

邵龙飞, 能源, 阮畦畦, 刘根骥, 张佳楠, 田志文. 2025. 克拉通盆地内部走滑断裂差异变形模拟及油气地质意义: 以塔里木盆地F₁19走滑断裂带为例. 地质科学, 60(5): 1242-1258. DOI: 10.12017/dzgx.2025.082. CSTR: 32087.14.2025.dzgx.082.

Shao Longfei, Neng Yuan, Ruan Qiqi, Liu Genji, Zhang Jia'nan, Tian Zhiwen. 2025. Simulation of differential deformation of internal strike-slip faults in the cratonic basin and its significance for oil and gas geology: An example of the F₁19 strike-slip fault zone in the Tarim Basin. Chinese Journal of Geology, 60(5): 1242-1258. DOI: 10.12017/dzgx.2025.082. CSTR: 32087.14.2025.dzgx.082.

克拉通盆地内部走滑断裂差异变形模拟及油气地质意义: 以塔里木盆地F₁19走滑断裂带为例*

邵龙飞¹ 能源² 阮畦畦² 刘根骥¹ 张佳楠¹ 田志文¹

(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)

摘要 塔里木克拉通盆地F₁19走滑断裂带是富满油田近年来增储上产的重点勘探新区块, 其斜向“丰”字交切型平面展布特征形成机制不清; 同时, 作为超深层走滑断裂带, 其成藏模式复杂, 井产差异较大, 影响因素未能明确, 制约着下一步勘探部署与决策。本文通过三维地震资料精细解释, 识别出F₁19走滑断裂带3条北东向主干断裂及1条南北向主干断裂, 划分了辫状、双重、羽状及马尾状平面分段样式; 通过构造物理模拟手段明确了F₁19走滑断裂带的形成机制, 是由早期3条北东向断裂被晚期南北向断裂切割所致; 结合区域应力背景建立了早-中寒武世北东向走滑雁列发育、晚寒武—早奥陶世南北向走滑初始发育、中奥陶世南北向走滑生长连接、晚奥陶世火成岩侵入和志留纪局部雁列地堑发育5大阶段演化模式; 最后通过结合井产数据建立油藏剖面分析指出, 克拉通盆地内部超深层走滑断裂平面分段、纵向分层差异变形控制了储层发育规模及油气运聚效应, 强活动叠接区储层发育规模大, 为重点油气勘探区, 具有“下生上储、断裂运聚和泥盖封堵”的成藏模式。深部玉尔吐斯组烃源岩提供油气源, 直立和分支走滑断层控制了油气垂向、斜向运移和聚集层位, 浅部泥岩盖层的完整性决定了盖层对于油气的封堵能力, 同时拥有良好的“生—储—盖”组合的油藏潜力最大。

关键词 克拉通盆地 塔里木盆地 F₁19走滑断裂带 差异变形 物理模拟 油气成藏

中图分类号: P542, P618.130.2

文献标识码: A

文章编号: 0563-5020(2025)05-1242-17

Simulation of differential deformation of internal strike-slip faults in the cratonic basin and its significance for oil and gas geology: An example of the F₁19 strike-slip fault zone in the Tarim Basin

Shao Longfei¹ Neng Yuan² Ruan Qiqi² Liu Genji¹ Zhang Jia'nan¹ Tian Zhiwen¹

(1. School of Earth Sciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249;

2. Karamay Campus, China University of Petroleum (Beijing), Karamay, Xinjiang 834000)

Abstract The F₁19 slip fault zone in Tarim Basin is the key exploration block of Fuman oilfield in recent years to increase reserves and production. However, its oblique “Feng”-shaped cross-cutting planar spreading characteristics are difficult to clarify its formation mechanism. And as an ultra-deep slip fault zone, its complex formation process, highly variable well productivity, and unclear controlling factors have constrained further exploration planning and decision-making. In this paper, three NE-trending main faults and one N-S-trending main fault of F₁19 strike-slip fault zone are identified by fine interpretation of three-dimensional seismic data, and

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42362026)和新疆维吾尔自治区重点研发专项(编号: 2024B01015)资助

本文作者: 邵龙飞, 男, 1996年生, 博士, 地质工程专业。E-mail: 569504887@qq.com

能源, 男, 1982年生, 教授, 构造地质学专业。本文通讯作者。E-mail: nengyuan@cupk.edu.cn

收稿日期: 2025-05-26, 修回日期: 2025-06-27

braided, double, pinnate and horsetail plane segmentation patterns are divided. By means of structural physical simulation, the formation mechanism of F₁₉ strike-slip fault zone is clarified, which is caused by the truncating of three early NE-trending faults by the late NS-trending faults. Combined with the regional stress background, the five major stages of the evolution model are established: Early-Middle Cambrian NE-trending strike-slip development, Late Cambrian-Early Ordovician initial development of NS-trending strike-slip, Middle Ordovician NS-trending strike-slip growth connection, Late Ordovician igneous intrusion, and Silurian localization of the development of strike-slip graben stage. Finally, through the establishment of reservoir profile and analysis of well production data, it is concluded that the plane segmentation and vertical layering difference deformation of ultra-deep strike-slip fractures in the cratonic basin control the scale of reservoir development and hydrocarbon transportation and gathering effect. The strong activity stacking area has the largest scale of reservoir development, which should be the key oil and gas exploration area, and the hydrocarbons have the mode of formation and reservoir development, which is “undergrowth and upgrowth storage, fracture transportation and mud cap seal”, and the oil and gas have the mode of formation and storage. The oil and gas have the model of “down-generation and up-storage, fracture transportation and blocking of mud cap”. The hydrocarbon source rock of deep Yuertusi Formation provides the oil and gas source. The vertical and branching strike-slip faults control the vertical and diagonal transportation paths of the oil and gas, and the integrity of shallow mudstone cover determines the blocking ability of cover for the oil and gas. At the same time, the reservoir potential of having a good combination of “production-storage-cover” is the greatest. The potential of reservoirs with a good combination of “production-reservoir-cover” is the largest.

Keywords Cratonic basin, Tarim Basin, F₁₉ strike-slip fault zone, Differential deformation, Physical simulation, Hydrocarbon formation

克拉通盆地是发育在稳定古老陆核之上的沉积盆地，通常具有长期稳定沉降、巨厚沉积层序和丰富的油气资源(何登发, 1996; 金之钧和谢方克, 2002)。国内大型克拉通盆地有塔里木盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地，国外有北美的密歇根盆地、澳洲的卡那封盆地、东西伯利亚盆地以及非洲的乍得盆地等(贾承造, 1999; 谢方克和蔡忠贤, 2003)。中国的塔里木、鄂尔多斯等盆地因后期构造叠加而复杂化，而北美、西伯利亚等克拉通盆地则更接近经典模式(谢方克和蔡忠贤, 2003)。这些盆地不仅是研究大陆演化的关键窗口，更是油气勘探的重点目标(何登发, 1996)。其中，塔里木盆地作为中国最大的内陆盆地，具有克拉通盆地的典型特征(贾承造和魏国齐, 2002; 张光亚等, 2002)。近年在其超深层(大于7 500 m)油气勘探领域不断突破，尤其是以位于北部凹陷区域的富满油田为先驱，位于富满油田地区的世界第二口陆上万米超深科探井——深地塔科1井成功完钻的探索下，在万米之深发现了油气显示，引领了我国超深层油气勘探与开发(王春

生等, 2024)。富满油田先后勘探识别了F₁₅、F₁₆、F₁₇和F₂₀等多条富油气大型走滑断裂带(陈平等, 2023; 刘强等, 2023; 宋兴国等, 2023)，发现石油地质储量达 4×10^8 t，石油资源量达 10×10^8 t，开发高效井多，快速建成了原油产量达 160×10^4 t/a的产能(田军等, 2021a)。随着F₁₅、F₁₇等大型走滑断裂带逐年的勘探与开发程度越来越高，富满油田的产能遇到了瓶颈，因此勘探重点转移到了一些相对小型的诸如F₁₉走滑断裂带上，其不属于常规克拉通盆地线型或弧形走滑断裂展布形态，而形如倾斜的“丰”字。前人针对F₁₉走滑断裂带仅做了基础构造解释，精度不够，对其展布形态未能充分识别与解析，且对其形成机制更是探讨不足，虽对其储层进行刻画与建模，但未能揭示其油气成藏规律(张银涛等, 2023; 丁留洋等, 2025; 刘冰雷等, 2025a)。这些未能解决的难题制约着F₁₉走滑断裂带储量单元划分以及勘探部署决策。本文通过三维地震资料小道距精细解释和物理模拟实验研究，建立了F₁₉走滑断裂带平面分段精细结构样式和立体演

化模式，揭示了其成因机制，并通过结合井产数据与油气成藏建模分析，得出了其走滑断裂控藏机制，对克拉通超深层走滑断裂型油气藏勘探具有指导借鉴意义。

1 区域地质概况

塔里木克拉通盆地是一个大型复合叠合盆地，

由古生代克拉通盆地和中、新生代前陆盆地叠加而成，其地层结构完整，沉积厚度大，从南华系到第四系均有发育，具有丰富的油气资源(杨海军等，2020；田军等，2021b)。盆地主要由“三隆四坳”组成，即塔北、中央和东南3大隆起，库车、北部、西南及东南4大坳陷(图1a)。该盆地经历了前寒武纪克拉通基底形成、南华—震旦纪

