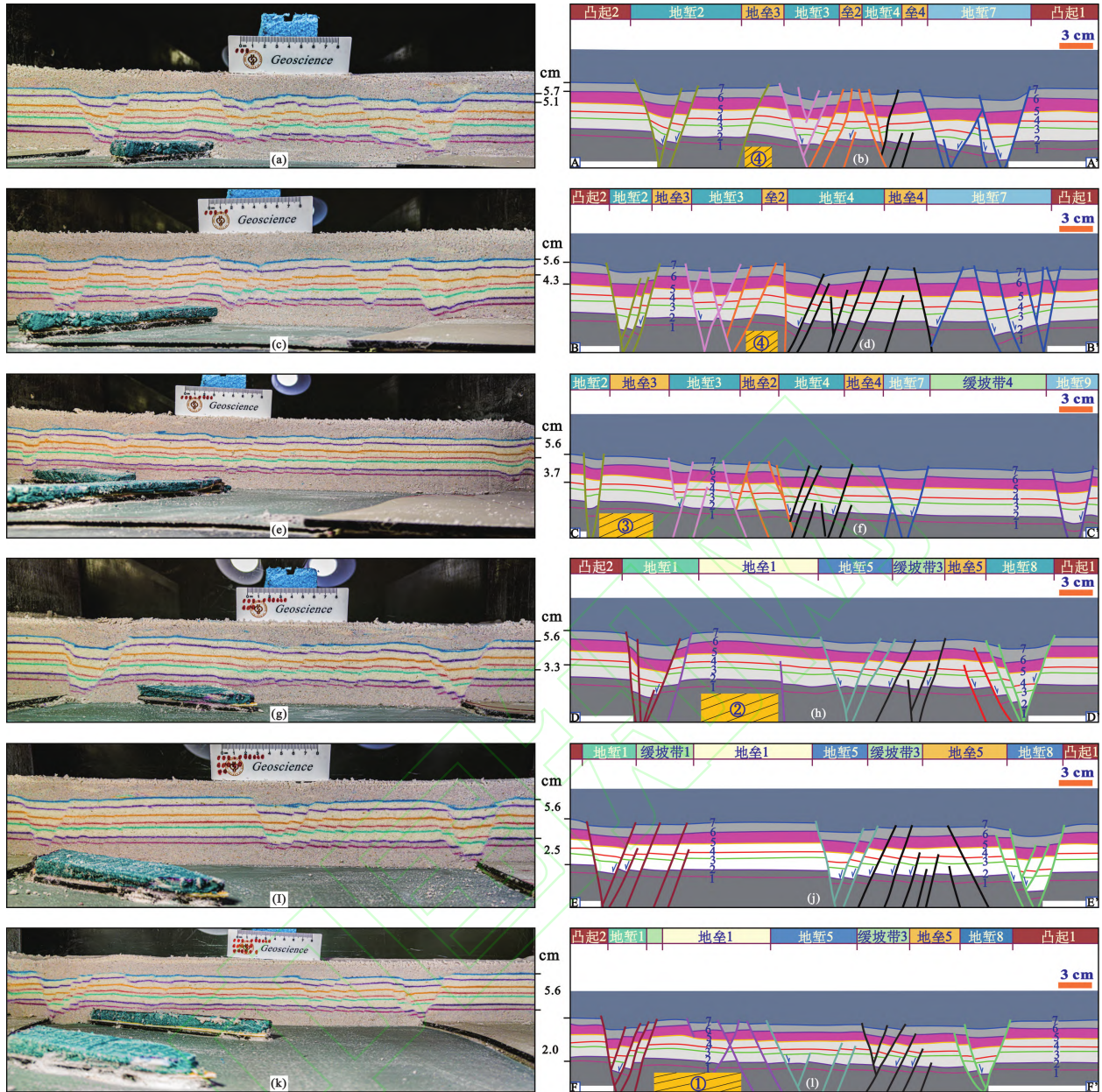


图 10 模型 2 实验切片(测线位置见图 9e)

Fig. 10 Experiment slices of Model 2 (survey line location shown in Fig. 9e)

(a,c,e,g,i)一切片原始形态;(b,d,f,h,j)一地质模型图

(a, c, e, g, i)—original slice morphology; (b, d, f, h, j)—geological model diagrams

进一步增大最终在盖层形成塌陷构造(刘晓峰等, 2010; 穆立华等, 2018), 多条阶梯式正断层向下卷入基底中, 成为“背形负花状构造”(图 12a, g, i 中的地堑 4, 6, 7)。韧性层既增强了裂隙作用所产生的构造变形, 也扩大了先存构造对盖层变形的影响。以先存构造为凸起边界, 发育有大量的正断层, 并持续延伸(图 12 的 a, b, e, f, i, j)。切片中的地堑普遍狭窄且深度更大, 同时正断层断距下大上小现象非常明显, 表明断层长期高活动性, 因此滑脱层的

存在使得盖层变形更加集中于单一断层的持续活动(长度、断距更大)而非新生多条次级断层调节位移。

5 讨论

根据三组砂箱对照组实验, 笔者进行了平面模拟结果与断层相关要素统计, 找寻南北分区差异变形, 东西断层分段连接的原因, 总结基底条件诱发盖层变形的控制因素(图 13)。最终优选实验结论与研究区明化镇组底界三维构造图进行对照(图 14),

