



逆冲-走滑作用叠加的复合构造变形机制砂箱模拟研究：以张家口-蓬莱断裂带渤海段为例

吕春晓, 郭玲莉, 陶 圩, 张家轩, 周琦杰, 张京京, 陈 欣, 王光增, 李三忠

Sandbox modeling on the reworking of strike-slip faulting from pre-existing thrusts: A case study of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone in Bohai area

LV Chunxiao, GUO Lingli, TAO Wei, ZHANG Jiaxuan, ZHOU Qijie, ZHANG Jingjing, CHEN Xin, WANG Guangzeng, and LI Sanzhong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2023032802>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海湾盆地中部428构造带近S-N向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用

Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 71-81

构造-沉积耦合过程的数值模拟：以南海北部阳江凹陷为例

Numerical modeling of the coupling between strike-slip faulting and sedimentation: A case from the Yangjiang Sag of northern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 139-150

台湾海峡滨海断裂带地质构造特征

Tectonic characteristics of the Binhai Fault Zone in Taiwan Strait

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(6): 72-80

南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向

Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(2): 131-143

海山俯冲对希库朗伊增生楔构造变形的影响：基于离散元模拟的认识

Effects of seamount subduction on structural deformation of Hikurangi accretionary wedge: Insights from discrete-element modeling

海洋地质与第四纪地质. 2023, 43(1): 82-93

西湖凹陷天台斜坡带北部构造变换带特征及油气地质意义

Characteristics of the structural transfer zone of northern Tiantai slope in Xihu Sag of the East China Sea Basin and their petroleum geological significances

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(6): 93-105



关注微信公众号，获得更多资讯信息

吕春晓, 郭玲莉, 陶圩, 等. 逆冲-走滑作用叠加的复合构造变形机制砂箱模拟研究: 以张家口-蓬莱断裂带渤海段为例 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(4): 108-122.

LV Chunxiao, GUO Lingli, TAO Wei, et al. Sandbox modeling on the reworking of strike-slip faulting from pre-existing thrusts: A case study of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone in Bohai area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(4): 108-122.

逆冲-走滑作用叠加的复合构造变形机制砂箱模拟研究: 以张家口-蓬莱断裂带渤海段为例

吕春晓^{1,2}, 郭玲莉^{1,2}, 陶圩^{1,2}, 张家轩^{1,2}, 周琦杰^{1,2}, 张京京^{1,2}, 陈欣^{1,2}, 王光增^{1,2}, 李三忠^{1,2}

1. 深海圈层与地球系统教育部前沿科学中心, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100

2. 崂山实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237

摘要: 逆冲构造体受走滑作用影响形成新的复合构造体系在自然界中较为常见。新生代以来张家口-蓬莱断裂带渤海段的左旋走滑运动, 改造了渤海湾盆地内燕山期挤压运动形成的逆冲构造。北西向的张家口-蓬莱断裂带渤海段受新生代以来太平洋板块俯冲驱动, 与共轭的北东向郯庐断裂带共同控制了渤海湾盆地现今的构造样式, 同时又是地震多发区和油气聚集区。本文通过砂箱模拟实验, 研究不同走滑速率不同基底强度条件下, 逆冲推覆构造受走滑作用改造的复合构造演化机制。实验结果显示, 在挤压背景下, 实验模型中先产生一系列的逆冲断层, 形成逆冲推覆构造和冲起构造; 叠加走滑作用后, 走滑断层切割先存逆冲断层, 具有明显的负花状构造特征。剖面上看, 走滑速率越大, 则断层数量越多, 断层断距更大, 花状构造更为复杂。在局部塑性基底模型中, 无叠加的走滑构造区可形成断陷。结合研究区构造演化过程, 模拟结果与张家口-蓬莱断裂带渤海段构造演化过程具有一定相似性, 尤其沙北断裂、沙东断裂内部花状构造发育最为典型。走滑断裂对构造圈闭具有一定的控制作用, 本模型可对逆冲叠加走滑复合区域的构造演变及动力机制分析提供参考和借鉴。

关键词: 砂箱模拟; 逆冲构造; 走滑构造; 叠加改造; 张家口-蓬莱断裂带

中图分类号: P736.1

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2023032802

Sandbox modeling on the reworking of strike-slip faulting from pre-existing thrusts: A case study of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone in Bohai area

LV Chunxiao^{1,2}, GUO Lingli^{1,2}, TAO Wei^{1,2}, ZHANG Jiaxuan^{1,2}, ZHOU Qijie^{1,2}, ZHANG Jingjing^{1,2}, CHEN Xin^{1,2}, WANG Guangzeng^{1,2}, LI Sanzhong^{1,2}

1. Frontiers Science Center for Deep Ocean Multispheres and Earth System, Key Lab of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, MOE and College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China

2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Laoshan Laboratory, Qingdao 266237, China

Abstract: It is common in nature for thrust structures to form new composite structural systems under the influence of strike-slip faulting. Since the Cenozoic, the sinistral strike-slip movement of the Zhangjiakou-Penglai fault zone in Bohai basin altered the pre-existed Yanshanian thrust structure. Driven by the subduction of the Pacific Plate since the Cenozoic, the NW-trending Zhangjiakou-Penglai fault zone fault zone co-worked with the conjugate NE-trending Tancheng-Lujiang fault zone and established the modern tectonic pattern of the Bohai Bay Basin. This area is an earthquake-prone area and also an oil-gas accumulation area. To understand the mechanism of strike-slip faulting from pre-existing thrusts, we conducted sandbox modeling with various strike-slip rates and basement rigidity setting. Results show a series of thrust faults forming thrust imbricate fan and pop-up structures under compression. After the superposition of thrusting by strike-slip motion, some strike-slip faults were formed and they cut through pre-existing thrusts, presenting a flower structure. Seen in the cross-section, the larger the strike-slip

资助项目: 崂山实验室科技创新项目“基于数字孪生的全球深时地貌重塑与资源环境预测”(LSKJ202204400); 国家自然科学基金创新研究群体项目“海底古地貌动态重建”(42121005); 国家自然科学基金重大项目重点支持项目(92058211); 国家自然科学基金面上项目“走滑派生构造差异演化主控因素的砂箱实验研究: 以郯庐断裂带渤海-山东段张扭派生的构造为例”(42072235); 李三忠教授泰山学者攀登计划项目(tspd20210305); 邢会林教授泰山学者特聘专家计划项目(tstp20221112)

作者简介: 吕春晓(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事构造地质学研究, E-mail: lcx5975@stu.ouc.edu.cn

通讯作者: 郭玲莉(1985—), 女, 副教授, 从事构造地质学及海洋地质学研究, E-mail: guolingli@ouc.edu.cn

收稿日期: 2023-03-28; **改回日期:** 2023-05-21. 周立君编辑

rate, the more faults, the larger the fault spacing, and the more complex flower structure. In the local plastic basement model, the strike-slip zone without superposition can form a fault depression. Combined with the tectonic evolution process of the study area, the modeled results showed a similar pattern of the tectonic pattern of the Zhangjiakou-Penglai fault zone, especially those of the flower structures in the Shabei fault and Shadong fault. Therefore, the strike-slip fault played a role in controlling the tectonic trap. This study provided a reference for understanding the dynamic mechanism of tectonic superposition of strike-slip faulting and thrusting.

Key words: sandbox modeling; thrust-nappe structures; strike-slip structures; superimposed transformation; Zhangjiakou-Penglai fault zone

挤压构造是地壳构造变形的基本类型之一,在挤压背景下,地壳易形成压性盆地、隆升地块、褶皱、俯冲带、造山带等构造。全球的挤压构造分布甚广,板块碰撞挤压形成一系列造山带,例如亚欧板块和非洲板块的碰撞挤压形成巨大的阿尔卑斯山脉,亚欧板块和印度洋板块碰撞挤压形成喜马拉雅山系。在大洋俯冲或大陆碰撞形成的造山带边缘会形成前陆褶皱和冲断带,这些地区又是许多主要油气藏聚集的地区,例如美国西部的落基山脉北部、阿巴拉契亚山脉^[1-2]、加拿大落基山脉^[3]、西班牙比利牛斯山脉^[4-5]、阿尔巴尼亚^[6-7]、巴基斯坦^[8-9]、巴布亚新几内亚等^[10]。褶皱带也是常见的挤压构造产物,发育于褶皱带内的逆冲断层相关褶皱也是油气形成圈闭的主要部位,如伊朗扎格罗斯褶皱带^[11-12]、南美洲亚安第斯褶皱冲断带^[13]等。逆冲构造体受走滑作用影响形成新的复合构造体系在自然界中较为常见,如准噶尔盆地东缘的中部早期逆冲作用较强,后期叠加走滑构造,该构造组合样式调节了盆地内部次级块体的运动^[14]。鄂尔多斯盆地西缘复杂褶皱冲断带,发育若干与之近垂直的调节型走滑断裂;在其北部杭锦旗地区也发育先存逆冲断裂在后期发生张扭走滑改造现象,具有明显的走滑分量^[15-16]。塔里木盆地顺北地区走滑断裂在中下奥陶统碳酸盐岩同时发育有“压脊-地堑”复合构造样式^[17];塔里木盆地塔西南地区走滑断裂多具有逆冲走滑叠加的变形特征^[15, 18]。受张家口-蓬莱断裂带影响,渤海湾盆地渤中坳陷西部也经历了挤压叠加走滑复合作用的改造^[19]。

张家口-蓬莱断裂带是一条巨型走滑深大断裂,其渤海段的活动控制和影响了渤海海域新近纪以来的构造演化,这些断裂与油气的富集和控藏作用密切相关。位于渤海地区的蓬莱9-1、渤中19-4、渤中8-4、曹妃甸12-6、曹妃甸6-4等均为张家口-蓬莱断裂带渤海段的主要断块油田^[20],作为主要的油气聚集区带^[19, 21-22],累计发现石油地质储量大于 $12 \times 10^8 \text{ t}$ ^[20]。许多学者^[23-27]对张家口-蓬莱断裂陆域部分进行了较多研究,但对其海域部分研究相对较少,其渤海段与北北东向的郯庐断裂带构成新生代渤

海海域两个主要的活动构造带^[28-30]。前人对渤海海域内张家口-蓬莱断裂的形成机制和原因认识不一,较多学者认为其雏形的形成和印支运动密切相关^[31-33]。王志才等^[34]、李西双等^[28]认为渤海海域内断裂基本特征是由一系列北西走向的次级断层组成,且大部分是以正断兼有走滑运动性质为主的断层。Peng等^[35]基于张家口-蓬莱断裂带在渤海地区渤中坳陷的沙垒田凸起东北段的钻井资料及三维地震分析,认为该区域是叠加构造带,其左旋走滑位移自新生代以来约为4 km,并控制了油气的运移和成藏。虽然前人对张家口-蓬莱断裂带渤海段的构造机制进行了很多探索,但叠加改造机制仍需进一步研究。

