

文章编号：1000-0747(2025)05-0000-13 DOI: 10.11698/PED.20240664

塔里木盆地超深层走滑断裂结构及垂向生长过程 构造物理模拟实验

能源¹, 谢舟², 邵龙飞¹, 阮畦畦³, 康鹏飞², 张佳楠¹, 田志文¹, 刘根骥¹

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249; 2. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院, 新疆库尔勒 841000;
3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区石油学院, 新疆克拉玛依 834000)

基金项目：国家自然科学基金项目（42362026），新疆维吾尔自治区重点研发项目（2024B01015）

摘要：针对塔里木盆地超深层走滑断裂带垂向生长演化过程不明, 碳酸盐岩缝洞体储层垂向分布复杂的问题, 通过柯坪地区野外露头分析、富满油田地震资料解释及构造物理模拟实验等方法对走滑断裂垂向演化过程进行研究, 得到如下认识: ①露头及超深层地震剖面解释表明, 走滑断裂内部可形成断层核-破碎带-原岩3层结构, 断层核在垂向空间内可以划分为缝洞体、断层泥及角砾岩带3种结构。受走滑断裂带结构及生长演化过程影响, 缝洞体分布表现出明显的垂向分层性。②超深层地震剖面显示走滑断裂带发育多层缝洞体, 可分为顶部破裂型、中部连接型、深部终止型及层内破裂型4种类型。③构造物理模拟实验及超深层地震资料解释揭示走滑断裂在垂向上经历了分层破裂—垂向生长—连接扩展3个演化阶段; 应用粒子测速监测技术发现, 断裂带演化的初始阶段首先在顶部或底部形成初始破裂, 在断层生长阶段初始破裂逐渐演化成断裂空腔, 随后在地层中部出现新的破裂, 与深浅层断裂空腔连接形成完整的断层带。④超深层碳酸盐岩地层主要发育3类缝洞型油藏(花状破碎型、深大断裂型、错断叠接型), 前两类缝洞体发育规模更大、油气成藏条件好、勘探潜力大。

关键词：走滑断裂; 垂向生长; 演化过程; 构造物理模拟; 碳酸盐岩缝洞体; 超深层; 塔里木盆地

中图分类号: TE122 文献标识码: A

Physical simulation experiment on vertical growth process of strike-slip faults in ultra-deep strata of the Tarim Basin, NW China

NENG Yuan¹, XIE Zhou², SHAO Longfei¹, RUAN Qiqi³, KANG Pengfei², ZHANG Jianan¹, TIAN Zhiwen¹, LIU Genji¹

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla 841000, China; 3. School of Petroleum, China University of Petroleum–Beijing at Karamay, Karamay 834000, China)

Abstract: In the ultra-deep strata of the Tarim Basin, the vertical growth process of strike-slip faults remains unclear, and the vertical distribution of fractured-cavity carbonate reservoirs is complex. This paper investigates the vertical growth process of strike-slip faults through field outcrop observations in the Keping area, interpretation of seismic data from the Fuman oilfield, and physical simulation experiments. The results are obtained mainly in four aspects. First, field outcrops and ultra-deep seismic profiles indicate a three-layer structure within the strike-slip fault, consisting of fault core, fracture zone, and primary rock. The fault core can be classified into three parts vertically: fracture-cavity unit, fault clay, and breccia zone. The distribution of fracture-cavity units demonstrates a distinct pattern of vertical stratification, owing to the structural characteristics and growth process of the slip-strike fault. Second, the ultra-deep seismic profiles show multiple fracture-cavity units in the strike-slip fault zone. These units can be classified into four types: top fractured, middle connected, deep terminated, and intra-layer fractured. Third, physical simulation experiments and ultra-deep seismic data interpretation reveal that the strike-slip faults have evolved vertically in three stages: segmental rupture, vertical growth, and connection and extension. The particle image velocimetry (PIV) detection demonstrates that the initial fracture of the fault zone occurred at the top or bottom and then evolved into cavities gradually along with the fault growth, accompanied by the emergence of new fractures in the middle part of the strata, which subsequently connected with the deep and shallow cavities to form a complete fault zone. Fourth, the ultra-deep carbonate strata primarily develop three types of fractured-cavity reservoirs: large and deep fault, flower-shaped fracture, and staggered overlap. The first two types are larger in size with better reservoir conditions, suggesting a significant exploration potential.

Key words: strike-slip fault; vertical growth; evolution process; physical simulation experiment; fractured-cavity carbonate reservoir; ultra-deep; Tarim Basin

引用：能源，谢舟，邵龙飞，等. 塔里木盆地超深层走滑断裂结构及垂向生长过程构造物理模拟实验[J]. 石油勘探与开发, 2025, 52(5): 1-13.

NENG Yuan, XIE Zhou, SHAO Longfei, et al. Physical simulation experiment on vertical growth process of strike-slip faults in ultra-deep strata of the Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(5): 1-13.

0 引言

近年来，塔里木盆地台盆区古生界碳酸盐岩地层内发现大规模走滑断裂，其控制的缝洞体油气藏引起了国内外地质家的广泛关注，其中富满油田属于典型的断控型岩溶区，是现阶段塔里木盆地碳酸盐岩勘探增储上产的重要领域^[1-9]。大量的研究表明^[2, 6, 10-18]，该类走滑断裂具有多期变形叠加、垂向分层发育、平面分段破裂的构造特征，其中垂向分层特征受控于地层岩性变化及多期构造运动，平面分段性受控于走滑断裂结构及生长连接过程，走滑断裂的分期性受控于区域构造应力场变化。走滑断裂平面和剖面上的构造样式复杂多样。

构造物理模拟实验是目前研究走滑断裂形成演化的重要手段之一，很多学者通过设计不同的实验模型，取得了很多重要认识。Cloos 和 Naylor^[19-20]通过物理模拟实验将走滑断裂带平面演化大致分为 4 个阶段。肖阳^[21]在构造物理模拟实验中应用 CT 成像技术再现了走滑断裂带贯穿的演化过程，并揭示了雁列构造“螺旋-拖曳”的发育模式，指出萌芽阶段的走滑构造在剖面上向上散开，是具有一定宽度的变形带。前人所做的研究多聚焦于走滑断裂平面展布特征及其横向分段性，对断裂带垂向演化过程及其与缝洞体发育的耦合机制研究仍然不足。走滑断裂活动过程中会引起地层破裂，地层受暴露溶蚀或深部流体影响，可以形成断裂-缝洞型油气藏，在地震剖面上表现出“串珠”状发育特征^[13, 22]。富满油田勘探发现表明，走滑断裂相关的缝洞体在断裂带内垂向差异分布特征明显^[6, 12, 14, 23-26]。走滑断裂复杂结构及垂向生长过程对缝洞体分布的控制作用尚不明确，亟需加强研究。

本文通过典型野外露头解剖、地震剖面解释，结合构造物理模拟实验及粒子测速（PIV）监测技术，恢复走滑断裂垂向演化过程，建立走滑断裂带结构模型，明确走滑断裂带内缝洞体的分布规律，为塔里木盆地超深层缝洞体油气藏勘探开发提供指导。

1 区域地质概况

富满油田位于塔里木盆地台盆区阿满过渡带东部（见图 1a），主要发育大量北东向—北北东向走滑断

裂，部分断裂活动规模较大，断裂自塔北隆起延伸至塔中隆起带（见图 1b）。地层发育齐全，纵向上可分为前南华系基底、南华系—震旦系裂谷盆地、寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩台地、志留系—白垩系海陆过渡型盆地及新生界前陆盆地 5 大构造层，富满油田下古生界寒武系—奥陶系海相碳酸盐岩地层中油气资源丰富^[5]。寒武系自下而上为玉尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格组以及下丘里塔格组。奥陶系自下而上为蓬莱坝组、鹰山组、一间房组、吐木休克组、良里塔格组及桑塔木组（见图 1c）。下奥陶统与上寒武统呈不整合接触，蓬莱坝组为细晶白云岩、白云质泥晶灰岩互层，其中鹰山组下段（3—4 亚段）发育厚层泥晶灰岩，间有白云质泥晶灰岩；中奥陶统发育厚层滩相生屑灰岩与砂屑灰岩；上奥陶统吐木休克组及良里塔格组分别发育薄层灰质泥岩和泥质灰岩，桑塔木组发育有厚层泥岩。

当前油气勘探的主要目的层为奥陶系一间房组和鹰山组上段（1—2 亚段）碳酸盐岩地层，埋深超 7 000 m，受走滑断裂变形破碎作用及岩溶作用影响，主要形成孔洞-裂缝型储层^[6]。下寒武统玉尔吐斯组发育烃源岩，通过走滑断裂连通奥陶系储层，上奥陶统桑塔木组发育区域厚层泥岩盖层，形成了优质的生储盖组合^[7]。

