

doi: 10.12097/gbc.2022.03.044

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

豆方鹏^{1,2}, 李江海^{1,2*}, 彭谋^{1,2}

DOU Fangpeng^{1,2}, LI Jianghai^{1,2*}, PENG Mou^{1,2}

1. 北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871;

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, OE, Peking University, Beijing 100871, China;

2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

摘要: 准噶尔盆地西北缘发育以红车(红山嘴、车排子)、克白(克拉玛依、百口泉)和乌夏(乌尔河、夏子街)为代表的边缘断裂系统,是影响石炭纪—三叠纪地层发育特征和控制油气聚集的关键因素。准噶尔盆地西北缘断裂带属性及形成机制是地球科学界广泛讨论的问题,并一直存在争议。基于区域地质背景和前人研究成果,采用物理砂箱实验模拟准噶尔盆地西北缘断裂带构造变形机制。实验结果表明,乌夏、克白断裂带主要由一条西倾的主断裂控制,两侧断裂不对称分布,为不对称状花状断裂。红车断裂带主要由 2 条主断裂控制,呈雁列状分布,整体表现为近似对称的花状构造。通过物理模拟正演,认为准噶尔盆地西北缘早石炭世—晚三叠世演化过程可分为 2 个阶段,即残余洋盆俯冲阶段和右旋走滑阶段。准噶尔盆地西北缘构造石炭纪—三叠纪地层圈闭发育,可能是逆冲断裂和褶皱形成的断鼻、断块和排列背斜,这些伴生构造圈闭是准噶尔盆地西北缘油气成藏的关键因素。

关键词: 准噶尔盆地西北缘; 玛湖凹陷; 物理模拟; 断裂带; 构造变形

中图分类号: P542.3; P554 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)04-0527-09

Dou F P, Li J H, Peng M. Tectonic deformation mechanism of the fault zone in the northwest margin of Junggar Basin: Based on physical experimental simulation. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(4): 527–535

Abstract: The development of marginal fault systems, exemplified by Hongche (Hongshanzui, Chepai), Kebai (Karamay, Baikouquan), and Wuxia (Wuerhe, Xiazijie) in the northwest margin of Junggar Basin, is a pivotal factor influencing the developmental characteristics of Carboniferous-Triassic strata and governing hydrocarbon accumulation. The nature and formation mechanism of the fault zone in the northwest margin of Junggar Basin have been extensively discussed within the earth science community. Building upon regional geological context and previous research findings, a physical sandbox experiment was conducted to simulate the tectonic deformation mechanism within the fault zone at northwestern Junggar Basin. The experimental outcomes reveal that the Wuxia and Kebai fault zones are primarily controlled by a west-dipping main fault with a symmetrically distributed subsidiary faults on both sides. Conversely, the Hongche fault zone is predominantly governed by two main faults exhibiting an en echelon distribution pattern with an approximately symmetrical flower-like structure. Through forward physical simulation, it can be inferred that Early Carboniferous to Late Triassic evolution at the northwest margin of Junggar Basin can be divided into two stages: residual ocean basin subduction stage followed by right-lateral strike-slip stage. The development of Carboniferous-Triassic stratigraphic traps in this region may be attributed to thrust faults and folds forming fault noses, fault blocks, and aligned anticlines. These associated structural traps serve as key factors for hydrocarbon accumulation at the northwest margin of Junggar Basin.

收稿日期: 2022-03-23; 修订日期: 2022-07-25

资助项目: 国家重点研发计划项目《重点含盐盆地钾盐成矿规律、勘查技术与增储示范》(编号: 2023YFC2906500)

作者简介: 豆方鹏 (1997-), 男, 在读硕士生, 从事地质学研究。E-mail: 2001210125@stu.pku.edu.cn

* 通信作者: 李江海 (1965-), 男, 教授, 从事全球构造教学与研究。E-mail: jhli@pku.edu.cn

Key words: northwestern margin of Junggar; Mahu depression; physical simulation; fault; tectonic mechanism

准噶尔盆地位于中亚造山带东南部,是一个形成于古生代,受中生代、新生代多期构造运动改造形成的叠合盆地,是中国主要的含油气盆地之一 (Carroll et al.,1990;Tao et al.,2016;Ding et al.,2017, 2019)。准噶尔盆地油气勘探始于 1909 年,距今已有 100 多年的历史。目前,准噶尔盆地已探明原油地质储量逾 30×10^8 t,并以年均 80×10^6 t 的速度递增 (支东明等,2018)。近年来,在准噶尔盆地西北缘玛湖凹陷西斜坡上已发现数个大型含油气储层,油气主要来源于玛湖凹陷二叠系佳木河组、风城组和下乌尔禾组 (Tao et al.,2016)。但准噶尔盆地西北缘二叠系已探明油气资源处于低水平,具有较高的油气勘探潜力 (Ablimit et al.,2020)。

前人研究发现,大致呈北东—南西弧形走向的红车(红山嘴-车排子)、克白(克拉玛依-百口泉)、乌夏(乌尔禾-夏子街)断裂系统,被认为是控制准噶尔盆地石炭纪—三叠纪地层发育特征和油气运移聚集的关键因素 (蔚远江等,2004;管树巍等,2008;况军等,2008;杨庚等,2011)。然而,准噶尔盆地西北缘断裂带是前陆冲断带,还是经过后续逆冲构造或走滑形成的断裂带,目前仍存在争议。一般认为,准噶尔盆地西北缘断裂带是由于晚古生代古亚洲洋闭合,准噶尔板块与西准噶尔板块碰撞形成的逆冲推覆系统 (管树巍等,2008;谭开俊等,2008;Zhou et al.,2019)。张越迁等 (2006) 应用叠合盆地研究中的关键技术,提出准噶尔盆地历史上发育 3 期前陆盆地;Liang et al.(2020) 根据二维和三维地震勘探资料,揭示准噶尔盆地类型为经过反转构造改造过的断陷盆地,这一点也得到其他学者的认同 (Tang et al.,2021;张元元等,2021);孙自明等 (2008) 通过野外地质调查和地震与大地电磁测深资料综合解释,认为准噶尔盆地总体表现出走滑-冲断构造特征;还有学者认为,准噶尔盆地西北缘只是受右旋走滑构造作用,与造山事件无关 (张越迁等,2011;陈石等,2016)。对准噶尔盆地西北缘断裂系统属性认识的不同,会导致其邻近地区构造性质和演化过程的差别,油气勘探方向也会有所差异,因此,研究该区域的构造演化机制对于中国油气勘探具有重要意义。