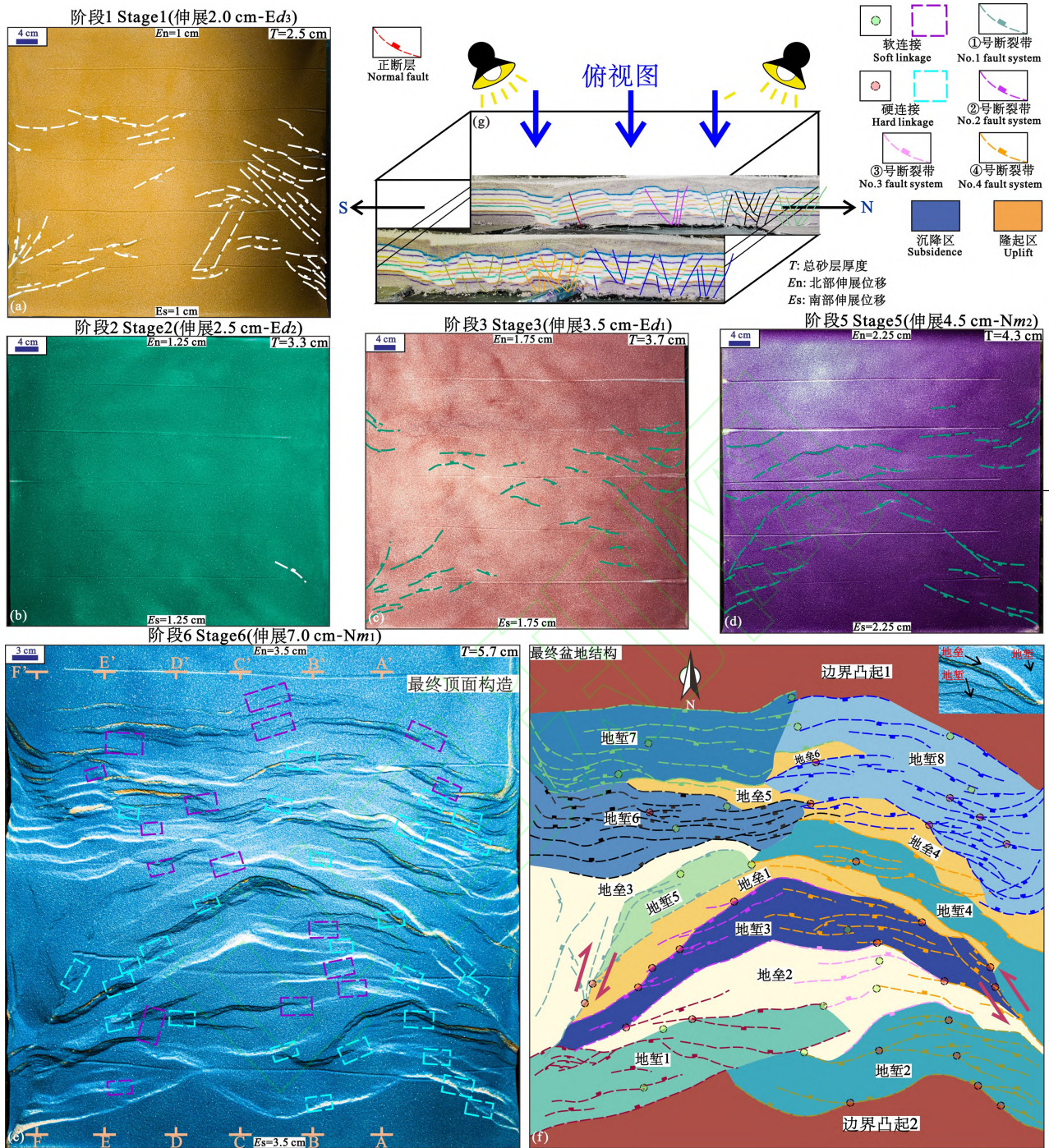


图 11 模型 3 模拟平面结果

Fig. 11 Plane results for Model 3

(a)—Ed₃ 变形结果; (b)—Ed₂ 变形结果; (c)—Ed₁ 变形结果; (d)—Nm₂ 变形结果; (e)—Nm₁ 变形结果; (f)—最终盆地构造纲要图; (g)—三维模型示意图

(a)—Ed₃ deformation results; (b)—Ed₂ deformation results; (c)—Ed₁ deformation results; (d)—Nm₂ deformation results; (e)—Nm₁ deformation results; (f)—final basin structural outline; (g)—3D model schematic

拟说明南堡凹陷的构造成因与控制因素, 并推广至其他裂陷盆地中。

5.1 实验间对比

三组模型分别展现出截然不同的几何形态(图

13a~c): 模型 1 的广布式地垒交织模式; 模型 2 的南北分区变形, 东西分段过渡相连模式; 模型 3 的南北分区变形, 东西连片弧形变形模式, 证实相同应力背景下, 基底先存条件的不同会极大的影响晚期盖

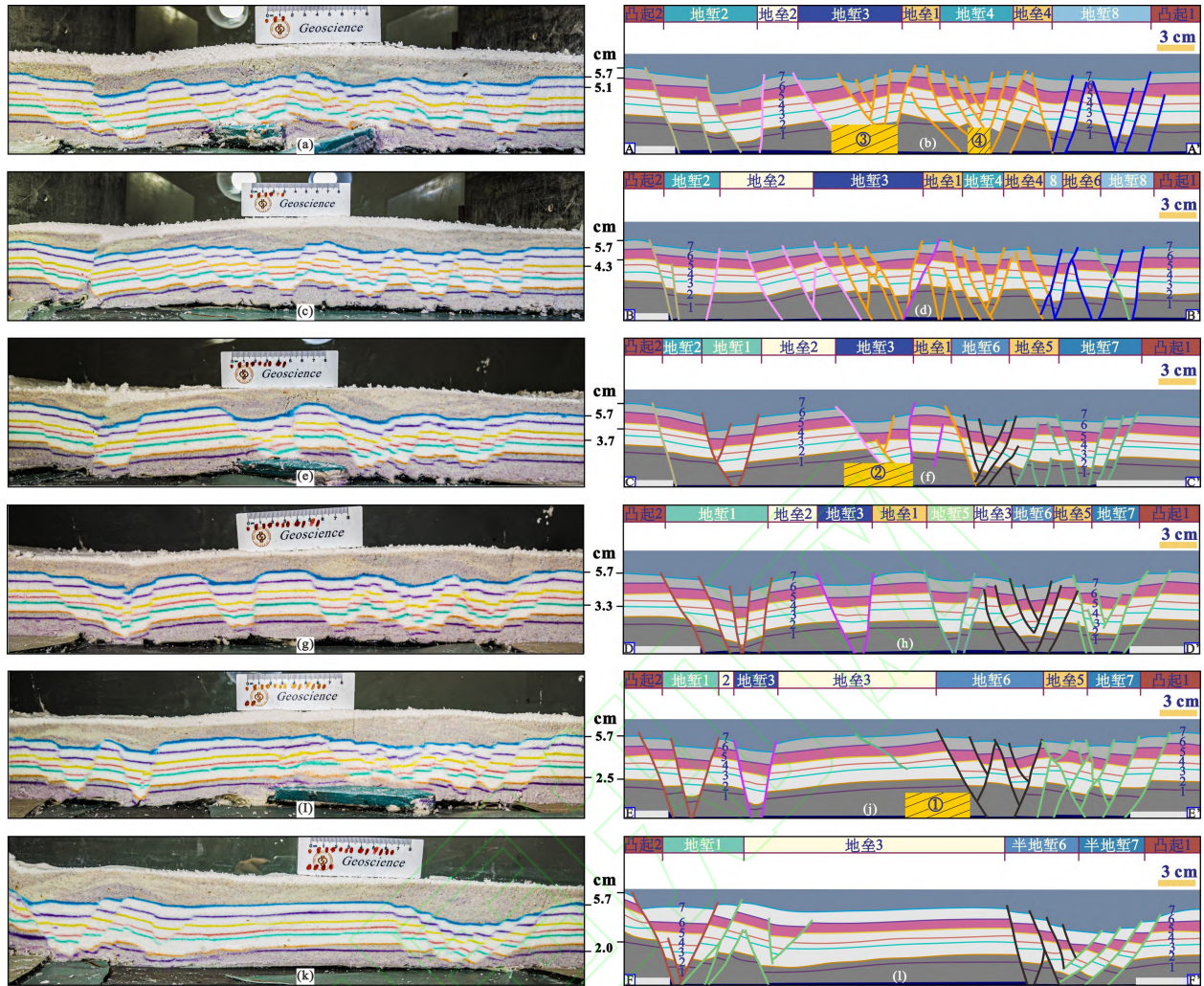


图 12 模型 3 实验切片(测线位置见图 11e)

Fig. 12 Experiment slices of Model 3 (survey line location shown in Fig. 11e)