2 超深层走滑断裂带发育模式

2.1 野外露头走滑断裂带结构特征

根据塔里木盆地奥依皮克野外露头显示，走滑断裂带在寒武系碳酸盐岩地层中具有复杂结构特征。野外露头特征如下①野外可见 F1—F4 共 4 条走滑断裂（见图 2），其中 F1、F4 走滑断裂为主走滑断裂，两条断裂间的断盘上发育 f1—f10 共 10 条次级断裂。自走滑断裂带向两侧断盘，断裂可形成断层核、破碎带、原岩 3 层结构。断层核为走滑断裂活动最强部位，原岩破裂形成空腔。破碎带主要受走滑断裂活动影响，原岩发生破碎形成大量小断裂和节理（见图 2b）。②走滑断裂核部空腔（缝洞体）的分布受控于走滑断裂活动性、走滑断裂组合样式、走滑断裂与地层切割关系。F1、F2、F3 断裂活动性强于 F4，因此右侧断裂带内形成的空腔及破碎地层规模也明显大于左侧。F2、F3 断裂位于 F1 断裂上盘，形成花状构造，断裂样式影响了

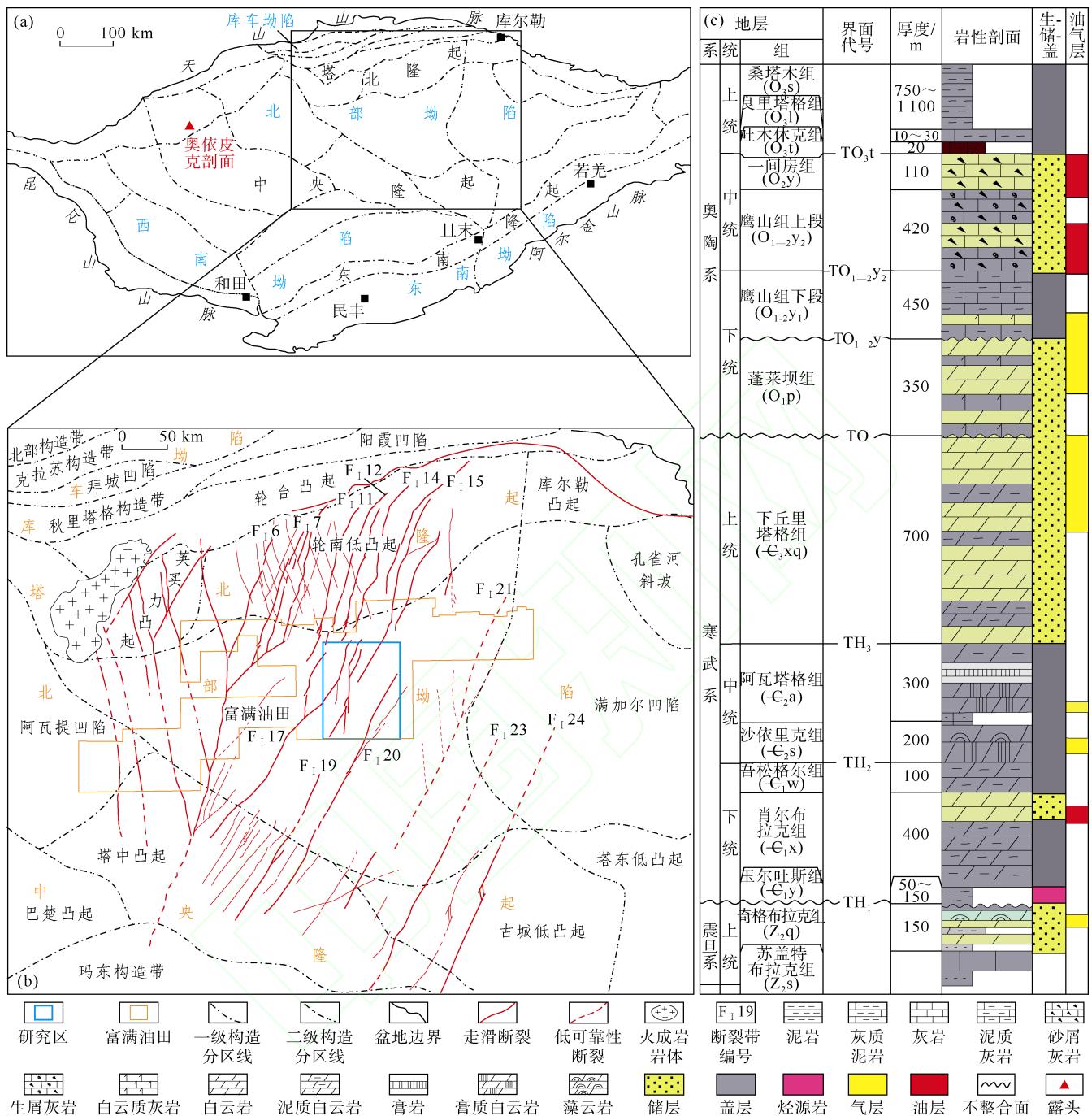


图1 塔里木盆地构造单元(a)、富满油田研究区位置(b)及地层综合柱状图(c)(据文献[7]修改)

空腔的分布。F1 断裂与 F2 断裂的公共盘内，在靠近 F1 断裂处形成空腔；F2 与 F3 断裂公共盘内，靠近 F3 断裂处空腔最发育，F1 断裂空腔被断裂内滑落的断块充填，因此向上空腔规模减少。F1 与 F3 断裂交汇处，地层破碎程度最大。F4 断裂未发育次级断裂，总体上核部空腔规模发育不大，地层上部和下部空腔规模明显大于中部。图 2a 中所示，25 号与 26 号地层岩性存在差异，下部白云质灰岩中白云质含量更高，因此在地层界面处也形成了明显的顺层破裂，受走滑断裂与

地层界线共同控制，两者叠接处地层破碎程度最高。
③除断层核外，地层破碎带内发育大量节理。F1 断层与 F4 断层之间节理最发育，主要发育垂直地层界线、平行地层界线、与地层界线斜交 3 组节理。破碎带内的断裂空腔不发育，仅有小规模空腔在靠近地层顶部和地层岩性变化界面处发育。