本文以东经 $83^\circ \sim 87^\circ$ 、北纬 $45^\circ \sim 47^\circ$ 范围为研

究区 (图 1-b),包含准噶尔盆地西北缘、西准噶尔褶皱山系和准噶尔地块,通过物理砂箱实验模拟,正演了区域构造演化过程,探讨了准噶尔盆地西北缘断裂带的几何学、运动学和应力学特征,以及可能存在的油气圈闭,为准噶尔盆地油气勘探工作提供了理论支持。

1 地质背景概况

准噶尔盆地呈三角形,位于中亚造山带中东部,阿尔泰山与天山之间,西侧为准噶尔西部山地,东至北塔山麓 (图 1-a)(Windley et al.,2007)。北疆地区是晚石炭世随着古亚洲洋演化而逐渐向南合并形成的 (韩宝福等,2006;Xu et al.,2013)。早泥盆世,古亚洲洋由于板块之间独特的边界条件并没有完全关闭,在哈萨克斯坦造山带被保存为残余洋盆,晚泥盆世 (约 360 Ma) 和整个石炭纪,残余洋逐渐被充填和封闭 (Yh et al.,2018)。准噶尔盆地在晚石炭世和二叠纪发育,接受河流和湖泊碎屑沉积 (Meng et al.,2009)。中生代,西准噶尔地区经历了挤压-隆升 (Zhao et al.,2014),其中大部分地区遭受剥蚀,为西准噶尔盆地提供了沉积物来源。与北疆大部分构造带近东西向的走向不同,准噶尔边缘断裂系统近似于北东—南西向弧形,平行于准噶尔地块西边界 (Zhao et al.,2014)。

准噶尔盆地西北缘断裂体系发育于扎伊尔山脉和哈拉阿拉特山脉前,南起车排子地区,北延夏子街和红旗坝地区,全长约 400 km。该边缘断裂体系划分为红车、克白和乌夏 3 个构造形态明显的断裂段,首尾相连,呈弧形向盆地外凸起 (图 1-b)。

根据王鹤华等 (2015) 解释的地震剖面 (图 1-c),准噶尔盆地西北缘断裂带倾角接近于垂直,次断裂在主断裂两侧几乎呈对称分布。石炭纪—三叠纪形成了大规模的叠瓦状推覆构造,且主要为挤压推覆构造。这些压扭性质断裂切穿了石炭系、二叠系、三叠系,尤其是二叠系、三叠系中的“花状”构造变形尤为强烈,推测在二叠纪—三叠纪西准噶尔残余洋弧与准噶尔板块压扭剪切活动明显。据 Tang et al.(2021) 解释的地震剖面 (图 1-d),准噶尔盆地西北缘断裂带北部主断裂带倾向从上往下逐渐向准噶尔盆地一侧倾斜,整体表现为右旋压扭性特征,呈不对称