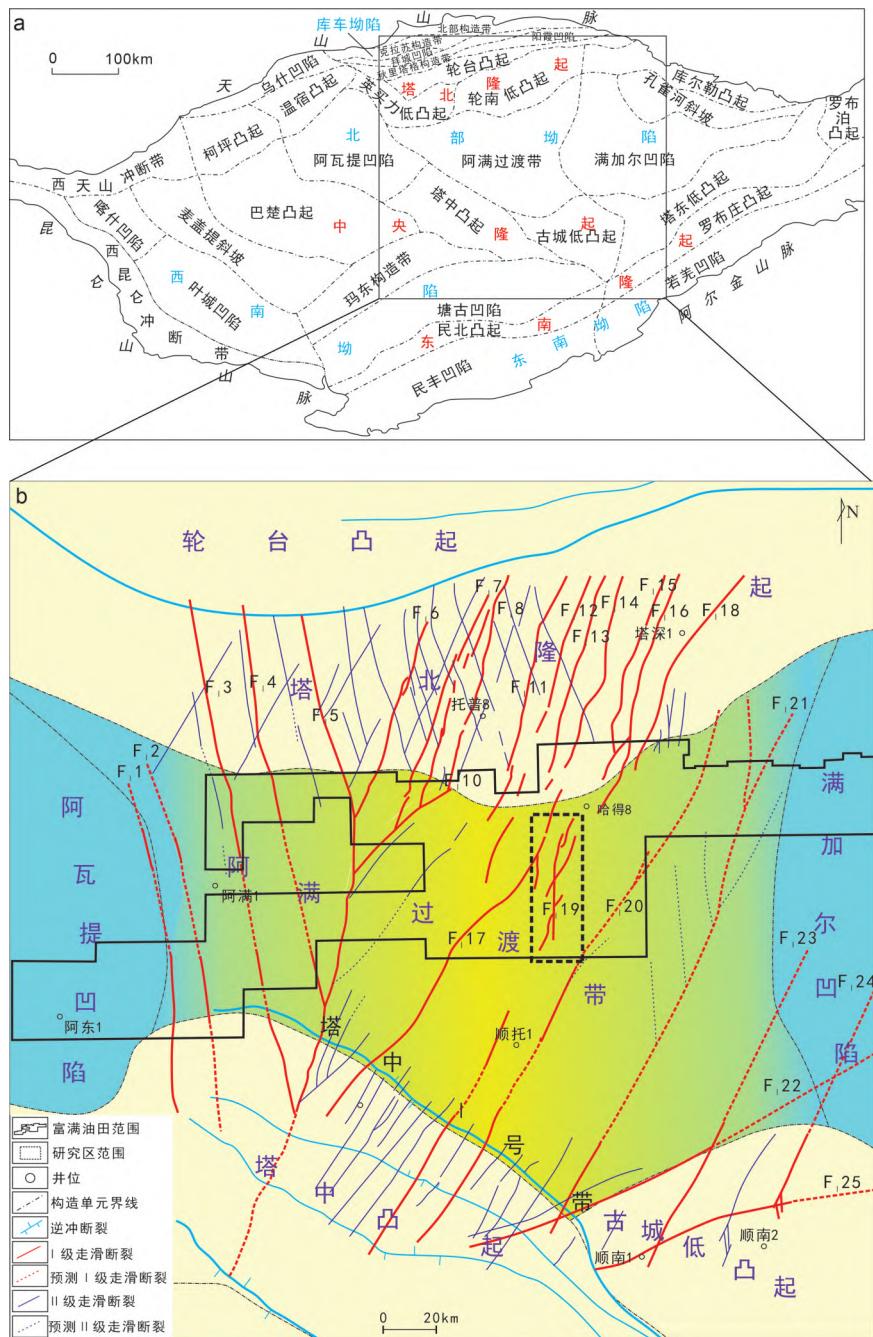


图 1 富满油田区域构造位置及邻区下古界主要断裂分布(断裂展布据张银涛等, 2023)

Fig. 1 Regional tectonic location of the Fuman oilfield and the distribution of major fractures in the Lower Paleozoic in neighboring areas
(fault distribution after Zhang et al., 2023)

强伸展挤压、寒武—奥陶纪弱伸展、志留—白垩纪升降以及新生代弱伸展—强挤压等演化阶段(邬光辉等, 2020; Xia et al., 2023)。盆地的油气资源具有海相与陆相油气藏并存(张光亚等, 2002)、多套烃源岩与储盖组合(贾承造和魏国齐, 2002)及多层次多期次成藏(张光亚等, 2002, 2007; 杨率等, 2022)等特点。塔里木克拉通内部走滑断裂系统主要分布于塔北隆起、塔中隆起及阿满过渡带, 目前已识别出Ⅰ级走滑断裂25条, Ⅱ级走滑断裂45条, 具有显著的平面分段性和纵向分层性特征, 断裂走向以NE、NNE和NNW向为主(王清华等, 2021; 张银涛等, 2024)。塔里木克拉通内走滑断裂对下古生界海相碳酸盐岩油气分布的控制作用表现为多尺度、差异化的特征, 断裂系统通过垂向疏导和储层改造形成纵向复式聚集模式, 断裂带内缝洞体发育主导油气富集(邬光辉等, 2012; 漆家福等, 2024)。在时空差异上, 加里东期与海西期断裂活动的强度差异导致烃源沟通与油气调整的分化, 而断裂带横向物性变化(如位移量、破碎带宽度)进一步造成油气分布的区段性, 这些凸显出走滑断裂—储层的耦合效应对油气成藏的关键控制作用(李曰俊等, 2008; 刘雨晴等, 2023)。

研究区F₁19走滑断裂带位于塔里木盆地近东北部的阿满过渡带富满油田中, 富满油田位于塔中、塔北两大含油气区之间(梁鑫鑫等, 2025), 是我国目前油气资源量最大的超深油田, 油藏普遍埋藏在7 500~10 000 m的超深层, 具有世界罕见的超深、超高温、超高压等特点, 勘探开采难度较大(王清华等, 2021, 2024a, 2024b; 王清华, 2023)。富满油田地区下古生界地层沉积相对完整, 由深至浅沉积有寒武系玉尔吐斯组烃源岩、肖尔布拉克组白云岩和泥晶灰岩、阿瓦塔格组膏盐岩、下秋里塔格组白云岩, 奥陶系蓬莱坝组白云岩、鹰山组—一间房组灰岩及桑塔木组巨厚泥岩层, 具有良好的“生—储—盖”组合(图2)。富满油田当前油气勘探的主要目的层为一间房组和鹰山组上段的碳酸盐岩地层, 钻井岩心及测井等资料显示, 储层受到走滑断裂活动、岩溶等作用的共同影响, 多发育断控缝洞型储层特征(邓兴梁等, 2021; 汪如军等, 2021; 王清华等, 2022; 乔俊程等, 2024; 陈石等, 2025)。

2 F₁19走滑断裂带差异变形

2.1 平面差异变形特征

走滑断裂是地壳在扭应力或剪切应力场作用下, 断层两盘在力偶作用下作相对水平运动产生的断裂, 成因分为两种类型机制, 分别是纯剪切走滑机制和简单剪切走滑机制。简单剪切又称单剪, 大多走滑断裂多位于单剪域中, 如达尔布特、阿尔金走滑断裂带及研究区F₁19走滑断裂带等皆属于简单剪切(王义天等, 1999)。里德尔剪切(Riedel)是目前获得认可并广泛使用的走滑断裂单剪成因模式(Sylvester and Smith, 1976; 漆家福等, 2006)。在里德尔剪切模式下的走滑应变椭圆中(图3), 可见走滑断裂在发育过程中会伴生复杂的构造样式, 如R破裂、褶皱、正断层及逆断层等, 因此走滑断裂平面会产生明显的分段差异变形, 主要分为主位移带、叠接区和尾端区3大结构, 其中以叠接区域最为复杂, 往往具有走滑伸展或走滑挤压复合运动, 形成拉分盆地或局部隆起等构造。

F₁19走滑断裂带一间房组是塔里木油田最主要的勘探目标, 走滑断裂发育特征显著, 平面展布非常规走滑断裂带线性特征, 其是由3条北东向的F1、F2和F3走滑断裂, 及1条南北向的F4走滑断裂组成, 呈现出不规则的类似倾斜的“丰”字形态(图4b)。F1北东向走滑断裂仅发育在F₁19走滑断裂带北段西侧, F2北东向走滑断裂切过了F₁19走滑断裂带北段东侧及中段西侧, F3北东向走滑断裂切过了F₁19走滑断裂带中段东侧及南段西侧, 而F4南北向断裂则是切割了3条北东向断裂, 贯通了F₁19走滑断裂带的南段、中段及北段。F₁19走滑断裂带平面分段变形特征明显, 不同段构造样式具有显著差异, 南段西侧F3断裂发育有张扭性质的辫状叠接区和压扭性质的双重叠接区, 东侧发育左阶式南北向断裂; 中段主要以线性变形为主, 主位移带发育明显, 局部发育有羽状构造及小型菱形叠接区; 北段以北东向走滑断裂发育为主, 西侧F1北东向断裂发育相对规模较大的双重叠接区及尾端的马尾状构造, 东侧F2断裂发育相对规模较大的菱形叠接区(图4c)。在志留系平面相干属性图中(图4a)可以看出, F₁19走滑断裂带几乎不再发育, 上覆层仅在Ms6、Ms7和Ms8

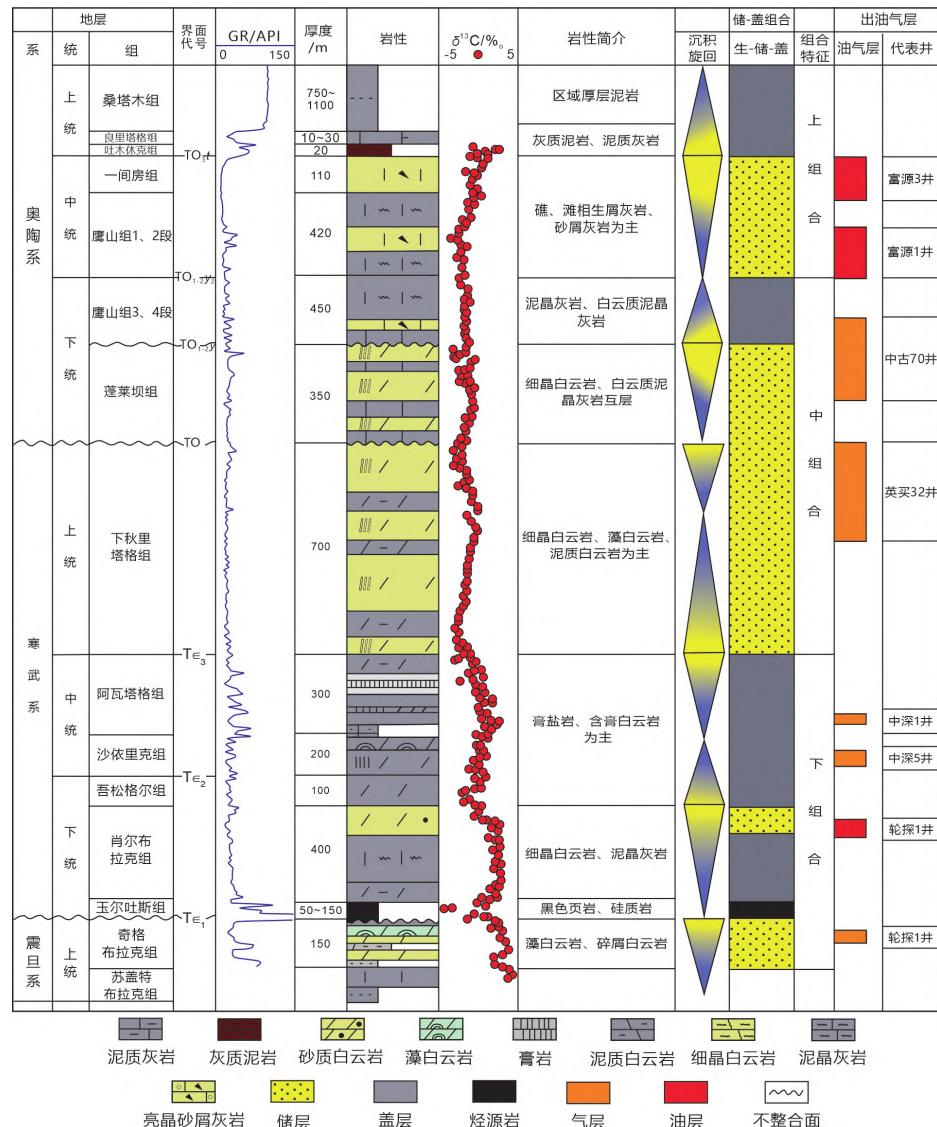


图 2 塔里木盆地富满地区地层综合柱状图(据田军等, 2021b 修改)

Fig. 2 Comprehensive histogram of strata in Fuman area, Tarim Basin (modified after Tian et al., 2021b)