(a, c, e, g, i) 切片原始形态(b, d, f, h, j) 地质模型图

(a, c, e, g, i)—original slice morphology; (b, d, f, h, j)—geological model diagrams

层变形(Morley, 2010; Jammes et al., 2010; 童亨茂等, 2011; Deng Chao et al., 2018)。保持相同伸展量情况时(30%伸展率), 模型 3 所形成的断层数量最多($n=163$), 模型 1 次之($n=103$), 模型 2 断层数量最少($n=91$)。先存构造的分布强制性改变南部的局部应力环境(图 13a, b), 既改变新生断层的产状, 还影响了断层发育的规模, 只有先存构造的模型 2 最终形成更少量的断层与更加离散的断层系统, 各断裂系统相连变得困难。而新增基底韧性层时, 显著的增强了断层间的联系与相互作用, 盆地更倾向于形成统一的变形系统(图 13b, c)。同时先存构造的作用也被放大, 不再强制性沿着先存构造形成断层, 而是逐步向端部发散成为东西走向正断层的一部分, 正是基底变形所带来的均匀伸展, 非牛顿流体的缓慢形变充分的在盖层表现这一应变过程,

这也导致了显著更多的断层数量。

正交伸展下的地堑边界没有发育大量阶梯式正断层用以调节位移(图 13a 中的地堑 6, 图 13b 中的地堑 8), 相反形成了规模近乎相同的单一对倾断层。这可能表明在弧形边界条件(非共轴变形)下, 正断层更倾向于形成多个孤立正断层来完成应力传递, 更多的孤立正断层间通过转换斜坡完成了位移传递(图 13a, b 中的地堑 1 与缓坡带 1), 转换斜坡作为平面褶皱更容易完成走向或弧形边界的位移旋转, 容纳了大量非共轴变形应变。

三组模型的走向玫瑰花图统计表明(图 13d~f): 在相同的演化过程中, 新生正断层也会有极大的区别, 发育多组不同走向断层。因此, 并非应力场转变才会导致不同走向断层的形成, 先存构造与边界凸起的几何形态都会影响盖层断层走向, 使得断层

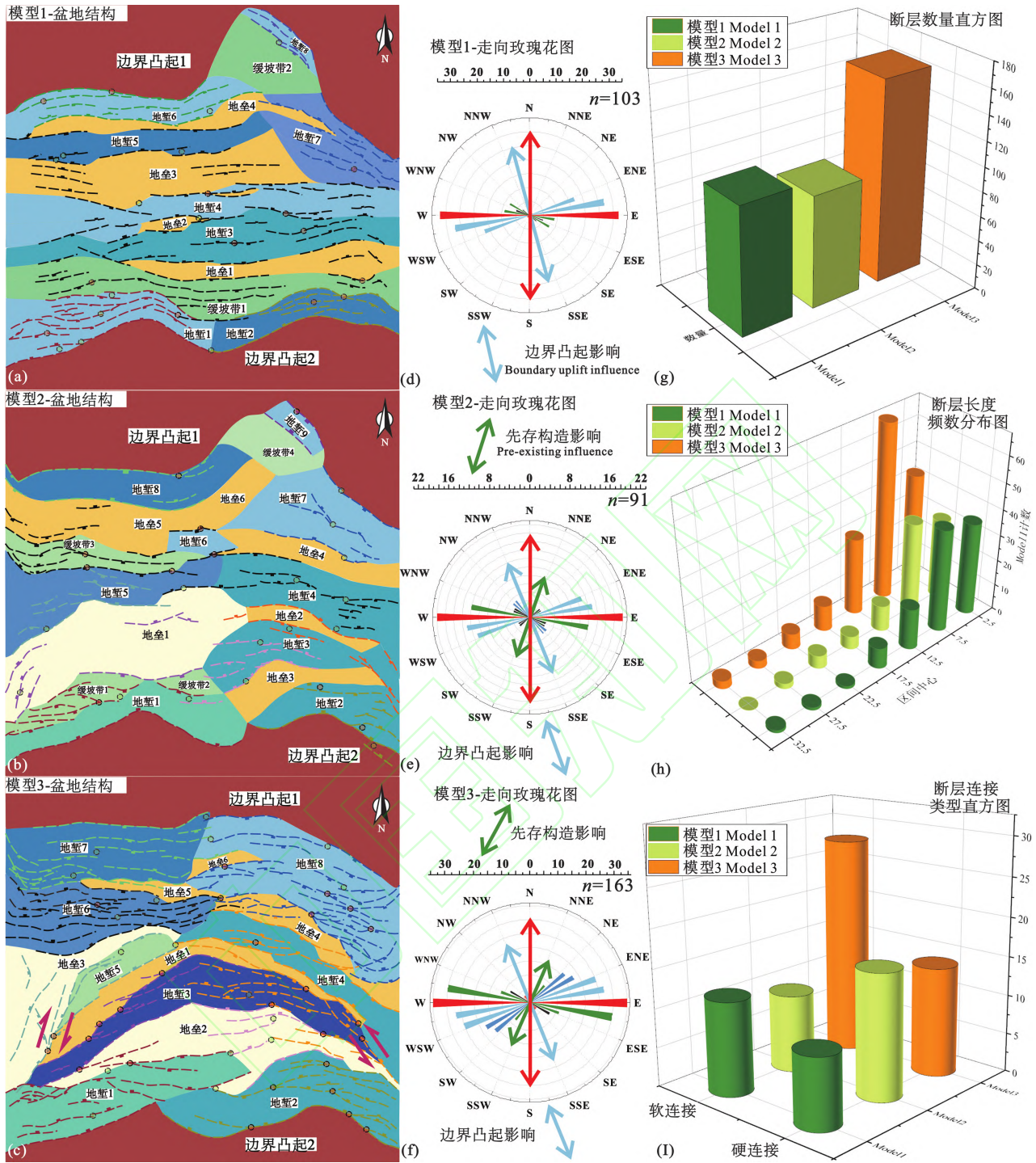


图 13 三组模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of simulation results for the three models

(a~c)—模型 1~3 最终盆地结构; (d~f)—三组模型走向玫瑰花图; (g)—断层数量直方图; (h)—断层长度频数分布图; (i)—断层连接类型直方图

(a~c)—final basin structures of models 1~3; (d~f)—rose diagrams of fault trends for the three models; (g)—histogram of fault numbers; (h)—frequency distribution of fault lengths; (i)—histogram of fault connection types

不再沿着垂直应力场方向形成, 转为沿先存构造走向形成, 基底韧性层的存在则会放大局部应力场变化带来的断层走向变化。

笔者对所用术语在砂箱实验中进行了标注, 正

断层分段生长时的转换斜坡几何形态及正断层间叠置的三个模式(图 7e、f), 转换斜坡带的消亡状态(图 9f)和垒堑构造(图 11f), 转换斜坡带的形成与消亡分别标志着断层间的软连接与硬连接状态, 针对断