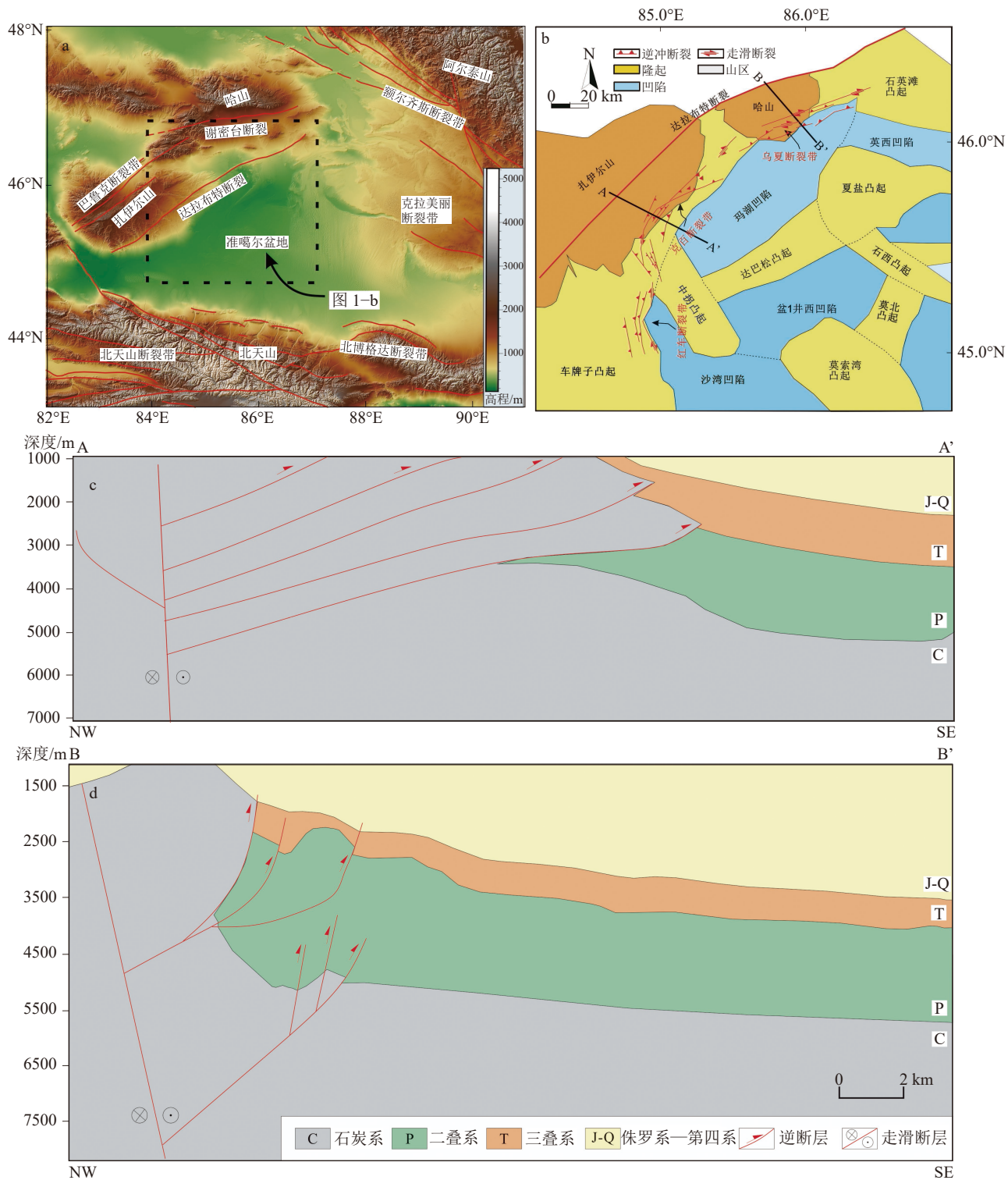


图 1 北疆地区数字高程模型(a, 显示了主要断裂和构造单元)、西北缘断裂体系简化构造图(b)、A-A'剖面地层结构图(c,据王鹤华等, 2015 修改)和 B-B'剖面地层结构图(d,据 Tang et al.,2021 修改)

Fig. 1 The digital elevation model of northern Xinjiang showing the major faults and structural units (a), the simplified structure diagram of the fault system in the northwest margin (b), the stratigraphic structure diagram of A-A' section (c), and the stratigraphic structure diagram of B-B' section (d)

花状构造。断裂带切穿石炭系—三叠系,并且大多为逆冲推覆构造,尤其在二叠纪—三叠纪“花状”变形强烈,表明二叠纪—三叠纪构造活动强烈,准噶尔盆地西北缘断裂带在走向上具有相同的演化时限。

准噶尔盆地西北缘包含石炭系—第四系,其中石炭系主要由火山碎屑岩和碎屑岩组成。二叠系以粗粒碎屑岩为主,主要由河流相、扇三角洲相的砾岩、砂岩、粉砂岩和泥岩组成。三叠系以碎屑岩为主,还可见灰褐色砂岩和灰色粉砂质泥岩互层。侏罗系—第四系主要为灰色粉细砂岩和泥岩,侏罗系还包含一些不等粒砂岩、砂砾岩及煤层。

2 物理实验方法及模型设计

2.1 实验原理

本次 2 组物理实验均采用石英砂做相似性材料,石英砂具有磨圆度中等、分选性较好的优点,平均粒度 0.2~0.3 mm,平均密度 1.35 g/cm³,石英砂摩擦系数和内摩擦角分别为 0.58 和 29°~31°(Deng et al.,2017)。石英砂具有近似线性的库伦-摩尔破裂变形行为和近似为零的内聚力值,能够基于相似比属性有效模拟 0~10 km 浅表地壳构造变形过程(Konstantinovskaya et al.,2011)。通过计算应力比可以衡量天然地壳岩石黏聚力,定义应力比 $\sigma = \rho \cdot l \cdot g$ (Weijermars et al.,1986),其中 σ 为应变比例系数, ρ 、 l 和 g 分别为物理模型和自然模型密度、长度和重力间比例系数,均为无量纲。根据表 1 计算出 $\sigma = 5.6 \times 10^{-6}$ 。若自然界岩石剪切强度为 $1 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6$ Pa(Hoshino et al.,1972),对应的物理模型内聚力强度为 5.6~11.2 Pa,它们普遍适用于正常重力条件下的物理砂箱实验模拟(Oncken et al.,2003)。值得注意的是,在本次实验中,砂体与玻璃侧壁接触面积与基底接触面积之比保持在 0.05~0.1 之间,没有显著摩擦侧壁效应偏差(Souloumiac et al.,2012)。故本次物理实验符合模拟自然重力下的自然界变形。

2.2 模型设计

物理模拟实验区包括中亚造山带东南部,并将地质模型简化为 2 个板块,采用中间砂体挤压区域模拟准噶尔西北断裂带。本次实验模拟断裂带时限为早石炭世—晚三叠世,断裂带形成之后又经历了改造,故不能完全反映当时的产状。晚二叠世—早三叠世古地磁证据表明,准噶尔盆地相对于成吉思弧西端约逆时针旋转了 70°(Wang et al.,2007;Yi et

表 1 本研究使用的物理参数和地质原型与实验模型之间的比例因子

Table 1 The physical parameters and scale factors between geological prototypes and experimental models used in this study

参数	地质原型	实验模型	比例因子
长度 (l)/m	4.5×10^4 m	5×10^{-1} m	$l_M/l_N = 9 \times 10^{-4}$
石英砂密度 (ρ)	2.4×10^3 kg/m ³	1.35×10^3 kg/m ³	$\rho_M/\rho_N = 0.65$
重力加速度 (g)	9.81 m/s ²	9.81 m/s ²	$g_M/g_N = 1.0$
摩擦系数 (μ)	0.73	0.58	$\mu_M/\mu_N = 0.65$
旋转角度 (θ)	70°	40°	$\theta_M/\theta_N = 0.65$
时间尺度 (T)	50 Myr	9 min	$T_M/T_N = 3.5 \times 10^{-13}$