复杂地质背景下,在先挤压后走滑两个应力系统控制下形成的构造样式复杂多样,而目前对逆冲叠加走滑作用复合条件下的构造变形演化模式不够清晰,因此,明晰“逆冲叠加走滑”作用复合条件下的构造组合样式对构造变形特征解析以及油气成藏构造背景预测具有重要的指导意义。为此本文设计了4组不同走滑速率、不同基底强度条件下的逆冲叠加走滑构造砂箱模型,采用石英砂模拟脆性层、局部使用弹性硅胶模拟塑性基底,研究逆冲推覆构造形成机制及受走滑作用改造产生的构造特征,结合区域构造演化过程,探讨构造叠加作用对该区的改造及张家口-蓬莱断裂带渤海段构造演化机制。

1 地质背景

张家口-蓬莱断裂带作为中国东部一条北西走向的走滑断裂,全程长度超过700 km^[20, 28],孕育许多中强度地震且蕴含丰富油气资源^[32-33, 36-39](图1)。张家口-蓬莱断裂带不是一条整体贯穿的连续断裂带,而是由一系列相互重叠且不连续的北西和西北西向断裂段组成^[32, 40],次级断层呈左阶梯状分布,并控制着一系列第四纪菱形盆地^[26, 32]。

张家口-蓬莱断裂带主要分为4段:张北-南口段、南口-宁河段、渤海段和烟台-蓬莱段^[40]。渤海

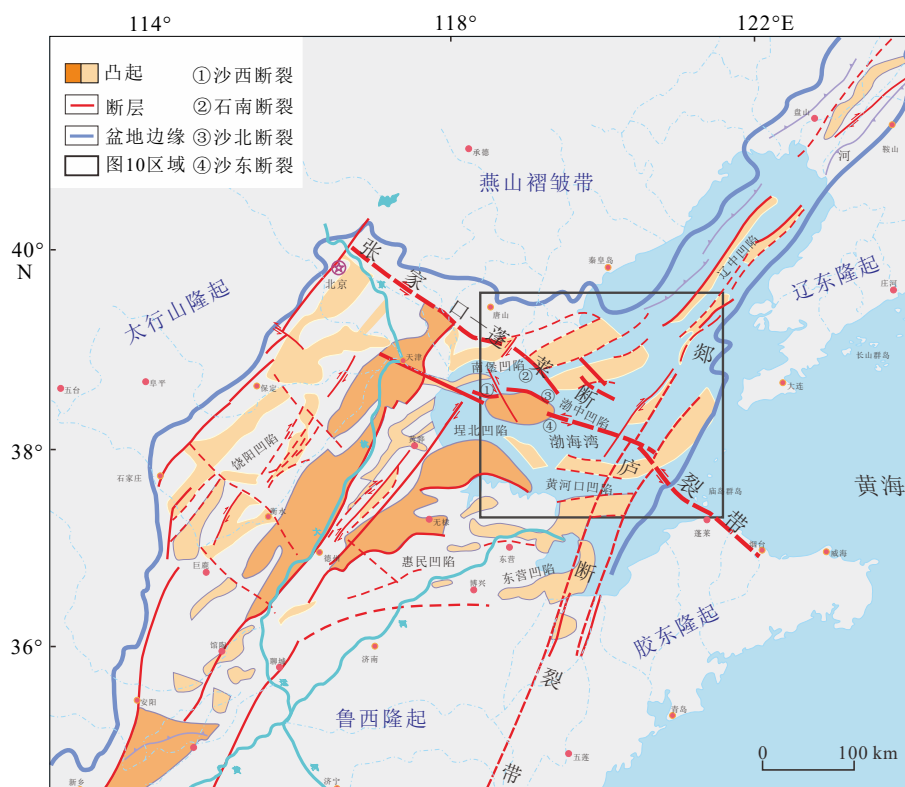


图1 渤海湾盆地的地质单元及张家口-蓬莱断裂带位置^[33, 55]

Fig.1 Geological units in the Bohai Bay Basin showing the location of the regional fault zones^[33, 55]

段从天津宁河入海,向东南延伸贯穿南堡凹陷、沙垒田凸起、渤中凹陷、渤南低凸起、庙西南凸起,在渤海海域内延伸长度约为240 km^[19],断裂带宽度为50~100 km,是一条比较宽泛的断裂带。该段包含了沙西断裂、沙东断裂、石南断裂、沙北断裂等一些次级断裂,通过研究海域浅层的地震资料,发现这些次级断裂通常由规模更小、倾向相同或相反的断裂组成,发育典型的花状构造^[32, 41-42]。

张家口-蓬莱断裂带渤海段是发育于渤海湾盆地的深大断裂,渤海湾盆地是位于华北克拉通的东部地块上的中—新生代盆地^[31, 43-44],具有多期演化历史,该区广泛发育中、新生代走滑构造,如郯庐断裂、张家口-蓬莱断裂等。这些大规模的走滑断裂系统对渤海湾盆地构造的形成具有重要作用^[31]。前人研究表明渤海湾盆地对周围板块的运动响应敏感^[42-43, 45-47]。中生代以来,由于受到扬子板块与华北板块碰撞的影响,环渤中地区出现东西向或北西西向南倾的一系列逆冲断层及宽缓的褶皱^[48-50],此时期某高角度断层经过后期运动的改造,形成了张家口-蓬莱断裂带渤海段的雏形。在古太平洋板块俯冲的影响下,渤海地区受到北北西向应力的挤压^[47, 51-54],整体处于隆升剥蚀状态。新生代以来,太平洋板块俯冲发生变化,使得渤海地区张家口-蓬莱

断裂带开始了左旋走滑运动,并改造了前期形成的挤压构造。

2 砂箱模拟方法

2.1 模型设计

模型装置如图2所示,由多个板块拼装组合而成,箱体的底面、边界可自由变换,以实现不同样式的构造变形模拟。砂箱模型的两块长侧板固定于实验平台,其中一侧使用透明钢化玻璃板,便于对实验加载过程进行观测和记录。箱体底部由两块宽度分别为200、300 mm的金属板组成。底部金属板前后两端设有4块小型金属挡板,根据不同的实验需要(具体实验参数见表1),它们既可以固定在底板上也可以在电机的推动下进行滑动。实验过程中通过电机Ⅰ与挡板相连,对砂体施加压应力,通过电机Ⅱ、Ⅲ与两块底板相连,对砂体施加剪切应力。

干燥石英砂变形符合莫尔-库伦破裂准则^[56-60],是模拟地壳浅层岩石脆性变形最理想的相似材料。本次实验根据相似性原理选用粒度为120~180 μm的不同颜色的干燥石英砂模拟沉积地层,最

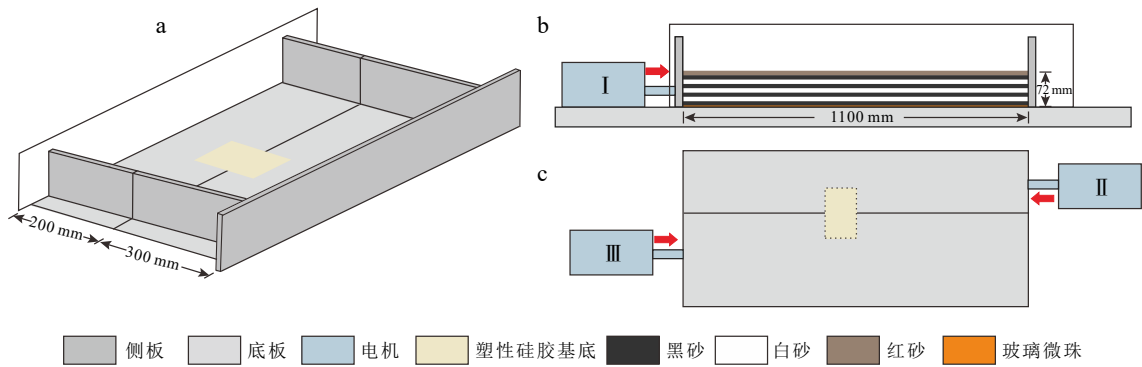


图 2 模型装置简化图

a: 实验装置示意图, b: 挤压模型, c: 走滑模型。

Fig.2 Simplified view of the model setup

a: Experimental device, b: compression model, c: strike-slip faulting model.

表 1 基于逆冲叠加走滑的砂箱模拟实验参数

Table 1 Parameters of the sandbox modeling based on early-stage compression superposition late-stage strike-slip faulting

实验编号	模型尺寸/mm	总缩短量/mm	挤压速率/(mm·s ⁻¹)	加载方向	总走滑位移量/mm	走滑速率/(mm·s ⁻¹)	局部塑性基底
Exp.1	1100×500×72	160	0.01	双向	120	0.02	无
Exp.2	1100×500×72	160	0.01	单向	60	0.01	无
Exp.3	1100×500×72	160	0.01	双向	120	0.02	150mm×300mm×1mm的弹性硅胶
Exp.4	1050×500×72	170	0.04	双向	120	0.02	150mm×300mm×5mm的弹性硅胶

注: 单向加载的走滑速率为电机速率, 双向加载的走滑速率为电机速率的两倍。

底层铺设厚度为 2 mm 的玻璃微珠来模拟沉积盖层中的软弱滑脱层^[61]。将不同颜色石英砂相间铺设(不同颜色的石英砂仅作为标志层用于对实验的区分), 最顶层使用肉红色石英砂, 每层石英砂铺设厚度 10 mm, 共计铺设厚度 70 mm(图 2b)。几何相似比例约为 10⁻⁵^[62-63]。

2.2 实验加载

燕山期, 太平洋板块的俯冲效应使渤海地区遭受挤压增厚, 形成了大量北北东向挤压断裂。新生代以来张家口-蓬莱断裂左旋走滑控制作用增强, 尤其是新构造运动时期张家口-蓬莱断裂左旋活动最为剧烈。在构造运动中不同的走滑速率会产生差异的地貌构造特征^[64-66], 在部分地区也可能存在局部弱化带差异, 为分析这两种因素下对断层展布的影响, 本模型以两期构造变形的相互作用为基础, 根据盆地演化发育特征及相似性原理设置先存逆冲叠加走滑运动的砂箱模拟实验: 分为走滑速率差异左旋走滑模型和局部基底差异左旋走滑模型。Exp.1 与 Exp.2 通过设置双向和单向加载体现速率差异, Exp.3 与 Exp.4 通过设置不同的塑性基底体现局部基底的差异。共 4 组实验, 通过两个阶段对模