层生长的各个阶段进行了统计和标注。统计结果揭示随着断层数量的增多,断层间的连接关系也更为复杂,模型 3 出现了大量的连接区,以低成熟的软连接为主要特征;然而模型 2 相比模型 1 虽然断层数量更少,但连接区却更多,这表明受先存构造影响,平面斜向生长的过程需要更多的转换斜坡带完成位移调节。模型 3 中的韧性层增强了断层间的相互作用,使得原本孤立断层紧密相连,形成大量的长距离延伸断层(长度区间 12.5~17.5 m 明显增多),模型 1 与模型 2 相比则断层长度近似,说明先存构造并不会增强断层生长过程(图 13g)。韧性层与先存断层同时存在时的断裂系统将会形成更多的转换斜坡带,这些地区更加有利于油气勘探与浅层成藏(Fossen and Rotevatn, 2016)。

5.2 实验与实例对比

三组模型变形结果各不相同,揭示变形前先存构造对晚期盖层变形明显的控制作用。模型 1 与研究区实际构造形态相比,既缺失北部高柳—高北断裂带,也缺少南部张扭帚状组合,只有盆地形态与实际相近,证明盆地边界凸起是控制整体盆地结构的重要因素;模型 2 与实际浅层构造形态相比,已经基本具有南北分区差异变形的格局,但诸如 1 号和 4 号断裂带的帚状特征尚不清晰,仅发育主干断层,简单的斜向伸展只会产生狭窄和分散的单一断层,形成雁列式构造,北部变形尚缺乏东西分段相连的基本特征;模型 3 与实际结果的高度相似性体现在南北分区变形(北部交织相连,南部张扭变形),断层数量与走向以及主要沉降区分布的一致性上。

北部强伸展变形区主要对应Ⅱ和Ⅲ新生性断裂系统(图 5b,图 14)。东营组以来应力场转为南北向伸展后,西南庄断层东段与柏各庄断层西段在该期由于伸展方向与断层小角度相交,不再强烈控陷。新生的高柳—高北断层开始活动控陷(图 2c),彼此交织相连,内部发育大量转换斜坡带(姜华等,2010;史冠中等,2011;孙思敏等,2016;Zhao Rui et al., 2019;刘可行等,2020),这与模型中的 F_6 和 F_7 号断裂系统在中段交织汇聚(图 14b),发育的位置和形态近似。而快速裂陷下新生的垒堑相间式构造(F_5 和 F_6 断裂系统)与 5 号断裂带和老爷庙断裂带匹配(图 14)。

南部的弧形断裂系统则是相对独立的构造体系,主要对应Ⅰ和Ⅳ继承性断裂系统(图 5b,图 14)。1 号与 4 号张扭断裂带则与模拟中的 F_1 、 F_4 断层系统匹配,共同构成弧形的端部(图 14),断层组合均

表现为向南收敛至主干边界,向北弧形发散的特征,次级断层呈阶梯式节节南掉,其锐角收敛指示局部存在的走滑分量(1 号右旋走滑分量与 4 号左旋走滑分量)。次级断层的弧形发散末端与线性收敛至主干断层,均形成于先存构造影响下的斜向伸展。两者中部夹持的连续弧形断裂系统(F_2 和 F_4)则对应 2 号东与 2 号北断裂带,分别与 4 号断裂带和 1 号断裂带过渡相连。南部 F_3 号断裂系统则对应于 3 号断裂带,形成东西走向的地堑形态,逐渐向 4 号断裂带收敛相交;西南部的东西向 F_{1-5} 号断裂系统正是边界影响下的新生断裂系统,与 1—5 号和 2 号西断裂带相对应(图 14)。

南堡凹陷内的各沉降中心也相匹配,林雀次凹与模拟结果的地堑 4—地堑 6 沿线匹配,正是位于南北变形分界的地区,成为凹陷主沉降中心;曹妃甸北次凹则与模拟结果的地堑 3 匹配,是北西向 2 号先存构造影响的新生负向构造;曹妃甸南次凹对应模拟结果中的地堑 2,是沙北断层与北西向 3 号先存构造共同控制的负向构造;西南庄次凹与模拟结果的地堑 7 相匹配,北堡次凹与模拟结果的地堑 6 匹配,都是断裂带内部的局部低洼;柳南次凹与地堑 8 南部匹配,是受边界断层影响的低幅度负向构造;拾场次凹则对应北部的地堑 7—8 沿线。

模拟工作还尚存一些缺点,如强制性先存构造的几何形态如何与真实地质模型一致(控制新生断层固定倾向),缺乏老爷庙与 5 号断裂带晚期的 NEE 向断裂系统(实验为东西向断层)及北部完整的盆地边界,在实验中切片主要以基底卷入式断层为主,最终盖层发育的断层总能在底部找到踪迹,相反自基底向上传播的断层总有夭折,这也地震剖面中盖层滑脱式的断层组合不匹配。笔者认为真实的地质过程经历多期异向伸展,可能由于模拟过程中缺失北东向构造强活动的 NW-SE 向伸展阶段,没有 NE 向先存断层面,这些力学软弱面会控制后期断层沿着先存走向定向排列,这可能解释了晚期 NEE 向构造的缺失。实验中的馆陶期热沉降过程只进行简单铺砂过程,而实际中上百万年的成岩,压实,固结作用在实验中被省略。这些地质过程的省略使得先存断层再活化变得相对极其容易,也使得模拟结果出现大量上下贯穿的长期活动断层。

但是模型 3 所得的模拟结果,不论是断裂系统,沉积中心还是整体构造形态都已经十分接近实际情况,说明南堡凹陷现今构造是在沙河街期北西南东向伸展叠加东营期以来南北向伸展所形成的,强制