注:实验模型密度数据据王鹤华等,2015;旋转角度数据据Wang et al.,2007;Yi et al.,2015

al.,2015),克白、乌夏断裂系统在弧形区域位置,而红车断裂系统走向趋向于南北向,故设计了 2 个模型来模拟准噶尔盆地西北缘断裂带,其中实验一模拟克白、乌夏断裂系统,实验二模拟红车断裂系统(图 2)。模型长 50 cm,宽 30 cm,挤压方向为左右两侧挤压,俯视图上侧边界为玻璃板格挡,下侧为开放边界。砂箱两侧为便于观察的透明玻璃,砂箱两端为由马达驱动的活动挡板。模型既可以单侧活动,也可以双侧活动。实验材料为经过筛选的松散石英砂,粒径 300~600 μ m,力学性质符合库仑准则,内摩擦角约为 31°。基于相似性原理考虑,变形速率为 100~200 转/min,速度 0.0800~0.100 mm/s,实验仪器运行 9 min。为了实现走滑,本次实验设计了图 2 所示的实验模型。实验过程采用相机拍摄记录。

实验一模拟准噶尔盆地西北缘弧形挤压走滑边界,实验模型依据准噶尔盆地的克白、乌夏断裂系统实际地质边界设定。在光滑的砂箱底面两侧分别铺设无伸缩性泡沫板各 1 块,用来模拟刚性基地,2 块泡沫板中间铺有白色石英砂,泡沫板与硅胶边界形状按照盆地实际边界形态设定。实验第一阶段,模拟早石炭世—晚石炭世残余洋盆俯冲,导致西准噶尔洋逐渐闭合,在模型中模型两侧的墙壁挤压,两块泡沫板由于挤压作用逐渐闭合,当时洋底的沉积物及火山喷发物由于洋壳俯冲发生挤压变形,同时,准

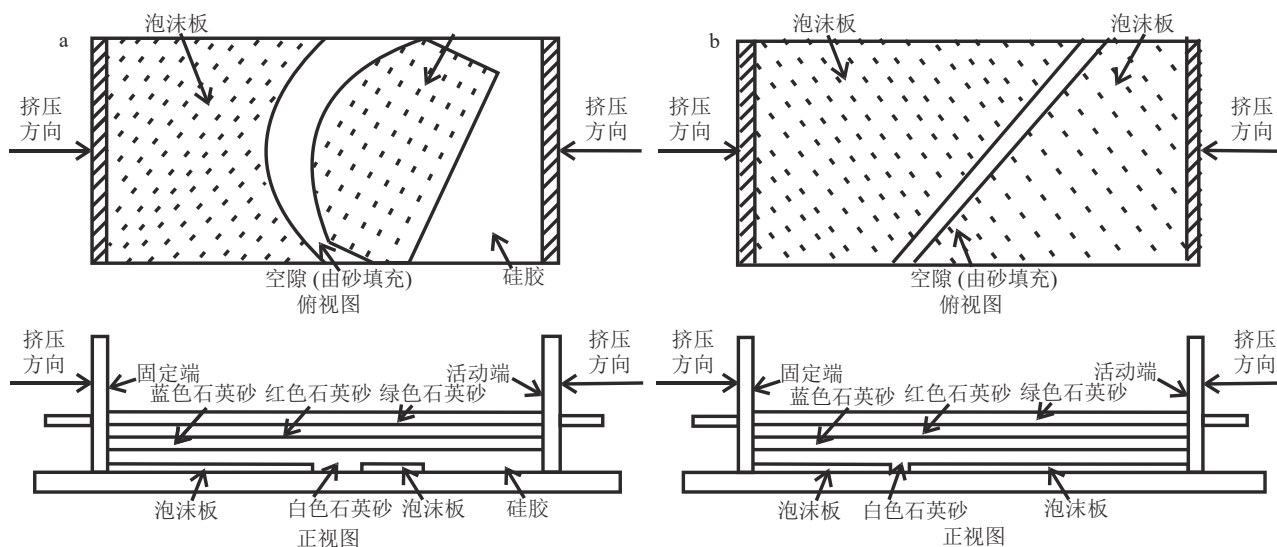


图 2 实验模型示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of experimental model

a—模拟弧形压扭性走滑; b—模拟直线压扭性走滑

噶尔地块相对于成吉思弧西端发生了小角度的逆时针旋转。实验第二阶段, 模拟早二叠世—晚三叠世准噶尔盆地相对于成吉思弧西端发生的大幅度逆时针旋转, 随着模型两侧的进一步挤压, 2 块泡沫板发生约 30° 的相对旋转, 直到 2 块泡沫板完全闭合, 挤压停止, 模拟结束。然后从下向上依次铺设彩色石英砂, 分别为 5 mm 白色石英砂、4 mm 蓝色石英砂、2 mm 红色石英砂及 4 mm 绿色石英砂, 其中以红色砂为标志层 (图 2)。

实验二模拟准噶尔盆地西北缘直线压扭型边界, 实验模型依据准噶尔盆地红车断裂系统设定。其他参数与实验一参数相同。实验模型左侧挤压 40 mm, 右侧挤压 40 mm。

3 实验结果

本次物理模拟实验重点考虑模型边界设定和板块之间相对运动速率两大因素, 在不断改进实验模型条件下, 选取与实际地震剖面拟合程度最高的一组进行分析。模拟结果显示, 弧形压扭性走滑隆起部分用实线标出, 俯视图从上到下隆起区宽度变化趋势为窄—宽—窄, 隆起幅度变化趋势为低—高一—低。这是由模型设置的初始条件决定的, 中部隆起幅度最大, 也是应力最集中的位置。实验二对应准噶尔盆地西北缘南部, 实验结果显示, 除上下两端有边缘效应、砂体逃逸外, 其余位置隆起幅度和宽度自

