

大地构造与成矿学

*Geotectonica et Metallogenia*

ISSN 1001-1552, CN 44-1595/P

## 《大地构造与成矿学》网络首发论文

题目： 基于先存构造的走滑断裂形成演化物理模拟研究——以准噶尔盆地玛湖凹陷为例

作者： 张佳楠，能源，付永红，邓勇，钟厚财，武小宁，岳纹

收稿日期： 2025-07-27

网络首发日期： 2026-04-14

引用格式： 张佳楠，能源，付永红，邓勇，钟厚财，武小宁，岳纹. 基于先存构造的走滑断裂形成演化物理模拟研究——以准噶尔盆地玛湖凹陷为例[J/OL]. 大地构造与成矿学. <https://link.cnki.net/urlid/44.1595.p.20260413.1357.004>



**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与《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。

# 基于先存构造的走滑断裂形成演化物理模拟研究 ——以准噶尔盆地玛湖凹陷为例

张佳楠<sup>1</sup>, 能源<sup>2\*</sup>, 付永红<sup>1</sup>, 邓勇<sup>3</sup>, 钟厚财<sup>3</sup>, 武小宁<sup>3</sup>, 岳纹<sup>3</sup>

(1. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京) 克拉玛依校区, 新疆 克拉玛依 834000; 3. 中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司, 河北 涿州 072750)

**摘要:** 先存构造对走滑断裂的形成和演化具有重要的控制作用。在克拉通盆地内, 走滑断裂往往与古隆起、凸起相伴生, 因此开展先存凸起控制下的走滑断裂构造物理模拟研究具有重要意义。本文依据相似性准则, 通过底板预置凸起, 设计了不同厚度及与剪切方向呈不同夹角的先存凸起模拟实验, 探究先存凸起控制下的走滑断裂形成演化规律。模拟结果显示: (1) 先存凸起影响走滑断裂的空间展布, 在平面上影响主位移带(PDZ)的发育特征。一系列雁列断层在凸起边缘形成, 后期在凸起上方演化为叠接隆起, 凸起后缘演化为叠接拉分; 纵向上发育花状构造, 断裂根部收敛于凸起边缘; (2) 不同厚度的先存凸起影响破裂发育程度、叠接区规模及主位移带(PDZ)贯通时间, 凸起厚度越大, 背斜隆起和拉分盆地越发育, PDZ贯通越早; (3) 与剪切方向呈不同夹角的先存凸起影响破裂发育样式、叠接区形态和规模。在先存凸起与剪切方向夹角为顺时针45°的实验中, 凸起上覆Y破裂与拉分盆地更发育; 在先存凸起与剪切方向夹角为逆时针45°的实验中, 背斜隆起和尾端辫状叠接构造更加发育。准噶尔盆地玛湖凹陷三叠纪发育NWW向走滑断裂体系, 在平面上呈左阶雁列式展布。与模拟结果对比显示: 玛湖凹陷走滑断裂构造样式受二叠系先存凸起控制, 其形成演化受达尔布特断裂活动及先存构造共同控制。

**关键词:** 先存构造; 走滑断裂; 构造物理模拟; 准噶尔盆地西北缘

中图分类号: P54 文献标志码: A

## 0 引言

走滑断裂(Strike-slip fault)又称走向滑动断裂, 是断裂两盘运动方向平行于断裂走向的一类断裂(Sylvester, 1988), 是一种常见的构造类型。走滑断裂常呈直线延伸, 甚至能穿过起伏很大的地形仍保持直线, 沿平面走向结构存在非均一性, 在发育过程中伴生复杂的构造样式, 如R、P破裂、褶皱、隆起等(图1), 具有“平面分段演化、垂向分层变形”的特征(韩俊等, 2021), 而断裂分段特性会对油气运聚、储层改造产生影响(Young et al., 2000; 何登发等, 2004; 王海学等, 2014)。从20世纪90年代开始, 油气勘探领域相关研究进一步推动了走滑断裂在理论研究和实际应用中的快速发展(贾承造等, 2021; 陈红汉, 2023)。准噶尔盆地西北缘发育大规模走滑断裂带, 蕴含着丰富的油气资源, 其中蕴含十亿吨级砂砾岩油藏的玛湖凹陷是最为富集的生烃凹陷。断裂体系是指在同一应力场下产生的断裂组合(张文佑和钟嘉猷, 1977), 在玛湖拗陷中部发育三叠系大侏罗沟NWW向雁列走滑断裂体系(图3a虚线框内), 西起达尔布特断裂, 东至达探1井周缘(图2a), 长度约80 km(卞保力等, 2019), 并与西北缘NE向克百断裂带大角度交切, 其下伏二叠系发育多组凸起构造(图3a)。

先存构造也称继承性构造。早在1888年, Suess提出晚期发育的褶皱会受到早期褶皱的影响而具有一定程度走向一致性的观点(Şengör et al., 2018)。Morley(1999)通过构造物理模拟实验将先存构造分为“透入型”和“间隔型”两种: 透入型先存构造表现为各向异性, 在变质岩组构中分布广泛, 显著影响区域断裂的方向; 间隔型构造指断层面或剪切带等孤立构造(Morley, 1999; 童亨茂等, 2009b)。前人研究表明, 断层几何特征、先存构造及转换

收稿日期: 2025-07-27; 改回日期: 2026-03-04

项目资助: 国家自然科学基金项目(42362026)和新疆维吾尔自治区重点研发项目(2024B01015-1)联合资助。

第一作者简介: 张佳楠(1998-), 男, 博士研究生, 构造地质学专业。E-mail: m17843127691@163.com

通信作者简介: 能源(1982-), 男, 教授, 主要从事构造地质学与油区构造解析研究。E-mail: nengyuan@foxmail.com

带的发育在盆地演化中起着重要的作用(王有功等, 2014; Roche et al., 2021)。在盆地尺度内, 早期构造活动下形成的断裂、大型剪切带、造山带以及地壳厚度差异都有可能形成先存构造。这些先存构造强度相对薄弱, 在应力背景转变下重新复活, 而断裂易沿着应力最容易释放的区域扩展(刘恒麟等, 2022)。先存构造的存在使得后期断裂构造样式和形成机制更加复杂。凸起(古隆起)是地质历史时期沉积盆地形成演化过程中形成的正向构造单元, 不仅记录了盆地演化与构造变形, 还是油气聚集的主要部位(何登发等, 2005; 邬光辉等, 2009), 可作为先存构造影响断裂形成演化和区域构造变形(王亮, 2021)。

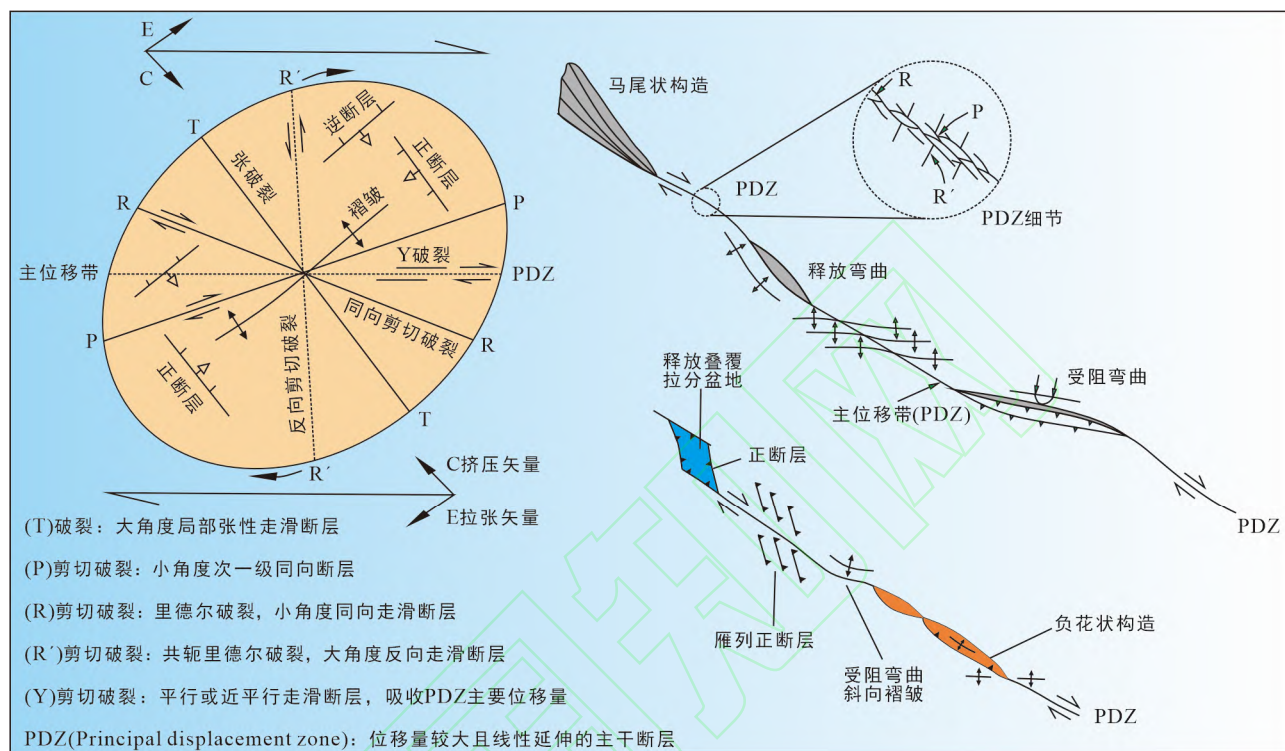


图1 走滑断裂应变椭圆及主位移带平面构造组合(据Biddle and Christie-Blick, 1985修改)