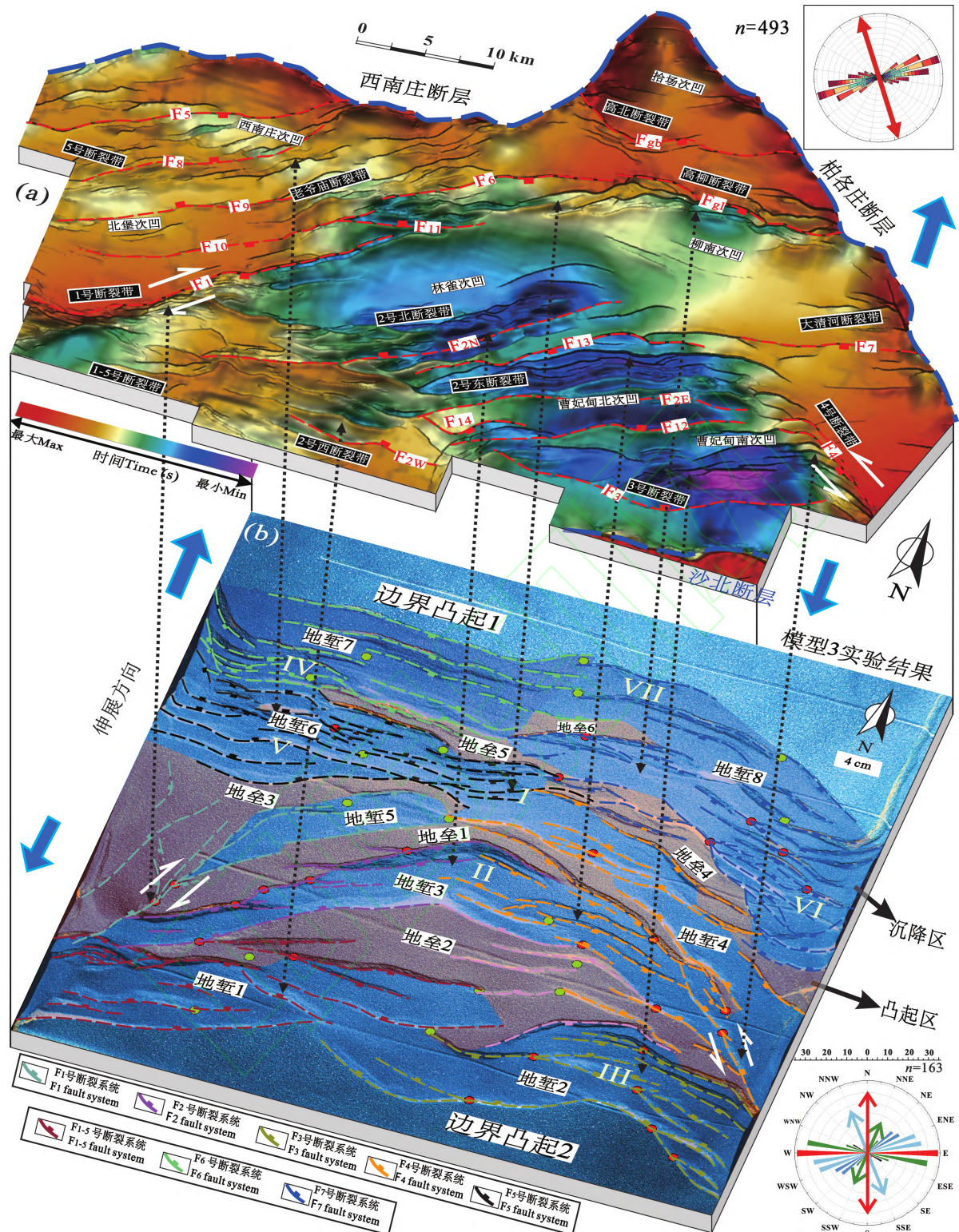


图 14 南堡凹陷模型 3 盆地结构与实例对比图

Fig. 14 Comparison of the basin structure of Model 3 with the actual Nanpu sag

(a) 南堡凹陷明化镇组底面三维构造图; (b) 模型 3 模拟结果盆地结构

(a)—3D structural map of the bottom surface of the Minghuazhen Formation in the Nanpu sag; (b)—basin structure from Model 3 simulation results

性先存构造是形成南北分区差异变形的重要基础, 韧性滑脱层的存在加强断层间的联系形成东西分段

相连的特征, 馆陶期的热沉降过程带来上下分层变形的差异。

6 结论

笔者通过三维地震资料解释与三组物理模拟实验,精细解剖了渤海湾盆地南堡凹陷的构造成因,并总结裂陷盆地的多条件影响因素,我们发现:

(1)南堡凹陷断裂系统在时间上具有继承性,空间上具有分带性,具有南北分区差异变形,上下分层变形的特征。以此划分为各具特色的4套断裂系统:北东向继承性断裂系统—帚状与负花状组合特征;北西向继承性断裂系统—马尾状与负花状组合特征;东西向新生性断裂系统—网状交织式与垒堑式组合;北东向新生性断裂系统—复合“Y”型与多米诺式组合特征。

(2)根据断层活动特征可将先存构造划分为强制性先存构造(注中古隆起)与先存薄弱型(先存断层面)。南堡凹陷南部三个北东走向的与一个北西走向的先存古隆起是导致后期南北分区变形的根本因素。先存断裂面会诱导晚期断层定向排列,进而偏离实际应力背景。

(3)对照组模拟实验证实强制性先存构造,基底韧性滑脱层可以合理地解释南北向伸展时,南堡凹陷断裂系统的形成演化。无韧性层基底变形时,先存构造会强制性使新生断层沿先存构造走向展布且局限于狭窄的应变区内,而具有韧性层时,广布式的应力分布将形变均匀传递至盖层,形成平面网状交织式的复杂变形。先存构造的存在会扰动新生断层走向及规模,进而影响盆地应力场恢复,在应力背景恢复时需要额外考虑先存构造的扰动。

References

- Allen M B, MacDonald D I M, Xun Zhao, Vincent S J, Brouet-Menzies C. 1997. Early Cenozoic two-phase extension and late Cenozoic thermal subsidence and inversion of the Bohaibasin, northern China. *Marine and Petroleum Geology*, 14(7~8): 951~972.
- Cai Rui, Liu Hao. 2013. Tectonic deformation and physical simulation of the Gaoliu fracture belt in Nanpu sag. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 20(4): 41~44+152~153 (in Chinese with English abstract).
- Claringbould J S, Bell R E, Jackson C A L, Gawthorpe R L, Odinsen T. 2017. Pre-existing normal faults have limited control on the rift geometry of the northern North Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 475: 190~206.
- Corti G, Philippon M, Sani F, Keir D, Kidane T. 2013. Re-orientation of the extension direction and pure extensional faulting at oblique rift margins: Comparison between the main Ethiopian rift and laboratory experiments. *Terra Nova*, 25(5): 396~404.
- Deng Chao, Gawthorpe R L, Fossen H, Finch E. 2018. How does the orientation of a preexisting basement weakness influence fault development during renewed rifting? Insights from three-dimensional discrete element modeling. *Tectonics*, 37(7): 2221~2242.
- Dong Yuexia, Wang Zecheng, Zheng Hongju, Xu Anna. 2008. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu sag. *Petroleum Exploration and Development*, 35(4): 424~430 (in Chinese with English abstract).
- Feng Jianwei, Wang Zhikun, Shang Lin. 2017. Genetic mechanisms of superimposed fault systems in Block 3 of Nanpusag, Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 38(6): 1032~1042 (in Chinese).
- Fossen H, Rotevatn A. 2016. Fault linkage and relay structures in extensional settings—A review. *Earth-Science Reviews*, 154: 14~28.
- Ge Zhiyuan, Gawthorpe R L, Rotevatn A, Thomas M B. 2017. Impact of normal faulting and pre-rift salt tectonics on the structural style of salt-influenced rifts: The Late Jurassic Norwegian central graben, North Sea. *Basin Research*, 29(5): 674~698.
- He Dengfa. 2022. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydrocarbon occurrence. *Earth Science Frontiers*, 29(6): 24~59 (in Chinese with English abstract).
- He Dengfa, Wang Chengshan, Guan Shuwei, Li Chuanxin, Wang Yu, Kai Baize, Mei Qinghua, He Hongbing. 2023. Stratified detachment deformation: New concept for studies on the tectonics of Qiangtangbasin. *Chinese Journal of Geology (Scientia Geologica Sinica)*, 58(1): 1~17 (in Chinese).
- Henza A A, Withjack M O, Schlische R W. 2010. Normal-fault development during two phases of non-coaxial extension: An experimental study. *Journal of Structural Geology*, 32(11): 1656~1667.
- Henza A A, Withjack M O, Schlische R W. 2011. How do the properties of a pre-existing normal-fault population influence fault development during a subsequent phase of extension? *Journal of Structural Geology*, 33(9): 1312~1324.
- Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. 2001. The tectonic evolution of Bohaibasin in Mesozoic and Cenozoic time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis*, 37(6): 845~851 (in Chinese with English abstract).
- Huang Haotian. 2019. The Function of Fault Superposition in No. 2 Structure and No. 3 structure of Nanpu sag. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Jammes S, Manatschal G, Lavie L. 2010. Interaction between prerift salt and detachment faulting in hyperextended rift systems: The example of the parentis and mauleon basins (Bay of Biscay and western Pyrenees). *AAPG Bulletin*, 94(7): 957~975.
- Jiang Hua, Wang Hua, Lin Zhengliang, Fang Xinxin, Zhao Shue, Ren Guiyuan. 2009. Periodic rifting activity and its controlling on sedimentary filling of Paleogene Period in Nanpu sag. *Acta Sedimentologica Sinica* 27(5): 976~982 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Hua, Wang Jianbo, Zheng Lei, Fang Xinxin, Yuan Shengqiang. 2010. Segment activity of Xi'nanzhuang fault in Nanpu sag and its controlling on sedimentary process. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(6): 1047~1053 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Fujie, Guo Jing, Pang Xiongqi, Chen Di, Wang Jianwei, Wang Yingxun, Li Yaqian, Chen Xue, Guo Tingwei, Fang Zhou, Wang Xiaohao, Qi Zhenguo, Wen Jiahao. 2023. Joint evaluation of three types of oil-gas resources in whole petroleum system of Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(9): 1472~1486 (in Chinese with English abstract).
- Liang Jie, Yu Fusheng, Liu Guoxi, Wang Tongkui, Li Dinghua, Ma Kui. 2014. Deformation superimposition characteristics resulting from stretching direction changes in nanpu sag: Insight from physical modeling. *Geoscience*, 28(1): 139~148 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Zhou Lihong, Liu Jianzhong, Shan Yehua, Gao