上而下几乎没有变化, 沿着断裂走向应力分布较均匀。

3.1 关于弧形压扭走滑边界

实验一结果表明, 在物理实验剖面上, 该走滑断裂带主断面陡, 次断裂在主断裂两侧分布, 整体表现为不对称的正花状构造, 具有压扭性特征。物理模拟与图 1-c 地层剖面图所示的构造变形相似, 主要表现在: ①主断裂带倾向从上往下逐渐向准噶尔盆地一侧倾斜, 显示右旋压扭性特征, 整体表现为不对称正花状构造; ②断裂带切穿石炭系—三叠系, 并且大多为逆冲推覆构造; ③断裂带断面上表现为上陡下缓, 尤其表现在 B-B', C-C', D-D' 剖面上。

实验一断层相关褶皱特征表现为前翼陡立后翼缓倾, 形成轴面倾斜的不对称构造, 沿着褶皱下伏断坡向上发展的逆冲断层的位移逐渐衰减为零 (图 3-a)。A、A'、B、B' 代表褶皱明显转折的连线, 整体 A、A' 直线倾角小于 B、B' 直线倾角, 从 A-A' 到 D-D' 剖面观察出 A、A' 直线的倾角逐渐减小并趋近于水平, 表明褶皱受到的挤压程度依次增加; T、T' 代表褶皱三叠系的转折端, 整体褶皱西侧的地势低于东侧, 从 A-A' 到 D-D' 剖面可见, T、T' 的高度除在 A-A' 剖面上近似外, 在其余剖面中都有明显的差异, 褶皱东侧有明显的抬升, 整体上褶皱西侧受到的挤压程度大于东侧, 总结弧形压扭走滑边界的实验结果发现, 断层褶皱类型为前翼逆冲断层褶皱 (图 4,

邓洪菱等,2009)。

3.2 关于直线压扭走滑边界

实验二模拟直线型压扭边界,在物理实验剖面上,该走滑断裂带主要由 2 个对称分布的主断裂带控制,次级断裂依次向上展布,呈现出正向花状构造。从上到下剖面位置依次对应图 3-a 中的 E-E', F-F', G-G' 剖面,其中 F-F' 对应图 1 中的 A-A' 剖面。2 张剖面图的相似性主要表现在:①在构造形态上具有一定相似性,次级断裂带都表现为上陡下缓;②断裂带在石炭纪—侏罗纪形成大规模的叠瓦状推覆,主要为挤压推覆构造;③这些高角度压扭性质断裂切穿石炭系、二叠系、三叠系,二叠纪、三叠纪“花状”构造变形尤为强烈。差异表现在主断裂带分布方面,地震解释剖面显示只有 1 条主断裂控制,而实验结果显示有 2 条主断裂带控制,分析原因可能是断裂带形成之后又经历了后期改造,故不能完全反映当时的产状。F-F'、G-G' 和 H-H' 垂直于砂箱物理模拟隆起走向,构造变形特征以 2 条高角度主断层为特征,呈雁列状分布。

实验二断层相关褶皱特征变现为前翼与后翼陡倾,形成轴面近似竖直的对称构造,沿着褶皱下伏断坡向上发展的逆冲断层的位移逐渐衰减为零。整体上, A、A' 直线倾角与 B、B' 直线倾角大小近似, A、A' 直线倾角没有明显变化,表明褶皱受到的挤压程度相近;褶皱东西侧地势相近, T、T' 高度近似,褶皱中心位置有明显的抬升,并且在褶皱核的正上方发生了垮塌,伴随着正断层的形成,总结直线压扭走滑边界的实验结果,断层褶皱类型为背斜逆冲断层(图 4, 邓洪菱等,2009)。

4 讨 论

综合前人研究资料及准噶尔地区特殊板块构造背景(韩宝福等,2006; Windley et al., 2007; Xu et al., 2013), 结合物理实验模拟结果, 笔者对准噶尔盆地西北缘动力学机制进行了分析。关于弧形走滑压扭性边界, 通过物理实验可以发现, 对比剖面 A-A', B-B', C-C', D-D', 构造隆起幅度先增强后平缓, 在 C-C' 处隆起幅度达到最大, 根据断裂带地理位置相对关系可知, C-C' 剖面位置是构造隆起发育最集中位置, 也是地应力最集中的区域。此外, 由于边界效应, A-A' 剖面与其他剖面相比, 构造形态明显不同, 主要表现为: 隆起幅度小, 宽度窄; 小断裂分布密且

多; 地层连续性强, 断裂未切穿地层, 可能是上侧挡板反作用力及泡沫板转动时上侧产生空白区引起垮塌影响所致。直线型压扭型边界模拟结果从上到下, 剖面构造特征具有高度的相似性, 这与直线型压扭构造设置的边界条件有关, 应力分布均匀, 没有应力集中位置。剖面整体有向东倾的趋势, 这是由设置的右旋走滑断裂的边界条件决定的。

通过 2 组砂箱物理实验模拟结果剖面图与前人解释的地震剖面对比, 石炭纪—三叠纪发育大规模叠瓦状推覆构造, 主要为挤压推覆构造。其中, 直线压扭走滑边界与王鹤华等(2015)解释的地震剖面对比, 发现 2 张剖面图在断层构造形态上具有相似性, 表现在断裂带倾向接近于垂直, 次断裂在主断裂两侧几乎对称分布, 都为近似对称的正花状构造。弧形压扭走滑边界与 Tang et al.(2021)解释的地震剖面对比, 发现二者在断层构造形态上也具有相似性, 具体变为主断裂带倾向从上往下逐渐向准噶尔盆地一侧倾斜, 整体表现为右旋压扭性特征, 以及不对称花状构造。总结发现, 物理砂箱实验正演与实际地震剖面吻合, 再结合前人对准噶尔地区石炭纪—三叠纪构造演化的研究, 主要将准噶尔西北早石炭世—晚三叠世演化模式分为 2 个阶段, 即残余洋盆俯冲阶段和右旋走滑阶段(陈石等, 2016; Yh et al., 2018; Liang et al., 2020)(图 5)。