虽然野外露头断裂规模小于超深层走滑断裂带规模，但是野外露头走滑断裂表现出的破裂方式及断裂带结构差异，可以帮助地震资料解释人员建立超深层

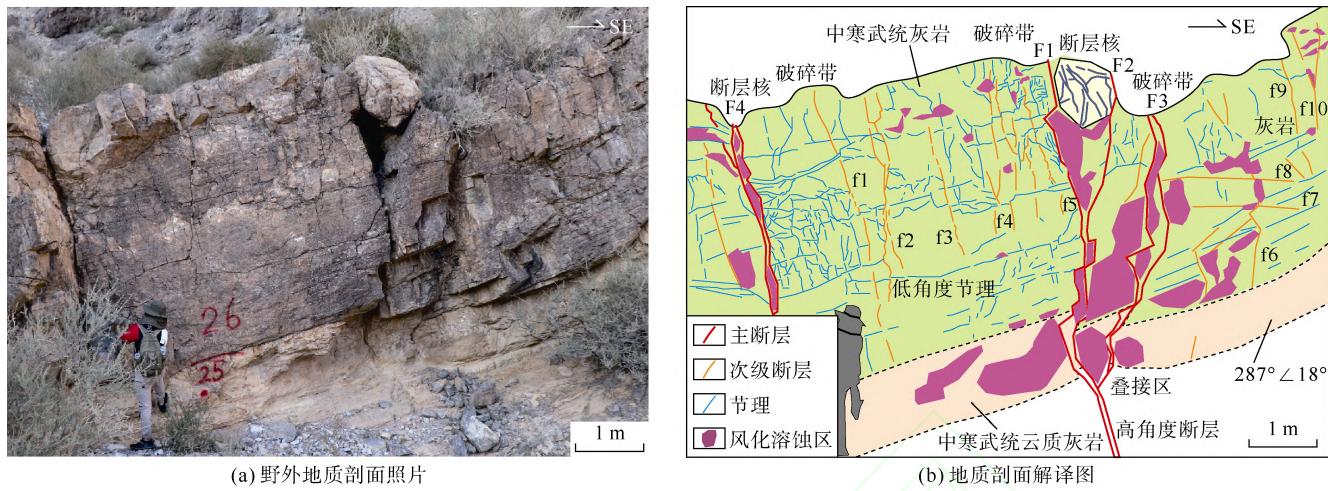


图2 塔里木盆地奥义奥依皮克剖面走滑断裂带垂向结构发育特征

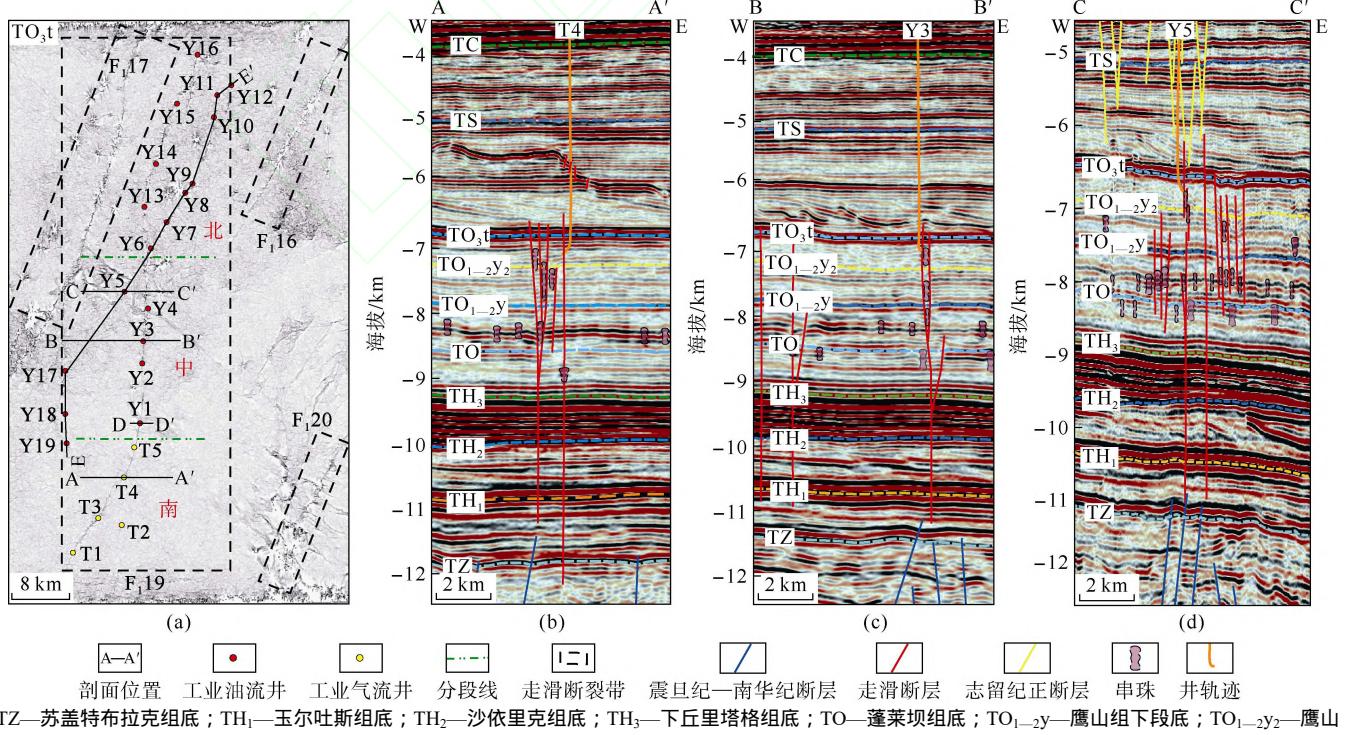
的地震资料解释地质模型。

2.2 3D 地震剖面走滑断裂及缝洞体垂向特征

富满油田是塔里木盆地断控缝洞型储层开发热点区块， F_{19} 断裂带属于目前重点增储上产区，该断裂带夹持于 F_{17} 和 F_{20} （北东走向断裂带）之间，断裂发育特征不同于周缘北东向大型走滑断裂带，断裂平面分段变形样式和叠接区发育更加复杂。 F_{19} 中部南北向走滑断裂切割了南部和北部的北东向走滑断裂，在塔里木盆地阿满过渡区走滑断裂系统中具有一定代表意义^[2]。

根据塔里木盆地过 F_{19} 走滑断裂带的3D地震资

料显示，地震剖面上发育多类型“串珠”，分布于不同的地层内。总体看表现为如下特征：①主干断裂附近串珠较发育，主干断裂活动性越强，剖面构造样式越复杂。过T4井、Y3井剖面显示（见图3），规模最大的串珠位于走滑断裂带花状构造内部断层核部位；过Y3井剖面，走滑断裂与奥陶系碳酸盐岩顶面地层（ TO_3t ）交汇处串珠最发育，而在 F_{19} 断裂带西侧，剖面上走滑断裂表现为直立型，未见明显的缝洞体发育；过Y5井剖面（见图3d），走滑断裂表现为侧接型，且在断裂侧接处串珠发育规模最大，说明走滑断裂剖面构造样式对缝洞体发育位置具有控制作用。②串珠



TZ—苏盖特布拉克组底； TH_1 —玉尔吐斯组底； TH_2 —沙依里克组底； TH_3 —下丘里塔格组底；TO—蓬莱坝组底； $TO_{1-2}y$ —鹰山组下段底； $TO_{1-2}y_2$ —鹰山组上段底； TO_3t —吐木休克组底；TS—志留系底；TC—石炭系底

图3 塔里木盆地富满油田一间房组顶面主要断裂平面分布图（a）和 F_{19} 断裂带典型地震剖面（b—d）

在断裂带不同层内分布存在明显差异。Y3井剖面西侧断裂在中一下奥陶统碳酸盐岩地层深部和浅部均有串珠分布(见图3b),且在垂向上表现出错位叠接特征。东侧断裂中,串珠在奥陶系鹰山组上段与鹰山组下段内均有分布,深浅层串珠不连通,深部串珠的规模大于浅部。③串珠分布不仅受主干走滑断裂控制,在蓬莱坝组内也存在着一系列层内串珠,其不只在断层核内发育,在地层内也广泛发育。串珠发育除了受控于走滑断裂以外,多期多类型的岩溶作用也起到重要作用。鹰山组下段和蓬莱坝组发育的层内缝洞体则是受到早期断裂活动及多期岩溶作用的改造而形成^[14, 27-28]。

过Y1井超深层地震剖面显示,走滑断裂带在奥陶系吐木休克组底面(TO_{3t})、鹰山组底面(TO_{1-2y})和蓬莱坝组底面(TO)处均发育缝洞体(见图4a),通过走滑断裂垂向断距统计,缝洞体往往出现在地层垂向断距变化较大处。不同层均方根反演属性图显示,奥陶系不同深度的缝洞体分布存在差异,红色高亮强振幅区为缝洞体发育区,奥陶系吐木休克组底面缝洞体主要集中在走滑断裂带附近(见图4b)。奥陶系鹰山组走滑断裂带在分支断层带内缝洞体较发育(见图4c),蓬莱坝组缝洞体则主要分布于断裂带两侧地层内,受地层层内节理的影响形成大面积的缝洞体(见图4d)。

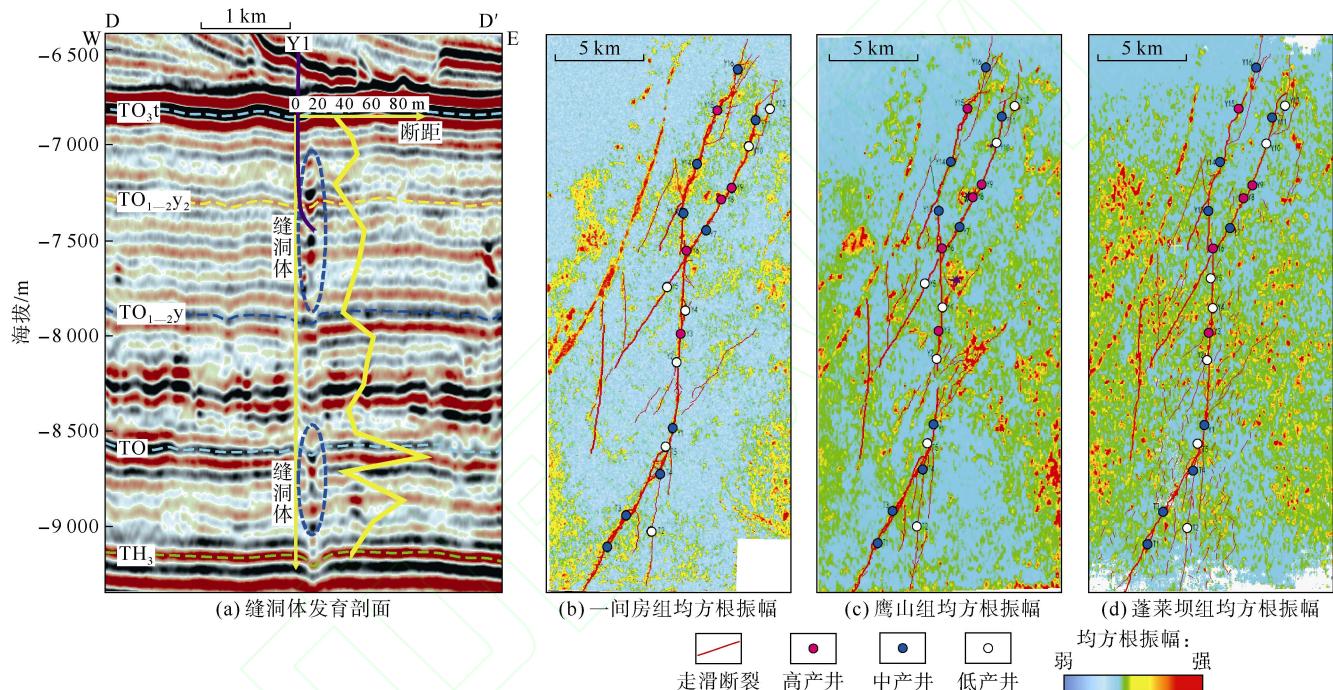


图4 塔里木盆地F19断裂带缝洞体典型剖面及不同组均方根振幅图

结合地震资料,垂向上缝洞体可以分为顶部破裂型、中部连接型、深部终止型及层内破裂型4种类型。由于走滑断裂带的复杂结构,走滑断裂的主位移带在剖面上表现为浅层单根断裂,缝洞体则表现为顶部破裂型。走滑断裂在深部和中部发育分支断裂,形成花状构造,缝洞体主要表现为中部连接型和深部终止型。由于层间节理和多种岩溶作用的存在,蓬莱坝组具有大量层内破裂型缝洞体。