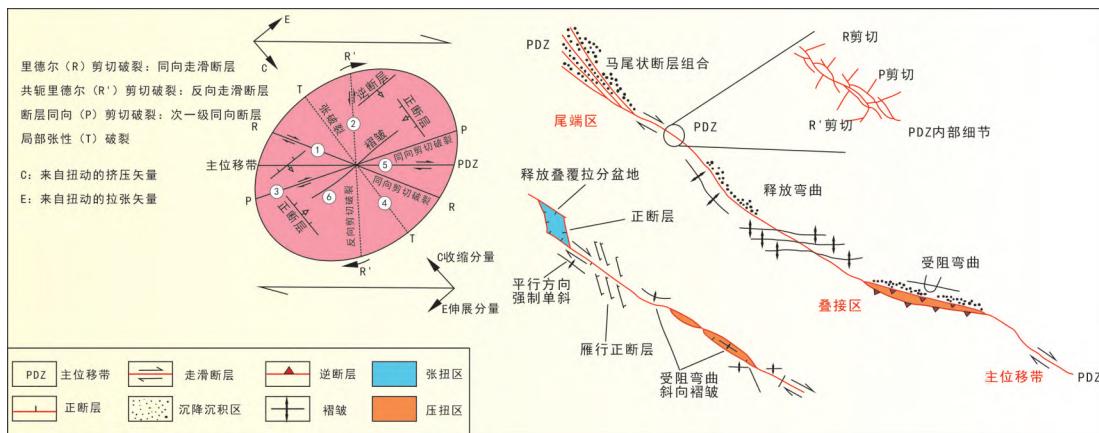
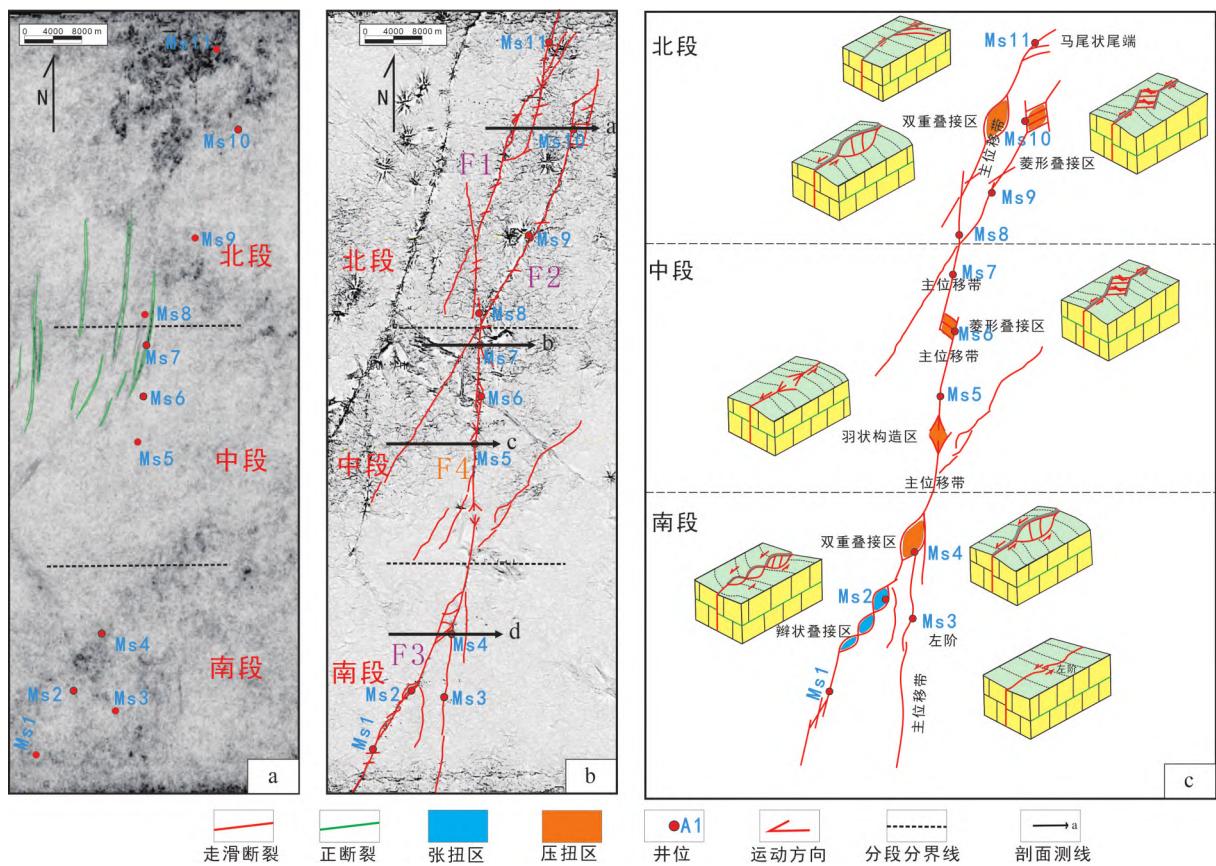


图 3 走滑应变椭圆及平面分段结构(据余朝华, 2008 修改)

Fig. 3 Strike-slip strain ellipse and planar segmented structure (modified after Yu, 2008)

图4 F₁₉走滑断裂带平面展布特征及分段样式模式

a. 志留系底界面(TS)相干属性及断裂叠合图; b. 中奥陶统一间房组顶界面(TO_{3t})相干属性及断裂叠合图;
c. 一间房组顶断裂分段差异变形发育模式

Fig. 4 The plane distribution characteristics and segmentation pattern of F₁₉ strike-slip fault zone

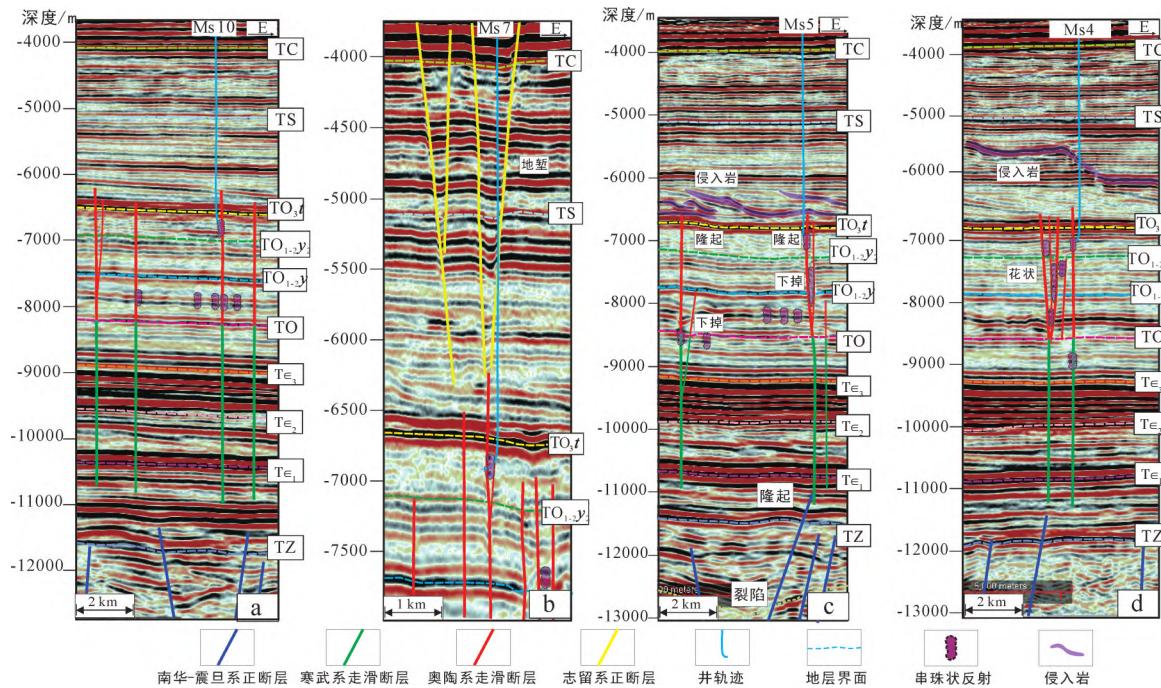
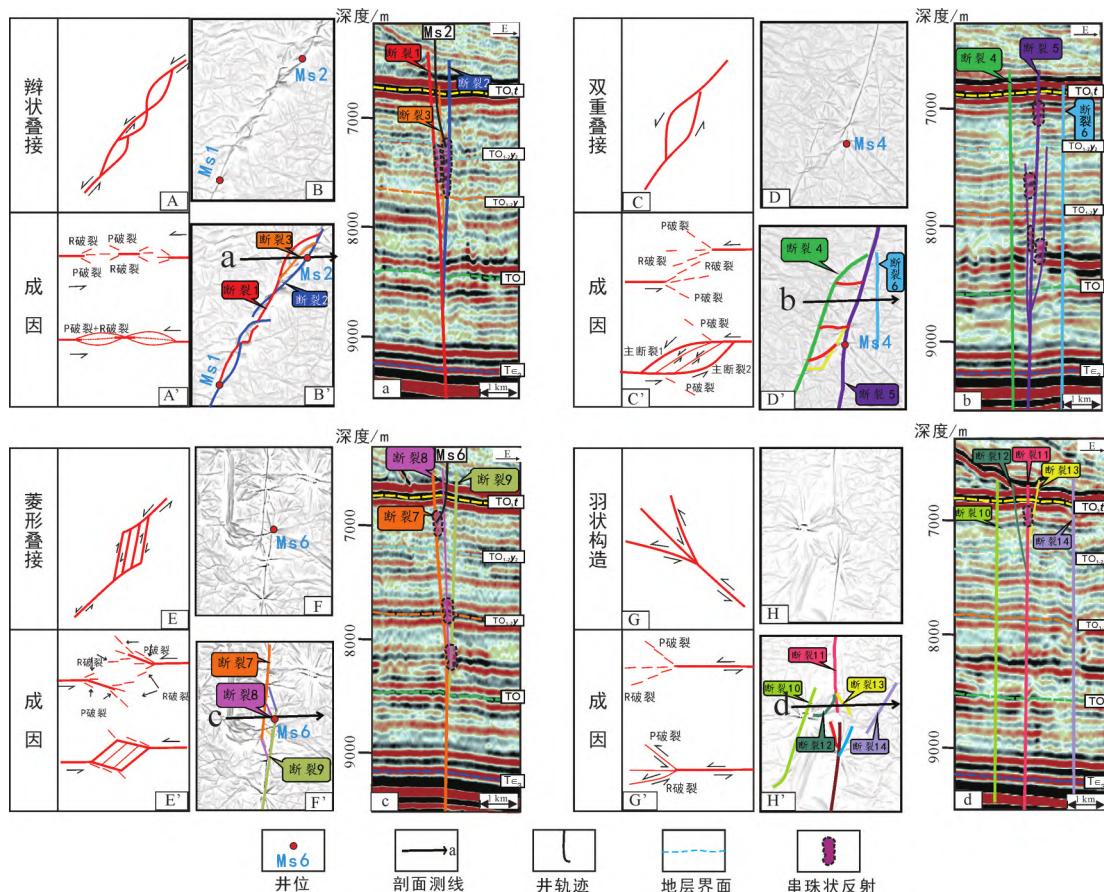
井区局部存在具有张扭性质的雁列正断层形成的地堑组合。