残余洋盆俯冲阶段: 准噶尔地区在早石炭世—晚石炭世保存了残余洋盆(韩宝福等, 2006; Windley et al., 2007; Xu et al., 2013), 随着被动陆缘洋壳俯冲, 西准噶尔洋逐渐缩小。但是由于哈萨克斯坦微大陆弯曲边界条件, 西准噶尔洋没有完全闭合, 之后由于沉积物的充填, 西准噶尔洋逐渐闭合。

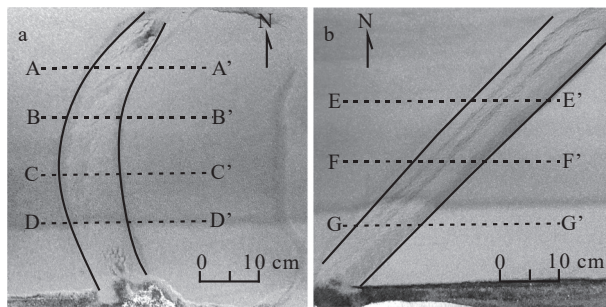


图 3 实验结果俯视图

Fig. 3 Top view of experimental results

a—弧形压扭性走滑; b—直线压扭性走滑

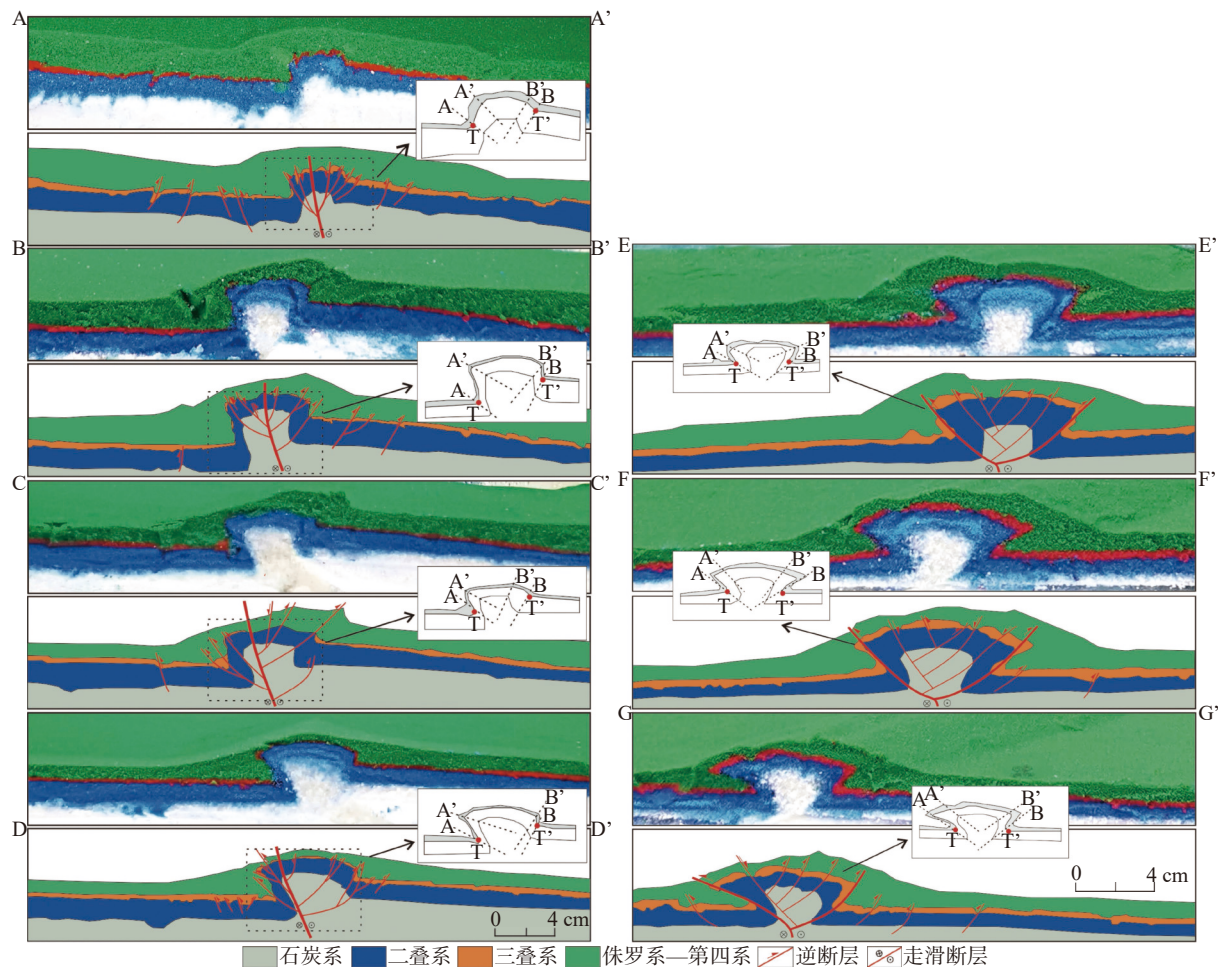


图 4 弧形压扭性边界物理模拟结果 (A-A'、B-B'、C-C'、D-D') 和直线压扭性边界物理模拟结果 (E-E'、F-F'、G-G')
(字母的含义说明见正文,剖面位置见图 3)

Fig. 4 Physical simulation results of arc compression-torsion boundary(A-A', B-B', C-C', D-D') and physical simulation results of straight-line compression-torsion boundary(E-E', F-F', G-G')