Fig.1 Strike-slip strain ellipse and planar structural combination of PDZ

前人对先存构造与裂谷构造系统间的关系进行了大量且深入的研究(Corti, 2004; 童亨茂等, 2009a; Phillips et al., 2016; Pongwapee et al., 2019; Wang et al., 2023; 张刚, 2023), 部分学者开始运用物理模拟技术研究先存薄弱带对走滑断裂分段性的影响(Dooley and Schreurs, 2012), 表明学术界开始重视走滑断裂与先存构造的关系。针对准噶尔盆地大侏罗沟走滑断裂, 有学者对形成机制进行了深入分析(吴孔友等, 2014; 卞保力等, 2019), 提出其是达尔布特走滑运动过程中产生的派生R'断裂的观点; 也有部分学者认为其形成是西北缘印支期斜向挤压的结果(杨庚等, 2009; 张晓杰等, 2017)。但关于先存构造如何影响走滑断裂形成演化及大侏罗沟走滑断裂与先存构造关系的研究论述较少, 因此开展该研究具有重要意义。

构造物理模拟实验技术能够直观反映地质体变形特征, 是模拟和评价地质体运动过程及动力机制的有效工具(Mou et al., 2023)。该技术始于19世纪早期, 并于20世纪30年代传入我国, 至今已发展200余年。从Cloos (1928)首次开展走滑砂箱物理模拟实验, 到Hubbert(1937)初步探索构造模拟实验结果的定量分析, 再到如今自动化程度较高的复杂物理模拟实验装置, 构造物理模拟技术已能够模拟褶皱、走滑断层、正断层、逆断层、岩石圈裂谷、碰撞挤压等更为复杂的构造地质现象; 且在离心机、CT扫描、3D建模、粒子图像测速(PIV)等高精尖技术的辅助下, 构造物理模拟实验技术已迈入数字化阶段。本文设计多组构造物理模拟实验, 在模型基底上预设不同厚度及与剪切方向呈不同夹角的先存凸起, 通过正演手段探究先存凸起构造形态差异对走滑断裂空间展布的影响, 并通过对比模拟结果与实际断裂形态, 探讨玛湖凹陷三叠系雁列式断裂体系的形成机制, 为准噶尔盆地西北缘油气勘探提供支撑。

# 1 区域地质概况

准噶尔盆地位于新疆维吾尔自治区北部,被天山、扎伊尔山-哈拉阿拉特山和阿尔泰山环绕。自晚古生代以来,经历海西、印支、燕山及喜山期多期复杂构造运动,根据隆坳格局可划分为中央坳陷、陆梁隆起、乌伦古坳陷、东部隆起、南缘冲断带、西部隆起6个一级构造单元和44个二级构造单元(王小军等, 2021),是发育于石炭系结晶基底上的大型叠合盆地,具有丰富的油气资源(商丰凯, 2020)。西北缘地区处于哈萨克板块和准噶尔地块的交汇处,紧邻西准噶尔造山带(陈石等, 2016)。晚石炭世-早二叠世,西北缘整体处于拉张背景,西准噶尔陆块不断演化,成盆构造形成,玛湖地区持续沉积形成巨厚二叠系地层。三叠纪-侏罗纪,盆地总体处于弱挤压状态,逆冲和走滑作用显著。晚白垩世,盆地大规模萎缩,西准噶尔地区抬升使得部分地层遭到剥蚀。新生代塔里木板块向天山俯冲,造成准噶尔南缘北天山大幅度隆起和南北麓挤压变形(梁媛媛, 2020)。

玛湖凹陷是准噶尔盆地中央坳陷西北部的次级构造单元,西侧紧邻克百断裂带与乌夏断裂带,南缘紧邻中拐凸起和达巴松凸起,东侧与夏盐凸起和英西凹陷毗邻。受克百和乌夏断裂带演化影响,三叠系之下地层从西北缘向凹陷内部倾斜,三叠系之上地层向凹陷内部缓倾,并向冲断带之上超覆(何登发等, 2018)。玛湖凹陷自下而上发育石炭系、二叠系佳木河组、风城组、夏子街组、下乌尔禾组和上乌尔禾组,三叠系百口泉组、克拉玛依组和白碱滩组,侏罗系八道湾组、三工河组、西山窑组和头屯河组,白垩系吐谷鲁群以及新生界,且各个构造层间存在多个不整合面(余兴等, 2021; 张磊等, 2024),其中石炭系与二叠系、二叠系与三叠系、三叠系与侏罗系、侏罗系与白垩系之间为角度不整合接触(陈静等, 2021)。

古地貌特征是揭示原型盆地特征的基础,根据计算顶底面深度差值可近似恢复该目的层在该沉积发育时期的相对古构造形态(李家强, 2008),前提是假设地层原始厚度在地质活动中不发生改变,上覆地层与古地貌间存在一种类似“镜像”的关系,基于计算的地层厚度差值,即推断和恢复古地貌形态(庞军刚等, 2013; 荆克尧等, 2021; 谢会文等, 2025)。如图2a所示,通过厚度图近似反映古构造形态,目的层夏子街组底面为下伏地层顶面,红色区域连续分布,地层厚度值小,表明下伏地层顶面为构造高部位,整体呈NE走向,其中东北、西南两处的椭圆形先存凸起沿NE走向发育,中部发育形状不规则的NWW走向凸起,其面积最大。

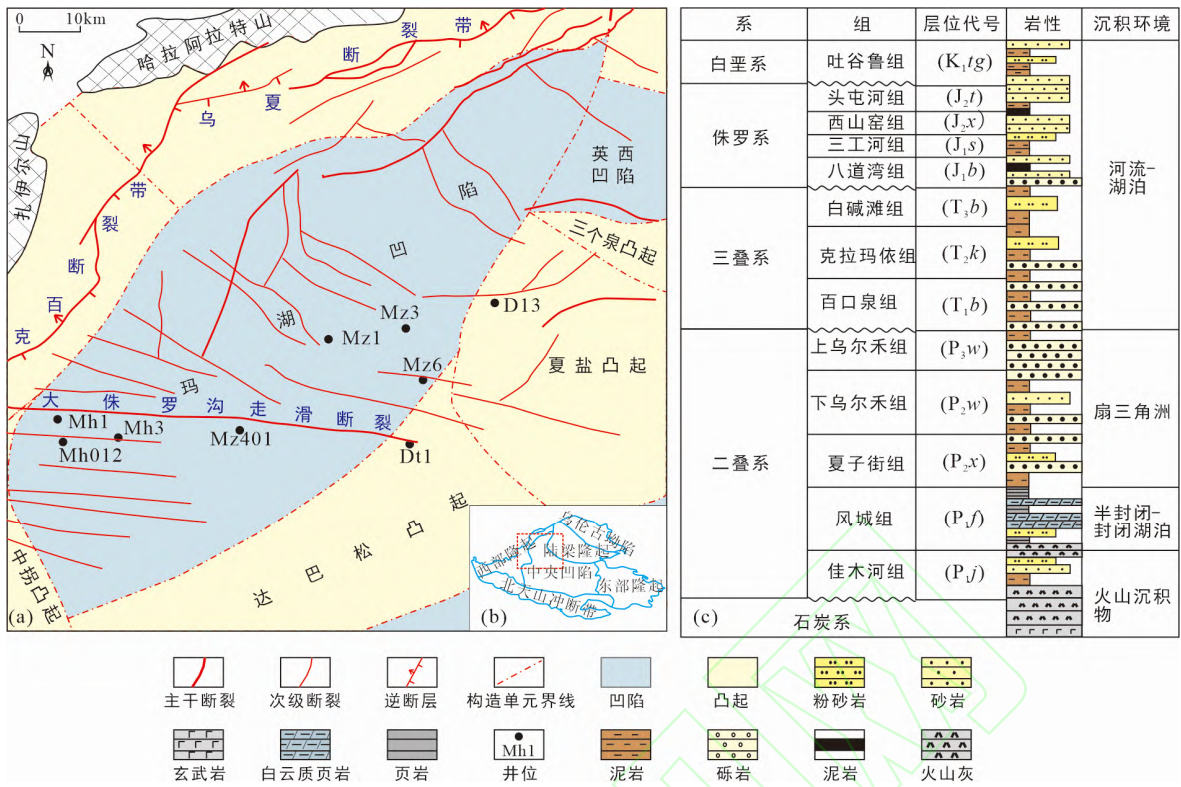
凸起区西邻西北缘中拐凸起,东接夏盐凸起,与三叠系NWW向大侏罗沟走滑断裂体系斜交。三叠系走滑断裂体系平面上呈左阶雁列式展布,主要发育在凸起间和凸起边缘。其中大侏罗沟走滑断裂延伸最远,全长约85 km,西与克百断裂带大角度交切,向东延伸至凸起区东缘,向北与各段次级断裂相互叠置,且延伸距离逐渐缩短。断裂体系在剖面上发育正花状和直立走滑构造样式(图3b),断裂根部收敛于先存凸起所处的二叠系风城组地层,纵向上凸起隆起范围上至二叠系夏子街组,下至石炭系。晚古生代发育逆冲断层,断穿石炭系地层向上至风城组顶界面。

## 2 物理模拟实验原理及模型设计

### 2.1 实验装置与材料

本文基于模型简化原则和相似性原则设计实验,选用干燥石英砂来模拟上地壳脆性岩层。基于库仑破坏准则,干燥石英砂具有较低的内聚力和内摩擦角(Tong et al., 2014),是模拟上地壳脆性地层的理想材料。目结土作为模拟先存凸起的实验材料,具有加水可反复使用、易干燥、可塑性强的特性,易于制作成不同大小和形状的凸起。砂箱主要由亚克力底板和挡板组成,底板对应实际自然界的刚性基底,施力电机从一侧对模型施加应力,作用在底板的在不同位置能够产生不同旋向的走滑应力场。