型进行加载, 第一阶段为逆冲推覆, 施加压应力, 模拟自燕山期以来的挤压过程。第二阶段为走滑, 施加剪切应力, 模拟了新生代以来张家口-蓬莱断裂带渤海段走滑形式的活动过程。具体实验参数见表 1。

Exp.1: 将砂箱一侧固定, 电机 I 连接于另一侧挡板, 以 0.01 mm/s 的速率, 对砂体单向推挤, 砂体长度由 1100 mm 缩短为 940 mm, 总缩短量为 160 mm。在走滑阶段, 电机 II 和电机 III 分别与两块底板相连, 以 0.01 mm/s 的速率相向运动, 走滑速率为 0.02 mm/s, 电机的位移量均为 60 mm, 走滑总位移量为 120 mm。

Exp.2: 在走滑阶段使电机 II 与底板相连使砂体单向走滑, 走滑速率为 0.01 mm/s, 其他与 Exp.1 相同, 走滑位移量为 60 mm。

Exp.3: 为研究局部塑性层对构造的影响, 在基底设置 150 mm×300 mm 厚度为 1 mm 的弹性硅胶(位置见图 2)观察走滑现象, 其他与 Exp.1 相同。

Exp.4: 在两底板区域断裂活动带之上固定 150 mm×300 mm 厚度为 5 mm 的弹性硅胶塑性层(位置见图 2), 设置局部软弱区, 与 Exp.3 对比。挤压速率为 0.04 mm/s, 总缩短量为 170 mm。走滑阶段与 Exp.1 一致。

2.3 实验数据分析

实验过程使用高分辨率相机分别对顶面变形和侧面变形进行连续记录,拍摄间隔 30 s 或 60 s。实验加载结束后,用水湿润干砂模型,等砂体稳定硬化后,分区域进行剖面切割和记录,垂直于逆冲断层方向上切除边界效应,在垂直于走滑断层方向上每隔 10 mm 记录剖面变形特征。

通过数字散斑方法(digital speckle correlation method, DSCM)计算表面的变形,以分析断层传播过程中的应变场^[39]。DSCM 是基于物体表面散斑图像分析从而获得物体运动和变形信息的光测方法,通过与砂箱模拟手段的联合应用,更有利于对数据的处理和分析^[67-68]。我们将连续记录的演变过程照片导入 DSCM 系统选定图像变形区域,通过计算机中的 DSCM 测量分析模块进行相关匹配计算,获取砂箱模型的变形场信息。然后结合实验对所得到的连续散斑图像进行分析。

3 实验结果

根据实验加载过程,本文按照逆冲阶段和走滑阶段对构造演化特征进行分析,在走滑阶段,分为无叠加的走滑构造区和逆冲受走滑改造叠加区进行构造解析。

3.1 逆冲阶段模拟结果

4 组实验在逆冲阶段表现出相似的演化过程,本文以 Exp.1 为例分析逆冲推覆构造的平面演化(图 3)和剖面演化特征(图 4)。

逆冲推覆构造的平面演化如图 3 所示,通过对模型施加压应力进行逆冲推覆,随着缩短量增加,观察到砂层平行缩短、褶皱、上冲改变原来稳定状态^[69],构造变形沿基底面滑脱层向前传递,深层砂体推掩到浅层砂体之上,随着缩短量增加,逆冲作用导致的地层增厚,上覆地层先后出现了 4 条主逆冲断裂(F1—F4)和数条小型的逆断层,形成叠瓦扇逆冲构造。

Exp.1 剖面演化显示(图 4),随着主应力加载先后出现了 4 条沿基底分布的主要逆冲断层和许多小型的逆断层,均为前展式逆冲断层,先形成的逆断层依次叠加后形成的断层,发育一系列逆冲叠瓦断层构造。主应力开始加载,沿着模型底部开始向上发育第一条逆断层 F1,砂体上方形成一个平缓的凸起,标志着早期 F1 逆冲断层的位置,随着缩短量

的不断增加,断层持续向上扩展,F1 已经传播到表面,形成了一个带有逆冲位移较小的前缘斜坡褶皱(图 4b)。在断层 F1 形成过程中,砂体向前的逆冲运动受阻,使得持续的挤压应力难以释放,当所积累的应力超过岩层的强度时发生反向逆冲,发育与逆冲断层 F1 共轭的第一个反冲断层 f1,当缩短量达到 30 mm 时(图 4b),一个小的冲起构造已经形成,同时第二个反冲断层 f2 发育。随着主应力持续加载,逆冲断层 F2 开始发育,当缩短量达到 70 mm 时,持续强烈的挤压上冲使得新的冲起构造形成(图 4c)。随着缩短持续 F3 开始形成并不断向上切割,当缩短量达到 100 mm 时逆冲断层 F3 向上拓展至表面(图 4d)。随着断层的不断发育,低角度逆冲断层 F4 形成,同时所围限的部位,因强烈挤压而上冲,形成变形强烈的隆起构造。从其剖面观察得到在该叠瓦扇式逆冲断层中,早期形成的断层多为高角度逆冲断层,后期形成的断层则为低角度逆冲断层且近平行展布,前方均形成一个小幅度前缘斜坡褶皱。随着缩短量增加,相对较深层次的砂层推掩到相对较浅层次的砂层之上,逆冲作用导致地层增厚,推覆端逆冲块体运动受阻,形成了与断坡共轭的反冲断层,并形成冲起构造。

3.2 走滑阶段模拟结果

3.2.1 走滑速率差异的影响

(1) 无叠加的走滑构造

在此区域断层组合形式比较简单,由一条近于直立的断层和几条微倾斜的断层组成,断层断距不明显。实验平面图像及数字散斑计算结果获得了 Exp.1 的体应变和最大剪应变变化,如图 5 所示,其中对于体应变场,红色代表拉张,颜色越红,代表拉张量越大。蓝色代表挤压,蓝色越深,挤压越强烈。对于最大剪应变场,颜色从蓝色变为红色代表最大剪应变逐渐变大。在走滑阶段初期(走滑位移 < 22 mm),在无叠加的走滑构造区其主断裂由基底向上发育,表层先是出现 R 剪切断层,与主走滑位移方向约呈 25° 夹角,呈现雁列式分布。随着走滑位移量加大,R 剪切继续传播和延长,开始出现细小的 P 剪切断层。随后 P 剪切之间逐渐贯通并连接切割先前形成的 R 剪切断层,形成一条贯通断裂带。结合 Exp.1 的剖面演化图(图 6),该断裂带表现为压扭特征,为明显正花状构造,断层组合形式在走向上具有相似结构(如图 6 剖面 43、46、50),但存在断层断距以及倾角上的变化。Exp.2 的走滑断层形成过程与 Exp.1 具有相似性(图 7),通过两

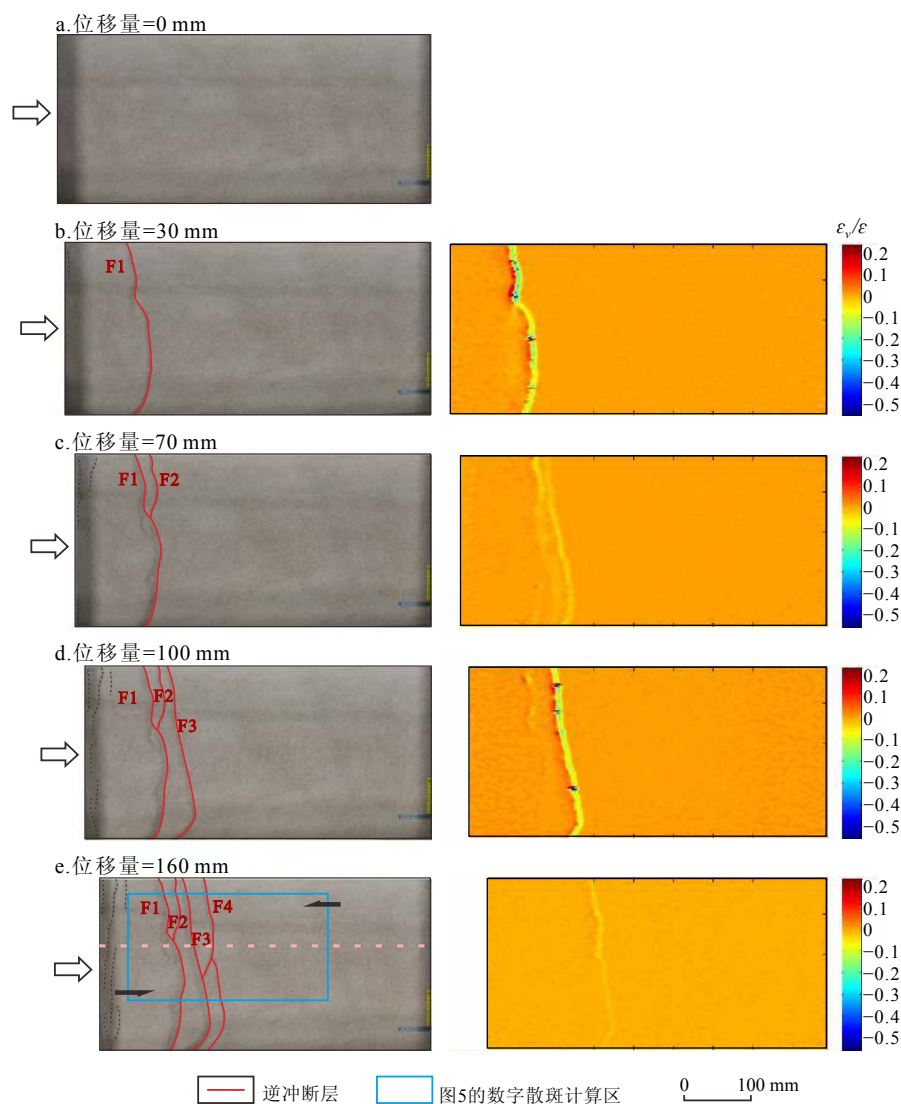


图 3 Exp.1 逆冲阶段平面演化图

左: 模型的平面视图, 右: 模型的体应变图 (ε_v)。

Fig.3 Plain view of the deformation in compression stage of Exp.1

Left: view of the models; right: view of volumetric strain (ε_v).