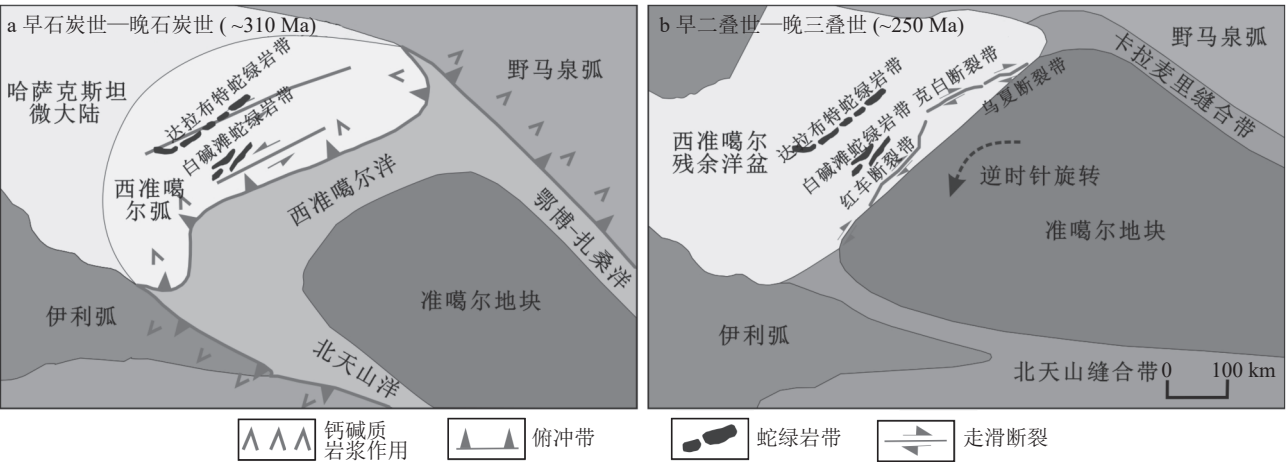


图 5 准噶尔地区早石炭世—晚石炭世 (约 310 Ma) 和早二叠世—晚三叠世 (约 250 Ma) 构造演化简图
Fig. 5 Tectonic evolution diagram of Early Carboniferous to Late Carboniferous(~310 Ma) and Early Permian-Late Triassic(~250 Ma) in Junggar area

右旋走滑阶段:在早二叠世—晚三叠世,准噶尔盆地与西准噶尔残余洋盆碰撞,并且由于准噶尔地块的逆时针旋转(Wang et al.,2007; Yi et al.,2015),乌夏、克白和红车断裂带形成具有右旋压扭性质的走滑断裂带。由于乌夏、克白和红车断裂带所处位置不同,压扭形成的构造也不同。逆冲断层和褶皱形成以断块、鼻状构造、雁列式背斜等类型为主的构造圈闭,到三叠纪大量烃源岩已经成熟,进入排烃阶段,与圈闭形成良好的配置关系,为形成大油气田提供了条件。

5 结 论

通过使用物理实验手段,不考虑沉积作用影响,在浅表地壳尺度下模拟了准噶尔盆地西北缘断裂带形成。得出主要结论如下。

(1) 在物理实验剖面上,弧形压扭走滑边界形成断裂具有主断面陡,次断裂在主断裂两侧分布的特征,整体变现为不对称正向花状构造。直线压扭走滑边界走滑断裂带主要由 2 个对称分布的主断裂带控制,次级断裂依次向上展布,呈现出对称正向花状构造。

(2) 将准噶尔西北早石炭世—晚三叠世演化模式分为 2 个阶段,即残余洋盆俯冲阶段和右旋走滑挤压阶段。残余洋盆阶段,随着被动陆缘洋壳俯冲,准噶尔地块与西准噶尔弧相向运动。右旋走滑阶段,准噶尔盆地与西准噶尔残余洋盆碰撞,并且准噶尔地块逆时针旋转,准噶尔盆地西北缘形成了具有右旋压扭性质的走滑断裂带。