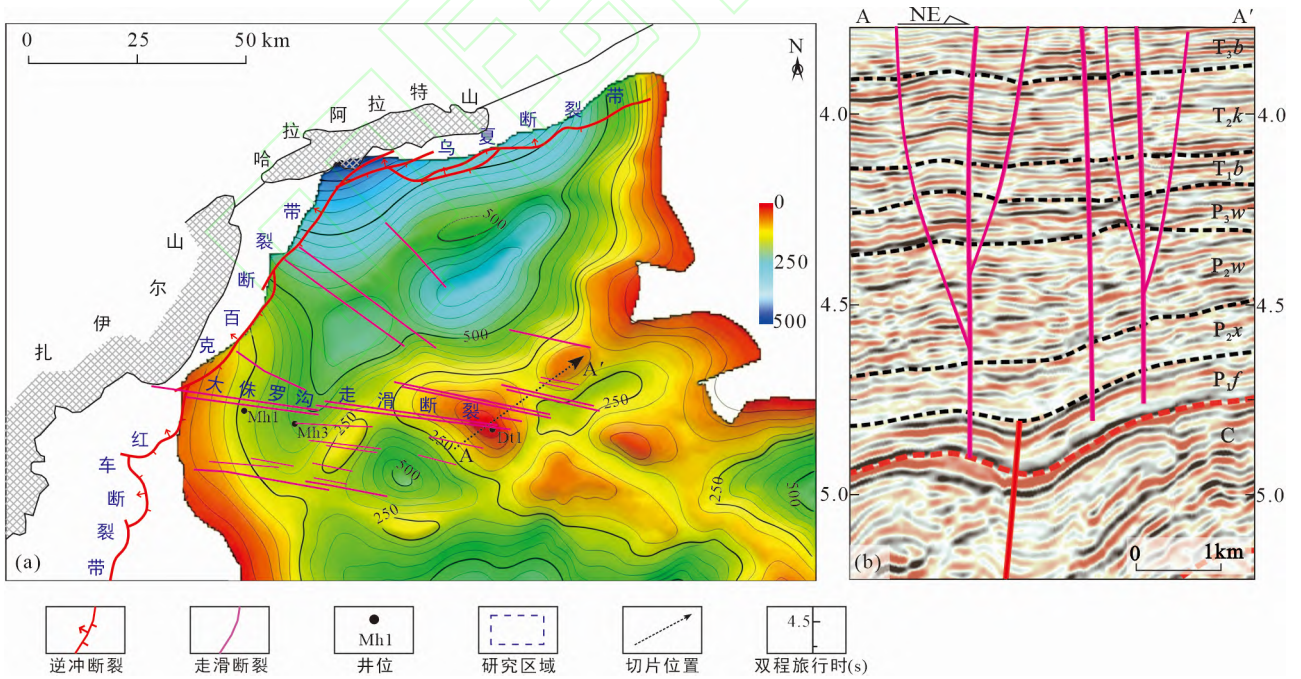
相似性原则是进行构造物理模拟实验的基本原则(Hubbert, 1937; Ramberg, 1981; Long et al., 2018)。实验设计需符合模型与地质原型在几何学、运动学和动力学上的相似,需要对模型大小、形状、应力状态等进行等比例缩放。模型和原型的应力比遵循 $\sigma_* \approx \rho_* g_* h_*$ ,其中 $\sigma_*$ 为实验模型与地质原型的应力比, $\rho_*$ 为模型与地质原型的密度比, $g_*$ 为实验模型与原型重力加速度比, $h_*$ 为模型与地质原型的厚度比。具体实验相似性参数如表1所示。



(a) 准噶尔盆地西北缘构造纲要图(据Feng et al., 2019修改); (b) 准噶尔盆地构造单元简图及研究区位置; (c) 玛湖凹陷地层综合柱状图(据Xia et al., 2020修改)。

图2 准噶尔盆地西北缘构造单元、断裂分布及地层综合柱状图

Fig.2 Tectonic units, fault distribution, and comprehensive histogram of the northwestern margin of the Junggar Basin



(a) 三叠系走滑断裂叠加二叠系地层厚度; (b) 对(a)中切片位置的三维地震资料进行构造解释。

图3 准噶尔盆地西北缘走滑断裂叠加地层厚度图与地震剖面构造解释

Fig.3 Strike-slip faults superimposed on the stratigraphic thickness map and structural interpretation of the seismic profile

表1 实验相似性参数

Table 1 Experimental similarity parameters

参数	单位	地质原型(n)	实验模型(m)	比例因子
厚度(h)	m	$h_n \approx 500$	$h_m \approx 0.04$	$h^* = h_m/h_n = 8 \times 10^{-5}$
地层密度( $\rho$ )	$kg/m^3$	$\rho_n \approx 2400$	$\rho_m \approx 1350$	$\rho^* = \rho_m/\rho_n \approx 0.65$
重力加速度(g)	$m/s^2$	$g_n \approx 9.8$	$g_m \approx 9.8$	$g^* = g_m/g_n = 1.0$
垂向应力( $\sigma$ )	Pa	$\sigma_n = \rho_n g_n h_n$	$\sigma_m = \rho_m g_m h_m$	$\sigma^* = \rho^* g^* h^* = 5.2 \times 10^{-5}$
黏聚强度(C)	Pa	$c_n$	$c_m$	$c^* = \sigma^* = 5.2 \times 10^{-5}$

注: 地质原型地层密度数据(据豆方鹏等, 2024)。

## 2.2 实验设计

本文所述实验基于中国石油大学(北京)克拉玛依校区构造实验室砂箱模拟实验台。实验模型尺寸为60 cm × 50 cm × 4 cm, 模型厚度4 cm模拟夏子街组地层厚度约500 m; 基底由两块亚克力底板组成, 模拟自然界刚性基底, 两块底板之间间隙模拟基底断层; 线性基底断层和水平方向应力施加能够模拟纯走滑应力场, 应力统一施加在上方推板, 固定下方推板以模拟晚古生代以来西北缘发生的右旋走滑(朱明等, 2021; Zhu et al., 2023)。模型上下两侧为透明玻璃挡板, 左侧放置步进电机, 电机由连接电脑控制, 运动速率精度0.001 mm/s, 实验设定运行速率为0.005 mm/s, 走滑位移量4.20 cm, 右侧为开放边界。模型基底底板拼贴处放置目结土模型, 目结土模型为半球状, 上覆铺设总计4 cm厚的白色干燥石英砂, 期间每隔一定厚度铺设一层极薄的彩色石英砂, 以便观察模型纵向切片变形特征; 砂体模型上表面铺设一层极薄的彩色石英砂, 便于正上方的相机记录平面变形过程。

为探究先存凸起与走滑断裂复杂平面样式的关系, 本实验通过改变目结土厚度、走向等参数模拟不同先存凸起状态, 共设计4组实验(图4), 其余参数条件不变。实验1、实验2旨在探究不同先存凸起厚度对走滑断裂的影响; 实验3、实验4旨在探究与剪切方向呈不同夹角的先存凸起对走滑断裂空间样式的影响, 其中凸起厚度等其余实验参数均与实验2相同。

## 3 实验结果

### 3.1 厚度对比实验结果

实验1为凸起厚度1.50 cm组(图5a)。首先, 走滑位移量为0.75 cm时, 在凸起上方发育R破裂。走滑位移量达到1.50 cm, 凸起左右两侧持续发育R破裂, 凸起左侧R破裂之间的间隔较右侧R破裂间隔更大, 与基底断层所成角度更陡。上覆地形出现轻微隆起, 发育近水平走向的Y破裂。凸起右侧R破裂相互叠接, 接近贯通。走滑位移量为2.85 cm时, 凸起上覆地层持续上拱形成背斜隆起。凸起后缘两条R破裂间地层下掉, 形成近菱形形态的离散型叠接区。凸起上方的Y破裂与凸起前缘的R破裂连接, 贯通凸起上覆地层, 并进一步发育至凸起后缘拉分盆地。挤压端和释放端两组R破裂发生逆时针旋转, 与基底断层的夹角逐渐减小。随着走滑位移量达到4.20 cm, 背斜隆起规模和拉分下切幅度进一步扩大, Y破裂连接凸起前缘两组R破裂和凸起后缘的拉分盆地边缘断裂, 并与尾端已贯通的R破裂连接, 形成贯穿背斜隆起的PDZ。最终呈现出雁列式次级断裂伴生背斜隆起与拉分盆地的平面构造形态。

实验2为凸起厚度2.0 cm组(图5b)。第一阶段走滑位移量为0.75 cm, 首先在先存凸起上方和远离板缘处产生R破裂, 与实验1初始过程一致。步进电机继续推进, 第二阶段走滑位移量为1.50 cm, 在凸起前缘持续发育R剪切破裂, 上方R剪切破裂间形成背斜隆起, 隆起上发育Y破裂。凸起后缘地层开始沉降, 沉降区右边界被一条低角度R破裂围限, 该低角度R破裂向右延伸, 与基底断裂夹角逐渐减小, 并连接第一阶段形成的R破裂。第三阶段走滑位移量为2.85 cm, 施力位置处两条R破裂相连, 背斜隆起上方Y破裂向左右两侧持续发育。凸起后缘地层沉降深度加剧, 低角度R破裂持续发育并贯穿至断裂尾端。第四阶段走滑位移量达到4.20 cm, 背斜隆起和拉分沉降规