个实验的剖面对比(图 6、图 7)可以看出, 走滑速率越大所形成的走滑断层倾角更小, 最小倾角接近 45° (图 6 剖面 34), 同时走滑速率越大所形成的花状构造直径更开阔, 且断距更大, 受走滑影响的区域更大(图 6 剖面 21)。

(2) 逆冲受走滑改造叠加

先形成的逆冲构造受走滑作用改造后, 内部结构更为复杂(图 5)。在挤压应力下形成的逆冲叠瓦扇构造受走滑作用的改造呈现左行拉伸, 并在其拉伸区形成断陷。主断裂由基底向上发育, 锥形初现, 体应变和最大剪应变显著增加, 指示着断裂发育(图 5)。同时沿走向发育了与主断裂带平行或呈微小角度相交的次级断层。随着位移量增加, 断层不断生长, 相交于走滑断裂带上。体应变集中区随

着断层扩展而范围增加, 且该处最大剪应变显著变大, 指示着断裂的发育及延伸方向, 断层主要沿着已有的断裂生长, 不产生新的断裂。图 6 为 Exp.1 的剖面演化图, 白线表示剖面位置, 红色线表示前期挤压过程中形成的逆冲断层, 黄色线表示后期走滑过程中新形成的断层。从其剖面看有明显的负花状构造(图 6 剖面 17), 主要由一条高角度的基底断层与多条走滑断层组合而成呈现多级“Y”字形结构, 并且向下延伸至走滑基底面, 使得先前的逆冲区域受走滑作用影响拉分沉降。

将 Exp.1 与 Exp.2 对比发现, Exp.1 形成的走滑断层数更多, 明显可见 5 条, 并且越靠近主断裂带, 断层倾角越大。从剖面看 Exp.1 形成的花状构造区域更开阔、断距更大, 在图 6 剖面 21 处达到最大

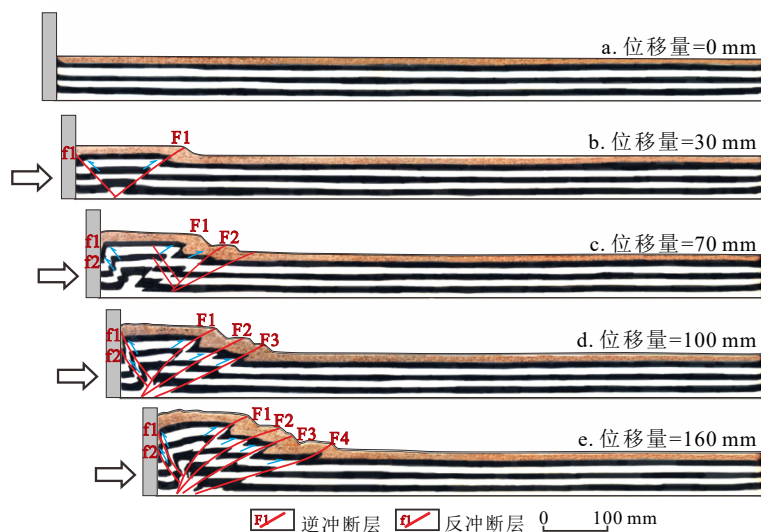


图4 Exp.1 逆冲阶段的剖面演化特征

区域位置见图3; a-e: 对应缩短量的模型侧面图; F1-F4、f1-f2 为发育的主控断层。

Fig.4 Section view of the deformation in compression stage of Exp.1

The blue square area in Fig. 3 is the observation area of the DSCM system. a-e: section views corresponding to different shortenings; F1-F4, f1 and f2 are the main controlling faults.

值, 断距约 20 mm。而 Exp.2(图 7)断层的组合形式比较简单, 表现为沿主断裂带的一系列走滑断层, 且在挤压逆冲区数量较少、形式单一, 表面呈雁列式排列。即整体上断层以向上离散陡倾至近直立的平面状断层形式出现, 断层断距不明显。Exp.1 和 Exp.2 结果显示, 后期形成的走滑断层切穿了前期挤压形成的逆断层, 断层之间交汇贯通为断层通道的形成奠定了基础。

3.2.2 局部基底差异的影响

(1) 无叠加的走滑构造

Exp.3 和 Exp.4 设置了塑性基底, 在无叠加的走滑构造区由于拉分作用形成次级凹陷。在 Exp.4 中基于走滑作用, 断裂不断生长, 当相对走滑位移量达到 30 mm 时, 3 条断裂呈明显的雁列式展布。塑性基底处出现隆起, 随着走滑断距增大, 隆起区域逐渐被拉开, 并在其前方开始形成一个菱形断陷(图 8)。随着走滑过程的进行, 走滑断层数量增多, 主断裂扩展至表面, 倾向断陷发育, 随着走滑断层增多, 断陷规模变大, 断裂从中间主断层向两侧延伸。当相对走滑位移量达到 90 mm 时发育的弧形、斜向断层形成了纵向沉降边缘, 界定了一个菱形沉降区域, 断陷轮廓开始展现, 随着走滑位移量不断增大, 断陷持续拉分。断层主要沿着已有的断裂裂陷, 断陷规模进一步增大, 并不产生新的断裂。从其剖面看, 内部呈现明显的负花状构造, 断层性质为正断层。越靠近断陷中心, 其断层组合形式越趋

于复杂, 断层数量逐渐增多, 断层倾角较小, 部分断层呈现上陡下缓的铲形, 断陷边界为近于直立的正断层, 包围整个沉降区域。在断陷内部, 还发育了一系列下未延伸至底板、上未达砂层顶部的断层, 断层倾角由浅部向深部逐渐变缓。从断陷中心部位的剖面可以看出, 该处断层断距及沉降幅度较大, 其中有明显的两个小地堑, 也就成为了两个沉降中心, 在构造特征上表现为两个负花状构造(图 8 剖面 49)。观察断陷边缘部位剖面发现, 相比于中心部位复杂的断层组合形式, 该处断层组合形式逐步简单化, 并且断层数量减少, 表现为一个狭窄的不对称地堑(图 8 剖面 54), 一侧被一个倾角为 $45^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的凹面向上的正断层包围, 另一侧被一个倾角为 $70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 的凸面上的正断层或一个陡倾斜的正断层包围, 断层底部到达底板位置。地堑的中心部位, 断层倾角较大, 呈现陡倾至近直立状态, 断层断距较小, 表现为一个非对称负花状构造特征。相比于 Exp.4 而言, Exp.3 塑性基底厚度较薄, 产生的断陷样貌存在差异。直至走滑停止, 从表面观察, 断陷面积较小, 沉降不明显, 从其剖面观察, 盆内呈现两个小地堑, 表示其为两个沉降中心, 但断层断距及沉降幅度较小, 凹陷程度浅。断层性质为正断层且倾角较高, 断陷边缘断层呈现上陡下缓的形态, 包围整个凹陷区域, 断陷内部断层数量较少。

(2) 逆冲受走滑改造叠加

Exp.4 的剖面演化如图 8 所示, 剖面 19—22 为

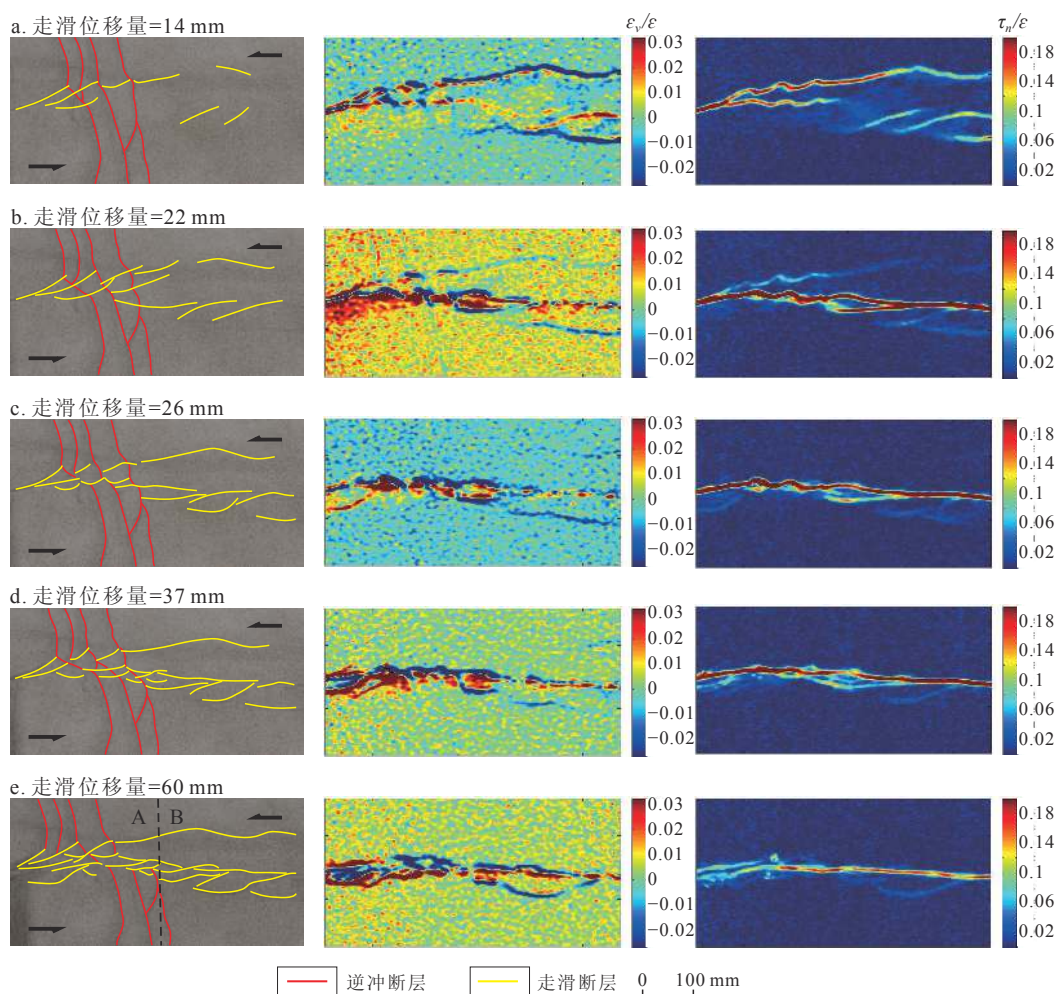


图 5 Exp.1 走滑阶段平面演化图

左图: 模型的平面演化图, 其中 A 为逆冲受走滑改造叠加区, B 为无叠加的走滑构造区; 中间图: 体应变图 (ε_v); 右图: 最大剪应变图 (τ_n)。

Fig.5 Plain view of the deformation evolution in late-stage strike-slip faulting of Exp.1, showing the thrusts superposed by strike-slip faults (A) and by the strike-slip structures without superposition (B)

Left: surface view of the models, middle: volumetric strain (ε_v), right: maximum shear strain (τ_n).