- Zhenping, Xu Shumei. 2004. Cenozoic faulting and basin formation in the eastern North China plate. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(3): 57~66 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Suo Yanhui, Dai Liming, Liu Liping, Jin Chong, Liu Xin, Hao Tianyao, Zhou Lihong, Liu Baohua, Zhou Juntai, Jiao Qian. 2010. Development of the Bohai Bay basin and destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64~89 (in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Zhao Guochun, Dai Liming, Zhou Lihong, Liu Xin, Suo Yanhui, Santosh M. 2012. Cenozoic faulting of the Bohai Bay basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 80~93.
- Liu Kexing, Gan Huajun, Chen Si, Meng Lingjian, Li Xiaopeng, Ke Youliang, Ma Jianghao, Wang Siyang. 2020. Genetic mechanism of allogenic migrated sequence stratigraphic architecture in Gaobei area of Nanpu sag and its significance for sedimentation. *Earth Science*, 45(10): 3603~3617 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lu, Sun Yonghe, Chen Chang, Lou Rui, Wang Qi. 2022. Fault reactivation in No. 4 structural zone and its control on oil and gas accumulation in Nanpu sag, Bohai Bay basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 716~727 (in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaofeng, Dong Yuexia, Wang Hua. 2010. Antiformal negative flower structure in Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Earth Science*, 35(6): 1029~1034 (in Chinese with English abstract).
- Morley C K. 2010. Stress re-orientation along zones of weak fabrics in rifts: An explanation for pure extension in 'oblique' rift segments? *Earth and Planetary Science Letters*, 297(3~4): 667~673.
- Morley C K, Haranya C, Phoosongsee W, Pongwapee S, Kornsawan A, Wonganan N. 2004. Activation of rift oblique and rift parallel pre-existing fabrics during extension and their effect on deformation style: Examples from the rifts of Thailand. *Journal of Structural Geology*, 26(10): 1803~1829.
- Mu Lihua, Gao Bin, Yu Fusheng, Wu Xin, Zhang Jingyi, Chen Shaoyong. 2018. Physical simulation for the origin of parallel conjugate faults and its application in the Nanpu sag. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(6): 988~1000 (in Chinese with English abstract).
- Keep M, McClay K R. 1997. Analogue modelling of multiphase rift systems. *Tectonophysics*, 273(3~4): 239~270.
- Qi Jiafu. 2004. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation. *Chinese Geology*, 31(1): 15~22 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, Yang Qiao, Chen Fajing. 1995. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rift basin in the Bohai Bay. *Experimental Petroleum Geology*, 17(4): 316~323 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Yu Fusheng, Lu Kezheng, Zhou Jianxun, Wang Ziyu, Yang Qiao. 2003. Conspectus on Mesozoic basins in Bohai bay province. *Earth Science Frontiers*, 10(S1): 199~206 (in Chinese with English abstract).
- Qi Jiafu, Yang Qiao. 2010. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China. *Marine and Petroleum Geology*, 27(4): 757~771.
- Schellart W P, Lister G S. 2005. The role of the East Asian active margin in widespread extensional and strike-slip deformation in East Asia. *Journal of the Geological Society*, 162(6): 959~972.
- Shi Zhenrong, Ge Yunlong, Qin Fengqi. 2000. Dynamic analysis of fault characteristics in the northern part of Nanpu sag. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 7(4): 1~4 + 19~5 (in Chinese with English abstract).
- Shi Guanzhong, Wang Hua, Xu Bei, Jiang Hua. 2011. Activity of Baigezhuang fault of Nanpu depression and its controlling on sedimentation. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 47(1): 85~90 (in Chinese with English abstract).
- Sun Simin, Ji Hancheng, Wang Jianwei, Zhang Hui, Chen Liang. 2016. Segmentation characteristics and evolution of Xinanzhuang fault in Nanpusag, Bohai Bay basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(5): 628~634 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Cai Dongsheng, Wu Yongping, Li Xiaoguang, Li Xushen, Meng Lingjian. 2010. Activity criterion of pre-existing fabrics in non-homogeneous deformation domain. *Science China Earth Sciences*, 53(8): 1115~1125.
- Tong Hengmao, Zhao Baoyin, Cao Zhe, Liu Guoxi, Dun Xiaomei, Zhao Dan. 2013. Structural analysis of faulting system origin in the Nanpu sag, Bohai Bay basin. *Acta Geologica Sinica*, 87(11): 1647~1661 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Fan Caiwei, Meng Lingjian, Zhao Baoyin, Fan Jingyu. 2018a. Manifestation and origin mechanism of the fault system complexity in rift basins in eastern southern China: Case Study of the Nanpu and Weixinan. *Acta Geologica Sinica*, 92(9): 1753~1765 (in Chinese with English abstract).
- Tong Hengmao, Gong Faxiong, Meng Lingjian, Zhao Baoyin. 2018b. Tectonic model of boundary fault migration and its genetic mechanism in the nanpu sag, Bohai Bay basin. *Geotectonica et Metallogenia*, 42(3): 421~430 (in Chinese with English abstract).
- Versfelt J, Rosendahl B R. 1989. Relationships between pre-rift structure and rift architecture in Lakes Tanganyika and Malawi, East Africa. *Nature*, 337: 354~357.
- Withjack M O, Callaway S. 2000. Active normal faulting beneath a salt layer: An experimental study of deformation patterns in the cover sequence. *AAPG Bulletin*, 84(5): 627~651.
- Wang Yuheng, Yu Fusheng, Zhao Baoyin, Meng Lingjian. 2024. New model of linkage evolution for the transtensional fault systems in the Nanpu sag of Bohai Bay basin: Insight from seismic interpretation and analogue modelling. *Petroleum Science*, 21(4): 228~2310.
- Wu Lin, Chen Qinghua, Liu Yin, Wang Xi, Zhang Xiaodan, Sun Ke, Chen Chuanhao. 2017. Extension direction and tectonism in rift basins and their control on structural style: A case study on the south fault terrace in the Gaoyousag, Subei basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 29~38 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhiping, Hou Xubo, Li Wei. 2007. Discussion on Mesozoic basin patterns and evolution in the eastern North China block. *Geotectonica et Metallogenia*, 31(4): 385~399 (in Chinese with English).
- Xiao Long, Wang Fangzheng, Wang Hua, Pirajno F. 2004. Mantle plume tectonics constraints on the formation of Songliao and Bohaiwan basins. *Earth Science*, 29(3): 283~292 (in Chinese with English abstract).
- Xu Anna, Dong Yuexia, Zou Caineng, Wang Zecheng, Zheng Hongju, Wang Xudong, Cui Ying. 2008. Division and evaluation of oil-gas prolific zones for litho-stratigraphic reservoirs in the Nanpusag. *Petroleum Exploration and Development*, 35(3): 272~280 (in Chinese with English abstract).
- Yang Rongchao, Li Liang, Lou Rui, Liu Lu, Liu Cong, Gao Tian. 2022. Fault development characteristics and genesis of the II and III structural belts in Nanpu sag, Bohai Sea, China. *Journal of Chengdu University of Technology*, 49(4): 482~490 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fusheng, Dong Yuexia, Tong Hengmao, Xiong Lianqiao, Long Xian. 2015. Characteristics and origins of structural deformation in the Paleogene in the western sag of Liaohe depression, Bohai Bay basin. *Oil & Gas Geology*, 36(1): 51~60 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fusheng, Koyi H. 2016. Cenozoic tectonic model of the Bohai Bay basin in China. *Geological Magazine*, 153(5~6): 866~886.
- Zhao Rui, Chen Si, Wang Hua, Gan Huajun, Wang Guanhong, Ma Qian. 2019. Intense faulting and downwarping of Nanpu sag in