模达到最大, 形成纺锤形拉分盆地。凸起正上方R破裂顺时针旋转, 与基底断裂夹角增大, 成为拉分盆地左侧边界。凸起后缘沿基底断裂发育Y破裂, 与拉分盆地右侧边界的低角度R破裂连接, 凸起上方Y破裂、前缘R破裂以及凸起后缘拉分盆地边界断裂相互连接, 形成贯穿整个模型的PDZ。

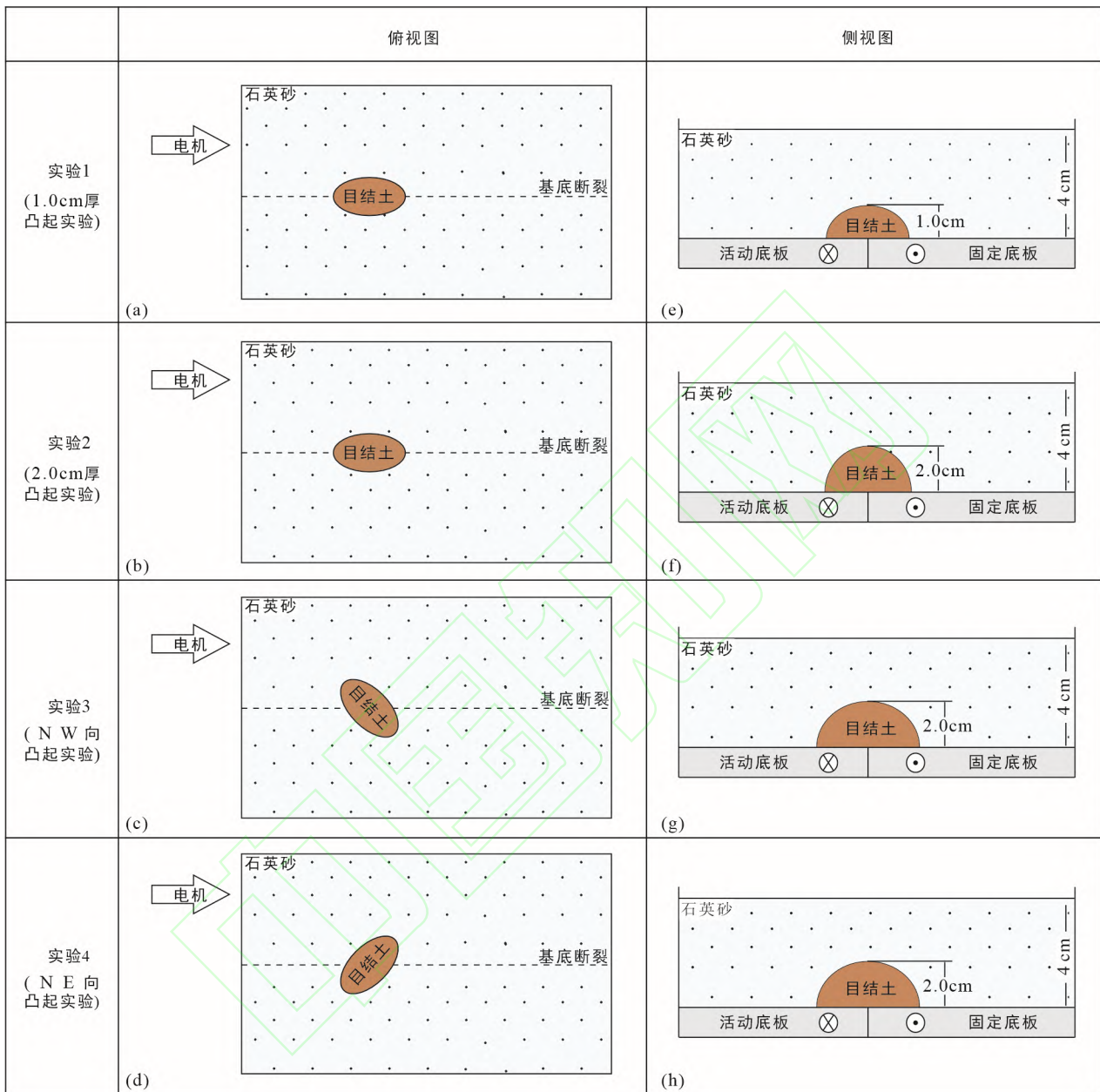


图4 物理模拟实验设计方案  
Fig.4 Design of the physical simulation experiment model

### 3.2 凸起走向对比实验结果

实验3为凸起与剪切方向夹角顺时针45°组(图6a)。第一阶段走滑位移量0.75 cm, 最先在凸起后缘产生近平行的两组R破裂,R破裂间发生地层下掉。第二阶段走滑位移量1.50 cm, 凸起正上方背斜隆起逐渐形成, 施力端发育两条低角度R破裂, 凸起后缘次级断裂持续发育, 形成几条活动较弱的R破裂, 拉分区域持续下切。走滑第一阶段形成的两组R破裂中, 凸起边缘R破裂向NW延伸, 另一条沿基底断裂向右延伸, 传递至尾端形成两条R破裂。走滑位移量达2.85 cm时, 凸起上方形成多条Y破裂, 未断穿背斜隆起, Y破裂延伸至凸起后缘拉分区。凸起前缘近施力端低角度R破裂相互连接, 并向凸起下边缘延伸。拉分区不再下切, 开始向两侧拓宽, 拉分区右边界断裂与

R破裂相互连接并贯通至最右侧板缘，与第二阶段发育的R破裂旋转连接形成辫状叠接区。走滑位移量达4.20 cm时，凸起上方Y破裂连接两侧断裂并贯通背斜隆起，形成PDZ。近施力端R破裂逆时针旋转，与基底断裂夹角逐渐变小并近于水平；靠近凸起下边缘处与基底断裂夹角未变。凸起后缘下掉区域各边界断裂发育完全，菱形拉分盆地完全形成。

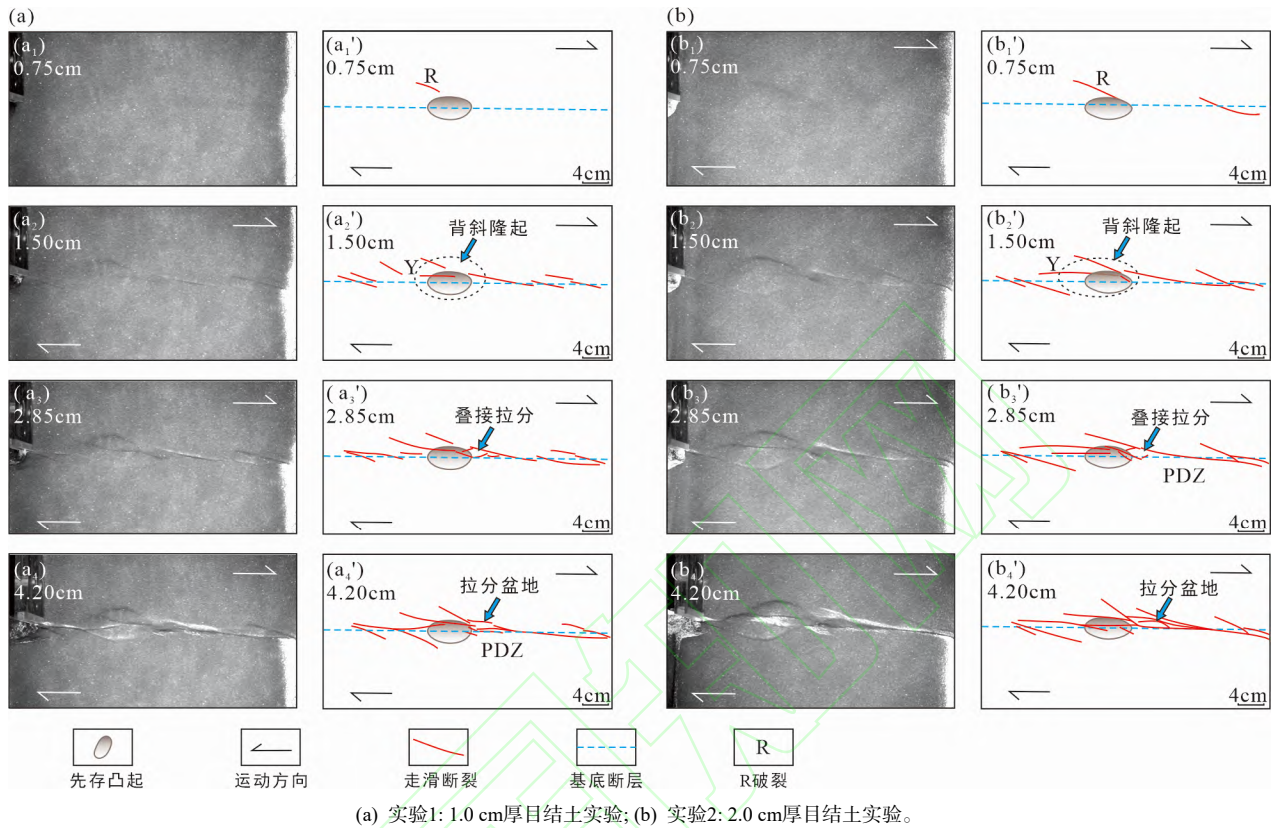


图5 不同厚度先存凸起实验过程及构造解释

Fig.5 Experimental process of pre-existing uplifts with different thicknesses and structural interpretation