从靠近挤压端到远离挤压端的连续变化剖面。可以看出, 前期受到挤压作用力的影响, 形成逆冲叠瓦扇构造, 后期受到走滑作用的影响, 产生数条走滑断层切割前期已经形成的逆冲断层, 剖面上表现为非典型花状构造, 在挤压和走滑的叠加作用下, 断层类型以逆断层为主。边界断层的倾角约为 $45^\circ \sim 60^\circ$, 底部与中心走滑断层连接, 向上可贯穿至砂层顶部, 左侧断距大于右侧断距, 边界逆断层所包围的区域整体呈现低隆起状态, 隆起高度可至 15 mm 且花状构造较为开阔 (图 8 剖面 19—22)。受局部塑性层厚度的影响, Exp.4 和 Exp.3 结果存在差异, Exp.3 剖面 (图 9) 显示, 走滑作用产生数条走滑断层切割前期已经形成的逆冲断层, 剖面上呈现负花状构造, 且断层数量较少, 断层除靠近中心走滑带位置外断距不明显, 花状构造较为狭窄, 影响区域较

小。Exp.3 和 Exp.4 结果显示, 受走滑作用改造后的构造结构复杂, 高陡断裂垂向贯穿多层砂体, 断层之间相互交织。

对比 4 组实验, 逆冲阶段均表现出相似的演化过程, 挤压作用下形成明显的冲起构造和叠瓦扇构造; 叠加走滑作用后, 走滑断层切割先存逆冲断层。由于走滑速率差异和局部塑性基底设置不同, 其平面演化和剖面演化特征表现出差异性。走滑速率越大发育断层数量越多, 断层断距更大, 花状构造更为复杂。在设置塑性层基底条件下, 塑性层越厚, 越容易形成断陷并且断层角度更低。

4 讨论

张家口-蓬莱断裂带是贯穿渤海湾盆地的深大

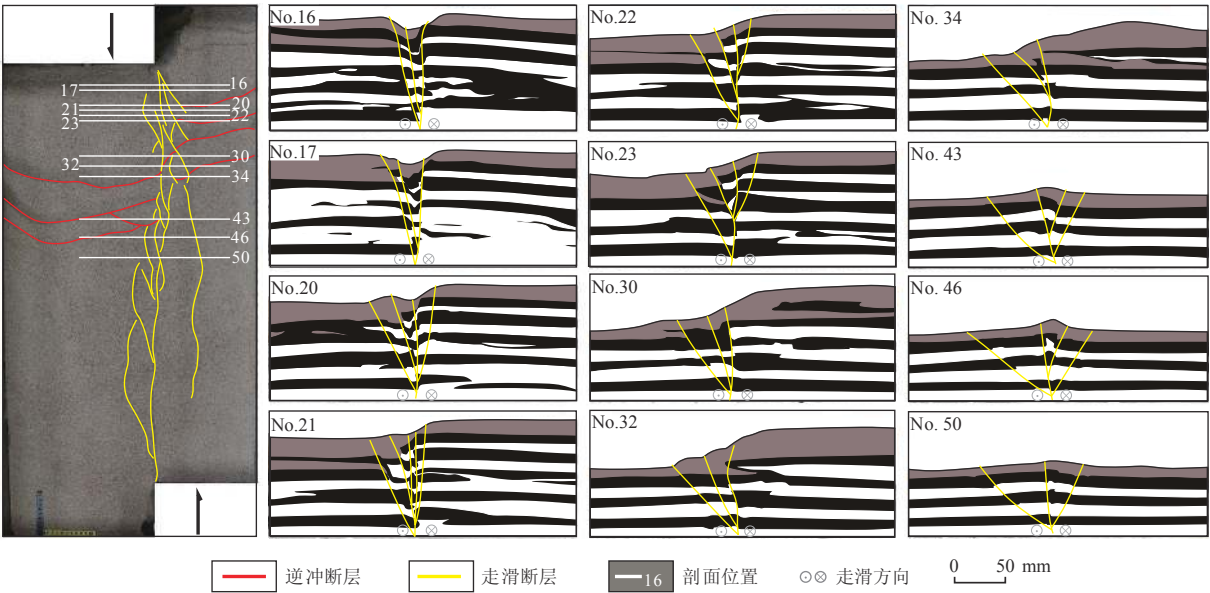


图 6 Exp.1 的平面图和剖面图
左: 平面断层视图标示 Exp.1 的剖面位置, 右: 模型剖面图。

Fig.6 Views of the Exp.1

Left: plain view showing the position of the Exp.1 profiles, Right: section views showing serial deformation and fault interpretation for 12 profiles of Exp.1.

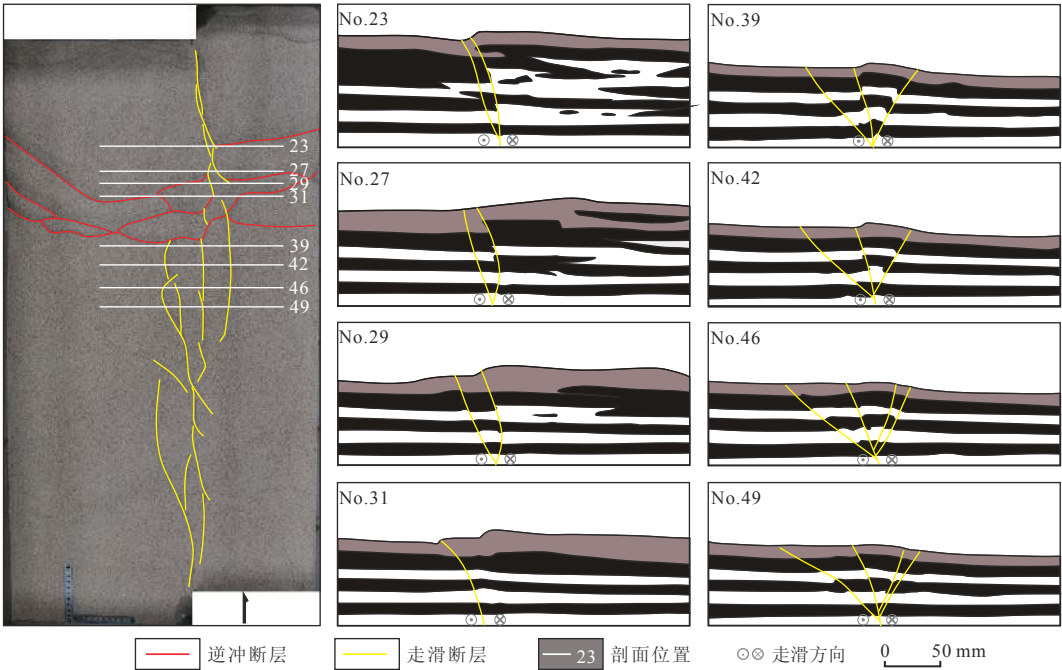


图 7 Exp.2 的平面图和剖面图
左图: 平面断层视图标示 Exp.2 的剖面位置, 右图: 模型剖面图。

Fig.7 Views of Exp.2

Left: plain view showing the position of the Exp.2 profiles, Right: section views showing serial deformation and fault interpretation for 8 profiles of Exp.2

断裂,对盆地的构造形成具有一定的控制作用,现今仍非常活跃。前人通过对新生代太平洋板块俯冲速率以及俯冲方向的研究^[42, 50-51, 70],发现张家口-蓬莱断裂带的演化与太平洋板块俯冲运动的变化相匹配^[42]。因此,太平洋板块的俯冲效应使得渤海

湾盆地受强烈剪切作用^[32-33, 39, 42],导致走滑运动开始。张家口-蓬莱断裂带渤海段横穿拗中坳陷沙垒田凸起东北部(图 10a),沙垒田凸起作为渤海海域西部新近系油气富集的区域^[71-74],目前已发现油气主要位于走滑断裂带内部或断裂带附近地区^[73]。

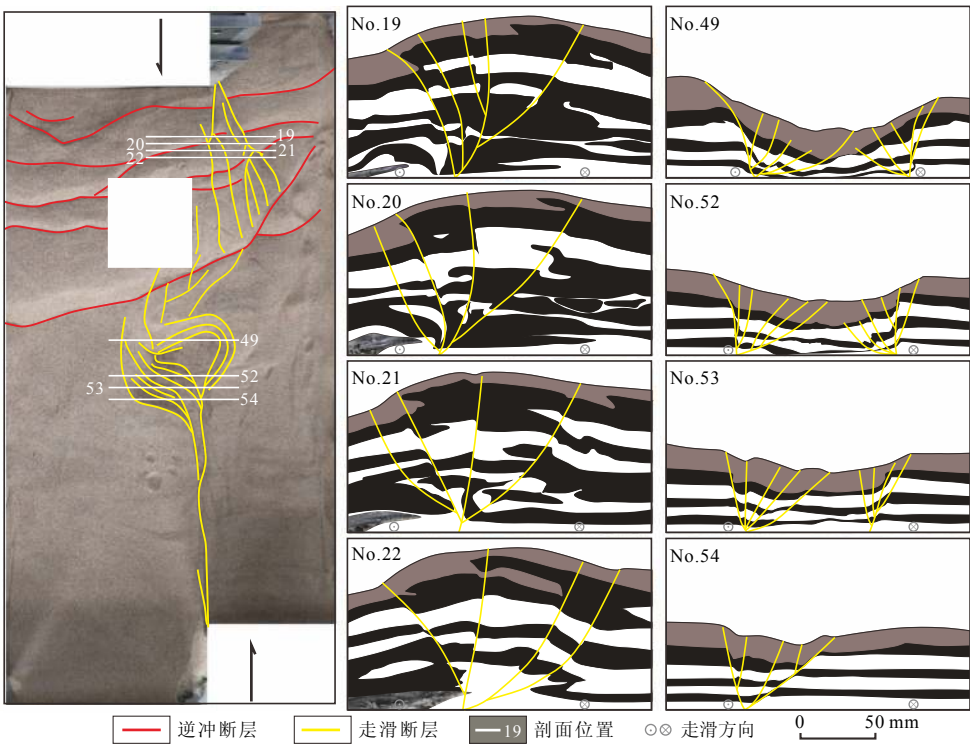


图 8 Exp.4 的平面图和剖面图
左图: 平面断层视图标示 Exp.4 的剖面位置, 右图: 模型剖面图。

Fig.8 Views of Exp.4

Left: plain view showing the position of the Exp.4 profiles, Right: section views showing serial deformation and fault interpretation for 8 profiles of Exp.4