2.2 剖面差异变形特征

F₁₉走滑断裂带剖面上分层差异变形特征明显, 深部南华—震旦系(TZ前)由于裂谷期伸展运动发育有正断层组成的裂陷槽(图5c), 寒武系(T_E—TO)始见明显的走滑断裂, 主要呈现单根直立构造样式, 为F₁₉走滑断裂带的根部。中-下奥陶统(TO至TO_{3t})走滑断裂分支断裂发育数量增多, 呈明显的花状或半花状构造(图5c、图5d), 且出现明显的正反转构造, 下奥陶统(TO至TO_{1-2y})明显下掉, 中奥陶统一间房组顶界面(TO_{3t})地层明显隆升, 可见F₁₉走滑断裂带非一期形成, 是由多期走滑活动形成。上奥陶统中(TO_{3t}—TS)走滑断裂发育终止于该层内, 在F₁₉走滑断裂带的中段及南段地震剖面中该层内可见明显的侵入岩发育, 说明走滑断裂活动末期发生了大规模的岩浆活动

(图5c、图5d)。在F₁₉走滑断裂带中段北部及北段南部, 地震剖面揭示上奥陶统一志留系(TO_{3t}—TC)中发育了由大规模张扭性正断层形成的地堑构造; 局部剖面显示正断层几乎快切穿了上奥陶统, 并与下部的走滑断裂在纵向上承接相连(图5b)。F₁₉走滑断裂带北段上奥陶统一志留系(TO_{3t}—TC)平稳沉积, 未见明显的构造活动现象。此外, 中-下奥陶统发育沿走滑断裂分布的串珠状反射, 该反射受走滑断裂控制发育明显, 多沿主干走滑断裂之上或在断裂带内部发育(图5d), 也存在特殊的层内串珠状反射发育的现象(图5a、图5c)。

F₁₉走滑断裂带叠接区域变形及成因同样具有显著差异(图6)。辫状叠接由同条主走滑断裂发育多组分支断裂, 产生P破裂与R破裂相互交汇生长连接形成辫状形态(图6A'), 剖面特征显示断裂破碎带较宽, 在鹰山组3、4段(TO_{1-2y}至TO_{1-2y})发育大规模串珠状反射特征(图6a); 双重叠接则由

图 5 F₁₉ 走滑断裂带剖面断裂变形特征(剖面位置见图 4b)Fig. 5 F₁₉ strike-slip fault zone profile fault deformation characteristics (see Fig. 4b for the cross-sectional position)图 6 F₁₉ 走滑断裂带叠接区及羽状构造成因模式Fig. 6 F₁₉ strike-slip fault zone overlap area and pinnate structure genetic model

两条主走滑断裂位置相错、互相生长连接至对方主断裂尾部相交封闭而形成双重构造, 其叠接内部常产生R破裂或P破裂等小型次级断裂连接两条主断裂(图6C'), 剖面特征中断裂4与断裂5两条主断层根部彼此独立并不交汇, 而两主断层夹持区域分支断裂发育, 串珠状反射丰富(图6b); 菱形叠接是由两条主干断裂呈发散状生长, 通过产生的P破裂与R破裂相互作用连接形成封闭的菱形叠接区(图6E'), 剖面特征显示断裂7与断裂9两条主断层间发育着次级断裂8, 与辫状和双重叠接相比, 菱形叠接区发育规模较小, 串珠状反射也相对较弱(图6c); 相较于叠接区, 羽状构造是主断裂前缘传播扩展时主位移带活动强度减弱, 两侧产生R破裂与P破裂形成的羽状断裂组合(图6G'), 剖面上呈对称发育特征, 可见主断裂11两侧对称发育次级断裂12与13, 串珠状反射弱(图6d), 此

构造发育于F₁₉走滑断裂带中段主位移带活动性减弱区域, 且前后发育两个羽状构造(图6H'), 若主位移带活动性持续增强, 此处可形成新的叠接构造区。F₁₉走滑断裂带这些叠接区域具有断裂活动性强、分支断裂多、破碎带宽度大、串珠状反射发育丰富等特点(图6a~图6c), 这些特点对于优质储层的发育至关重要。

3 F₁₉走滑断裂带区域构造应力及演化特征

阿满过渡带经历了多期构造演化运动, 使得位于其中的F₁₉走滑断裂带地震剖面垂向上多期性特征显著。南华纪, 塔里木盆地发生大规模伸展运动形成早期裂谷, 盆地北部天山洋、西南部昆仑洋和东南部阿尔金洋相继打开(贾承造, 1999)(图7a), 阿满过渡带受到近南北向伸展应

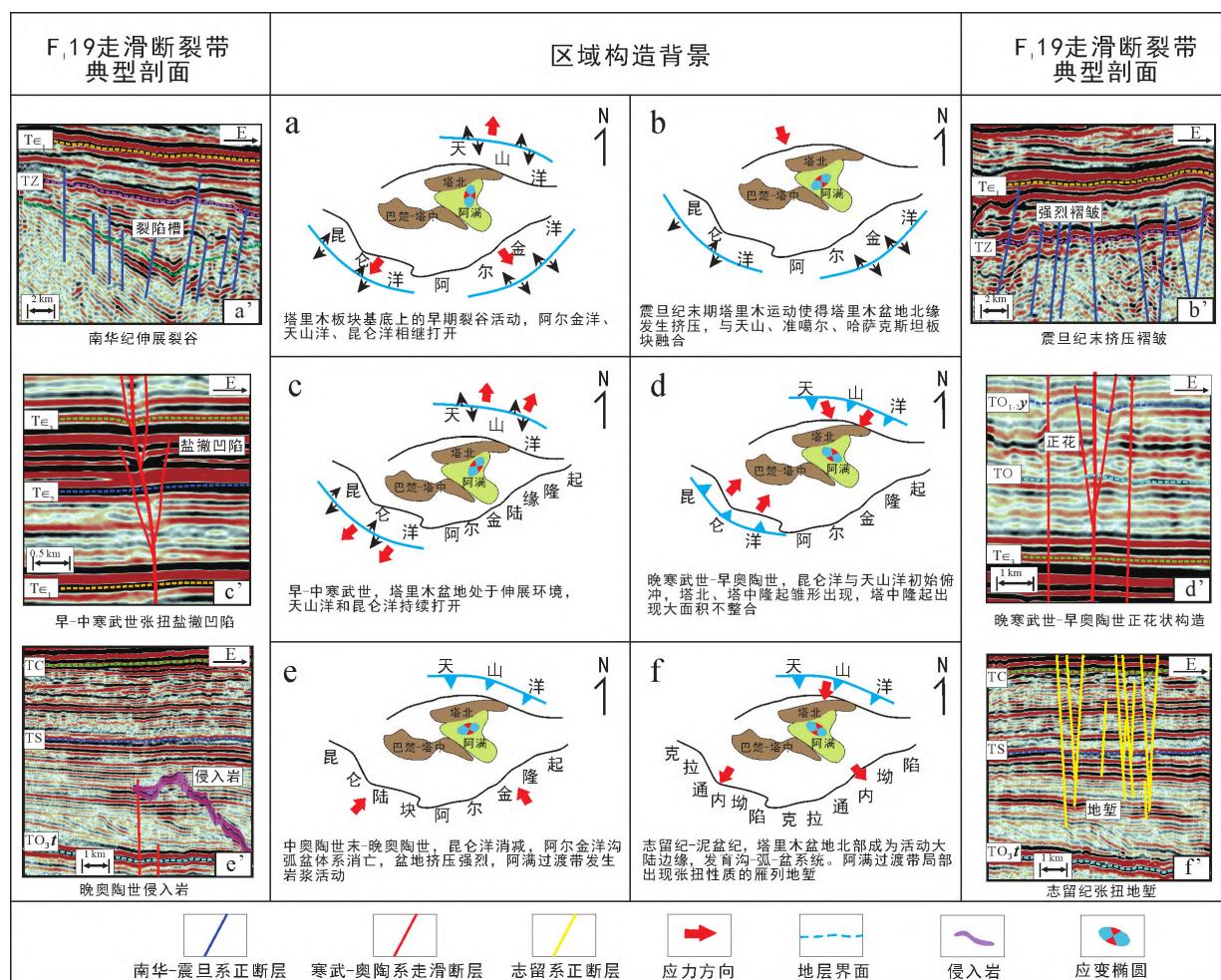


图7 阿满过渡带区域构造应力演化背景及典型剖面

Fig. 7 Regional tectonic stress evolution background and typical section of Aman transition zone

力, F_{19} 走滑断裂带地震剖面显示深部南华纪地层(TZ前)发育有明显的由正断层形成的大型裂陷槽(图7a'); 震旦纪末期裂谷活动停歇, 盆地发生塔里木运动使得北缘强烈挤压, 并与天山、准噶尔和哈萨克斯坦板块相接(汤良杰, 1994)(图7b), 阿满过渡带受到北西向挤压应力, F_{19} 走滑断裂带地震剖面显示在震旦系(TZ— T_{E_1})存在强烈的褶皱变形现象(图7b'); 早-中寒武世, 塔里木盆地转为伸展环境, 天山洋和昆仑洋持续打开扩展, 阿尔金洋俯冲消减形成阿尔金陆缘隆起(贾承造, 1999)(图7c), 阿满过渡带受到北东—南西向伸展应力, F_{19} 走滑断裂带开始发育, 地震剖面揭示中寒武统膏盐岩沉积层(T_{E_2} 至 T_{E_3})存在明显的受伸展应力而形成的盐撤凹陷构造(图7c'); 晚寒武世—早奥陶世, 昆仑洋与天山洋向塔里木盆地初始俯冲, 塔北、塔中隆起雏形开始出现, 并发育大面积不整合(贾承造, 1999)(图7d), 阿满过渡带受到北东—南西向挤压应力, 走滑活动增强, F_{19} 走滑断裂带地震剖面上可见典型的正花状构造(图7d'); 中-晚奥陶世, 昆仑洋俯冲消减, 阿尔金洋沟—弧—盆体系消亡, 盆地受强烈挤压, 阿满过渡带受多方向挤压应力(张光亚等, 2007; 何碧竹等, 2013)(图7e), 强挤压运动致使阿满过渡带普遍发生岩浆活动, F_{19} 走滑断裂发育停歇于晚奥陶系泥岩沉积层内(TO_3 —TS), 地震剖面上可见大规模岩浆侵入现象(图7e'); 志留纪—泥盆纪, 塔里木盆地北部成为活动大陆边缘, 发育沟—弧—盆系统, 北部天山洋俯冲消减, 西南和东南部发育克拉通内坳陷(汤良杰, 1994; 贾承造, 1999)(图7f), 阿满过渡带受到张扭性质应力, 发育雁列式地堑构造, F_{19} 走滑断裂带地震剖面上多组正断层形成地堑切穿了志留纪地层(TS—TC)(图7f')。