实验4为凸起与剪切方向夹角逆时针45°组(图6b)。第一阶段走滑位移量为0.75 cm，在凸起后缘和板缘产生两条收敛至基底断层的R破裂；走滑位移量增加到1.50 cm时，在凸起两侧发育一系列雁列式R破裂，凸起上覆发育背斜隆起，凸起后缘叠接区下掉。走滑位移量达到2.85 cm时，在凸起前缘，发育的Y破裂贯穿背斜隆起并与前缘低角度R破裂连接，形成PDZ。凸起后缘形成菱形拉分盆地。拉分盆地右侧边界破裂与尾端R破裂旋转相互连接，形成辫状叠接区。走滑位移量达到4.28 cm时，背斜隆起进一步发育，凸起后缘拉分盆地无明显变化，辫状叠接区部分被PDZ贯穿破坏。

实验4中NE向放置目结土，实验结果与玛湖凹陷NE向先存凸起一致性较高，因此对实验4模型浇水固结，沿NE向切片对断裂剖面进行分析(切片位置如图6b<sub>4</sub>)。实验剖面如图7所示，红线为断裂解释。可见纵向上走滑断裂以发育正花状构造为主，地层被挤压向上隆起，两侧单条断裂线性延伸，花状构造及两侧单条断裂根部收敛于凸起之上，向上部地层散开。与实际地震剖面对比(图3b)，模拟结果相似程度较高，均发育正花状和直立走滑构造样式。

通过对每组实验不同变形阶段的次级断裂走向进行统计，进一步揭示先存凸起存在下的走滑断裂变形机制；对于单条次级断裂，当其走向发生变化时，统计为多条次级断裂(图8)。在不同凸起厚度实验中(图9)，实验1和实验2皆发育NW向次级断裂。在四个走滑位移阶段，两组实验次级断裂发育数量均呈不断上升趋势。不同的是，实验1中断裂走向与基底断裂夹角为0°~30°，实验2中断裂走向与基底断裂夹角为0°~40°；其中在第二阶段到第四阶段，实验2发育更大角度的次级断裂，与基底断裂的夹角为30°~40°。从走滑位移阶段一到阶段二，实验2的次

级断裂数量大于实验1; 但到了阶段三, 实验2的次级断裂数量增长放缓, 断裂总数量小于实验1并持续至实验结束。

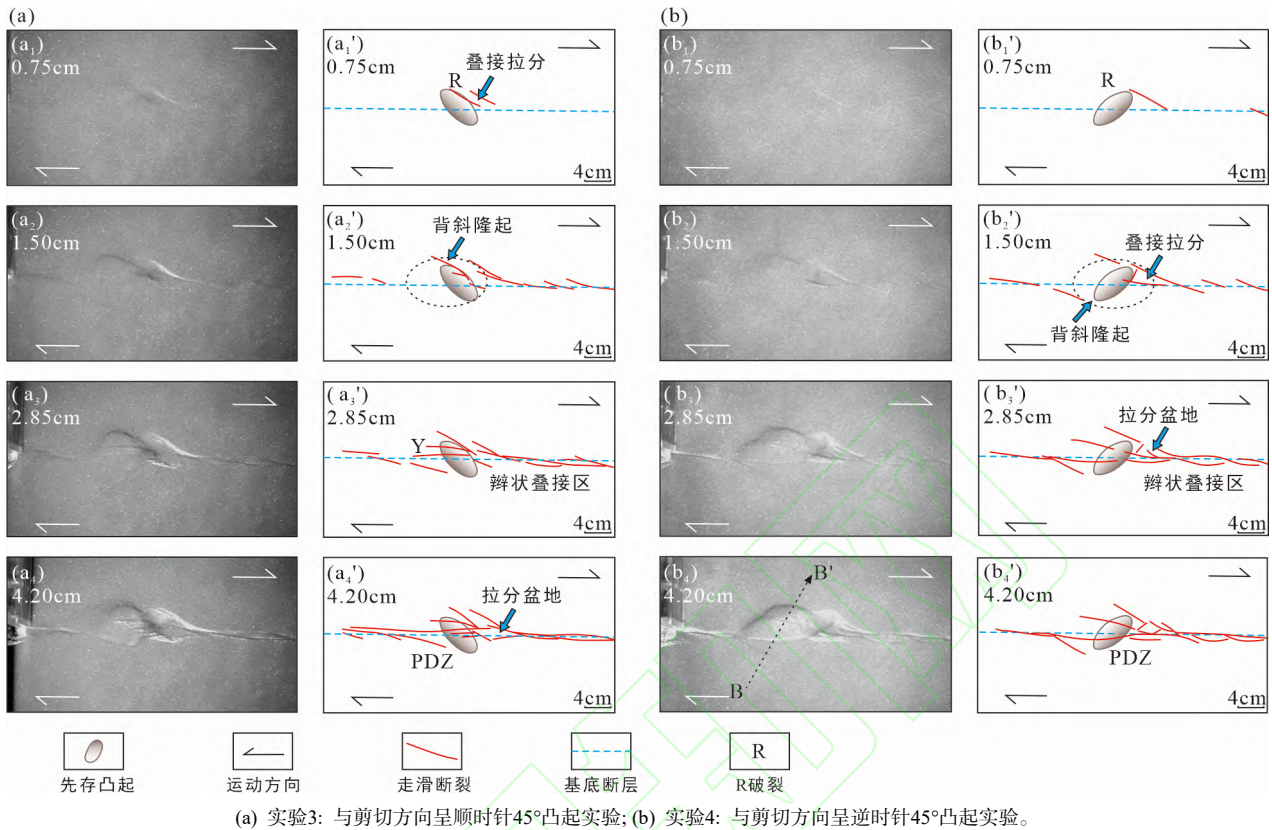


图6 不同走向先存凸起实验过程及构造解释

Fig.6 Experimental process of pre-existing uplifts with different strikes and structural interpretation

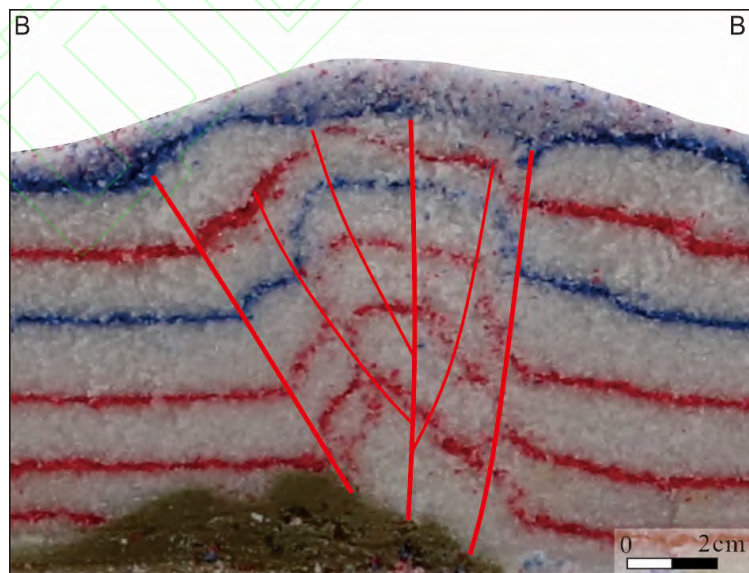


图7 实验4模型切片图(切片位置见图5b4)

