

石油科学通报
Petroleum Science Bulletin
ISSN 2096-1693, CN 10-1405/TE

《石油科学通报》网络首发论文

题目：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
作者：陈石，梁鑫鑫，张银涛，谢舟，黄伟，宋兴国，陈九洲，彭梓俊，杨俊鹏
收稿日期：2024-10-14
网络首发日期：2025-01-24
引用格式：陈石，梁鑫鑫，张银涛，谢舟，黄伟，宋兴国，陈九洲，彭梓俊，杨俊鹏. 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[J/OL]. 石油科学通报. <https://link.cnki.net/urlid/10.1405.TE.20250123.1801.004>



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。

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

陈石^{1,2*}, 梁鑫鑫^{1,2}, 张银涛³, 谢舟³, 黄伟^{1,2}, 宋兴国^{1,2}, 陈九洲³, 彭梓俊³, 杨俊鹏³

1 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3 中国石油塔里木油田公司, 库尔勒 841000

*通信作者, chenshi4714@163.com

收稿日期: 2024-10-14; 修回日期: 2024-12-12

国家自然科学基金面上项目(42472186)资助

摘要 富满油田古生界超深层走滑断控缝洞型油气藏是塔里木盆地油气勘探开发的热点,但目前对区域内走滑断层发育特征、演化期次划分以及相应的控圈规律目前尚缺乏相关研究。本文基于富满油田新采集的三维地震资料,结合相干和最大似然等平面属性,对走滑断裂的空间展布特征进行了精细解译,并综合不整合构造、断层交切关系以及地层沉积特征等,厘定了走滑断层的活动时期,同时综合储集体特征与断裂空间展布的关系,对圈闭的类型和特征进行了划分与总结。研究表明,富满油田三维工区内走滑断裂平面展布具有典型分区发育的特征,可划分为4个变形区,包括断裂斜交区、边界限制区、主干断裂发育区以及断裂弱发育区。富满油田古生界走滑断裂垂向上由下至上可划分出3个构造变形层,深部构造变形层(TC₃之下)、中部构造变形层(TC₃-TO_{3t})以及浅部构造变形层(TO_{3t}-TP)。深部构造变形层中,基底普遍发育裂陷结构且走滑断层活动强度较弱;中部构造变形层中,走滑断裂活动强烈,大部分于奥陶系碳酸盐岩顶面附近发育正花状构造;浅部构造变形层中,与走滑断裂活化相关的雁列式正断层广泛发育,垂向上具有分层分布的特征。走滑断裂的演化过程整体可大致厘定出3个主要活动期次,分别为中晚寒武世、中晚奥陶世以及志留-石炭纪,其中大部分断裂活动终止于中晚奥陶世,仅有部分晚期活化的大型走滑断层持续活动至志留-石炭纪。储层发育规模及位置受断裂的空间展布特征影响,在侧向致密基岩和上奥陶统盖层遮挡下,组合形成断控缝洞型圈闭,依据断裂平面几何学特征可划分出6类圈闭,分别为羽状型、辫状型、线性型、马尾状型、菱形叠接型以及软连接型。

关键词 塔里木盆地; 富满油田; 走滑断裂; 分区发育; 分层变形; 分期活动; 断控缝洞型圈闭

中图分类号: P618.13; TE122

Development characteristics of Paleozoic strike-slip fault and its controlling on traps in Fuman Oilfield, Tarim Basin

CHEN Shi^{1,2}, LIANG Xinxin^{1,2}, ZHANG Yintao³, XIE Zhou³, HUANG Wei^{1,2}, SONG Xingguo^{1,2},
CHEN Jiuzhou³, PENG Zijun³, YANG Junpeng³