4 F_{19} 走滑断裂带形成机制物理模拟实验

古老、稳定的克拉通盆地走滑断裂带常呈线性或弧形展布, 延伸长度可达数十至数百公里(谢方克和蔡忠贤, 2003; 杨海军等, 2020)。塔里木克拉通盆地 F_{19} 走滑断裂带夹持于 F_{17} 和 F_{20} 走滑断裂之间, 与周缘走滑断裂带具有显著差异, 其不同于常规的 F_{17} 和 F_{20} 走滑断裂线性或弧形展布特征, 而是呈现不规则的北东向与南北向走滑断裂相互交切的特征(图1)。因此笔者不认为 F_{19} 走滑断裂带为同一期构造运动下同一条走滑断裂逐渐发育演变而成。 F_{19} 走滑断裂存在断裂多期活动叠加的特征, 笔者认为 F_{19} 走滑断裂带的北东向与南北向断裂为不同期、不同走滑断裂带逐渐发育相互交切组合而成。

4.1 实验原则

为了验证 F_{19} 走滑断裂带形成演化机制, 本文采用构造物理模拟实验方法, 模拟走滑断裂形成过程。目前, 构造物理模拟技术能够在实验室条件下再现地质构造变形过程, 并通过数字记录和图像处理, 定量分析变形结果和地质构造成因机制, 因此构造物理模拟已经成为含油气盆地构造研究的一种有效方法(Dooley and Schreurs, 2012; Yu et al., 2022)。实验遵循相似性原理, 将地质原型按照一定比例缩放, 选取适当力学强度的实验材料, 满足相似关系(Yu et al., 2022)(表1)。

4.2 实验参数及模型设计

本实验构造物理模拟平台主要由3部分组成: 主控台、砂箱实验平台、数码监测系统。实验模型的初始尺寸为长60 cm、宽40 cm、厚度3 cm(表2)。

表 1 相似条件参数

Table 1 Similarity condition parameters

参数	代码	单位	自然原型	模拟模型	比例因子
厚度	h	m	$h_n \approx 3000$	$h_m \approx 0.03$	$h^* = h_m/h_n = 1 \times 10^{-5}$
密度	ρ	kg/m^3	$\rho_n \approx 2800$	$\rho_m \approx 2300$	$\rho^* = \rho_m/\rho_n \approx 0.82$
重力加速度	g	m/s^2	$g_n = 1$	$g_m = 1$	$g^* = g_m/g_n = 1$
内摩擦角	φ	°	31 ~ 38	31	1
时间	t	h	$t_n = 30 \text{ Ma}$	$t_m \approx 2.08 \text{ h}$	$t^* = t_m/t_n = 7.91 \times 10^{-12}$

表 2 实验参数

Table 2 Experimental parameters

顶面高度/cm	铺设序列	砂层顶面标志层颜色	运动学特征	运动速率	位移量
3.5	0.5 cm底板; 3 cm白色石英砂	蓝色	左行	0.016 mm/s	12 cm

实验模型四周由推板和固定挡板构成封闭条件。实验过程中采用松散干燥的白色石英砂(内摩擦角约31°, 密度约2.3 g/cm³)作为相似性材料, 石英砂的变形特性符合库仑准则, 是模拟脆性地层的理想材料(Dooley and Schreurs, 2012)。模拟的地层厚度约为3 000~4 000 m, 实验模型中地层厚度设置为3 cm, 构造物理模拟实验中地层厚度的相似系数为 1×10^{-5} , 时间相似系数为 7.91×10^{-12} , 即物理模型运动1 h, 代表实际地质运动约14.4 Ma。实验模型的其他相关参数与地质原型的对比如表1所示。

基于前文分析, 本实验以两块0.5 cm×20 cm×60 cm的刚性底板作为基底, 在刚性底板上设置3个长条形硬纸板F_a、F_b和F_c, 硬纸板在空间上保持竖直, 硬纸板高度为2 cm, 用来模拟F₁、F₂和F₃共3条先存北东向断裂, 3个硬纸板长度和摆放位置与F₁、F₂和F₃的相对空间位置满足相似性原理(图8)。设置好3个条状硬纸板后, 在两块底板之上铺设厚度为3 cm的白色干燥石英砂, 砂层顶部铺设厚度忽略不计的蓝色干燥石英砂薄层作为标志层。在电机1和2的驱动下, 两块刚性底板传递动力, 带动上覆砂层发生相对位移, 底板发生剪切运动, 模拟走滑断裂的相对滑动。设计运动底板位移量为12 cm, 电机运动由计算机控制, 电机运动速率精度为0.001 mm/s, 实验过程中电机运动速率设置为0.016 mm/s, 参数见表2。

4.3 实验结果

实验结果显示(图9), 当走滑位移量为2 cm时, 处于走滑变形初始阶段, 模型中央南北向出现了一系列雁列式右阶排布的断裂, 此时产生的断裂主要为初始变形阶段产生的R破裂(图9a、图9a'); 随着走滑位移量逐渐增大, 南段北东向断裂优先出现初步复活迹象(图9b、图9b'); 当走滑位移量增加到6 cm时, 3条先存的北东向断裂出现了复活现象, 而南北向R破裂长度向两端延伸, 逐渐生长连接(图9c、图9c'); 当走滑位移量

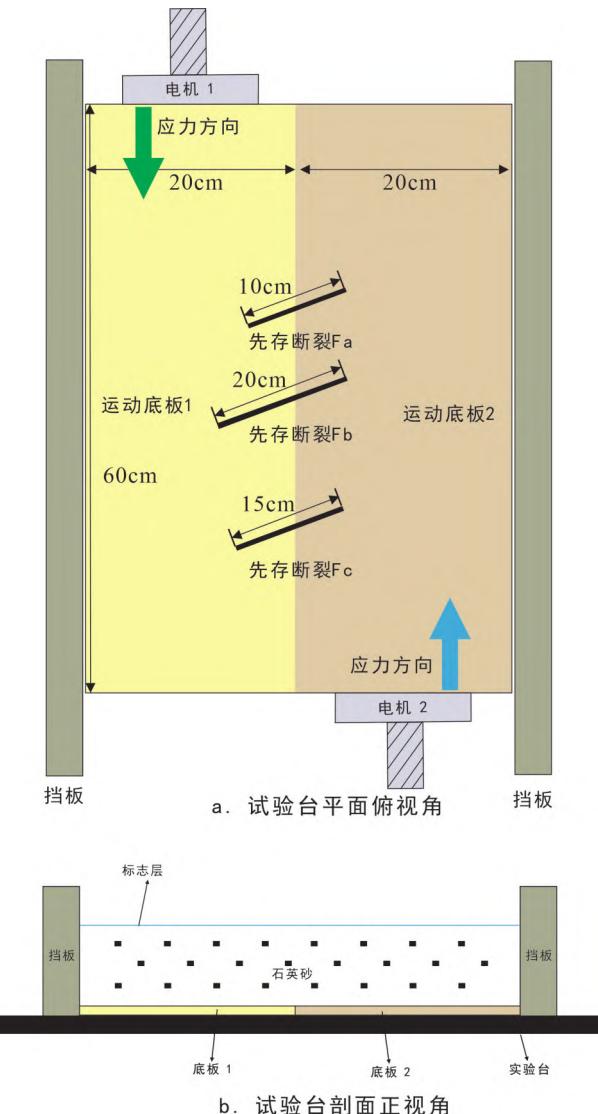


图 8 实验装置及模型设计

Fig. 8 Experimental device and model design

为8 cm时, 3条已复活的北东向断裂有所延伸, 此时南北向断裂已连成一线, 形成主位移带贯穿3条北东向断裂, 同时在主干断裂周围产生少量次级断裂(图9d、图9d'); 当走滑位移量达到10 cm, 北段南北向断裂形成双重叠接区(图9e、图9e'); 当走滑位移量进一步加强至12 cm时, 3条北东向先存断裂进一步发育, 长度增加, 且出现略微向北旋转现象(图9f、图9f')。

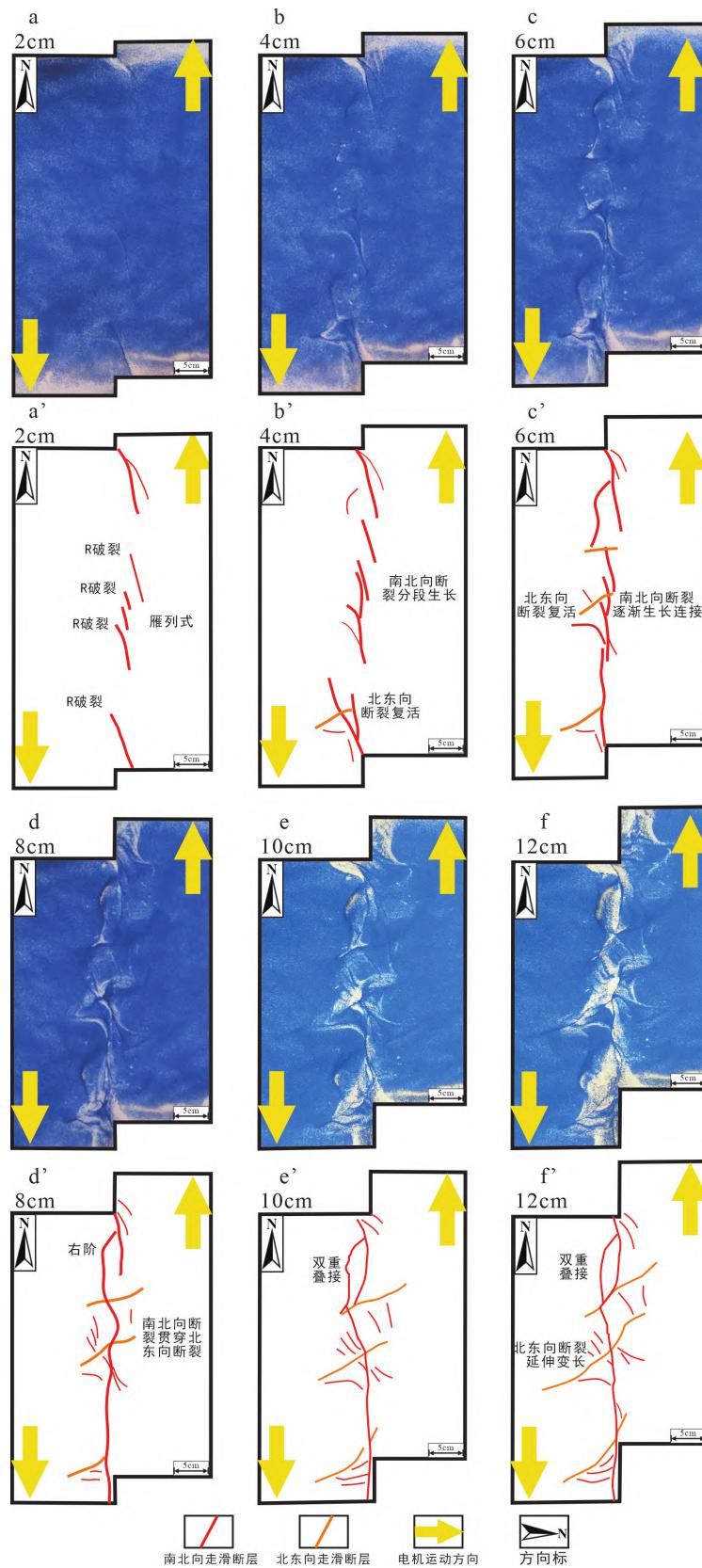


图 9 物理模拟实验结果

 $a' \sim f'$ 分别为 $a \sim f$ 的断裂解析图

Fig. 9 Physical simulation experiment results

4.4 物理模型与实际地质对比分析

通过物理模拟实验结果与实际断裂构造对比发现(图10), 本实验结果与F₁₉走滑断裂平面展布特征具有较高的相似度。F₁₉走滑断裂带是由3条北东向的F1、F2和F3走滑断裂及1条南北向的F4走滑断裂组合而成, 呈现出不规则的类似倾斜的“丰”字形态(图10a), 3条北东向断裂被南北向断裂F4贯穿切割, 南段北东向F3断裂出现明显错断。实验结果同样显示(图10b), 3条先存的北东向断裂F_a、F_b和F_c被南北向断裂贯穿, 南端北东向断裂F_c同样出现被南北向断裂切割交错的现象。此外, 物理模拟实验与实际F₁₉走滑断裂北东向断裂皆表现出向北偏转的特征。因此物理模拟实验结果与实际F₁₉走滑断裂较高的匹配度验证了笔者的观点, F₁₉走滑断裂带3条北东向断裂与1条南北向断裂为不同期、不同走滑断裂带逐渐发育相互交切组合而成。