- the Bohai Bay basin, eastern China; Response to the Cenozoic stagnant Pacific slab. *Marine and Petroleum Geology*, 109: 819~838.
- Zhou Haimin, Wei Zhongwen, Cao Zhonghong, Cong Liangzi. 2000. Relationship between formation, evolution and hydrocarbon in Nanpu sag. *Oil & Gas Geology*, 21(4): 345~349 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jianxun, Qi Jiafu. 1999. Influences of direction of extensional boundary on strikes of normal faults in extension basin: Insights from plane sandbox experiments. *Scientia Geologica Sinica*, 34(4): 491~497+450~537 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qijie, Liu Yongjiang, Wang Deying, Guan Qingbin, Wang Guangzeng, Wang Yu, Li Zunting, Li Sanzhong. 2022. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay. *Earth Science Frontier*, 29(5): 147~160 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tianwei, Zhai Ruiguo. 2008. Genesis and control of structural style of Nanpu depression in Bohai Bay basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(2): 10~14+639 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Tianwei, Zhou Jianxun, Dong Yuxia, Wang Xudong, Chang Hongwei. 2009. Formation mechanism of Cenozoic fault system of Nanpu sag in Bohai Baybasin. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 33(1): 12~17 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Guang, Liu Cheng, Gu Chengchuan, Zhang Shuai, Li Yunjian, Su Nan, Xiao Shiye. 2018. Oceanic plate subduction history in the western Pacific Ocean; Constraint from late Mesozoic evolution of the Tan-Lu fault zone. *Science China (Earth Sciences)*, 61(4): 386~405 (in Chinese).
- Zwaan F, Schreurs G, Naliboff J, Buiter S J H. 2016. Insights into the effects of oblique extension on continental rift interaction from 3D analogue and numerical models. *Tectonophysics*, 693: 239~260.
- ### 参 考 文 献
- 蔡蕊, 刘浩. 2013. 南堡凹陷高柳断裂带构造变形特征与物理模拟研究. *特种油气藏*, 20(4): 41~44, 152~153.
- 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 徐安娜. 2008. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制. *石油勘探与开发*, 35(4): 424~430.
- 冯建伟, 王志坤, 商琳. 2017. 渤海湾盆地南堡凹陷3区多期叠加断裂体系形成机制. *石油与天然气地质*, 38(6): 1032~1042.
- 何登发. 2022. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律. *地质前缘*, 29(6): 24~59.
- 何登发, 王成善, 管树巍, 李传新, 王瑜, 开百泽, 梅庆华, 贺鸿冰. 2023. 分层滑脱: 羌塘盆地构造研究的新概念. *地质科学*, 58(1): 1~17.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(6): 845~851.
- 黄浩天. 2019. 南堡凹陷2、3号构造带叠加断层作用及机理. 中国石油大学(北京)硕士学位论文.
- 姜华, 王华, 林正良, 方欣欣, 赵淑娥, 任桂媛. 2009. 南堡凹陷古近纪幕式裂陷作用及其对沉积充填的控制. *沉积学报*, 27(5): 976~982.
- 姜华, 王建波, 张磊, 方欣欣, 袁圣强. 2010. 南堡凹陷西南庄断层分段活动性及其对沉积的控制作用. *沉积学报*, 28(6): 1047~1053.
- 姜福杰, 郭婧, 庞雄奇, 陈迪, 王建伟, 汪英勋, 李亚茜, 陈雪, 郭婷玮, 房舟, 王晓昊, 齐振国, 文嘉豪. 2023. 渤海湾盆地南堡凹陷全油气系统3类油气资源联合评价. *石油学报*, 44(9): 1472~1486.
- 李三忠, 周立宏, 刘建忠, 单业华, 高振平, 许淑梅. 2004. 华北板块东部新生代断裂构造特征与盆地成因. *海洋地质与第四纪地质*, 24(3): 57~66.
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 刘丽萍, 金宠, 刘鑫, 郝天珧, 周立宏, 刘保华, 周均太, 焦倩. 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. *地质前缘*, 17(4): 64~89.
- 梁杰, 于福生, 刘国玺, 王童奎, 李定华, 马奎. 2014. 南堡凹陷分期异向伸展变形叠加特征: 来自砂箱物理模拟实验的启示. *现代地质*, 28(1): 139~148.
- 刘可行, 甘华军, 陈思, 孟令箭, 李潇鹏, 柯友亮, 马江浩, 王思洋. 2020. 南堡凹陷高北地区“异迁移”型层序构型成因及其对沉积的意义. *地球科学*, 45(10): 3603~3617.
- 刘露, 孙永河, 陈昌, 姜瑞, 王琦. 2022. 南堡凹陷4号构造带断裂活化及其对油气成藏的控制作用. *石油勘探与开发*, 49(4): 716~727.
- 刘晓峰, 董月霞, 王华. 2010. 渤海湾盆地南堡凹陷的背形负花状构造. *地球科学*, 35(6): 1029~1034.
- 穆立华, 高斌, 于福生, 吴鑫, 张敬艺, 陈少勇. 2018. 走向平行之共轭式断层成因模拟及其在南堡凹陷中的应用. *大地构造与成矿学*, 42(6): 988~1000.
- 漆家福. 2004. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释. *中国地质*, 31(1): 15~22.
- 漆家福, 张一伟, 陆克政, 杨桥, 陈发景. 1995. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式及其动力学过程. *石油实验地质*, 17(4): 316~323.
- 漆家福, 于福生, 陆克政, 周建勋, 王子煜, 杨桥. 2003. 渤海湾地区的中生代盆地构造概论. *地质前缘*, 10(S1): 199~206.
- 石振荣, 葛云龙, 秦凤启. 2000. 南堡凹陷北部断裂特征动力学分析. *断块油气田*, 7(4): 1~4+19~5.
- 史冠中, 王华, 徐备, 姜华. 2011. 南堡凹陷柏各庄断层活动特征及对沉积的控制. *北京大学学报(自然科学版)*, 7(4): 1~4+19~5.
- 孙思敏, 季汉成, 王建伟, 章惠, 陈亮. 2016. 渤海湾盆地南堡凹陷西南庄断层分段特征及演化. *石油实验地质*, 38(5): 628~634.
- 童亨茂, 蔡东升, 吴永平, 李晓光, 李绪深, 孟令箭. 2011. 非均匀变形域中先存构造活动性的判定. *中国科学: 地球科学*, 41(2): 158~168.
- 童亨茂, 赵宝银, 曹哲, 刘国玺, 顿小妹, 赵丹. 2013. 渤海湾盆地南堡凹陷断裂系统成因的构造解析. *地质学报*, 87(11): 1647~1661.
- 童亨茂, 范彩伟, 孟令箭, 赵宝银, 范晋煜. 2018a. 中国东-南部裂陷盆地断裂系统复杂性的表现形式及成因机制: 以南堡凹陷和涠西南凹陷为例. *地质学报*, 92(9): 1753~1765.
- 童亨茂, 龚发雄, 孟令箭, 赵宝银. 2018b. 渤海湾盆地南堡凹陷边界断层的“跃迁”特征及其成因机制. *大地构造与成矿学*, 42(3): 421~430.
- 吴林, 陈清华, 刘寅, 王玺, 张晓丹, 孙珂, 陈传浩. 2017. 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. *石油与天然气地质*, 38(1): 29~38.
- 吴智平, 侯旭波, 李伟. 2007. 华东北部地区中生代盆地格局及演化过程探讨. *大地构造与成矿学*, 31(4): 385~399.
- 肖龙, 王方正, 王华, Pirajno F. 2004. 地幔柱构造对松辽盆地及渤海湾盆地形成的制约. *地球科学(中国地质大学学报)*, 29(3): 283~292.
- 徐安娜, 董月霞, 邹才能, 汪泽成, 郑红菊, 王旭东, 崔璞. 2008. 南堡凹陷岩性-地层油气藏区带划分与评价. *石油勘探与开发*, 35(3): 272~280.
- 杨荣超, 李亮, 姜瑞, 刘露, 刘聪, 高添. 2022. 南堡凹陷II号、III号构造带断裂构造发育特征及成因. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(4): 482~490.
- 于福生, 董月霞, 童亨茂, 熊连桥, 龙炯. 2015. 渤海湾盆地辽河西部凹陷古近纪变形特征及成因. *石油与天然气地质*, 36(1): 51~60.
- 周海民, 魏忠文, 曹中宏, 丛良滋. 2000. 南堡凹陷的形成演化与油气关系. *石油与天然气地质*, 21(4): 345~349.
- 周建勋, 漆家福. 1999. 伸展边界方向对伸展盆地正断层走向的影响: 来自平面砂箱实验的启示. *地质科学*, 34(4): 491~497+450~537.
- 周琦杰, 刘永江, 王德英, 关庆彬, 王光增, 王宇, 李遵亭, 李三忠.