1 State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

Received: 2024-10-14; Revised: 2024-12-12

Abstract The Paleozoic ultra-deep strike-slip fault-controlled fracture-vuggy reservoirs within the Fuman Oilfield represent a focal point for hydrocarbon exploration and development in the Tarim Basin. However, current research

on the regional development characteristics, evolutionary phases, and the governing principles of these strike-slip faults remains scarce. In this study, based on newly acquired 3-D seismic data from the Fuman Oilfield, and seismic planar attributes such as coherence and likelihood, we have conducted a refined interpretation of the spatial distribution patterns of the strike-slip faults. By integrating structural features of unconformities, the intersectional relationships of faults, and sedimentological characteristics of the strata, the active periods of the strike-slip faults are clarified. Concurrently, the classification and summary of trap types and their characteristics have been based on the correlation between reservoir attributes and the spatial arrangement of faults. The research reveals that the planar distribution of strike-slip faults across the 3D surveys of the Fuman Oilfield exhibits distinct zonal characteristics, categorizable into four deformation zones: the oblique zone of faults, the boundary-restricted zone, the main fault development zone, and the weak fault development zone. The Paleozoic strike-slip faults within the Fuman Oilfield can be stratified into three structural deformation layers from the deep to shallow: the deep structural deformation layer (below TC₃), the middle structural deformation layer (TC₃-TO_{3t}), and the shallow structural deformation layer (TO_{3t}-TP). In the deep structural deformation layer, the basement generally exhibits rift structures with weak strike-slip fault activity; in the middle structural deformation layer, strike-slip faulting is intense, with most developing positive flower-like structures near the top surface of the Ordovician carbonate rocks; in the shallow structural deformation layer, en echelon normal faults associated with the reactivation of strike-slip faults are widely developed, and they exhibit a vertically layered distribution characteristic. The evolution of the strike-slip faults can be delineated into three principal phases of activity: the Middle to Late Cambrian, the Middle to Late Ordovician, and the Silurian-Carboniferous. The majority of these faults ceased activity by the Middle to Late Ordovician, with only a few large, later reactivated strike-slip faults remaining active into the Silurian-Carboniferous. The scale and positioning of reservoir development are significantly influenced by the spatial distribution of the faults. Under the sealing of lateral dense bedrock and the Upper Ordovician caprock, fault-controlled fracture-cave traps are formed. Based on the geometric characteristics observed on the fault plane, the traps can be further classified into six distinct types: pinnate, braided, linear, horsetail, diamond superimposed, and soft connection types.

Key words Tarim Basin; Fuman Oilfield; strike-slip fault; zone development; layered deformation; multi-stage evolution; fault-controlled fracture-vuggy type trap

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.001

0 引言

近年来,随着地球物理技术的持续突破与创新,在塔里木盆地古生界深层与超深层识别出了一系列走滑断裂^[1-3]。相较于板块边缘的大型走滑断裂,塔里木盆地内的走滑断裂发育在克拉通内部,平面延伸距离短(大部分小于 50 km),滑移距小(小于 2 km),属于板内小滑移距断裂^[4-6]。

沿盆内走滑断裂,在塔北、塔中隆起及阿满过渡带先后取得了一系列重大油气勘探发现,包括塔河油田、哈拉哈塘油田、塔中 I 号气田、顺北油田,以及近年来最大的油气勘探发现——富满油田。富满油田目前年产量近五百万吨,累计提交储量超十亿吨,区域内包含多条富油断裂,如 F₁17、F₁19、F₁20 等^[7-11],并取得了富东 1 井的新突破^[12],落实了走滑断裂与深部台缘带耦合控储控藏的新规律。近年来,众多学者对台盆区走滑断裂的几何学、运动学及动力学特征均开展了详尽研究,普遍认为走滑断裂具有规模分级、平面分区、垂向分层、走向分段、演化分期的特征^[13-20],同时具有控圈控储控藏的作用^[5, 21-24]。但是前人研究区域主要集中于塔中、塔北隆起以及顺北地区,而富满油田属于勘探开发热点新区,前期受三维地震资料未覆盖限制,目前整体研究程度仍较低,走滑断裂整体发育及演化特征尚未明确,且富满油田内走滑断裂控圈规律也缺乏详尽研究,限制了进一步选区评价及目标优选,也不

利于后续深化油气开发进程。

本文基于富满油田三维高精度地震资料,结合相干、曲率、最大似然等属性,充分识别并解译三维区内各级走滑断裂,明确断裂空间展布特征,厘定断裂演化期次;结合振幅变化率等地震属性以及剖面断裂破碎带发育特征,总结富满油田圈闭发育类型,并总结走滑断裂控圈规律,对富满油田后续布井以及油气田开发具有一定地质指导意义。文中提出的走滑断裂控圈类型,探讨了走滑断裂控圈模式,可为相关研究提供一定参考。