Fig.7 Model section of Experiment 4

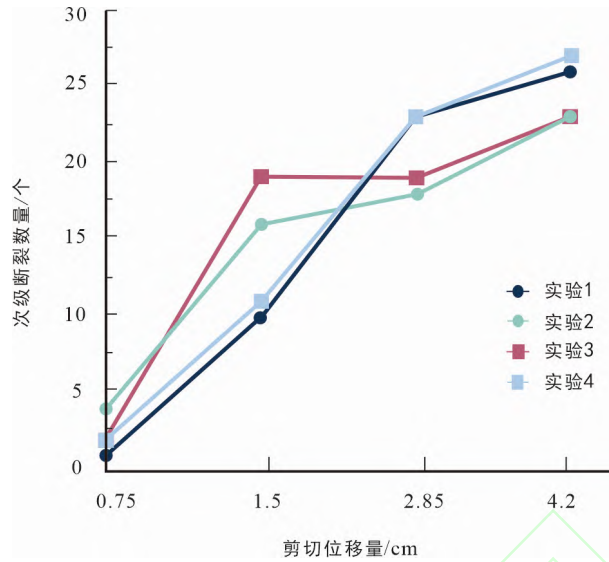


图8 不同走滑位移阶段的断裂数量

Fig.8 Number of strike-slip faults at different displacement stages

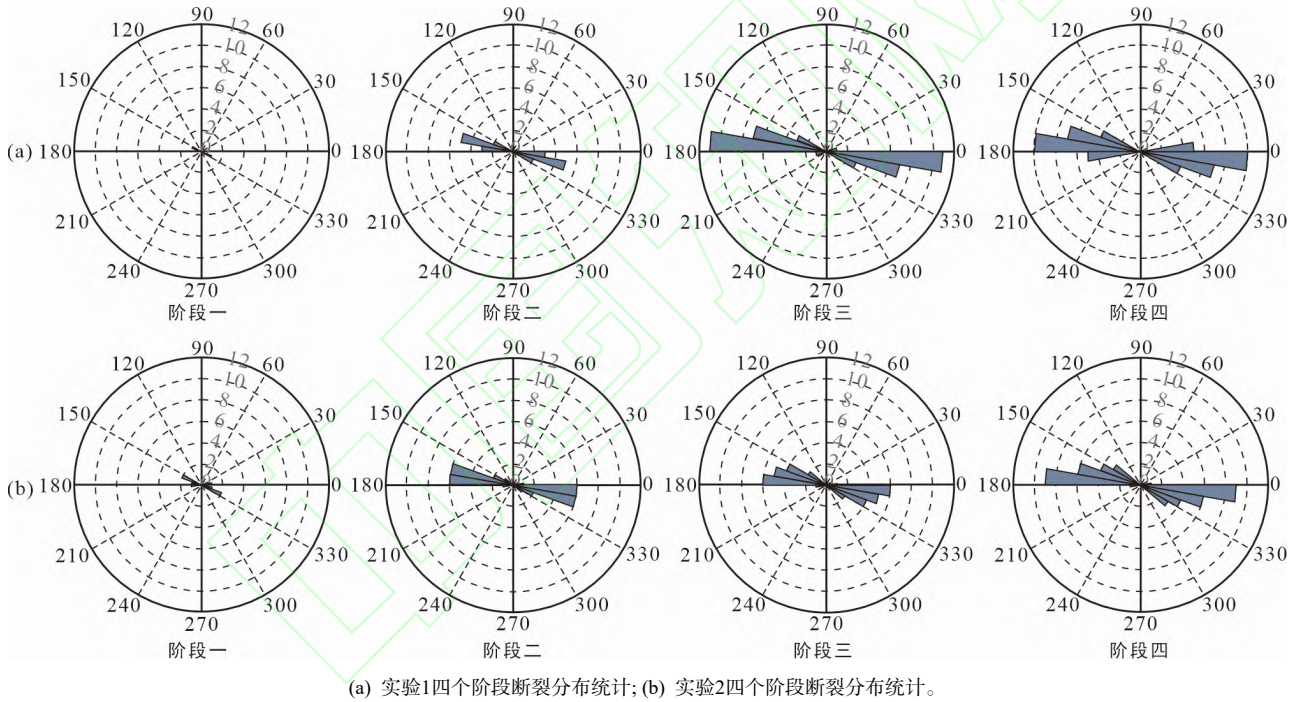
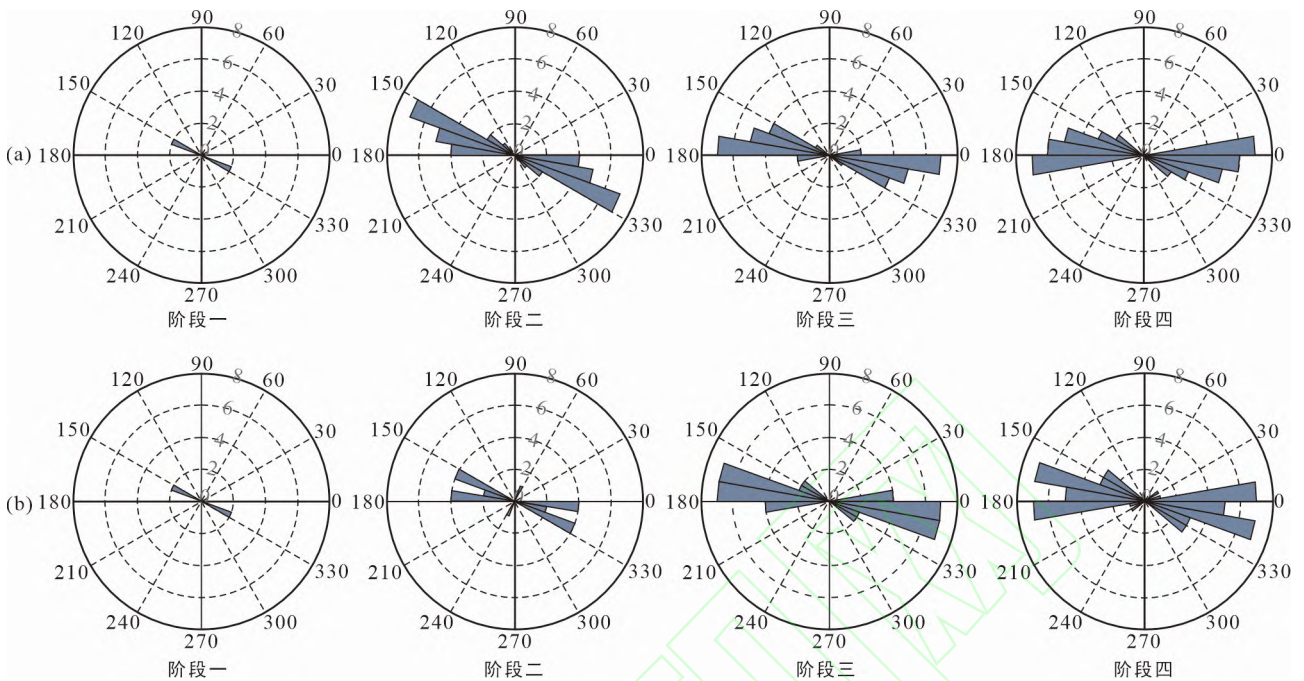


图9 凸起厚度实验断裂分布玫瑰花图

Fig.9 Rose diagrams of fault distribution in uplift thickness experiments

在与剪切方向呈不同夹角的实验中(图10), 实验3与实验4均发育NW和NE向次级断裂, 并在四个阶段内持续发育。在走滑位移前期的一、二阶段, 两组实验以NW向R破裂发育为主。实验4在第二阶段出现沿凸起后缘发育的高角度NE向次级断裂, 其数量少于实验3。从第三阶段开始, 实验3和实验4中NWW向和NEE向次级断裂持续发育, 实验4次级断裂总数量超过实验3; 实验4中NEE向走滑断裂与基底断裂夹角为 $0\sim 10^\circ$ , 其中大量Y破裂发育并贯通, 与基底断裂的夹角为 $0\sim 5^\circ$ , 近于平行; 同时, 实验4的高角度NE向断裂发生顺时针旋转, 与先存凸起走向近乎平行。第四阶段, 两组实验次级断裂数量持续增长(图9), 实验4发育的次级断裂总数量继续高于实验3; NWW走向次级断裂数量无明显变化, 增长主要体现为NEE向次级断裂数量的增加; 但与基底断裂夹角为 $0\sim 10^\circ$

的NWW走向断裂数量较第三阶段减少，部分断裂尾端在发育过程中逆时针旋转从而改变走向；不同的是，实验4中转换为NEE走向的Y断裂更多。凸起后缘的高角度NE向断裂持续顺时针旋转。



(a) 实验3四个阶段断裂分布统计; (b) 实验4四个阶段断裂分布统计。

图10 凸起走向及实验断裂分布玫瑰花图

Fig.10 Rose diagrams of fault distribution from strike-slip experiments

## 4 讨论

将经典里德尔走滑实验(图11)作为无凸起对照组，与预置先存凸起的实验1或实验2进行对比，可以发现两者初始阶段走滑形成过程相似，均发育R剪切破裂。但是在发育过程中，先存凸起作用显现，平面上具有明显的分段特征。R、Y等次级破裂与剪切方向的夹角、间隔、发育程度等在凸起前、后缘差异明显，且地层受扰动产生起伏，在凸起前缘形成背斜隆起，凸起后缘地层拉分沉降。因此可知，先存凸起的存在对走滑断裂的形成和演化具有控制作用。

通过对不同凸起厚度和凸起走向差异的四组实验，分析先存凸起对走滑断裂的具体影响。在两组厚度对比实验中，达到相同的走滑位移量时，凸起上方和远离施力位置均发育R破裂，整个走滑断裂形成和演化过程相似，均形成背斜隆起和拉分盆地；凸起后缘R破裂较前缘更发育，贯通较早。实验2中凸起厚度较大，破裂发育程度更高，背斜隆起、纺锤形拉分盆地及PDZ的形成时间相较于实验1更早，隆起和沉降幅度相较于实验1更大。先存凸起厚度实验结果表明，厚度大的凸起其上覆盖层更薄，走滑断裂从根部形成并发育至地表所需时间更短，处于应力薄弱区的PDZ形成也随之更早。实验1和实验2在走滑位移前两阶段与后两阶段的断裂数量增长速率存在差异：前期实验1断裂数量少于实验2，表明实验1前期走滑发育程度低于实验2。第三至第四阶段，实验1的次级断裂数量超过实验2，其中发育在凸起前缘和后缘的Y断裂增长速率变大、数量增多，表明在第二阶段断裂发育中期，实验2已接近成熟状态；第三阶段Y断裂和部分次级断裂相互连接形成PDZ，断裂走向、规模趋于稳定，次级断裂数量少于实验1。第四阶段叠接区形态发育更加完整，拉分盆地下切更深，而实验1中走滑断裂直到第四阶段PDZ才连接贯通。