2.3 超深层走滑断裂结构模式

综合野外露头资料、地震资料及超深层钻井资料,在经典走滑断裂“断层核-破碎带-原岩”三带式模型的基础上进行改进,建立了走滑断裂垂向结构模型(见图5a)。①走滑断裂带断层核内部发育断层泥、角砾岩及缝洞体,而缝洞体在断层核内存在垂向分布差异性,

受断层泥、角砾岩的影响,缝洞体也可以垂向分隔且相互不连通。②破碎带内的裂缝带除了发育X型剪节理外,还发育垂直层面的张节理和平行层面的顺层节理。原岩带内,基本保持了地层岩性特征,仅有少量裂缝发育。在塔里木盆地超深层发育的复杂走滑断裂系统内(见图5b),可以识别出走滑断裂带内多层分布的多类型缝洞体,主要分布在走滑断裂带花状构造内,主断裂带两侧、走滑断裂与地层的交界处,在垂向上具有明显的不连续性。

3 走滑断裂垂向发育过程的构造物理模拟实验

为验证走滑断裂垂向的演化规律及走滑断裂形成

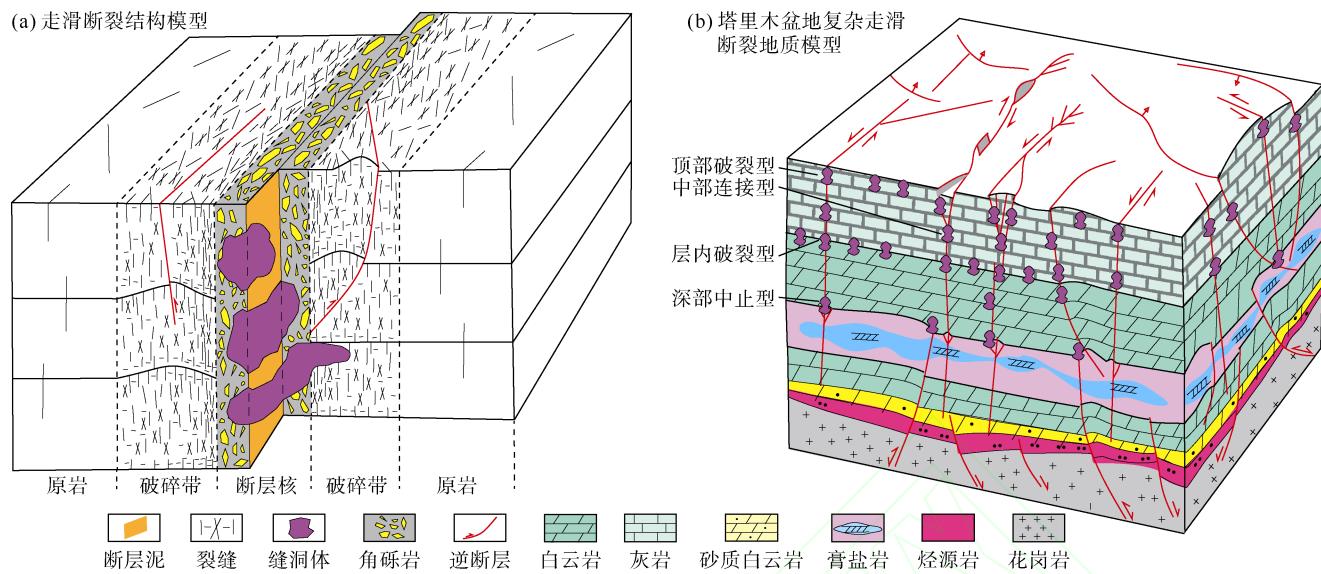


图 5 含缝洞体的走滑断裂模型

演化过程中缝洞体的分布规律，本文采用构造物理模拟方法模拟走滑断裂形成过程，同时通过 PIV 监测的方式获得实验过程中走滑断裂及两盘应力-应变的动态变化情况。通过应力-应变变化推测走滑断裂及两盘的破裂方式、缝洞体可能发育的位置及分布规律。

3.1 实验设计

3.1.1 实验方案

本文采用的物理模拟实验方法与前人采用的方法相类似，主要应用湿石英砂模拟碳酸盐岩地层，通过两块基底板的相对位移来模拟走滑断裂形成的剪切作用^[21]。由于走滑断裂形成于加里东中晚期，与碳酸盐地层沉积期相当，走滑断裂形成后经历了地层的深埋，因此本实验未增加上覆地层。与前人实验过程对比，本实验系统观察了走滑断裂在垂向上的形成演化过程，并记录了断裂生长情况及应力-应变的变化情况，可以更好地反映断裂带演化-成熟的过程。

中国石油大学（北京）克拉玛依校区构造物理模拟实验室的模拟平台主要由 3 部分组成：主控台、砂箱实验平台、PIV 监测系统。4 组实验模型①—④的初始尺寸为长 30 cm (X 方向) 宽 20 cm (Y 方向) 厚度 4 cm (Z 方向)。为了便于观察断裂的垂向破裂过程，模型四周均不设置边界条件。实验以两块 0.5 cm×20 cm×60 cm 的刚性底板作为基底（见图 6）。在电机驱动下，两块刚性底板传递动力带动上覆砂层发生位移，底板发生剪切运动模拟走滑断裂的相对滑动。当断裂垂向上演化成熟后停止运动，设计基底板位移量相对较小，为 2 cm；电机运动由计算机控制，实验过程中电机运动速率为 0.008 mm/s，实验模型①和②在两块

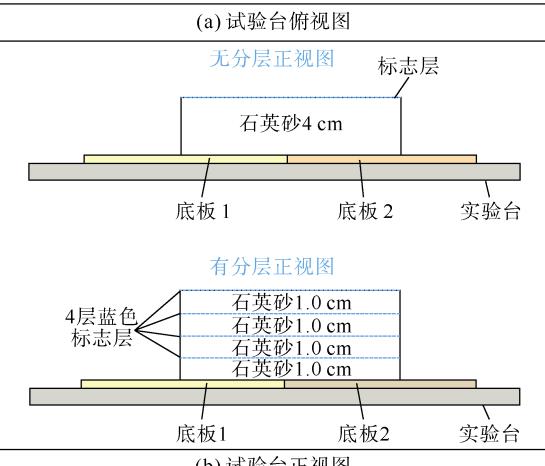
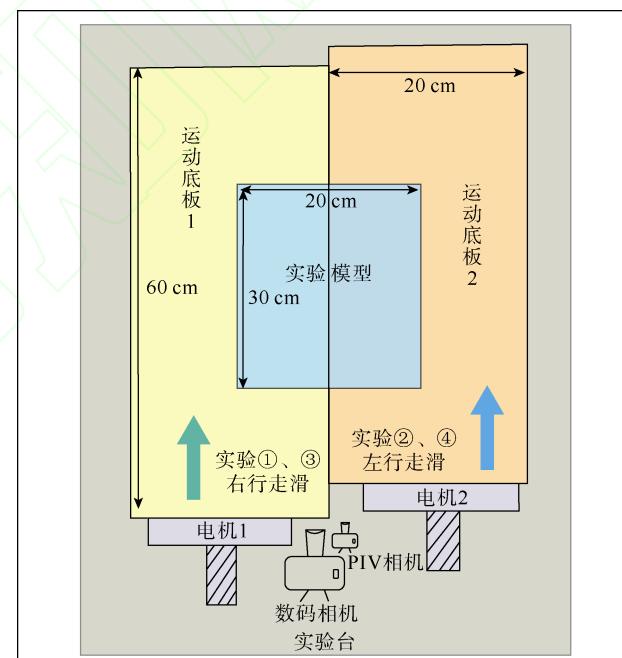


图 6 走滑断裂垂向生长构造物理模拟实验装置

底板之上铺设了4 cm厚的石英砂，未设置分层特征，分别施加右行和左行走滑作用力，实验模型①左侧底板为运动盘，右侧底板保持固定，实验模型②反之；实验模型③和④铺设了4层1 cm厚的石英砂，各层之间采用不同粒径彩色石英砂作为标志层，区分各层差异，重复实验①和②的实验过程（见图6）。

实际地质条件下，地层的含水、含油气性等有可能造成断裂带内部结构进一步复杂，但是对断裂带垂向破裂及演化过程的影响不明显^[18]；在实验过程中不同模型所用湿砂的含水量略有差异、砂层铺设不一致以及与底板之间摩擦力大小有所不同，结果存在微小的误差，本文不做具体讨论。