1 区域地质概况

塔里木盆地位于新疆维吾尔自治区南部,面积达 $4 \times 10^5 \text{ km}^2$,油气资源极其丰富,是我国最大的陆内含油气叠合盆地^[25-26]。盆地整体内部隆坳相间,具有“三隆四坳”的构造格局。富满油田主体位于盆地中部北部坳陷的阿满过渡带,南北分别塔中隆起与塔北隆起相接,东西分别与满加尔凹陷与阿瓦提凹陷毗邻,整体形态呈马鞍状展布(图1)。

阿满过渡带处于盆地中部,属于克拉通内部构造环境,整体构造活动较盆地边缘更稳定。然而盆地夹持于中亚构造域与特提斯构造域之间^[27],周缘被天山、昆仑山及阿尔金山环绕,且造山带发生了多期强烈活动,阿满过渡带也经历了多个构造演化阶段。自晚新元古代 Rodinia 超大陆裂解以来^[28-29],周缘各洋盆处于持续扩张状态,盆地内部整体处于弱伸展的构造环境,基底中发育一系列裂陷结构^[23, 30](图2),阿满过渡带在该阶段整体构造稳定,发生稳定沉降。加里东中期—海西早期,南部古昆仑洋和古阿尔金洋开始逐渐俯冲闭合^[31-32],盆地内部变为挤压构造应力环境,塔中与塔北隆起发生隆升,阿满过渡带处于强挤压环境并发育低凸起。海西中晚期—印支期,盆地北缘南天山俯冲闭合^[33-34],南部原特提斯洋关闭,阿满过渡带处于持续强挤压环境。燕山期—喜山期,阿满过渡带发生构造微调且持续埋深稳定沉降,并于喜山期完成构造定型^[35]。

阿满过渡带整体地层发育齐全,古生界-新生界地层均有发育(图3)。受沉积环境变化影响,富满油田内古生界地层岩性具有显著分层差异变化特征。寒武系—中奥陶统主体为碳酸盐岩(除下寒武统玉尔吐斯组泥岩和中寒武统膏盐岩外),上奥陶统—石炭系为碎屑岩,二叠系广泛发育火成岩。富满油田内古生界垂向上存在多套储盖组合,与下寒武统玉尔吐斯组烃源岩组合形成丰富的含油气系统。目前主力含油气层系为中下奥陶统鹰山组(O_{1-2y})和上奥陶统一间房组(O_{2y}),垂向上被上奥陶统区域性厚层泥岩封盖。轮探1井等超深探井^[36-37]结果表明,下寒武统肖尔布拉克组(C_{1x})和吾松格尔组(C_{1w})具有巨大油气勘探潜力,垂向上与中寒武统膏盐岩形成储盖组合,是塔里木盆地重点油气勘探接替领域。