5 F₁₉走滑断裂带形成机制演化模式

根据F₁₉走滑断裂带区域构造应力背景及物理模拟研究结果, 建立F₁₉走滑断裂带形成机制立体演化模式(图11), 将F₁₉走滑断裂带划分为5个构造活动阶段, 分别为早-中寒武世北东向走滑雁列发育阶段、晚寒武世—早奥陶世南北向走滑初始发育阶段、中奥陶世南北向走滑生长连接阶段、晚奥陶世火成岩侵入阶段和志留纪局部雁列地堑发育阶段。

早-中寒武世, F₁₉走滑断裂带受到北东—南西向的伸展应力形成盐撤凹陷构造, 北东向走滑断裂F1、F2及F3初始分段雁列式发育(图11a); 晚寒武—早奥陶世, F₁₉走滑断裂带受到北部和西南部的挤压应力, 南北向走滑断裂F4初始分段发育, 北东向走滑断裂延伸变长, 持续发育, 南段北东向断裂F3形成了初步的双重叠接区(图11b); 中奥陶世, F₁₉走滑断裂带受到北部、西南及东

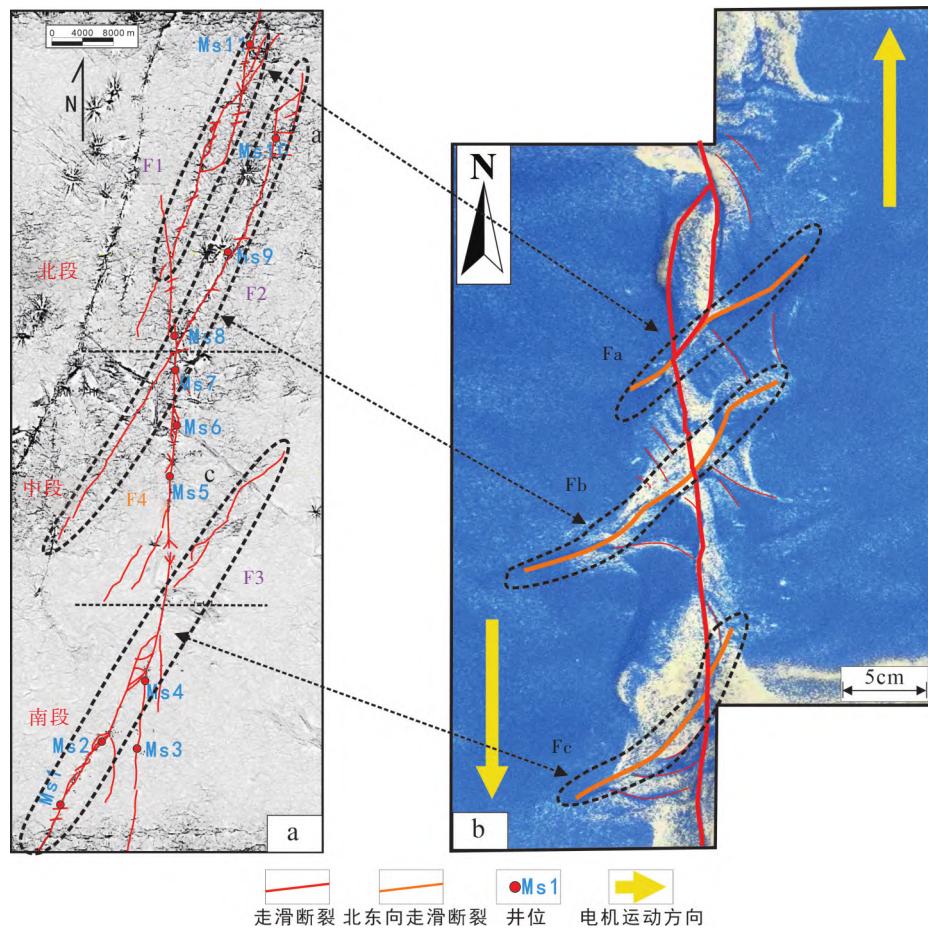
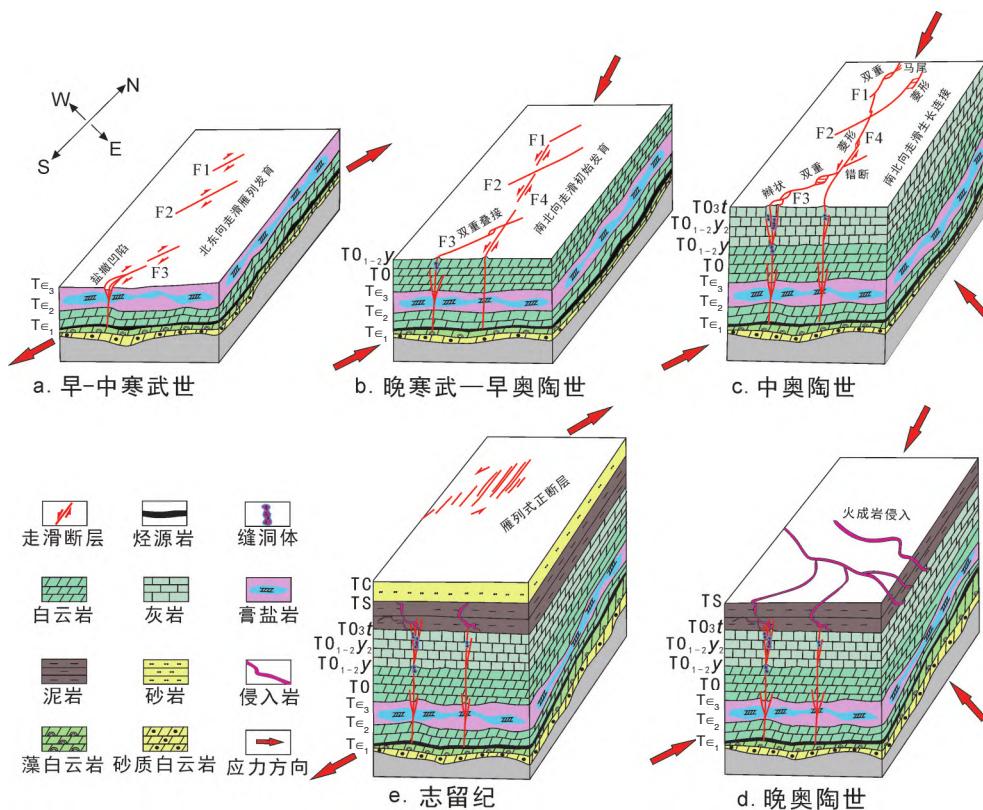


图 10 物理模型与实际断裂对比图解

Fig. 10 Comparison diagram of physical model and actual fracture

图 11 F_19 走滑断裂带立体演化模式Fig. 11 F_19 strike-slip fault zone three-dimensional evolution model

南多方向的挤压应力，走滑活动加强，断裂变形显著，南北向走滑断裂F4生长连接且切割3条北东向走滑断裂F1、F2及F3，其中F3断裂平面具有明显错断，北东向走滑断裂F1北段发育双重叠接及马尾状构造，北东向走滑断裂F2北段发育菱形叠接区(图11c)，北东向走滑断裂F3发育瓣状叠接区及扩大规模的双重叠接区；晚奥陶世， F_19 走滑断裂带受到多方向挤压应力强度减弱，走滑断裂发育停歇于泥岩层中，晚奥陶世末期发生岩浆活动，形成大范围条带溢流状侵入岩构造(图11d)；志留纪， F_19 走滑断裂带从受挤压应力转变为受到北东—南西向伸展应力，并且受到残余走滑分量的影响，在局部形成张扭性质的雁列式正断层(图11e)。

6 油气地质意义

塔里木盆地内部超深层 F_19 走滑断裂带的分层差异变形对油气的控制作用具有显著差异(图12)。走滑断裂深切至下寒武统(T_{E_1} 至 T_{E_2})玉尔吐斯组烃源岩，浅部发育至一间房组顶(TO_{3t})，纵深长

度近4 000 m，成为了油气向上运移的优势通道。玉尔吐斯组烃源岩为富满地区超深层最主要的生油岩层，上寒武统一中奥陶统(T_{E_3} — TO_{3t})为碳酸盐岩层，是良好的油气储集层，走滑断裂在碳酸盐岩层中活动强烈，分支断裂发育丰富，增大了岩石孔隙度及破碎带宽度，并且沿断裂周缘及断裂带内部普遍发育具有良好储集空间的缝洞体，使得优质储层发育规模进一步扩大。在碳酸盐岩层顶部沉积的桑塔木组巨厚泥岩层(TO_{3t} —TS)为良好的盖层，纵向上形成“生—储—盖”组合，为油气藏的形成奠定基础。

走滑断裂分段的差异变形及活动强度控制着优质储层的发育规模。切过 F_19 走滑断裂带南部双重叠接区的Ms4井油藏剖面显示，鹰山组——间房组最大破碎带宽度约800 m(图12d)，断裂活动性强，分支断裂发育，花状构造明显，破碎带内部缝洞体发育丰富，优质储层规模大；而切过主位移带的过Ms7井油藏剖面显示，鹰山组——间房组破碎带宽度仅约250 m(图12a、图12c)，断裂活动性弱，分支断裂发育少，储层发育规模小。

过Ms10井油藏剖面虽位于叠接区,但是其位于F₁19走滑断裂带北东向断裂F2的尾端区,尾端区为断裂活动强度减弱至消亡区,因而虽形成叠接样式但其内部破碎带及缝洞体发育较差。

走滑断裂纵向发育样式及发育部位控制了油气的运移路径及聚集位置。过Ms10井油藏剖面中(图12a),断裂多呈单根直立发育,油气垂向运移至一间房组聚集成藏;过Ms5井油藏剖面中(图12c),断裂左侧在蓬莱坝组(TO至TO₁₋₂y)发育分支断裂,油气沿分支断裂斜向运移,在深部可能形成潜在油藏,此时鹰山组(TO₁₋₂y至TO₁₋₂y₂)致密灰岩可充