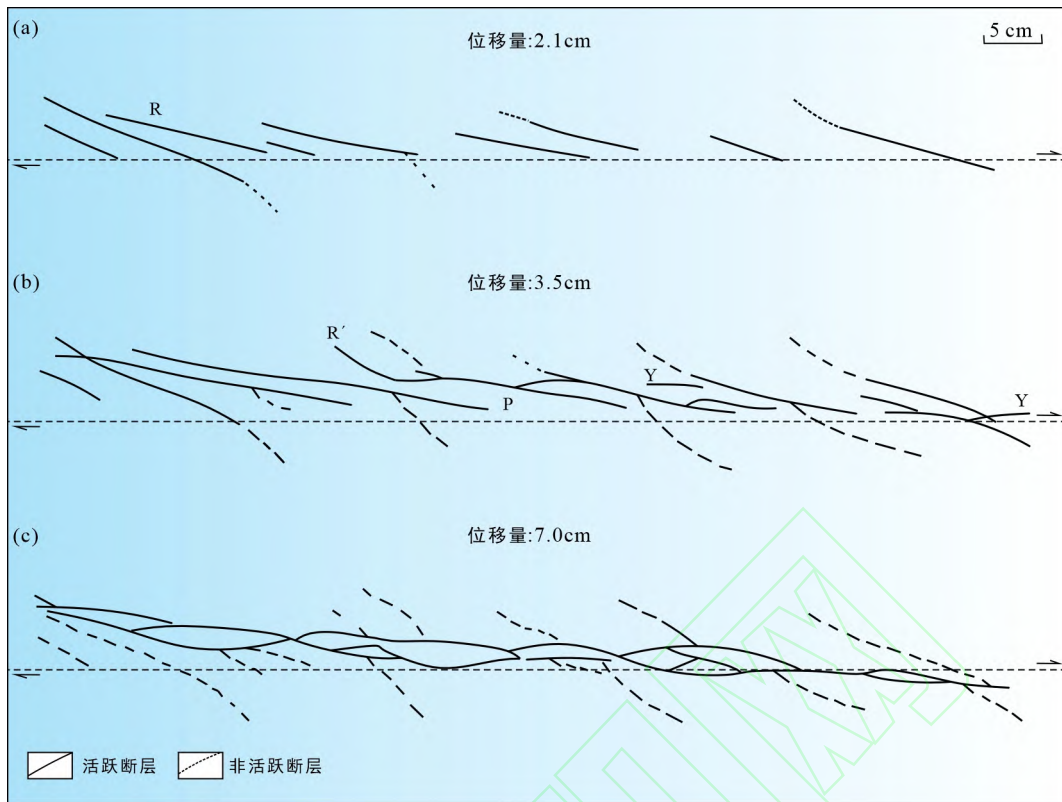


图11 Riedel走滑剪切物理模拟实验(据Naylor et al., 1986修改)

Fig.11 Analogue modeling of Riedel strike-slip shear

在与应力场方向呈不同角度的实验中,实验三、实验四断裂形成和演化过程相似,皆先形成走向和数量相同的R破裂,在先存凸起前缘形成背斜隆起,凸起后缘形成拉分沉降,第三阶段在凸起后缘发育辫状叠接区,第四阶段形成PDZ。不同的是,实验3在第一阶段就出现了拉分沉降,早于在第二阶段才出现该现象的实验2,且在第三、第四阶段形成的拉分叠接范围要比实验2、实验4广,但背斜隆起规模不如实验4。通过断裂数量统计,实验3在第二阶段凸起后缘发育的次级断裂数量增多,次级断裂总数量超过实验4;第三阶段至第四阶段,实验3次级断裂数量小于实验4,这与厚度对比实验后期情况相反,实验4在此阶段集中于凸起后缘的NE向次级断裂大量发育,使得次级断裂数量快速增长。而实验3在走滑后期次级断裂增长集中在先存凸起上覆区域,凸起两侧的断裂相互连接贯通形成PDZ。实验3与实验4在断裂发育程度上没有明显差别,主要区别在于断裂样式、叠接区形态和规模等平面分段特征。

虽然模拟结果的相似性并不能代表断层具有相似的变形机制和演化过程,但是就断层特征、构造样式及发育过程而言,较高的相似性使得在自然实例与构造模拟之间进行合理对比成为可能(Mou et al., 2023)。将实验结果与实际研究区(图3a)进行对比,可以发现玛湖凹陷三叠系走滑断裂体系的发育特征与先存凸起模拟实验四个发育阶段中的第二阶段相似:断裂主体沿凸起边缘间隔发育,次级断裂相互叠置且未贯通,断裂系统在平面上呈左阶雁列式展布;随后走滑剪切作用结束,平面上呈现的隆凹格局与实验结果相似度较高;在先存凸起厚度较大的高部位,其后缘均伴生厚度减薄的向斜凹陷,具有明显的分段特征。将实验切片(图7)与实际地震切片(图3b)对比,可以看出纵向上相似度仍较高,均发育花状构造和线性走滑断裂,且断裂根部收敛于先存凸起侧翼。因此,玛湖凹陷走滑断裂的形成演化可总结为:在晚二叠世西北缘应力作用下走滑断裂开始形成,发育过程中受下二叠统先存凸起影响,使得走滑断裂平面分段、雁列特征和纵向发育特征显现,至三叠纪完全定型。吴孔友等(2014)、卞保力等(2019)和周路等(2019)认为大侏罗沟走滑断裂是达尔布特断裂活动中派生的大角度R'断裂,且物理模拟实验结果表明先存凸起影响走滑断裂平面分段特征,因此推测大侏罗沟走滑断裂的形成演化是达尔布特走滑断裂活动派生和下伏先存构造共同作用的结果。

## 5 结 论

(1) 物理模拟实验结果表明, 先存构造影响走滑断裂的形成与演化, 具体表现为控制走滑断裂的发育程度、空间构造样式和平面分段特征。

(2) 不同厚度先存凸起影响破裂发育程度、叠接规模以及PDZ贯通时间, 凸起厚度越大, 破裂和叠接区越发育, PDZ贯通时间越早; 与应力场不同方向叠加的先存凸起影响破裂发育样式、叠接区形态和规模, 与剪切方向呈顺时针45°夹角的先存凸起实验中, 上覆Y破裂和拉分盆地更发育; 与剪切方向呈逆时针45°夹角的走向先存凸起实验中, 背斜隆起和辫状叠接区规模更大。

(3) 准噶尔盆地西北缘的自然实例与物理模拟实验结果具有较高的几何学一致性。大侏罗沟NWW向走滑断裂体系具有左阶雁列式展布、沿先存凸起边缘间隔状发育及纵向花状构造发育的空间样式特征, 表明其形成和演化受达尔布特断裂活动和下二叠统先存凸起的共同控制。

致谢: 专家评委在论文评审过程中所提供的宝贵意见对提升论文质量帮助很大, 作者受益匪浅, 在此表示诚挚的感谢。

### 参考文献(References):

- 卞保力, 张景坤, 吴俊军, 李宗浩, 王岩, 曹剑. 2019. 准噶尔盆地西北缘大侏罗沟走滑断层油气成藏效应. 地学前缘, 26(1): 238–247.
- 陈红汉. 2023. 我国大型克拉通叠合盆地的走滑构造与油气聚集研究进展. 地球科学, 48(6): 2039–2066.
- 陈静, 陈军, 李卉, 努尔艾力·扎曼. 2021. 准噶尔盆地玛中地区二叠系–三叠系叠合成藏特征及主控因素. 岩性油气藏, 33(1): 71–80.
- 陈石, 郭召杰, 漆家福, 邢向荣. 2016. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义. 石油与天然气地质, 37(3): 322–331.
- 豆方鹏, 李江海, 彭谋. 2024. 准噶尔盆地西北缘断裂带构造变形机制—基于物理实验模拟研究. 地质通报, 43(4): 527–535.
- 韩俊, 况安鹏, 能源, 黄诚, 李琦琦, 陈平, 申卓仪. 2021. 顺北5号走滑断裂带纵向分层结构及其油气地质意义. 新疆石油地质, 42(2): 152–160.
- 何登发, 尹成, 杜社宽, 石昕, 马辉树. 2004. 前陆冲断带构造分段特征—以准噶尔盆地西北缘断裂构造带为例. 地学前缘, 11(3): 91–101.
- 何登发, 吴松涛, 赵龙, 郑孟林, 李涤, 路玉. 2018. 环玛湖凹陷二叠–三叠系沉积构造背景及其演化. 新疆石油地质, 39(1): 35–47.
- 何登发, 翟光明, 况军, 张义杰, 石昕. 2005. 准噶尔盆地古隆起的分布与基本特征. 地质科学, 40(2): 248–261.
- 贾承造, 马德波, 袁敬一, 魏国齐, 杨敏, 闫磊, 田方磊, 姜林. 2021. 塔里木盆地走滑断裂构造特征、形成演化与成因机制. 天然气工业, 41(8): 81–91.
- 荆克尧, 陈霞, 金晓辉. 2021. 古构造定量恢复的地球物理方法研究及应用. 石油实验地质, 43(2): 354–359.
- 李家强. 2008. 层拉平技术在沉积前古地貌恢复中的应用—以济阳拗陷东营地区为例. 胜利油田职工大学学报, 22(1): 31–32.
- 梁媛媛. 2020. 准噶尔盆地西北缘走滑构造特征及其控藏作用研究. 北京: 中国石油大学(北京)硕士学位论文.
- 刘恒麟, 李忠权, 李根, 李敬生, 蒙启安, 彭杨, 胡懿灵, 龙伟, 晏山, 万双双. 2022. 先存构造对断层后期生长及形态的影响: 以海拉尔盆地红旗凹陷为例. 地球科学, 47(7): 2646–2666.
- 庞军刚, 杨友运, 李文厚, 李玲, 文莹. 2013. 陆相含油气盆地古地貌恢复研究进展. 西安科技大学学报, 33(4): 424–430.
- 商丰凯. 2020. 叠合盆地凸起区多期复杂断裂特征及形成机制—以准噶尔盆地车排子凸起为例. 断块油气田, 27(3): 278–283.
- 童亨茂, 孟令箭, 蔡东升, 吴永平, 李绪深, 刘明全. 2009a. 裂陷盆地断层的形成和演化—目标砂箱模拟实验与认识. 地质学报, 83(6): 759–774.
- 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 张红波, 李晓宁. 2009b. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律. 地学前缘, 16(4): 97–104.
- 王海学, 李明辉, 沈忠山, 付晓飞, 程志远, 王彪. 2014. 断层分段生长定量判别标准的建立及其地质意义—以松辽盆地杏北开发区萨尔图油层为例. 地质论评, 60(6): 1259–1264.
- 王亮. 2021. 基于构造物理模拟的东非裂谷Turkana拗陷的形成与演化. 武汉: 中国地质大学(武汉)博士学位论文.
- 王小军, 宋永, 郑孟林, 任海蛟, 吴海生, 何文军, 王韬, 王霞田, 赵长永, 郭健辰. 2021. 准噶尔盆地复合含油气系统与复式