(3) 准噶尔盆地西北缘地区的构造圈闭可能是由逆冲断裂和褶皱形成的断鼻、断块和排列背斜构成,这些伴生构造圈闭是准噶尔盆地西北缘油气成藏的关键。

致谢:感谢审稿专家对文章提供的宝贵修改意见,感谢成都理工大学提供的物理砂箱模拟实验室。

参考文献

- Ablimit I, Zha M, Ding X J, et al. 2020. Identification of a Permian foreland basin in the western Junggar Basin(NW China) and its impact on hydrocarbon accumulation[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 187: 920–4105.
- Carroll A R, Liang Y, Graham S A, et al. 1990. Junggar basin, northwest China: Trapped Late Paleozoic ocean[J]. *Tectonophysics*, 181(1/4): 1–14.
- Deng B, Jiang L, Zhao G, et al. 2017. Insights into the velocity-dependent geometry and internal strain in accretionary wedges from analogue models[J]. *Geological Magazine*, 155(5): 1089–1104.
- Ding X J, Gao C H, Zha M, et al. 2017. Depositional environment and factors controlling β -carotane accumulation: A case study from the Jimsar Sag, Junggar Basin, northwestern China[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 485: 833–842.
- Ding X J, Qu J H, Ablimit I, et al. 2019. Organic matter origin and accumulation in tuffaceous shale of the lower Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 179: 696–706.
- Hoshino K. 1972. Mechanical properties of Japanese Tertiary sedimentary rocks under high confining pressures[R]. Geological Survey of Japan.
- Konstantinovskaya E, Malavieille J. 2011. Thrust wedges with decollement levels and syntectonic erosion: A view from analog models[J]. *Tectonophysics*, 502(3/4): 336–350.
- Liang Y Y, Zhang Y Y, Chen S, et al. 2020. Controls of a strike-slip fault system on the tectonic inversion of the Mahu depression at the northwestern margin of the Junggar Basin, NW China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 198: 104229.
- Meng J, Guo Z, Fang S. 2009. A new insight into the thrust structures at the northwestern margin of Junggar Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 16(3): 171–180.
- Oncken A O. 2003. The impact of analogue material properties on the geometry, kinematics, and dynamics of convergent sand wedges[J]. *Journal of Structural Geology*, 25(10): 1691–1711.
- Souloumiac P, Maillot B, Leroy Y M. 2012. Bias due to side wall friction in sand box experiments[J]. *Journal of Structural Geology*, 35(2): 90–101.
- Tang W B, Zhang W W, Pe-Piper G, et al. 2021. Permian to early Triassic tectono-sedimentary evolution of the Mahu sag, Junggar Basin, western China: sedimentological implications of the transition from rifting to tectonic inversion[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 123: 104730.
- Tao K Y, Cao J, Wang Y, et al. 2016. Geochemistry and origin of natural gas in the petroliferous Mahu sag, northwestern Junggar Basin, NW China: Carboniferous marine and Permian lacustrine gas systems[J]. *Organic Geochemistry*, 100: 62–79.
- Wang B, Chen Y, Zhan S, et al. 2007. Primary Carboniferous and Permian paleomagnetic results from the Yili Block (NW China) and their implications on the geodynamic evolution of Chinese Tianshan Belt[J]. *Earth Planet*, 263: 288–308.
- Weijermars R, Schmeling H. 1986. Scaling of Newtonian and non-Newtonian fluid dynamics without inertia for quantitative modelling of rock flow due to gravity (including the concept of rheological similarity)[J]. *Physics of the Earth & Planetary Interiors*, 43(4): 316–330.
- Windley B F, Alexeev D, Xiao W, et al. 2007. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt[J]. *Journal of the*

- [Geological Society](#), 164(1): 31–47.
- Xu Q Q, Ji J Q, Zhao L, et al. 2013. Tectonic evolution and continental crust growth of Northern Xinjiang in northwestern China: Remnant ocean model[J]. [Earth-Science Reviews](#), 126: 178–205.
- Yh A, Gza B. 2018. Final amalgamation of the Tianshan and Junggar orogenic collage in the southwestern Central Asian Orogenic Belt: Constraints on the closure of the Paleo-Asian Ocean-ScienceDirect[J]. [Earth-Science Reviews](#), 186: 129–152.
- Yi Z, Huang B C, Xiao W J, et al. 2015. Paleomagnetic study of Late Paleozoic rocks in the Tacheng Basin of West Junggar (NW China): Implications for the tectonic evolution of the western Altaids[J]. [Gondwana Research](#), 27(2): 862–877.
- Zhao S, Li S, Xin L, et al. 2014. Intracontinental orogenic transition: Insights from structures of the eastern Junggar Basin between the Altay and Tianshan orogens[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 88(6): 137–1484.
- Zhou Y C, Chen Q H, Wu K Y, et al. 2019. The basin and range systems and their evolution of the northwestern margin of Junggar Basin, China: Implications for the hydrocarbon accumulation[J]. *Energy Exploration & Exploitation*, 37(5): 1577–1598.
- 陈石, 郭召杰, 漆家福, 等. 2016. 准噶尔盆地西北缘三期走滑构造及其油气意义[J]. [石油与天然气地质](#), 37(3): 322–331.
- 邓洪菱, 张长厚, 李海龙, 等. 2009. 褶皱相关断裂构造及其地质意义[J]. [自然科学进展](#), 19(3): 285–296.
- 管树巍, 李本亮, 侯连华, 等. 2008. 准噶尔盆地西北缘下盘掩伏构造油气勘探新领域[J]. [石油勘探与开发](#), 35(1): 17–22.
- 韩宝福, 季建清, 宋彪, 等. 2006. 新疆准噶尔晚古生代陆壳垂向生长—后碰撞深成岩浆活动的时限[J]. [岩石学报](#), 22(5): 1077–1086.
- 况军, 张越迁, 侯连华. 2008. 准噶尔盆地西北缘克百掩伏带勘探领域分析[J]. *新疆石油地质*, 29(4): 431–434.
- 杨庚, 王晓波, 李本亮, 等. 2011. 准噶尔盆地西北缘斜向挤压构造与走滑断裂[J]. *地质科学*, 46(3): 696–708.
- 谭开俊, 张帆, 吴晓智, 等. 2008. 准噶尔盆地西北缘盆地耦合与油气成藏[J]. [天然气工业](#), 28(5): 10–13.
- 王鹤华, 吴孔友, 裴仰文, 等. 2015. 扎伊尔山冲断-走滑构造演化特征与物理模拟[J]. [地质力学学报](#), 21(1): 56–65.
- 蔚远江, 何登发, 雷振宇, 等. 2004. 准噶尔盆地西北缘前陆冲断带二叠纪逆冲断裂活动的沉积响应[J]. [地质学报](#), 78(5): 612–625.
- 张元元, 曾宇轲, 唐文斌. 2021. 准噶尔盆地西北缘二叠纪原型盆地分析[J]. [石油科学通报](#), 6(3): 333–343.
- 孙自明, 洪太元, 张涛. 2008. 新疆北部哈拉阿拉特山走滑-冲断复合构造特征与油气勘探方向[J]. *地质科学*, 43(2): 309–320.
- 张越迁, 张年富. 2006. 准噶尔大型叠合盆地油气富集规律[J]. [中国石油勘探](#), 11(1): 59–64.
- 张越迁, 汪新, 刘继山, 等. 2011. 准噶尔盆地西北缘乌夏走滑构造及油气勘探意义[J]. *新疆石油地质*, 32(5): 447–450.
- 支东明, 唐勇, 郑孟林, 等. 2018. 玛湖凹陷源上砾岩大油区形成分布与勘探实践[J]. [新疆石油地质](#), 39(1): 1–1.