当其盖层。

盖层的完整性决定了对于油气的封堵能力。过Ms10井油藏剖面中的桑塔木组泥岩盖层发育最稳定、最完整,无明显构造活动现象(图12a)。过Ms5井及Ms4井油藏剖面中,泥岩盖层遭到岩浆侵入,造成一定破坏,但未纵向切穿盖层,因此对巨厚泥岩层的封堵能力影响不大(图12c、图12d)。过Ms7井油藏剖面中的泥岩盖层遭受的破坏最大,志留系发育的正断层切穿泥岩盖层与下部走滑断裂纵向相接,使得盖层的封堵能力大幅降低。

良好的“生—储—盖”组合决定了油气成藏

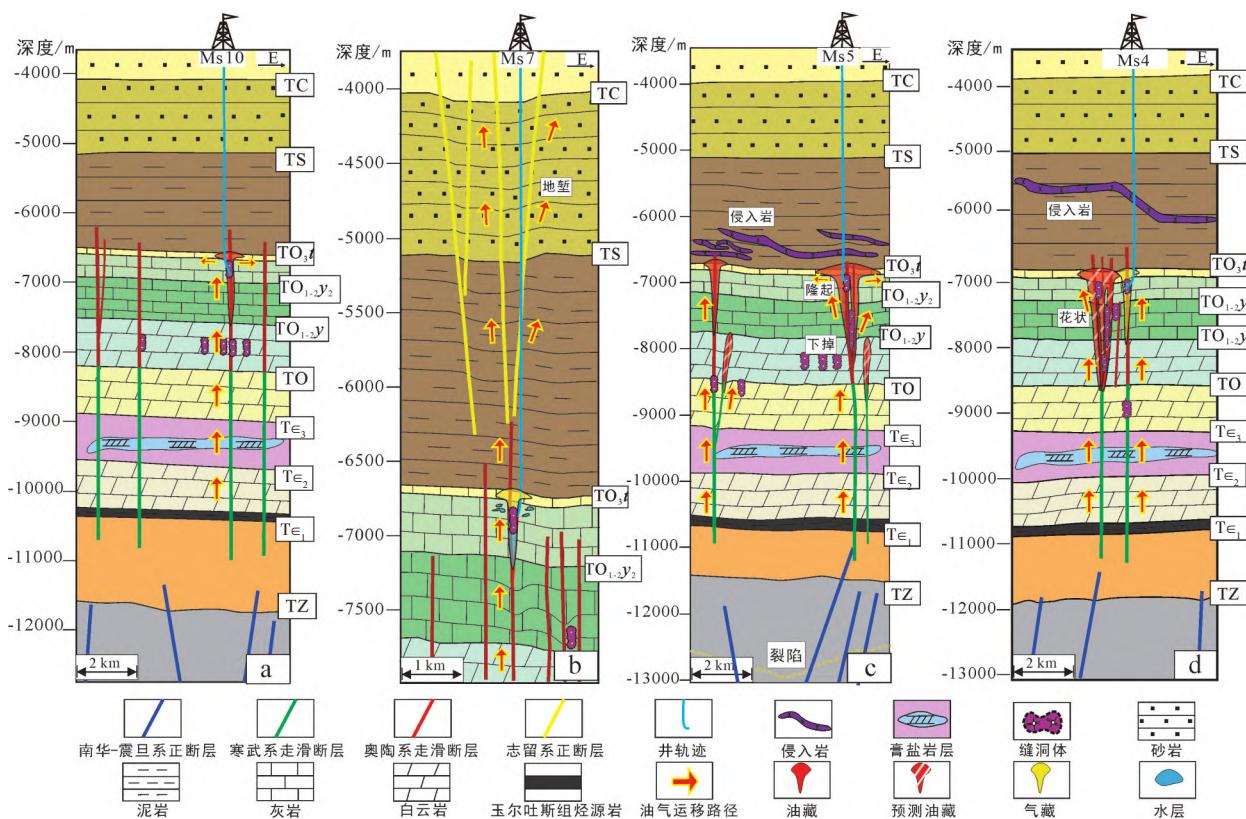


图 12 超深走滑断裂控藏模式(油藏剖面图 12a~图 12d 分别对应于图 5a~图 5d 中 4 个地震剖面)

Fig. 12 Reservoir-controlling model of ultra-deep strike-slip fault (the oil reservoir profiles Fig. 12a~Fig. 12d correspond to the four seismic profiles in Fig. 5a~Fig. 5d, respectively.)

表 3 井产数据

Table 3 Well production data

井名	平均日产液/t	平均日产油/t	平均日产气/m ³	含水率/%	气油比/(m ³ /t)	压降产液量/(t/MPa)	井类型
Ms10	48.84	48.27	16241	1.18	336.47	541.92	工业油流井
Ms7	72.58	45.24	73055.09	37.67	1614.87	398.01	工业气流井
Ms5	95.85	94.82	51715.06	1.08	545.40	2465.99	工业油流井
Ms4	70.30	68.60	62939.99	2.42	917.47	308.65	工业气流井

的规模性。表 3 中, Ms5 井平均日产油 94.82 t, 压降产液量 2 465.99 t/MPa, 是 4 口井中产能最高的。Ms7 井平均日产油 45.24 t, 压降产液量 398.01 t/MPa, 同时具有 37.67% 的高含水率, 在 4 口井中产能最低。研究区玉尔吐斯组烃源岩厚度及生烃潜力差别不大, 关键是在两口井所钻遇的储层和盖层具有较大差异, Ms5 井所钻遇断裂储层规模好, 缝洞体发育规模大, 发生明显井液漏失现象, 且盖层相对完好, 虽有侵入岩发育, 但未对盖层造成贯穿破坏, 因此盖层油气封堵能力依旧完好(图 12c)。而 Ms7 井所钻遇储层发育规模小, 缝洞体规模较小, 且盖层遭受正断层的强烈贯穿破坏, 致使油气沿着正断层发生严重逸散(图 12b), 因此导致油气产量低、含水量高的现象。Ms4 井油藏剖面中, 发育有良好的叠接区破碎带, 储层规模大, 且盖层具有较强封堵能力, 但是 Ms4 井未钻遇叠接区内部, 而是位于叠接区外侧邻近断裂上, 储层规模小(图 12d), 因此油气产能同样较低, 如果后期能通过压裂等技术改造沟通邻近叠接区内部储层, 可能会对油气产能有较大的提高。

7 结 论

(1) 克拉通盆地内部走滑断裂多期活动显著, 同区交切型走滑断裂带很可能是由不同期、不同线形或弧形走滑断裂带组合而成。 F_{19} 走滑断裂带的不规则展布特征是由于早期的 3 条北东向断裂被晚期的南北向断裂切割组合而成, 可分为早-中寒武世北东向走滑雁列发育阶段、晚寒武世-早奥陶世南北向走滑初始发育阶段、中奥陶世南北向走滑生长连接阶段。其中, 第 3 个阶段南北向断裂切割了 3 条北东向断裂, 形成了 F_{19} 走滑断裂带类似倾斜“丰”字形的最终特殊展布形态。后又经历了晚奥陶世火成岩侵入和志留纪局部雁列地堑发育构造活动阶段, 影响了 F_{19} 走滑断裂带浅部盖层的封闭性。

(2) 克拉通盆地内部超深层走滑断裂平面分段、纵向分层差异变形控制了储层发育规模及油气运聚效应, 强活动叠接区储层发育规模最大, 应为重点的油气勘探区, 其次是主位移带, 尾端断裂活动减弱区储层发育较差; 油气具有“下生上储、断裂运聚和泥盖封堵”的成藏模式, 深部玉尔吐斯组烃源岩提供油气源, 直立和分支走滑断裂控

制了油气的垂向和斜向运移路径, 浅部泥岩盖层的完整性决定了盖层对于油气的封堵能力, 同时拥有良好“生—储—盖”组合的油藏潜力最大。

参 考 文 献

- 陈平, 能源, 吴鲜等. 2023. 塔里木盆地顺北 5 号走滑断裂带分层分段特征及构造演化. 新疆石油地质, 44(1): 33-42.
Chen Ping, Neng Yuan, Wu Xian et al. 2023. Stratification and segmentation characteristics and tectonic evolution of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 44(1): 33-42.
- 陈石, 梁鑫鑫, 张银涛等. 2025. 塔里木盆地富满油田古生界走滑断裂发育特征及控圈模式. 石油科学通报, 10(1): 1-15.
Chen Shi, Liang Xinxin, Zhang Yintao et al. 2025. Development characteristics of Paleozoic strike-slip fault and its control on traps in Fuman oilfield, Tarim Basin. *Petroleum Science Bulletin*, 10(1): 1-15.
- 邓兴梁, 闫婷, 张银涛等. 2021. 走滑断裂控碳酸盐岩油气藏的特征与井位部署思路——以塔里木盆地为例. 天然气工业, 41(3): 21-29.
Deng Xingliang, Yan Ting, Zhang Yintao et al. 2021. Characteristics and well location deployment ideas of strike-slip fault-controlled carbonate oil and gas reservoirs: A case study of the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(3): 21-29.
- 丁留洋, 赵永刚, 周飞等. 2025. 阿满过渡带东部中-下奥陶统储层特征与主控因素. 录井工程, 36(1): 114-122.
Ding Liuyang, Zhao Yonggang, Zhou Fei et al. 2025. The Middle-Lower Ordovician reservoirs characteristics and main control factors in the eastern part of the Aman transition zone. *Mud Logging Engineering*, 36(1): 114-122.
- 何碧竹, 焦存礼, 许志琴等. 2013. 塔里木盆地加里东中-晚期构造不整合与周缘造山带构造作用的响应. 地质学报, 87(增刊): 34-34.
He Bizhu, Jiao Cunli, Xu Zhiqin et al. 2013. Response of the mid-late tectonic unconformity and tectonics of the peripheral orogenic belt in the Tarim Basin, Garidong, China. *Acta Geologica Sinica*, 87(suppl.): 34-34.
- 何登发. 1996. 克拉通盆地的油气地质理论与实践. 勘探家, 1(1): 18-24.
He Dengfa. 1996. Petroleum geology and exploration of cratonic basins. *Explorationist*, 1(1): 18-24.
- 贾承造. 1999. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律. 新疆石油地质, 20(3): 177-183.
Jia Chengzao. 1999. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 20(3): 177-183.
- 贾承造, 魏国齐. 2002. 塔里木盆地构造特征与含油气性. 科学通报, 47(增刊): 1-8.