3.1.2 实验地质意义

实验中设置不同的断裂运动方向（左行、右行）和地层条件（无分层、分层）的地质意义如下：①左行与右行模型：塔里木盆地的走滑断裂带中，部分断裂表现为左行剪切（如塔里木盆地满加尔凹陷台盆区走滑断裂系统），而另一些断裂则为右行剪切（如F15以西走滑断裂系统）。研究左右行剪切模型有助于分析不同走滑方向对断裂几何形态和生长模式的影响。左行和右行模型可以模拟区域构造应力场对断裂缝洞体发育以及垂向生长连接的差异性。②分层与无分层模型：塔里木盆地内的地层具有分层性特征，不同地层的力学性质和岩性差异会显著影响断裂的生长。无分层模型模拟均质地层条件，可揭示走滑断裂在单一岩性条件下的生长过程，为基础研究提供参考。分层模型更贴近塔里木盆地的实际地质情况，可研究断裂在分层介质中的垂向生长模式和缝洞体连通性。③垂向生长机制研究：结合左行、右行和分层、无分层的模型，实验可以探讨不同运动方向的走滑断裂如何在垂向上生长并影响不同层位、分层地层是否阻碍或引导断裂的垂向生长。

3.2 实验过程

3.2.1 无分层条件下构造物理模拟实验过程

实验模型①的结果显示（见图7），实验过程中走滑量从0 cm增加到0.46 cm时，彩色照片可以看出剖面上未见明显形变，无断裂产生。当走滑量达到0.52 cm时，模型深部和浅部出现微弱变形，有小断裂产生。当走滑量继续增加到0.61 cm时，模型中部也开始出现破裂，此时断裂还未连接在一起，处于走滑断裂分层破裂阶段。走滑量从0.61 cm增加到0.75 cm的过程中，断裂在垂向上逐渐贯通生长连接，进入第2个演化阶段（垂向生长阶段）。随着位移量继续从0.75 cm增大，

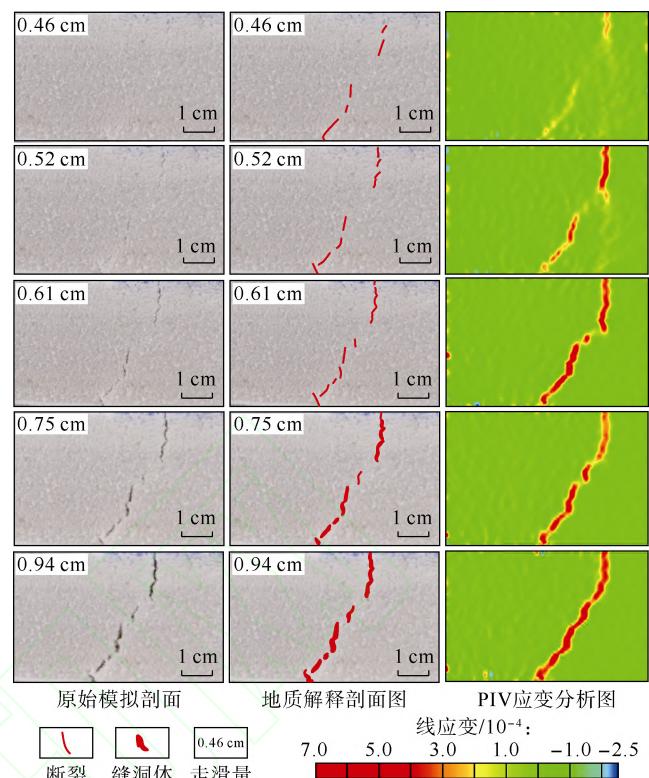


图7 无分层条件下右行走滑断裂垂向生长实验（实验①）

断裂带内部完全连通，宽度继续横向扩展，到此进入断裂带演化的第3阶段（连接扩展阶段）。受主动盘活动的影响，断裂在生长过程中向主动盘一侧倾斜。

有限剪切应变的累积过程显示，在挤压初期走滑量达到0.46 cm时，运动底板边缘和浅部有限剪切应变加强（约4%），但此时模型未见明显的断裂产生。走滑量达到0.52 cm时，深部与浅部的有限剪切应变逐渐增大（约10%），此时在应变集中的部位有明显的断裂产生。随着走滑量进一步增大达到0.75 cm时，深部与浅部的有限剪切应变集中区域发生连接，应变强度也随之增大（约20%），演化过程与断裂生长过程一致。

实验表明，发生剪切运动的初期，断裂的形成不是瞬时产生的，在深、中、浅层不同部位出现初始小断裂，断裂形成具有一定的时间间隔，从而导致不同部位变形样式存在差异。尽管这一过程发生的时间很短，但是却表明走滑断裂具有随时间推移分层破裂-连接的演化特征。

实验②为左行走滑断裂生长过程（见图8），走滑断裂发育初期，剖面上出现分层破裂，但与实验①相比，实验②先在剖面中部产生破裂，短时间内模型的深部与浅部相继有断裂产生，剖面PIV图片显示，模型首先在中部和底部产生应力应变集中，在上部主动盘一侧出现了层内应力应变集中，由于在模型顶部铺

设彩色标志层时混入部分干砂，导致浅层产生非均质性，出现了层内的微裂隙，从而使应力未集中在浅部主断裂带，在模型中部先产生破裂。断裂发育到生长连接阶段时，连接方式与实验①的直接连接也略有不同，中部与浅部断裂发生侧向连接，当断裂横向扩展后，侧向连接逐渐发育成垂向雁列式展布特征，中部与深部的断裂带内出现了断裂空腔。“垂向雁列”和“断裂空腔”的存在，导致断裂在后期横向扩展过程中形成多段缝洞体，且“缝洞体”垂向分隔特征明显，表现出软连接特征。

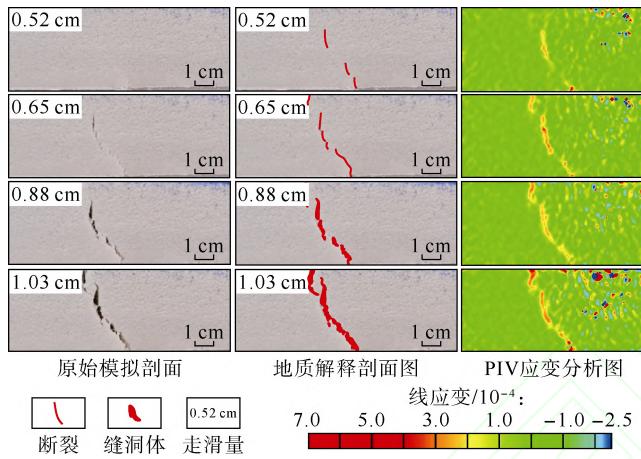


图 8 无分层条件下左行走滑断裂垂向生长实验(实验②)

实验②有限剪切应变的累积过程与实验①有所不同，首先在模型深部和中部发生应变集中，强度约为4%；走滑量为0.56 cm时，应变集中区分层发育。走滑量从0.56 cm增加到1.03 cm的过程中，有限剪应变在断裂带缝洞体发育部位最为明显，强度约20%，即“垂向雁列”和“断裂空腔”的位置应变强度较大，在断裂软连接部位应变强度较小。可以推断断裂连通性较好的部位，有限剪应变也越强。

3.2.2 分层条件下构造物理模拟实验过程

实验③和④的模型内加入了蓝色干石英砂作为标志层，其他实验条件不变。实验③在深部和浅部出现分层破裂后（见图9），经历了生长连接和断面横向扩展两个阶段，演化过程与实验①有极高的相似性。但实验③浅部与深部断裂倾角差异较大，浅部断裂较直立；中部和深部断裂倾角较实验①更小，推测存在多套地层的情况下，地层界面差异会影响深部与浅部断裂的连接情况，不同层间断裂破裂方向不同。断裂发育过程中在主动盘一侧有另一条小断裂F2形成，该断裂未与浅部断裂连接，在实际地质条件下，这种未与浅部断裂贯通连接的裂缝可能作为深层油气良好的储

集空间，对超深层走滑断裂油气藏的勘探具有启发意义。实验④断裂（见图10）与实验③形成和演化过程相似，都率先在深部与浅部形成断裂，最后逐渐生长连接；由于标志层的影响，断裂出现了顺层发育现象，且底部出现了明显的滑脱现象。该实验结果与野外观测露头（见图1）具有高度一致性，25与26号地层界面处也形成了明显的顺层破裂。实验③、④和实验①、②的结果差异是由于将不同粒径、不同湿度的石英砂作为标志层，影响了不同地层之间应力应变的产生和传递，使走滑断裂的垂向连接情况和演化过程发生改变。

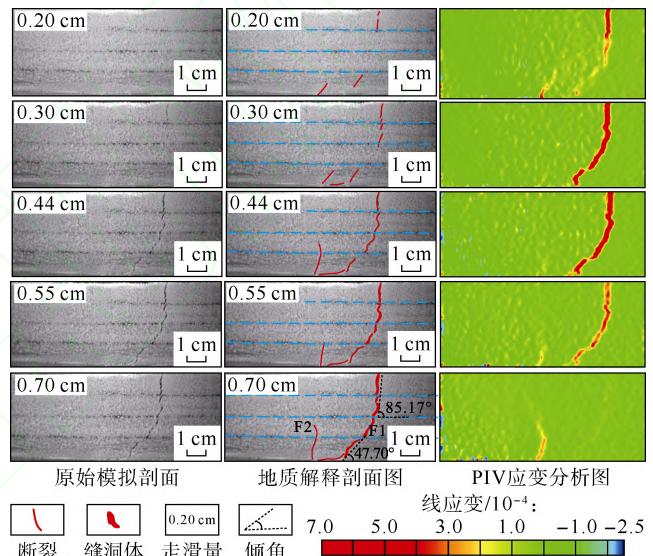


图 9 分层条件下右行走滑断裂垂向生长实验(实验③)