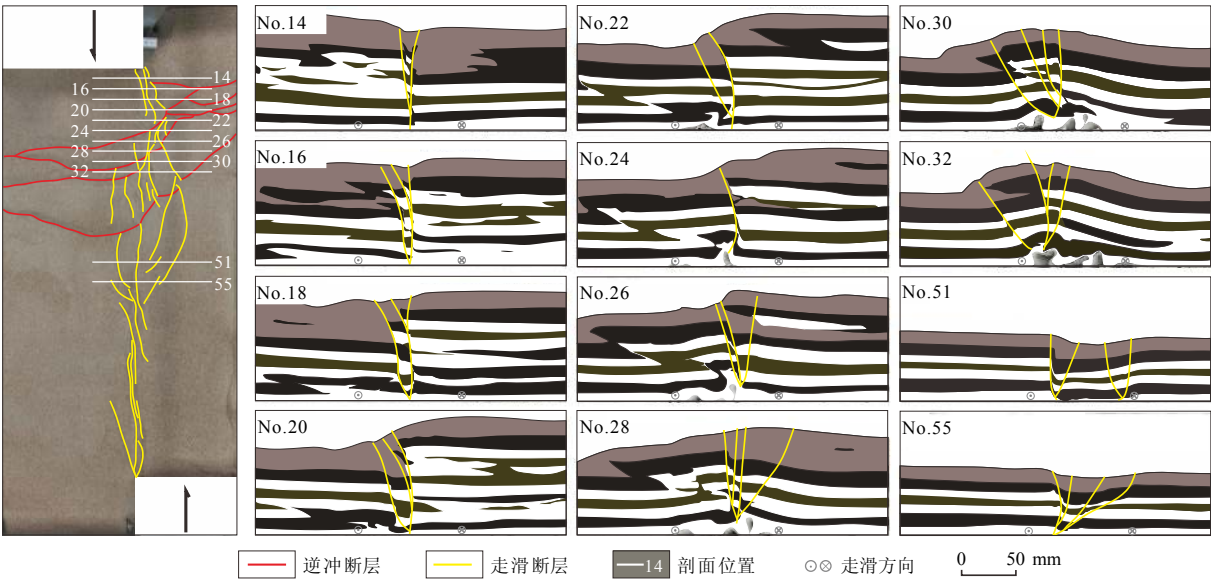


图 9 Exp.3 的平面图和剖面图
左图: 平面断层视图标示 Exp.3 的剖面位置, 右图: 模型剖面图。

Fig.9 Views of Exp.3

Left: plain view showing the position of the Exp.3 profiles, Right: section views showing serial deformation and fault interpretation for 12 profiles of Exp.3

作为渤海湾盆地的一个二级构造单元, 该地区同样经历了多期构造运动叠加(图 10a-c), 印支期北北东向强烈的挤压应力使环渤海中地区出现东西向或北

西西向南倾的一系列逆冲断层^[75]。这些断裂整体平行或近平行展布。尤其是在渤海中凹陷西部、西北部和西南部的潜山南缘(如石臼坨凸起和沙垒田凸

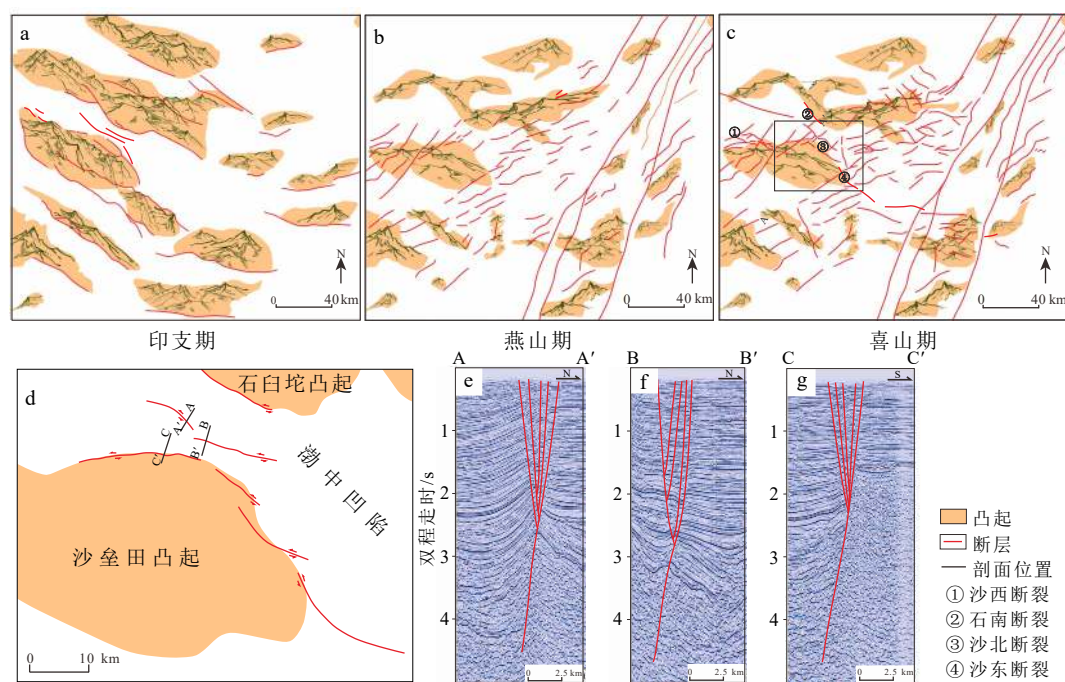


图 10 研究区平面演化模式图及剖面

a-c: 研究区平面演化模式图, 研究区位置见图 1; d: 渤海湾盆地渤中坳陷沙垒田凸起东北部的地震剖面位置; e-g: 地震剖面图显示了研究区域的走滑断层模式, 据文献 [42, 78] 修改。

Fig.10 Plain view of tectonic evolution of the study area

a-c: Plain view of tectonic evolution of the study area (study area in Fig.1); d: the location of the northeastern area of the Shaleitian Uplift in the Bohai Bay Basin, showing the location of the seismic profile; e-g: seismic profiles showing the strike-slip fault patterns of the study area (modified from references [42, 78]).

起的大型逆冲断裂)和潜山内部多发育规模较大的断裂体系且横向延伸较远。沙垒田凸起东北部印支期形成的高角度断层, 经过后期的一系列运动, 可能形成了张家口-蓬莱断裂带渤海段的雏形 [31-33]。在燕山早期, 扬子板块与华北板块碰撞挤压逐渐减弱, 太平洋板块俯冲效应开始显现 [50], 渤海地区遭受挤压增厚, 大量北北东向压扭性断裂和褶皱构造形成 [54]。燕山晚期, 受古太平洋板块北北西向持续挤压影响, 渤海地区整体处于隆升剥蚀状态 [76-77], 研究区处于挤压构造背景。喜山期以来张家口-蓬莱断裂带左旋走滑控制作用增强 [29, 33], 表现为张扭特征, 尤其是新构造运动时期左旋活动最为剧烈 [32]。该地区叠加走滑作用后, 使得原先的构造格局发生改造, 复杂的断裂系统使得岩层通道连通以及油气圈闭系统形成, 具备了良好的油气富集成藏条件。这使得沙垒田凸起成为渤海西部海域当前最重要的油气产区。本模型模拟自燕山期以来挤压、走滑两期运动叠加的构造演化过程, 将两底板间预设为前期形成的高角度锥形断层。实验第一阶段通过对砂体施加的挤压作用力使得地层冲起抬高, 实验第二阶段通过施加剪切应力模拟地块的走滑过

程。穿过逆冲构造的主走滑位移带上方出现断陷, 在这些断层交汇的地方表现出明显花状构造, 叠加走滑运动后使原来的逆冲结构更加复杂化。结合研究区的地震剖面图 (图 10d), 模拟结果 (图 6 剖面 21) 与渤海湾盆地渤中坳陷沙垒田凸起东北部地区张家口-蓬莱断裂带构造几何学特征有一定的相似性。我们认为该地区燕山期地层抬升后受张家口-蓬莱断裂带渤海段走滑影响, 后期的走滑断裂与前期的断裂交错切割, 改造了前期高角度前展式逆冲构造, 在走滑中心位置发育负花状构造且凹陷明显, 从其基底来看, 该地区并未出现大范围的隆起和断陷, 我们推测该区域具有相对均一性的基底。虽然该地区演化并没有受到基底差异的影响, 但通过模拟可以发现, 差异基底会改变原来的地貌特征, 构造变形更容易发生在塑性基底之上。此外该地区叠加走滑运动后使原来的逆冲结构更加复杂化, 逆冲改造型断裂有利于油气的垂向输导, 此类断裂两侧均可发育储层条件较好的油气田。后期经过剥蚀沉积作用削高填低以及一系列的构造演化最终成为潜山构造埋藏海底, 为其成为油气矿藏提供了有利的地质条件。

5 结论

断层组合形式不同会产生复杂的构造特征。在复杂的地质背景下,地壳在不同的动力学环境下会受到不同的应力作用形成千姿百态的构造形式。本文结合张家口-蓬莱断裂带渤海段构造演化过程,通过4组砂箱模拟实验研究不同走滑速率不同基底强度条件下,逆冲推覆构造受走滑作用改造的复合构造演化机制,得出结论如下:

(1)逆冲阶段,受挤压作用出现一系列的逆冲断层,冲起构造、叠瓦扇构造尤为明显。逆冲推覆构造的扩展方式为前展式,前期形成的逆冲断层角度较高,后期则为低角度断层呈现平行逆断层,根带复杂。

(2)走滑作用叠加改造阶段,走滑断层切割前期形成的逆冲断层,呈现左行拉伸并在其拉伸区形成断陷,从其剖面看,原逆冲断层被错断,有明显的负花状构造且沉降中心断层结构复杂。

(3)走滑速率差异会影响断层的展布,速率越大,所形成的走滑断层范围更大、数量更多、倾角更小、断距更大。局部弱化带会形成差异的地貌构造,可形成断陷且以正断层为主,塑性层越薄凹陷程度越浅,面积较小,并且断陷内断层数量较少,角度较高。

参考文献 (References)