- 聚集成藏. 中国石油勘探, 26(4): 29–43.
- 王有功, 吕延防, 付广, 孙永河, 李鑫. 2014. 复式断陷边界控陷断层生长特征及油气地质意义—以松辽盆地长岭早白垩世复式断陷群东部为例. 地质学报, 88(9): 1666–1676.
- 邬光辉, 李启明, 肖中尧, 李洪辉, 张立平, 张现军. 2009. 塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探. 大地构造与成矿学, 33(1): 124–130.
- 吴孔友, 瞿建华, 王鹤年. 2014. 准噶尔盆地大侏罗沟断层走滑特征、形成机制及控藏作用. 中国石油大学学报(自然科学版), 38(5): 41–47.
- 谢会文, 张亮, 王斌, 罗浩渝, 张科, 章国威, 李玲, 申林. 2025. 塔里木盆地库车坳陷三叠纪古构造特征及对沉积的控制作用. 岩性油气藏, 37(3): 13–22.
- 杨庚, 王晓波, 李本亮, 石昕, 李选, 管树巍. 2009. 准噶尔盆地西北缘斜向挤压构造与油气分布规律. 石油与天然气地质, 30(1): 26–32.
- 余兴, 尤新才, 白雨, 李鹏, 朱涛. 2021. 玛湖凹陷南斜坡断裂识别及其对油气成藏的控制作用. 岩性油气藏, 33(1): 81–89.
- 张刚. 2023. 先存断裂对大陆裂谷形成演化的影响. 徐州: 中国矿业大学硕士学位论文.
- 张磊, 魏小松, 唐勇, 郑孟林, 严德天, 张宝, 张铭轩, 袁铎恩. 2024. 准噶尔盆地玛湖凹陷中部地区多层系油气成藏条件及勘探前景. 石油学报, 45(5): 771–786.
- 张文佑, 钟嘉猷. 1977. 中国断裂构造体系的发展. 地质科学, 12(3): 197–209.
- 张晓杰, 王伟锋, 卿艳彬, 胡瑜, 沈跃. 2017. 准噶尔盆地西北缘横断层特征及形成机制探讨. 地质科学, 52(4): 1068–1078.
- 周路, 朱江坤, 宋永, 陆鹏, 瞿建华, 尤新才, 吴勇, 任本兵, 赵明坤, 肖豪. 2019. 玛湖凹陷玛中–玛东地区三叠系百口泉组断裂特征及控藏作用分析. 地学前缘, 26(1): 248–261.
- 朱明, 袁波, 梁则亮, 杨迪生, 唐雪颖. 2021. 准噶尔盆地周缘断裂属性与演化. 石油学报, 42(9): 1163–1173.
- Biddle K T, Christie-Blick N. 1985. Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation. Oklahoma: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists: 375–384.
- Cloos H. 1928. Experimente zur inneren Tektonik. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie Abhandlungen B*, 12: 609–621.
- Corti G. 2004. Centrifuge modelling of the influence of crustal fabrics on the development of transfer zones: insights into the mechanics of continental rifting architecture. *Tectonophysics*, 384(1–4): 191–208.
- Dooley T P, Schreurs G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574–575: 1–71.
- Feng C, Lei D W, Qu J H, Huo J Z. 2019. Controls of paleo-overpressure, faults and sedimentary facies on the distribution of the high pressure and high production oil pools in the lower Triassic Baikouquan Formation of the Mahu Sag, Junggar Basin, China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 176: 232–248.
- Hubbert M K. 1937. Theory of scale models as applied to the study of geological structures. *Geological Society of America Bulletin* 48(10), 1459–1520.
- Long W, Li Z Q, Li Y, Chen J L, Tan F Y, Zheng Z Y, Hu J M, Li R F. 2018. Experimental Insights on the Structural Patterns and Their Formation Mechanisms of the Xujiaweizi Fault Depression in the Songliao Basin. *Journal of Earth Science*, 29(2): 369–375.
- Morley C K. 1999. How successful are analogue models in addressing the influence of pre-existing fabrics on rift structure? *Journal of Structural Geology*, 21(8–9): 1267–1274.
- Mou Y C, Liang H, Su N, Guo W, Pei Y W. 2023. Control of pre-existing faults on transtensional and transpressional fault systems: A perspective from analogue modelling. *Journal of Asian Earth Sciences*, 252, 105689.
- Naylor M A, Mandl G, Supesteyn C H K. 1986. Fault geometries in basement-induced wrench faulting under different initial stress states. *Journal of Structural Geology*, 8(7): 737–752.
- Phillips T B, Jackson C A, Bell R E, Duffy O B, Fossen H. 2016. Reactivation of intrabasement structures during rifting: A case study from offshore southern Norway. *Journal of Structural Geology*, 91: 54–73.
- Pongwapee S, Morley C K, Won-in K. 2019. Impact of pre-existing fabrics and multi-phase oblique extension on Cenozoic fault patterns, Wichianburi sub-basin of the Phetchabun rift, Thailand. *Journal of Structural Geology*, 118: 340–361.
- Ramberg H. 1981. Gravity, Deformation and the Earth's Crust. London New York: Academic Press.
- Roche V, Camanni G, Childs C, Manzocchi T, Walsh J, Conneally J, Saqab M M, Delogkos E. 2021. Variability in the three-dimensional geometry of segmented normal fault surfaces. *Earth-science Reviews*, 216, 103523.
- Şengör A M C, Lom N, Sağdıç N G. 2019. Tectonic inheritance, structure reactivation and lithospheric strength: The relevance of geological history. *Geological Society, London, Special Publications*, 470(1): 105–136.

- Sylvester A G. 1988. Strike Slip faults. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11): 1666–1703.
- Tong H M, Koyi H M, Huang Scott, Zhao H T. 2014. The effect of multiple pre-existing weaknesses on formation and evolution of faults in extended sandbox models. *Tectonophysics*, 626: 197–212.
- Wang D, Yang L L, Li W, Wang X D. 2023. The Impact of Pre-Existing Faults on Fault Geometry during Multiphase Rifts: The Jiyang Depression, Eastern China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11[10].
- Xia L W, Cao J, Stüeken E E., Zhi D M, Wang T T, Li W W. 2020. Unsynchronized evolution of salinity and pH of a Permian alkaline lake influenced by hydrothermal fluids: A multi-proxy geochemical study. *Chemical Geology*, 541, 119581.
- Young M J, Gawthorpe R L, Sharp I R. 2000. Sedimentology and sequence stratigraphy of a transfer zone coarse-grained delta, Miocene Suez Rift, Egypt. *Sedimentology*, 47(6): 1081–1104.
- Zhu M, Liang Z L, Wang X, Wang R F, Yu Y L, Xiao L X, Wei L Y. 2023. Mesozoic strike-slip fault system at the margin of the Junggar Basin, NW China. *Journal of Structural Geology*, 175, 104950.

## Physical Simulation Experiment on the Formation and Evolution of Strike-slip Faults Controlled by Pre-existing Structures: A Case Study in the Mahu Sag, Junggar Basin

ZHANG Jianan<sup>1</sup>, NENG Yuan<sup>2\*</sup>, FU Yonghong<sup>1</sup>, DENG Yong<sup>3</sup>, ZHONG Houcai<sup>3</sup>,  
WU Xiaoning<sup>3</sup>, YUE Wen<sup>3</sup>

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Karamay Institute, China University of Petroleum (Beijing), Karamay 834000, Xinjiang, China; 3. Petrochina Oriental Geophysical Exploration Company Limited, Zhuozhou 072750, Hebei, China)

**Abstract:** Pre-existing structures play a significant role in the formation and evolution of strike-slip faults. In cratonic basins, strike-slip faults often occur in association with paleo-uplifts. Therefore, conducting physical simulation studies on strike-slip faults controlled by pre-existing uplifts is of great significance. In this paper, based on similarity criteria and the pre-setting of uplifts on the base plate, simulation experiments were designed with different thicknesses and angles relative to the shear direction of pre-existing uplifts, aiming to explore the formation and evolution mechanisms of strike-slip faults. The simulation results show that: (1) Pre-existing uplifts affect the spatial distribution of strike-slip faults and the linear development characteristics of the Primary Displacement Zone (PDZ) in plan view. A series of en-echelon faults form at the edge of the uplift and later evolve into restraining stepovers above the pre-existing uplift and pull-apart basins at the rear edge of the uplift. In vertical section, flower structures develop, with fault roots converging at the edges of the pre-existing uplifts. (2) The thickness of the pre-existing uplifts affects the degree of fracture development, the stepover scale, and the timing of PDZ penetration. The thicker the uplift, the more developed the anticlinal uplifts and pull-apart basins, and the earlier the PDZ penetrates. (3) The angle between the pre-existing uplifts and the shear direction affects the fracture development pattern, as well as the shape and scale of the stepover zone. In the experiment where the angle between the pre-existing uplift and the shear direction is 45° clockwise, the Y fractures and pull-apart basin above the uplift are more developed. In the experiment with a 45° counterclockwise angle between the pre-existing uplift and the shear direction, anticlinal uplifts and braided stepovers at the tail are more developed. The Triassic NWW-trending strike-slip fault system developed in the Mahu Sag of the Junggar Basin exhibits an en-echelon distribution in plan view. Comparison with the simulation results indicates that the strike-slip faults in the Mahu Sag are controlled by pre-existing Permian uplifts, and their formation and evolution are jointly controlled by the activity of the Darbut Fault and pre-existing structures.

**Keywords:** pre-existing structures; strike-slip faults; structural physical modeling; northwestern margin of the Junggar Basin