2022. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成. 地学前缘, 29(5): 147~160.
周天伟, 翟瑞国. 2008. 渤海湾盆地南堡凹陷构造样式成因与控油作用试验研究. 石油天然气学报, 30(2): 10~14+639.

周天伟, 周建勋, 董月霞, 王旭东, 常洪卫. 2009. 渤海湾盆地南堡凹陷新生代断裂系统形成机制. 中国石油大学学报(自然科学版), 33(1): 12~17.

Genesis analysis of the Nanpu sag, Bohai Bay basin: Insights from seismic data interpretation and 3D sandbox analogue modelling

WANG Yuheng^{1,2)}, YU Fusheng^{* 1,2)}, SONG Lu³⁾, WANG Dandan⁴⁾, ZHAO Baoyin⁵⁾,
QI Yili^{1,2)}, MENG Lingjian⁵⁾

1) College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

2) State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;

3) China National Petroleum Corporation Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102206, China;

4) The Fifth Geology Company of Hebei Geology & Minerals Bureau, Tangshan, Hebei 063000, China;

5) Jidong Oilfield Company, PetroChina Limited Company, Tangshan, Hebei 063004, China

* Corresponding author: fushengyu@cup.edu.cn

Abstract

The formation process of rift basins is influenced by multiple factors, including pre-existing structures, sedimentary material properties, rift phases, and directions. Ultimately, this process results in multiple sets of fault systems with different orientations and scales, leading to the formation of various structural styles. This undoubtedly makes the structural analysis of basins highly challenging. In this study, we replicated the evolution process of the Nanpu sag since the Dongying Formation, which underwent N-S extension under the influence of multiple factors, through the interpretation of 3D seismic data and comparison with analogue modellings of group structures. The study reveals the following findings: The Nanpu sag is a result of multiple-phase rifting developed under pre-existing structures. Eventually, it formed a structural pattern of N-S partition deformation, connected in segments from east to west, and vertically deformed within the Minghuazhen formation. The pre-existing paleo-uplift in the southern part of the sag affects the uniformly distributed extensional deformation, while in the northern part, a segmented interconnected mesh-like fault system is formed. Reactivation of pre-existing structures in the southern part leads to the formation of E-W curved en echelon inherited fault systems on both sides. The NE pre-existing fault planes formed during multiple-phase orthogonal rifting processes are important factors restricting the late-stage oriented arrangement of faults. Ductile detachment layers are key material factors that enhance the interaction between faults. They facilitate the connection of isolated faults, forming E-W segmented connected normal fault combinations. The faults accommodate oblique extension caused by pre-existing structures through their own bending.

Key words: Bohai Bay basin; pre-existing structure; detachment layer; analogue modelling; Nanpu sag