- [1] Faill R T. A geologic history of the north-central Appalachians, part 3. The Alleghany Orogeny [J]. *American Journal of Science*, 1998, 298 (2): 131-179.
- [2] Mount V S. Structural style of the Appalachian Plateau fold belt, north-central Pennsylvania [J]. *Journal of Structural Geology*, 2014, 69: 284-303.
- [3] Barclay J E, Smith D G. Western Canada foreland basin oil and gas plays[M]//In Macqueen R W, Leckie D A. Foreland Basins and Fold Belts. American Association of Petroleum Geologists, 1992, 55: 81-105.
- [4] Roest W R, Srivastava S P. Kinematics of the plate boundaries between Eurasia, Iberia, and Africa in the North Atlantic from the Late Cretaceous to the present [J]. *Geology*, 1991, 19 (6): 613-616.
- [5] Anastasio D J, Teletzke A L, Kodama K P, et al. Geologic evolution of the Peña flexure, Southwestern Pyrenees mountain front, Spain [J]. *Journal of Structural Geology*, 2020, 131: 103969.
- [6] Velaj T, Davison I, Serjani A, et al. Thrust tectonics and the role of evaporites in the Ionian Zone of the Albanides [J]. *AAPG Bulletin*, 1999, 83 (9): 1408-1425.
- [7] Velaj T. New ideas on the tectonic of the Kurveleshi anticlinal belt in Albania, and the perspective for exploration in its subthrust [J]. *Petro-leum*, 2015, 1 (4): 269-288.
- [8] Jadoon I A K, Frisch W. Hinterland-vergent tectonic wedge below the Riwat Thrust, Himalayan foreland, Pakistan: Implications for hydrocarbon exploration [J]. *AAPG Bulletin*, 1997, 81 (3): 1320-1336.
- [9] Davis D M, Engelder T. The role of salt in fold-and-thrust belts [J]. *Tectonophysics*, 1985, 119 (1-4): 67-88.
- [10] 卢景美, 闵才政, 于圣杰, 等. 巴布亚盆地构造研究新认识及勘探意义 [J]. *中国海上油气*, 2022, 34 (3): 20-27. [LU Jingmei, MIN Caizheng, YU Shengjie, et al. New understanding and exploration significance of Papuan Basin structural research [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34 (3): 20-27.]
- [11] Beydoun Z R, Hughes Clarke M W, Stoneley R. Petroleum in the Zagros Basin: a late Tertiary foreland basin overprinted onto the outer edge of a vast hydrocarbon-rich Paleozoic-Mesozoic passive-margin shelf[M]//In Macqueen R W, Leckie D A. Foreland Basins and Fold Belts. American Association of Petroleum Geologists, 1992, 55, 309-339.
- [12] Sarkarinejad K, Ghanbarian M A. The Zagros hinterland fold-and-thrust belt in-sequence thrusting, Iran [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 85: 66-79.
- [13] Dunn J F, Hartshorn K G, Hartshorn P W. Structural styles and hydrocarbon potential of the sub-Andean thrust belt of southern Bolivia[M]//In Tankard A J, Suárez Soruco R, Welsink H J. Petroleum Basins of South America. American Association of Petroleum Geologists, 1995: 523-543.
- [14] 赵淑娟, 李三忠, 刘鑫, 等. 准噶尔盆地东缘构造: 阿尔泰与北天山造山带交接转换的陆内过程 [J]. *中国科学:地球科学*, 2014, 44 (10): 2130-2141. [ZHAO Shujuan, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Structures of the eastern Junggar Basin: intracontinental transition between the North Tianshan and the Altai Orogens [J]. *Scientia Sinica (Terrae)*, 2014, 44 (10): 2130-2141.]
- [15] 郑和荣, 胡宗全, 云露, 等. 中国海相克拉通盆地内部走滑断裂发育特征及控藏作用 [J]. *地学前缘*, 2022, 29 (6): 224-238. [ZHENG Herong, HU Zongquan, YUN Lu, et al. Strike-slip faults in marine cratonic basins in China: Development characteristics and controls on hydrocarbon accumulation [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29 (6): 224-238.]
- [16] Huang L, Zhang C L, Pu R H, et al. Tectonic evolution of the thrust-Nappe belt in the southwestern Ordos Basin (China): new constraints from exploration seismic data [J]. *Geotectonics*, 2020, 54 (2): 229-239.
- [17] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例 [J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45 (6): 1111-1126. [DENG Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: a case study of the Shunbei Area, Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45 (6): 1111-1126.]
- [18] Song Z H, Tang L J, Liu C. Variations of thick-skinned deformation along Tumuxiuke thrust in Bachu uplift of Tarim Basin, northwestern

- China [J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 144: 104277.
- [19] 李新琦, 李慧勇, 于海波, 等. 张家口—蓬莱断裂带渤海段断裂特征及其与油气差异成藏的关系[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(5): 16-22, 49. [LI Xinqi, LI Huiyong, YU Haibo, et al. Fault characteristics and its relationship with differential hydrocarbon accumulation of Zhangjiakou-Penglai Fault in Bohai region [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(5): 16-22, 49.]
- [20] 彭靖淞, 韦阿娟, 孙哲, 等. 张家口—蓬莱断裂带渤海沙垒田凸起东北段盆地再造及其对油气成藏的影响[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 200-211. [PENG Jingsong, WEI Ajuan, SUN Zhe, et al. Sinistral strike slip of the Zhangjiakou-Penglai Fault and its control on hydrocarbon accumulation in the northeast of Shaleitian Bulge, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 200-211.]
- [21] 徐长贵. 渤海走滑转换带及其对大中型油气田形成的控制作用[J]. *地球科学*, 2016, 41(9): 1548-1560. [XU Changgui. Strike-slip transfer zone and its control on formation of medium and large-sized oil-fields in Bohai Sea Area [J]. *Earth Science*, 2016, 41(9): 1548-1560.]
- [22] 董月霞, 汪泽成, 郑红菊, 等. 走滑断层作用对南堡凹陷油气成藏的控制[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(4): 424-430. [DONG Yuexia, WANG Zecheng, ZHENG Hongju, et al. Control of strike-slip faulting on reservoir formation of oil and gas in Nanpu Sag [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2008, 35(4): 424-430.]
- [23] 徐杰, 王若柏, 王春华, 等. 华北东南部介休-新乡-溧阳北西向新生地震构造带[J]. *地震地质*, 1997, 19(2): 125-134. [XU Jie, WANG Ruobai, WANG Chunhua, et al. Jiexiu Xinxiang Liyang northwest trending newly generated seismotectonic zone in the southeast area of North China [J]. *Seismology and Geology*, 1997, 19(2): 125-134.]
- [24] 朱德瑜, 王珊玲, 许桂林, 等. 河北省张家口断裂带的空间展布和第四纪活动特征[J]. *地壳构造与地壳应力文集*, 2000(13): 74-78. [ZHU Deyu, WANG Shanling, XU Geilin, et al. Spatial distribution and its quaternary activities of the Zhangjiakou Fault, Hebei Province [J]. *Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics*, 2000(13): 74-78.]
- [25] 赖晓玲, 张先康, 孙译. 张北地震区壳幔边界复杂性特征及其构造意义[J]. *地震学报*, 2006, 28(3): 230-237. [LAI Xiaoling, ZHANG Xiankang, SUN Yi. The complexity feature of crust-mantle boundary in Zhangbei seismic region and its tectonic implication [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2006, 28(3): 230-237.]
- [26] 尤惠川, 邵翠茹, 杨歧焱, 等. 张家口断裂发现第四纪晚期活动证据[J]. *震灾防御技术*, 2008, 3(4): 474-477. [YOU Huichuan, SHAO Cuiyu, YANG Qiyan, et al. Some active evidences in late Quaternary of Zhangjiakou Fault [J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2008, 3(4): 474-477.]
- [27] 冉勇康, 陈立春, 徐锡伟. 北京西北活动构造定量资料与未来强震地点的讨论[J]. *地震学报*, 2001, 23(5): 502-513. [RAN Yongkang, CHEN Lichun, XU Xiwei. Quantitative data about active tectonics and possible locations of strong earthquakes in the future in northwest Beijing [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2001, 23(5): 502-513.]
- [28] 李西双, 刘保华, 华清峰, 等. 张家口—蓬莱断裂带渤海段晚第四纪活动特征[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(3): 332-341. [LI Xishuang, LIU Baohua, HUA Qingfeng, et al. Characters of the Zhangjiakou-Penglai fault zone activity in the Bohai sea since late quaternary [J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(3): 332-341.]
- [29] 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 张家口—蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. *地震地质*, 1998, 20(2): 146-154. [XU Jie, SONG Changqing, CHU Quanzhi. Preliminary study on the seismotectonic characters of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone [J]. *Seismology and Geology*, 1998, 20(2): 146-154.]
- [30] 朱光, 徐佑德, 刘国生, 等. 郯庐断裂带中-南段走滑构造特征与变形规律[J]. *地质科学*, 2006, 41(2): 226-241, 255. [ZHU Guang, XU Youde, LIU Guosheng, et al. Structural and deformational characteristics of strike-slipings along the middle-southern sector of the Tan-Lu Fault Zone [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(2): 226-241, 255.]
- [31] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏[J]. *地学前缘*, 2010, 17(4): 64-89. [LI Sanzhong, SUO Yanhui, DAI Liming, et al. Development of the Bohai Bay Basin and destruction of the North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4): 64-89.]
- [32] 索艳慧, 李三忠, 刘鑫, 等. 中国东部NWW向活动断裂带构造特征: 以张家口—蓬莱断裂带为例[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 953-966. [SUO Yanhui, LI Sanzhong, LIU Xin, et al. Structural characteristics of NWW-trending active fault zones in East China: a case study of the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(3): 953-966.]
- [33] Wang G Z, Li S Z, Suo Y H, et al. Deep-shallow coupling response of the Cenozoic Bohai Bay Basin to plate interactions around the Eurasian Plate [J]. *Gondwana Research*, 2022, 102: 180-199.
- [34] 王志才, 邓起东, 晁洪太, 等. 山东半岛北部近海海域北西向蓬莱-威海断裂带的声波探测[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(4): 1092-1101. [WANG Zhicai, DENG Qidong, CHAO Hongtai, et al. Shallow-depth sonic reflection profiling studies on the active Penglai-Weihai fault zone offshore of the northern Shandong peninsula [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2006, 49(4): 1092-1101.]
- [35] Peng J S, Wei A J, Sun Z, et al. Sinistral strike slip of the Zhangjiakou-Penglai Fault and its control on hydrocarbon accumulation in the northeast of Shaleitian Bulge, Bohai Bay Basin, East China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(2): 215-226.
- [36] Fu Z X, Liu J, Liu G P. On the long-term seismic hazard analysis in the Zhangjiakou-Penglai seismotectonic zone, China [J]. *Tectonophysics*, 2004, 390(1-4): 75-83.
- [37] Dai L M, Li Q W, Li S Z, et al. Numerical modelling of stress fields and earthquakes jointly controlled by NE-and NW-trending fault zones in the Central North China Block [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 28-40.
- [38] Su S J, Li Y, Chen Z, et al. Geochemistry of geothermal fluids in the Zhangjiakou-Penglai Fault Zone, North China: implications for structural segmentation [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 230: 105218.
- [39] Guo L L, Li S Z, Suo Y H, et al. Experimental study and active tectonics on the Zhangjiakou-Penglai fault zone across North China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 114: 18-27.
- [40] 高战武, 徐杰, 宋长青, 等. 张家口—蓬莱断裂带的分段特征[J]. 华