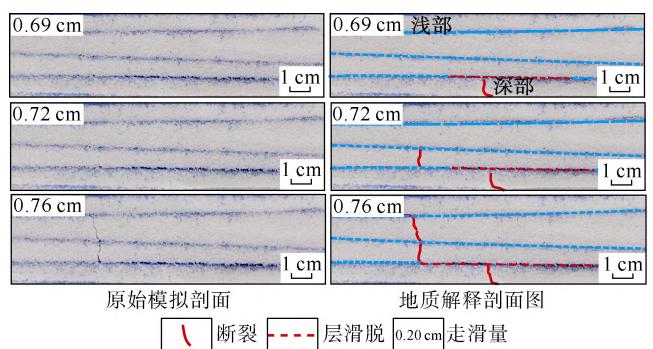


图 10 分层条件下左行走滑断裂垂向生长实验(实验④)

实验③有限剪切应变的累积过程首先在模型深部和浅部出现垂向有限剪切应变，走滑量为0.20 cm时浅部应变强度（约10%）大于深部，这与剖面上模型浅部断裂宽度明显强于深部相一致。走滑量达到0.44 cm时断裂生长链接，此时应变强度达到最大（约20%）。走滑量从0.44 cm增加到0.70 cm的过程中，主断裂的

变形不够明显, 应变强度逐渐减小, 左侧的小断裂F2逐渐发育, 此时剖面上的应变集中已经从主断裂F1转移到左侧小断裂F2。

3.3 实验定量分析(增加缝洞体出现的定量分析)

通过对实验①和②中的断裂在不同发育阶段不同深度的断裂宽度、长度和倾角进行定量统计分析, 对

比在不同阶段不同深度下的断裂垂向发育特征。测量结果表明, 断裂长度和宽度随着位移量呈线性增加(见图11)。尽管初始断裂出现的部位有所不同, 但最终形成的断裂规模约是初始断裂的2倍。同时在不同深度上断裂的长度和宽度具有较大变化和差异性, 表现出分层差异生长的特征。

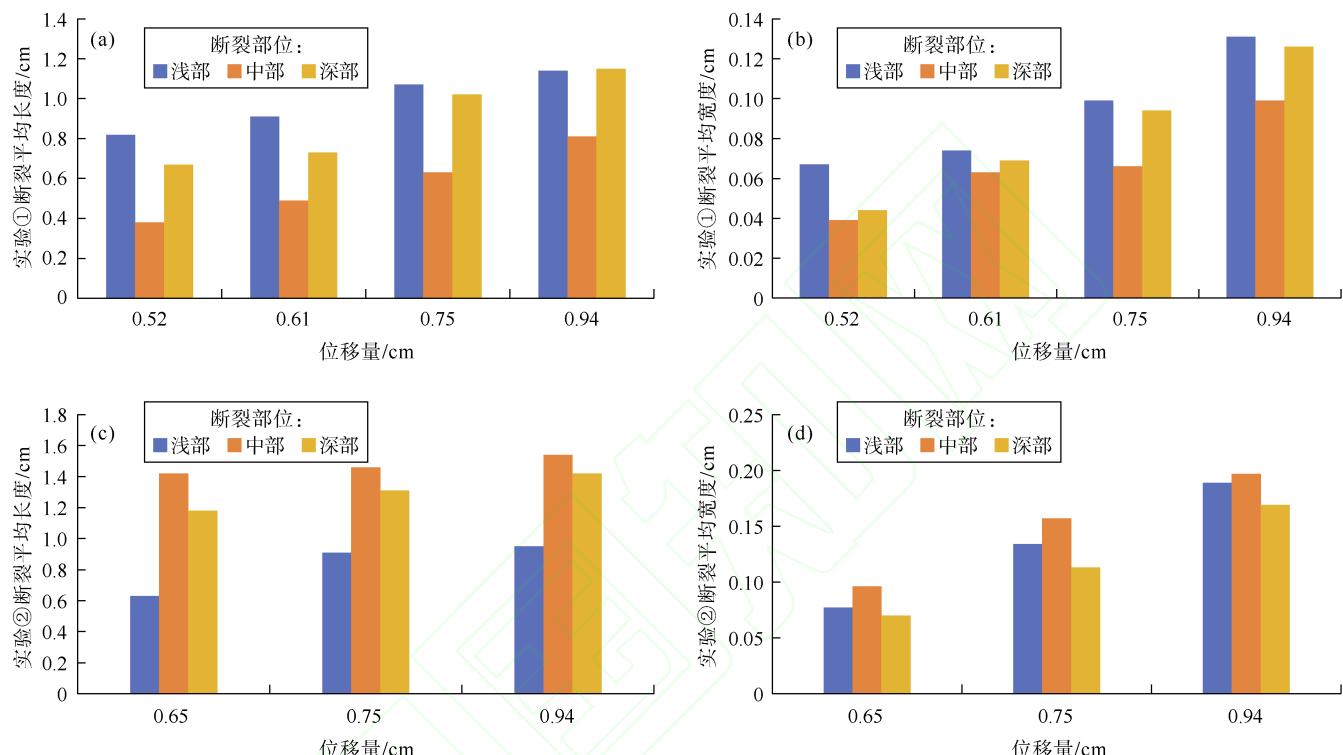


图11 实验①和②中不同深度断裂长度及宽度随位移量变化趋势

实验结果还表明, 断裂的倾角随深度的增加而减小。在模型深部, 一般断裂的倾角约45°; 在模型中部, 断

裂倾角继续增大到60°~70°; 到模型浅部, 倾角开始快速增大到近乎直立状态, 夹角大多大于80°(见表1)。

表1 走滑断裂垂向生长构造物理模拟实验数据分析

实验① 浅部					实验① 中部					实验① 深部				
位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)	位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)	位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)
0.52	0.067	0.82	12.24	79.16	0.52	0.039	0.38	9.74	76.91	0.52	0.044	0.67	15.20	46.59
0.61	0.074	0.91	12.30	81.96	0.61	0.063	0.49	7.78	81.04	0.61	0.069	0.73	10.57	47.51
0.75	0.099	1.07	10.81	84.04	0.75	0.066	0.63	9.54	74.31	0.75	0.094	1.02	10.85	47.49
0.94	0.131	1.14	8.70	81.97	0.94	0.099	0.81	8.18	78.61	0.94	0.126	1.15	9.12	53.28
实验② 浅部					实验② 中部					实验② 深部				
位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)	位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)	位移量/cm	宽度/cm	长度/cm	长宽比	角度/(°)
0.65	0.077	0.63	8.18	86.84	0.65	0.096	1.42	14.79	63.6	0.65	0.070	1.18	16.86	48.78
0.88	0.134	0.91	6.79	87.75	0.88	0.157	1.46	9.29	68.5	0.88	0.113	1.31	11.59	46.82
1.03	0.189	0.95	5.03	87.40	1.03	0.197	1.54	7.82	68.2	1.03	0.169	1.42	8.40	49.30

在实际地质条件下, 碳酸盐岩储层中缝和洞没有严格的定义区分, 形态上裂缝一般长宽比大于10^[29]。

为了描述缝洞体出现的规律, 将缝洞体定义为长宽比小于10的断裂。通过计算断裂长宽比不难看出, 随着

位移量的增加，不同部位断裂长宽比基本呈现减小的趋势，说明缝洞体发育规模逐渐增大（见表1）。实验①和②在连接扩展阶段，断裂长宽比均小于10，缝洞体发育；在垂向生长阶段，实验①的中部和实验②的中浅部缝洞体规模较大；而在分层破裂阶段，断裂长宽比大部分都大于10，剖面上也未见缝洞体发育。由此可见，走滑断裂带缝洞体主要发育在走滑断裂演化过程的中后期。

3.4 实验结论

通过走滑断裂垂向生长构造物理模拟实验，建立了分层破裂-垂向生长-连接扩展3个阶段演化模型（见图12）。

分层破裂阶段：走滑断裂初始破裂呈现垂向分层性，不同层位破裂存在时间差。在无分层实验时，断裂优先从深部和浅部或中部启动，在扩展至整个模型，这种差异可能受模型非均质性（如杂砂混入）影响。分层条件下，标志层导致应力分布差异，破裂多从深部与浅部同时启动，且受地层界面控制出现顺层滑脱或倾角变化。