- Jia Chengzao and Wei Guoqi. 2002. Tectonic characterization and hydrocarbons of the Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47 (suppl.): 1-8.
- 金之钧, 谢方克. 2002. 中国典型含油气盆地地层压力分布特征. 石油大学报(自然科学版), 26(6): 1-6.
- Jin Zhijun and Xie Fangke. 2002. Distribution features of formation pressure in typical petrolierous basin of China. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 26(6): 1-6.
- 李曰俊, 吴根耀, 孟庆龙等. 2008. 塔里木西部地区古生代断裂活动的方式和机制. 地质科学, 43(4): 727-745.
- Li Yuejun, Wu Genyao, Meng Qinglong et al. 2008. Active modes and mechanisms of the Paleozoic faultings in western Tarim. *Chinese Journal of Geology*, 43(4): 727-745.
- 梁鑫鑫, 张银涛, 陈 石等. 2025. 塔里木盆地富满油田走滑断裂多核破碎带地震响应特征. 岩性油气藏, 37(2): 127-138.
- Liang Xinxin, Zhang Yintao, Chen Shi et al. 2025. Seismic response characteristics of strike-slip fault multi-core damage zones in Fuman oilfield, Tarim Basin. *Lithologic Reservoirs*, 37(2): 127-138.
- 刘冰雷, 赵永刚, 张银涛等. 2025a. 塔里木盆地阿满过渡带东部主干走滑断裂变形特征及断溶储集体发育. 地质科学, 60 (2): 360-377.
- Liu Binglei, Zhao Yonggang, Zhang Yintao et al. 2025a. The deformation characteristics of the main strike-slip faults and the development of fault-karst reservoirs in the eastern part of the Aman transition zone, Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 60(2): 360-377.
- 刘冰雷, 赵永刚, 张银涛等. 2025b. 塔里木盆地阿满过渡带东部19号走滑断裂构造解析及控储意义. 地学前缘, 1-18. 网络首发.
- Liu Binglei, Zhao Yonggang, Zhang Yintao et al. 2025b. Structural analysis and reservoir-controlling significance of No. 19 strike-slip fault in the eastern Aman transition zone, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*. 1-18. Published Online.
- 刘强, 张银涛, 陈 石等. 2023. 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. 现代地质, 37(5): 1123-1135.
- Liu Qiang, Zhang Yintao, Chen Shi et al. 2023. Development and evolution characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its geological significance: A case study of F₁17 fault in Fuman oilfield. *Geoscience*, 37(5): 1123-1135.
- 刘雨晴, 邓 尚, 张继标等. 2023. 塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨. 地学前缘, 30(6): 95-109.
- Liu Yuqing, Deng Shang, Zhang Jibiao et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of the strike-slip fault networks in the Shunbei area and the surroundings, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(6): 95-109.
- 漆家福, 夏义平, 杨 桥. 2006. 油区构造解析. 北京: 石油工业出版社. 1-161.
- Qi Jiafu, Xia Yiping and Yang Qiao. 2006. Tectonic Analysis of the Oil Area. Beijing: Petroleum Industry Press. 1-161.
- 漆家福, 陈 石, 罗彩明等. 2024. 塔里木盆地阿一满过渡区走滑断裂系统及其控藏规律. 地质学报, 98(12): 3662-3682.
- Qi Jiafu, Chen Shi, Luo Caiming et al. 2024. Strike-slip fault system and its reservoir-controlling rules in Awati-Manger-transitional area Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica*, 98 (12) : 3662-3682.
- 乔俊程, 常少英, 曾溅辉等. 2024. 塔里木盆地北部富满地区超深层走滑断裂带碳酸盐岩油气差异成藏成因探讨. 石油与天然气地质, 45(5): 1226-1246.
- Qiao Juncheng, Chang Shaoying, Zeng Jianhui et al. 2024. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 45(5): 1226-1246.
- 宋兴国, 陈 石, 谢 舟等. 2023. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏. 石油与天然气地质, 44(2): 335-349.
- Song Xingguo, Chen Shi, Xie Zhou et al. 2023. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 44(2): 335-349.
- 汤良杰. 1994. 塔里木盆地构造演化与构造样式. 地球科学, 19 (6): 742-754.
- Tang Liangjie. 1994. Evolution and tectonic patterns of Tarim Basin. *Earth Science*, 19(6): 742-754.
- 田 军, 王清华, 杨海军等. 2021a. 塔里木盆地油气勘探历程与启示. 新疆石油地质, 42(3): 272-282.
- Tian Jun, Wang Qinghua, Yang Haijun et al. 2021a. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 42(3): 272-282.
- 田 军, 杨海军, 朱永峰等. 2021b. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 42(8): 971-985.
- Tian Jun, Yang Haijun, Zhu Yongfeng et al. 2021b. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oilfield, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(8): 971-985.
- 王春生, 冯少波, 张 志等. 2024. 深地塔科1井钻井设计关键技术. 石油钻探技术, 52(2): 78-86.
- Wang Chunsheng, Feng Shaobo, Zhang Zhi et al. 2024. Key technologies for drilling design of well Shendi Take-1. *Petroleum Drilling Techniques*, 52(2): 78-86.
- 王清华. 2023. 塔里木盆地富满油田凝析气藏成因. 石油勘探与开发, 50(6): 1128-1139.
- Wang Qinghua. 2023. Origin of gas condensate reservoir in Fuman oilfield, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 50(6): 1128-1139.
- 王清华, 杨海军, 汪如军等. 2021. 塔里木盆地超深层走滑断裂带大油气田的勘探发现与技术创新. 中国石油勘探, 26 (4): 58-71.
- Wang Qinghua, Yang Haijun, Wang Rujun et al. 2021. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration*, 26(4): 59-71.

- 王清华, 杨海军, 李 勇等. 2022. 塔里木盆地富满大型碳酸盐岩油气聚集区走滑断裂控储模式. 地学前缘, 29(6): 239-251.
- Wang Qinghua, Yang Haijun, Li Yong et al. 2022. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin: A reservoir model. *Earth Science Frontiers*, 29 (6): 239-251.
- 王清华, 蔡振忠, 张银涛等. 2024a. 塔里木盆地超深层走滑断裂油气藏研究进展与趋势. 新疆石油地质, 45(4): 379-386.
- Wang Qinghua, Cai Zhenzhong, Zhang Yintao et al. 2024a. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 45(4): 379-386.
- 王清华, 杨 威, 周 慧等. 2024b. 塔里木盆地西北缘乌什西次凹的地层系统和构造特征. 地质科学, 59(2): 271-287.
- Wang Qinghua, Yang Wei, Zhou Hui et al. 2024b. The stratigraphic system and structural characteristics of the western subsag of Wushi Sag, NW Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 59 (2): 271-287.
- 汪如军, 王 轩, 邓兴梁等. 2021. 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. 天然气工业, 41(3): 10-20.
- Wang Rujun, Wang Xuan, Deng Xingliang et al. 2021. Control effect of strike-slip faults on carbonate reservoirs and hydrocarbon accumulation: A case study of the northern depression in the Tarim Basin. *Natural Gas Industry*, 41(3): 10-20.
- 王义天, 李继亮. 1999. 走滑断层作用的相关构造. 地质科技情报, 18(3): 30-34.
- Wang Yitian and Li Jiliang. 1999. Fault-related tectonics of the strike-slip faulting. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 18(3): 30-34.
- 邬光辉, 杨海军, 屈泰来等. 2012. 塔里木盆地塔中隆起断裂系统特征及其对海相碳酸盐岩油气的控制作用. 岩石学报, 28 (3): 793-805.
- Wu Guanghui, Yang Haijun, Qü Tailai et al. 2012. The fault system characteristics and its controlling roles on marine carbonate hydrocarbon in the central uplift, Tarim Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 28(3): 793-805.
- 邬光辉, 邓 卫, 黄少英等. 2020. 塔里木盆地构造—古地理演化. 地质科学, 55(2): 305-321.
- Wu Guanghui, Deng Wei, Huang Shaoying et al. 2020. Tectonic-paleogeographic evolution of the Tarim Basin. *Chinese Journal of Geology*, 55(2): 305-321.
- 谢方克, 蔡忠贤. 2003. 克拉通盆地基底结构特征及油气差异聚集浅析. 地球科学进展, 18(4): 561-568.
- Xie Fangke and Cai Zhongxian. 2003. The primary study of basement structure and difference of hydrocarbon reservoir in cratonic basin. *Advances in Earth Science*, 18(4): 561-568.
- 杨海军, 邬光辉, 韩剑发等. 2020. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析. 地质科学, 55(1): 1-16.
- Yang Haijun, Wu Guanghui, Han Jianfa et al. 2020 Structural analysis of strike-slip faults in the Tarim intracratonic basin. *Chinese Journal of Geology*, 55(1): 1-16.
- 杨 率, 邬光辉, 朱永峰等. 2022. 塔里木盆地北部地区超深断裂油藏关键成藏期. 石油勘探与开发, 49(2): 249-261.
- Yang Shuai, Wu Guanghui, Zhu Yongfeng et al. 2022. Key oil accumulation periods of ultra-deep fault-controlled oil reservoir in northern Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2): 249-261.
- 余朝华. 2008. 渤海湾盆地济阳坳陷东部走滑构造特征及其对油气成藏的影响研究(博士学位论文). 山东青岛: 中国科学院海洋研究所. 1-140.
- Yu Zhaohua. 2008. Study of Strike-Slip Structure Feature and Its Influence on the Hydrocarbon Accumulation in East Jiayang Depression, Bohai Bay Basin (PhD Thesis). Qingdao, Shandong: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences. 1-140.
- 张光亚, 王红军, 李洪辉. 2002. 塔里木盆地克拉通区油气藏形成主控因素与油气分布. 科学通报, 47(增刊): 24-29.
- Zhang Guangya, Wang Hongjun and Li Honghui. 2002. Main controlling factors of oil and gas reservoir formation and oil and gas distribution in the Craton zone of Tarim Basin. *Chinese Science Bulletin*, 47(suppl.): 24-29.
- 张光亚, 赵文智, 王红军等. 2007. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统. 石油与天然气地质, 28(5): 653-663.
- Zhang Guangya, Zhao Wenzhi, Wang Hongjun et al. 2007. Multicycle tectonic evolution and composite petroleum systems in the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 28(5): 653-663.
- 张银涛, 陈 石, 刘 强等. 2023. 塔里木盆地富满油田F₁₉断裂发育特征及演化模式. 现代地质, 37(2): 283-295.
- Zhang Yintao, Chen Shi, Liu Qiang et al. 2023. Development characteristics and evolution model of F₁₉ fault in Fuman oilfield, Tarim Basin. *Geoscience*, 37(2): 283-295.
- 张银涛, 余一欣, 谢 舟等. 2024. 塔里木盆地富满地区走滑断裂带精细刻画及勘探应用成效. 现代地质, 38(6): 1417-1430.
- Zhang Yintao, Yu Yixin, Xie Zhou et al. 2024. Identification of strike-slip faults and exploration breakthroughs in the Fuman area, Tarim Basin. *Geoscience*, 38(6): 1417-1430.
- Dooley T P and Schreurs G. 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574-575: 1-71. DOI: 10.1016/j.tecto.2012.05.030.
- Sylvester A G and Smith R R. 1976. Tectonic transpression and basement-controlled deformation in San Andreas fault zone, Salton trough, California. *AAPG Bulletin*, 60(12): 2089-2101. DOI: 10.1306/C1EA3A73-16C9-11D7-8645000102C1865D.
- Xia J K, Zhong Z Q, Huang S Y et al. 2023. The proto-type basin and tectono-paleogeographic evolution of the Tarim Basin in the Late Paleozoic. *Frontiers in Earth Science*, 11: 1097101. DOI: 10.3389/feart.2023.1097101.
- Yu F S, Zhang R F, Yu J F et al. 2022. Meso-Cenozoic negative inversion model for the Linhe Depression of Hetao Basin, China. *Geological Magazine*, 159 (4): 535-560. DOI: 10.1017/S0016756821001138.