- 北地震科学, 2001, 19(1): 35-42, 54. [GAO Zhanwu, XU Jie, SONG Changqing, et al. The segmental character of Zhangjiakou-Penglai Fault [J]. North China Earthquake Sciences, 2001, 19(1): 35-42, 54.]
- [41] 张先康, 杨玉春, 赵平, 等. 唐山滦县震区的三维地震透射研究: 中、上地壳速度层析成像[J]. 地球物理学报, 1994, 37(6): 759-766. [ZHANG Xiankang, YANG Yuchun, ZHAO Ping, et al. Three-dimensional seismic transmission experiment in the Luanxian earthquake region of North China: tomographic determination of the upper and middle crust structure [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(6): 759-766.]
- [42] Ma X, Liu J Y, Lin C S, et al. Cenozoic evolution of Zhangjiakou-Penglai Fault Zone in the western offshore Bohai Bay Basin: Evidence from 3D seismic data [J]. *Geological Journal*, 2021, 56(4): 2192-2211.
- [43] Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Mesozoic basins in eastern China and their bearing on the deconstruction of the North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 64-79.
- [44] Zhang Y, Dilek Y, Zhang F Q, et al. Structural architecture and tectonic evolution of the Cenozoic Zhanhua Sag along the Tan-Lu Fault Zone in the eastern North China: reconciliation of tectonic models on the origin of the Bohai Bay Basin [J]. *Tectonophysics*, 2020, 775: 228303.
- [45] Liang J T, Wang H L, Bai Y, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Bohai Bay Basin and its coupling relationship with Pacific Plate subduction [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2016, 127: 257-266.
- [46] Qi J F, Yang Q. Cenozoic structural deformation and dynamic processes of the Bohai Bay basin province, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(4): 757-771.
- [47] Liu L H, Hao T Y, Lü C C, et al. Crustal structure of Bohai Sea and adjacent area (North China) from two onshore-offshore wide-angle seismic survey lines [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 98: 457-469.
- [48] 宗国洪, 施央申, 王秉海, 等. 济阳盆地中生代构造特征与油气[J]. 地质论评, 1998, 44(3): 289-294. [ZONG Guohong, SHI Yangshen, WANG Binghai, et al. Mesozoic structures and their relations to hydrocarbon traps in the Jiyang Basin [J]. Geological Review, 1998, 44(3): 289-294.]
- [49] 李理, 钟大赉. 渤海湾盆地济阳坳陷碎屑锆石裂变迹年龄记录的构造抬升事件[J]. 岩石学报, 2018, 34(2): 483-494. [LI Li, ZHONG Dalai. Tectonic uplift recorded by detrital zircon fission track age in Jiyang depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2018, 34(2): 483-494.]
- [50] 周琦杰, 刘永江, 王德英, 等. 渤海湾中部中、新生代构造演化与潜山的形成[J]. 地学前缘, 2022, 29(5): 147-160. [ZHOU Qijie, LIU Yongjiang, WANG Deying, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic evolution and buried hill formation in central Bohai Bay [J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(5): 147-160.]
- [51] Northrup C J, Royden L H, Burchfiel B C. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its potential relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia [J]. *Geology*, 1995, 23(8): 719-722.
- [52] Liu S F, Gurnis M, Ma P F, et al. Reconstruction of northeast Asian deformation integrated with western Pacific plate subduction since 200 Ma [J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 175: 114-142.
- [53] Liu X, Zhao D P, Li S Z, et al. Age of the subducting Pacific slab beneath East Asia and its geodynamic implications [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, 464: 166-174.
- [54] 武子涵, 于海波, 张参, 等. 渤海湾盆地中部428构造带近S-N向走滑断裂的形成时期及其在中生代期间的调节转换作用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2023, 43(1): 71-81. [WU Zihan, YU Haibo, ZHANG Can, et al. Formation period of S-N strike-slip fault in the 428 tectonic belt in the central of Bohai Bay Basin and its adjustment and transformation in the Mesozoic [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2023, 43(1): 71-81.]
- [55] Li S Z, Zhao G C, Dai L M, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 80-93.
- [56] Naylor M A, Mandl G, Supesteijn C H K. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states [J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8(7): 737-752.
- [57] 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.
- [58] Dooley T P. Geometries and kinematics of strike-slip fault systems: insights from physical modelling and field studies[D]. Doctor Dissertation of Royal Holloway, University of London, 1994.
- [59] Marques F O, Nogueira C R. Normal fault inversion by orthogonal compression: sandbox experiments with weak faults [J]. *Journal of Structural Geology*, 2008, 30(6): 761-766.
- [60] Dooley T P, Schreurs G. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results [J]. *Tectonophysics*, 2012, 574-575: 1-71.
- [61] Panien M, Schreurs G, Pfiffner A. Mechanical behaviour of granular materials used in analogue modelling: insights from grain characterisation, ring-shear tests and analogue experiments [J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(9): 1710-1724.
- [62] Hubbert M K. Theory of scale models as applied to the study of geological structures [J]. *GSA Bulletin*, 1937, 48(10): 1459-1520.
- [63] McClay K R. Deformation mechanics in analogue models of extensional fault systems [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 1990, 54(1): 445-453.
- [64] 李艳友, 漆家福, 周赏. 走滑构造差异变形特征及其主控因素分析: 基于砂箱模拟实验[J]. 石油实验地质, 2017, 39(5): 711-715. [LI Yanyou, QI Jiafu, ZHOU Shang. Differential deformation and its main controls on strike-slip structures: evidence from sandbox experiments [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2017, 39(5): 711-715.]
- [65] 李伟, 平明明, 周东红, 等. 辽东湾坳陷新生代主干断裂走滑量的估算及其地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2018, 42(3): 445-454. [LI Wei, PING Mingming, ZHOU Donghong, et al. Estimation of the Cenozoic strike-slip displacement for major faults in the Liaodong bay depression and its geological significance [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2018, 42(3): 445-454.]
- [66] 黄飞鹏. 阿尔金断裂带构造地貌特征与中东段上新世以来的走滑速率[D]. 中国地震局地质研究所博士学位论文, 2022. [HUANG

- Feipeng. A study on tectonic geomorphology characteristics and strike-slip rate since Pliocene in the middle and eastern section of the Altyn Tagh fault zone[D]. Doctor Dissertation of Institute of Geology, China Earthquake Administrator, 2022.]
- [67] Zhou P, Goodson K E. Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation [J]. *Optical Engineering*, 2001, 40(8): 1613-1620.
- [68] Ma S P, Xu X H, Zhao Y H. The Geo-DSCM system and its application to the deformation measurement of rock materials[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41(Suppl 1): 292-297.
- [69] Dixon J M, Tirrul R. Centrifuge modelling of fold-thrust structures in a tripartite stratigraphic succession [J]. *Journal of Structural Geology*, 1991, 13(1): 3-20.
- [70] Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. Relative motions between oceanic and continental plates in the Pacific basin[M]//In Engebretson D C, Cox A, Gordon R G. *Relative Motions Between Oceanic and Continental Plates in the Pacific Basin*. Geological Society of America, 1985: 1-60.
- [71] 胡贺伟, 李慧勇, 肖述光, 等. 沙垒田凸起西段走滑断裂发育特征及其对油气的控制作用[J]. *海洋地质前沿*, 2022, 38(3): 36-44. [HU Hewei, LI Huiyong, XIAO Shuguang, et al. Characteristics of strike-slip faults on the western Shaleitian Uplift and their control over oil and gas accumulation [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2022, 38(3): 36-44.]
- [72] 石文龙, 张志强, 彭文绪, 等. 渤海西部沙垒田凸起东段构造演化特征与油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(2): 242-247. [SHI Wenlong, ZHANG Zhiqiang, PENG Wenxu, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the east part of Shaleitian Saitent, western Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(2): 242-247.]
- [73] 张正涛, 林畅松, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地沙垒田地区新近纪走滑断裂发育特征及其对油气富集的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 778-788. [ZHANG Zhengtao, LIN Changsong, LI Huiyong, et al. Characteristics of the Neogene strike-slip faults and their controls on hydrocarbon accumulation in Shaleitian uplift, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 778-788.]
- [74] 彭文绪, 张志强, 姜利群, 等. 渤海西部沙垒田凸起区走滑断层演化及其对油气的控制作用[J]. *石油学报*, 2012, 33(2): 204-212. [PENG Wenxu, ZHANG Zhiqiang, JIANG Liqun, et al. Evolution of strike-slip faults in the Shaleitian bulge of the western Bohai offshore and their control on hydrocarbons [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(2): 204-212.]
- [75] 李三忠, 刘鑫, 索艳慧, 等. 华北克拉通东部地块和大别-苏鲁造山带印支期褶皱-逆冲构造与动力学背景[J]. *岩石学报*, 2009, 25(9): 2031-2049. [LI Sanzhong, LIU Xin, SUO Yanhui, et al. Triassic folding and thrusting in the Eastern Block of the North China Craton and the Dabie-Sulu orogen and its geodynamics [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(9): 2031-2049.]
- [76] 索艳慧, 李三忠, 曹现志, 等. 中国东部中生代反转构造及其记录的大洋板块俯冲过程[J]. *地学前缘*, 2017, 24(4): 249-267. [SUO Yanhui, LIU Xin, CAO Xianzhi, et al. Mesozoic-Cenozoic inversion tectonics of East China and its implications for the subduction process of the oceanic plate [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24(4): 249-267.]
- [77] 王宇, 徐春强, 郭玲莉, 等. 渤海湾盆地石臼坨东428潜山构造成因解析: 华北克拉通破坏的深度揭示[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(1): 219-228. [WANG Yu, XU Chunqiang, GUO Lingli, et al. Structural analysis of Shijiutuo east 428 buried hill in Bohai bay basin: implications on destruction of the North China craton [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(1): 219-228.]
- [78] 叶涛, 牛成民, 王德英, 等. 渤海西南海域中生代构造演化、动力学机制及其对华北克拉通破坏的启示[J]. *地学前缘*, 2022, 29(5): 133-146. [YE Tao, NIU Chengmin, WANG Deying, et al. Mesozoic tectonic evolution of the southwestern Bohai Sea and its dynamic mechanism: Implications for the destruction of the North China Craton [J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(5): 133-146.]