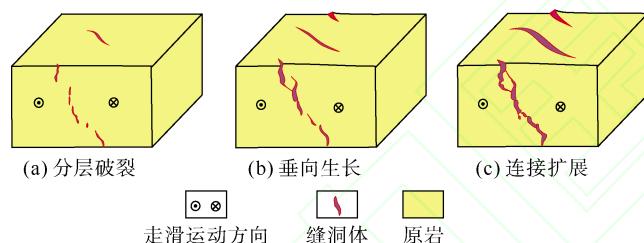


图12 走滑断裂垂向生长过程模式图

垂向生长阶段：分层破裂的断裂通过垂向或侧向生长逐渐连接。实验①中断裂垂向直接贯通，形成连续主断裂带。实验②断裂通过“垂向雁列”侧向连接，中部与深部断裂带内形成断裂空腔，垂向连通性较差。分层条件下，浅部断裂倾角更直立，深部倾角减小（ $45^\circ \sim 60^\circ$ ），标志层界面处断裂顺层扩展，导致滑脱或未连接次级裂缝（如F2）。此阶段缝洞体开始发育，断裂长宽比随位移量增加呈减小趋势（见表2），缝洞体（长宽比小于10）主要在中后期形成，集中于断裂连接部位（如“雁列”空腔或主断裂带）。

连接扩展阶段：断裂完全连通后，横向扩展主导演化，形成规模化的缝洞系统。断裂带宽度与长度线性增长。“断裂空腔”垂向叠置，后期扩展形成“缝洞体”，空腔连通性增强但保留垂向分隔特征。

总的来说，岩石物性差异和位移量累积是3个演化阶段的关键控制因素。在地层界面处，由于岩石物性差异可能导致断裂顺层发育，使地层界面处破碎程度高于其他部位。标志层或非均质层导致应力传递路径改变，影响断裂倾角、连接方式及顺层滑脱。断裂宽度、长度与缝洞体规模均随位移量线性增加，长宽比减小反映缝洞体规模增大。走滑断裂带垂向分层段破裂与连接过程，可形成复杂缝洞网络，为深层油气储集提供有利空间。

4 超深层走滑断裂缝洞体特征及勘探潜力

塔里木盆地内部广泛发育中小尺度滑移距走滑断裂，走滑断裂普遍具有“纵向分层，平面分段，垂向多期叠加”的空间结构特征。本文的研究结果与塔里木台盆区富满地区超深层走滑断裂缝洞体发育特征相匹配，建立了适用于超深层走滑断裂带的走滑断裂垂向演化模型，明确了缝洞体发育类型。对于其他盆地走滑断裂研究也具有重要的参考意义^[30-32]。

富满油田F19走滑断裂带缝洞体发育明显，在剖面上（见图4a），缝洞体垂直于走滑断裂呈“串珠状”发育，在平面上（见图4b—4d），缝洞体呈斑点状或沿走滑断裂带呈条带状分布。广泛发育的缝洞体为油气的储集提供了有利空间，油气资源勘探潜力巨大。

F19走滑断裂带断控缝洞型油藏主要分为3类油藏，一类是Y9井和Y8井钻遇的花状破碎型油藏、二类是Y6井钻遇的深大断裂型油藏、三类是Y5井钻遇的错断叠接型油藏（见图13）。其中花状破碎型油藏和深大断裂型油藏断裂连通性更好，有利储集空间更大，油气聚集更多，油藏规模和勘探潜力更大，而错断叠接型油藏连通性相对于前两类油藏较差，有利储集空间相对局限，油藏规模较小，勘探潜力有限。从生产井数据就可看出（见表2），钻遇花状破碎缝洞型油藏的Y9井、Y8井以及钻遇深大断裂缝洞型油藏的Y6井皆是高产井，压降产液量分别为6 246.15, 7 287.74, 5 218.85 t/MPa。

研究表明超深层仍具有发育缝洞体的条件，且超深层缝洞体更接近油源，如果有较好的分隔条件也可以富集成藏。目前油田勘探主要集中在鹰山组1—2段，深部鹰山组3—4段及蓬莱坝组内也发育串珠和层内断裂，具有较大的勘探潜力，是下一步勘探的重点。

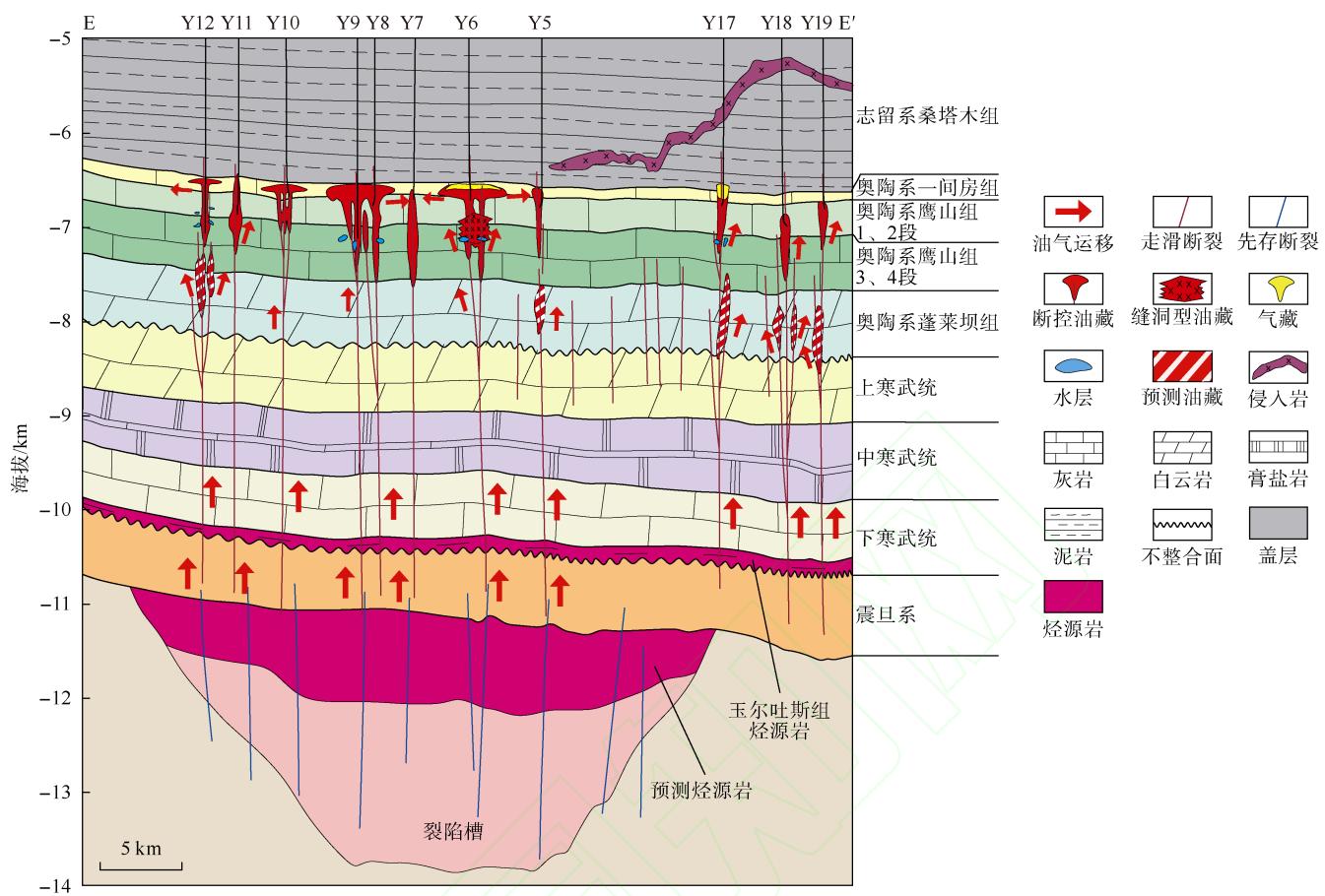


图 13 F19 走滑断裂带油藏剖面(剖面位置见图 3a)

表 2 富满油田 F19 走滑断裂带典型井数据统计表

井名	平均日产液/(t·d ⁻¹)	平均日产油/(t·d ⁻¹)	平均日产气/(m ³ ·d ⁻¹)	含水率/%	气油比/(m ³ ·d ⁻¹)	压降产液量/(t·MPa ⁻¹)	井类型	井评价
Y17	47.50	46.67	23 542	1.75	504.48	270.43	工业油流井	低产井
Y12	44.27	43.07	15 801	2.72	366.89	98.76	工业油流井	低产井
Y11	48.84	48.27	16 241	1.18	336.47	541.92	工业油流井	中产井
Y10	64.27	63.49	21 588	1.21	340.01	225.32	工业油流井	低产井
Y9	84.00	83.26	21 876	0.88	262.74	6 246.15	工业油流井	高产井
Y8	91.51	90.33	29 309	1.29	324.47	7 287.74	工业油流井	高产井
Y7	94.81	93.86	34 216	1.00	364.54	94.81	工业油流井	低产井
Y6	88.01	86.67	43 522	1.52	502.15	5 218.85	工业油流井	高产井

注: 高产井压降产液量大于 2 000 t/MPa; 中产井压降产液量 500~2 000 t/MPa; 低产井压降产液量小于 500 t/MPa

5 结论

本文揭示了塔里木盆地超深层走滑断裂垂向演化过程及其对缝洞体发育的控制机制, 主要有以下几方面认识。

走滑断裂带内部发育断层核-破碎带-原岩三层结构, 断层核在垂向上可细划为缝洞体、裂隙带及角砾岩带 3 种结构。

走滑断裂垂向生长过程可以划分为分层破裂—垂向生长—连接扩展 3 阶段演化规律。分层破裂阶段:

在垂向上地层内形成多段破裂区, 受地层差异影响, 深浅层分段断裂出现的次序不同。纵向生长阶段: 分层破裂通过垂向或侧向连接形成主断裂带, 形成断层空腔; 断裂沿地层界面发生滑脱。连接扩展阶段: 断裂完全连通后横向扩展, 形成缝洞。实验数据显示, 断裂宽度、长度与缝洞体规模随位移量线性增长, 长宽比减小反映缝洞体规模增大。

超深层缝洞体分为 4 类: 顶部破裂型(浅部直立断裂)、中部连接型(花状构造分支断裂)、深部终止型(断裂垂向未贯通部位)、层内破裂型(地层内节理

与岩溶作用叠加)。

花状破碎型与深大断裂型缝洞体连通性好、储集空间大，勘探潜力大；错断叠接型因连通性差，油气运移受影响，勘探风险较高，需进一步加强油气运移路径研究。

参考文献：

- [1] 王清华. 塔里木盆地 17 号走滑断裂带北段差异变形与演化特征[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1136-1145.
WANG Qinghua. Differential deformation and evolution characteristics of the no.17 strike-slip fault zone in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1136-1145.
- [2] 张银涛, 陈石, 刘强, 等. 塔里木盆地富满油田 F119 断裂发育特征及演化模式[J]. 现代地质, 2023, 37(2): 283-295.
ZHANG Yintao, CHEN Shi, LIU Qiang, et al. Development characteristics and evolution model of F119 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(2): 283-295.
- [3] 刘强, 张银涛, 陈石, 等. 塔里木盆地走滑断裂发育演化特征精细解析及其地质意义：以富满油田 F117 断裂为例[J]. 现代地质, 2023, 37(5): 1123-1135.
LIU Qiang, ZHANG Yintao, CHEN Shi, et al. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its geological significance: A case study of F117 fault in Fuman Oilfield[J]. Geoscience, 2023, 37(5): 1123-1135.
- [4] 张水昌, 王华建, 苏劲, 等. 地球系统演化对中国海相超深层油气形成与富集的控制作用[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 759-773.
ZHANG Shuichang, WANG Huajian, SU Jin, et al. Control of earth system evolution on the formation and enrichment of marine ultra-deep petroleum in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 759-773.
- [5] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(4): 58-71.
WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4): 58-71.
- [6] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 971-985.
TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971-985.
- [7] 王清华. 塔里木盆地富满油田凝析气藏成因[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1128-1139.
WANG Qinghua. Origin of gas condensate reservoir in Fuman Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1128-1139.
- [8] 能源, 邬光辉, 黄少英, 等. 再论塔里木盆地古隆起的形成期与主控因素[J]. 天然气工业, 2016, 36(4): 27-34.
NENG Yuan, WU Guanghui, HUANG Shaoying, et al. Formation stage and controlling factors of the paleo-uplifts in the Tarim Basin: A further discussion[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(4): 27-34.
- [9] 王铁冠, 宋到福, 李美俊, 等. 塔里木盆地顺南-古城地区奥陶系鹰山组天然气气源与深层天然气勘探前景[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 753-762.
WANG Tieguan, SONG Daofu, LI Meijun, et al. Natural gas source and deep gas exploration potential of the Ordovician Yingshan Formation in the Shunnan-Gucheng region, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 753-762.
- [10] 汪如军, 王轩, 邓兴梁, 等. 走滑断裂对碳酸盐岩储层和油气藏的控制作用：以塔里木盆地北部坳陷为例[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 10-20.
WANG Rujun, WANG Xuan, DENG Xingliang, et al. Control effect of strike-slip faults on carbonate reservoirs and hydrocarbon accumulation: A case study of the northern depression in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 10-20.
- [11] 邓尚, 李慧莉, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂中段活动特征及其地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(5): 990-998.
DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990-998.
- [12] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878-888.
DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878-888.
- [13] 能源, 杨海军, 邓兴梁. 塔中古隆起碳酸盐岩断裂破碎带构造样式及其石油地质意义[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(1): 40-50.
NENG Yuan, YANG Haijun, DENG Xingliang. Structural patterns of fault broken zones in carbonate rocks and their influences on petroleum accumulation in Tazhong Paleo-uplift, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(1): 40-50.
- [14] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38-51.
QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuogule uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38-51.
- [15] 况安鹏, 余一欣, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北地区 11 号走滑断裂带变形及其活动特征[J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1809-1817.
KUANG Anpeng, YU Yixin, ZHU Xiuxiang, et al. Deformation and activity characteristics of the No. 11 strike-slip fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2021, 35(6): 1809-1817.
- [16] 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂带形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(3): 510-520.
WU Guanghui, MA Bingshan, HAN Jianfa, et al. Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(3): 510-520.
- [17] WANG Z Y, GAO Z Q, FAN T L, et al. Structural characterization and hydrocarbon prediction for the SB5M strike-slip fault zone in the Shuntuo Low Uplift, Tarim Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 117: 104418.

- [18] 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.
- [19] CLOOS H. Experimente zur inneren tektonik[J]. *Zentralblatt für Mineralogie, Geologie und Paläontologie Abhandlungen B*, 1928(12): 609-621.
- [20] 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.
- [21] 肖阳, 邬光辉, 雷永良, 等. 走滑断裂带贯穿过程与发育模式的物理模拟[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(3): 340-348.
XIAO Yang, WU Guanghui, LEI Yongliang, et al. Analogue modeling of through-going process and development pattern of strike-slip fault zone[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(3): 340-348.
- [22] NENG Y, LI Y, QI J F, et al. Deformation styles and multi-stage evolution history of a large intraplate strike-slip fault system in a Paleozoic superimposed basin: A case study from the Tarim Basin, NW China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 837354.
- [23] HAN X Y, DENG S, TANG L J, et al. Geometry, kinematics and displacement characteristics of strike-slip faults in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin: A study based on 3D seismic data[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2017, 88: 410-427.
- [24] LI M J, WANG T G, CHEN J F, et al. Paleo-heat flow evolution of the Tabei Uplift in Tarim Basin, northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37(1): 52-66.
- [25] 侯少勇, 段霈泽, 赫庆庆, 等. 富满油田超深碳酸盐岩油气藏走滑断裂带有利储层发育区研究[J]. *海洋石油*, 2023, 43(1): 10-15.
HOU Shaoyong, DUAN Peize, HE Qingqing, et al. Study on the favorable reservoir area of strike-slip fault zone of ultra-deep carbonate reservoir in Fuman Oilfield[J]. *Offshore Oil*, 2023, 43(1): 10-15.
- [26] CHEN S, ZHANG Y T, XIE Z, et al. Multi-stages of Paleozoic deformation of the fault system in the Tazhong Uplift, Tarim Basin, NW China: Implications for hydrocarbon accumulation[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2024, 265: 106086.
- [27] 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 47-58.
WANG Qinghua, YANG Haijun, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 47-58.
- [28] 倪新锋, 沈安江, 乔占峰, 等. 塔里木盆地奥陶系缝洞型碳酸盐岩岩溶储层成因及勘探启示[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(2): 144-158.
NI Xinfeng, SHEN Anjiang, QIAO Zhanfeng, et al. Genesis and exploration enlightenment of Ordovician fracture-vuggy carbonate karst reservoirs in Tarim Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(2): 144-158.
- [29] 王小垚, 曾联波, 魏荷花, 等. 碳酸盐岩储层缝洞储集体研究进展[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(8): 818-832.
WANG Xiaoyao, ZENG Lianbo, WEI Hehua, et al. Research progress of the fractured-vuggy reservoir zones in carbonate reservoir[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(8): 818-832.
- [30] 马兵山, 梁瀚, 邬光辉, 等. 四川盆地中部地区多期次走滑断层的形成及演化[J]. *石油勘探与开发*, 2023, 50(2): 333-345.
MA Bingshan, LIANG Han, WU Guanghui, et al. Formation and evolution of the strike-slip faults in the central Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2023, 50(2): 333-345.
- [31] 何登发. 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[J]. *地学前缘*, 2022, 29(6): 24-59.
HE Dengfa. Multi-cycle superimposed sedimentary basins in China: Formation, evolution, geologic framework and hydro-carbon occurrence[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 24-59.
- [32] 唐大卿, 陈红汉, 耿锋, 等. 板内小位移走滑断裂特征解析: 以塔里木、四川及鄂尔多斯盆地为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2067-2086.
TANG Daqing, CHEN Honghan, GENG Feng, et al. Characteristics of intraplate small-displacement strike-slip faults: A case study of Tarim, Sichuan and Ordos basins[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2067-2086.

第一作者简介: 能源 (1982-), 男, 黑龙江大庆人, 博士, 中国石油大学(北京)地球科学学院教授, 主要从事构造地质学、油区构造解析、构造物理模拟等研究。地址: 北京市昌平区府学路号, 中国石油大学(北京)地球科学学院, 邮政编码: 102249。E-mail: nengyuan@cup.edu.cn

收稿日期: 2024-10-17 修回日期: 2025-08-28

(编辑 衣英杰)