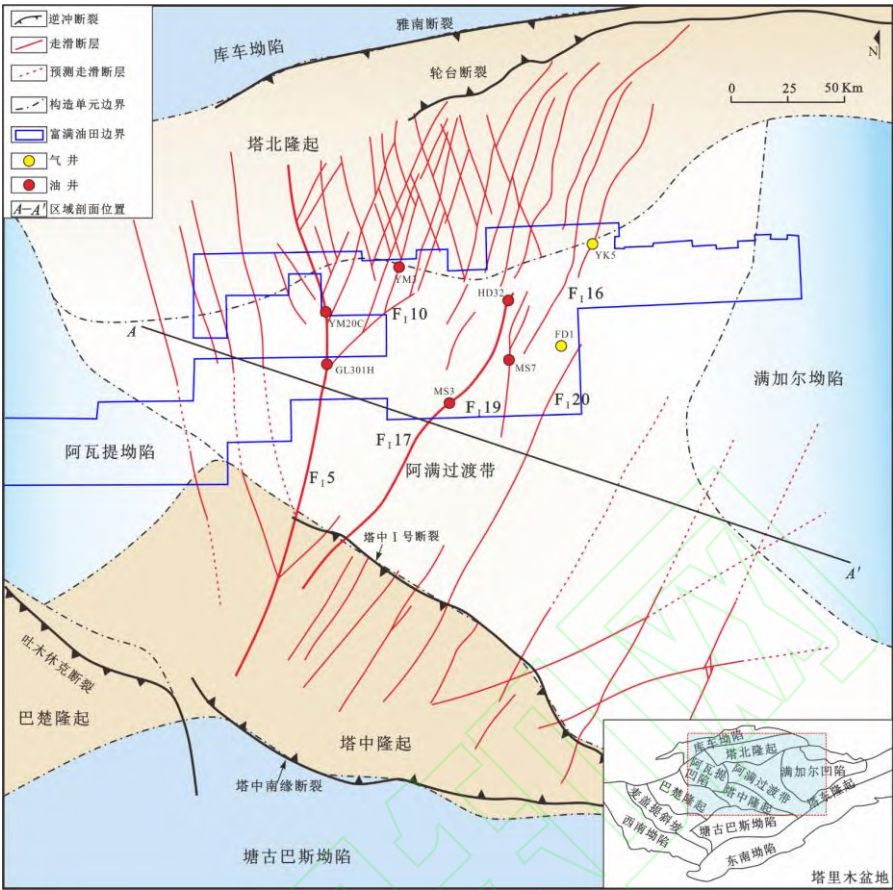


图 1 富满油田区域构造位置及邻区下古生界主要断裂分布
Fig.1 Regional structural location of Fuman Oilfield and Distribution of main faults of Lower Paleozoic in adjacent area

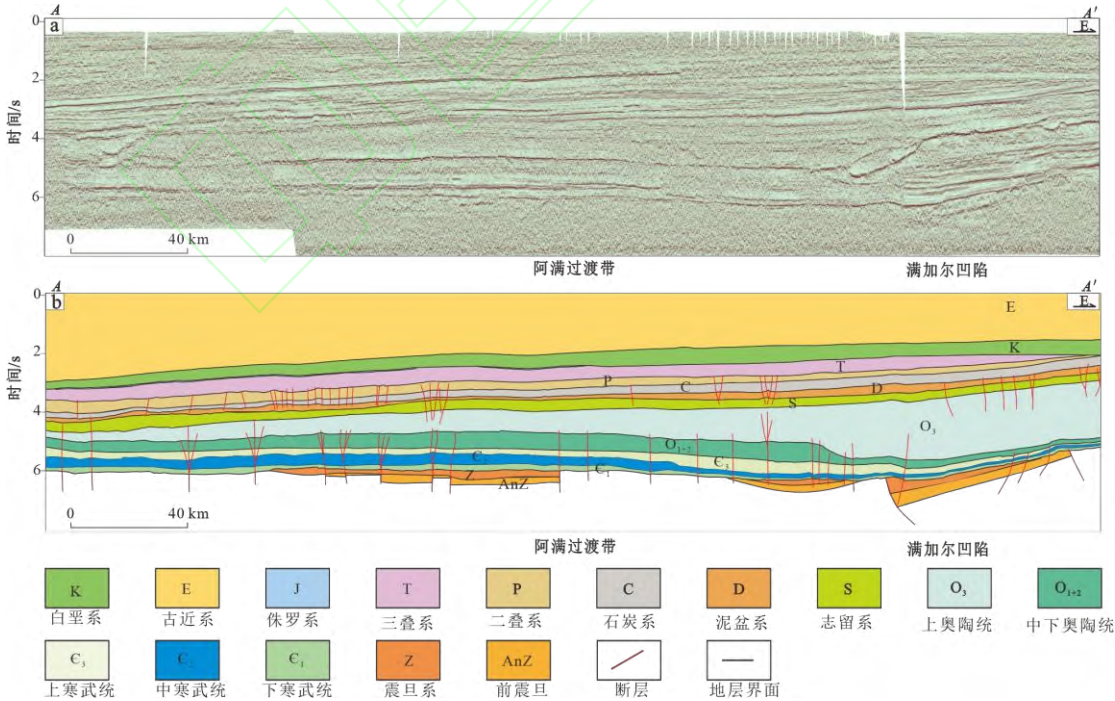


图 2 阿满过渡带区域地质剖面（剖面位置见图 1）
Fig.2 Regional geological section across the Manxi Low Uplift (the location is shown in Fig. 1)

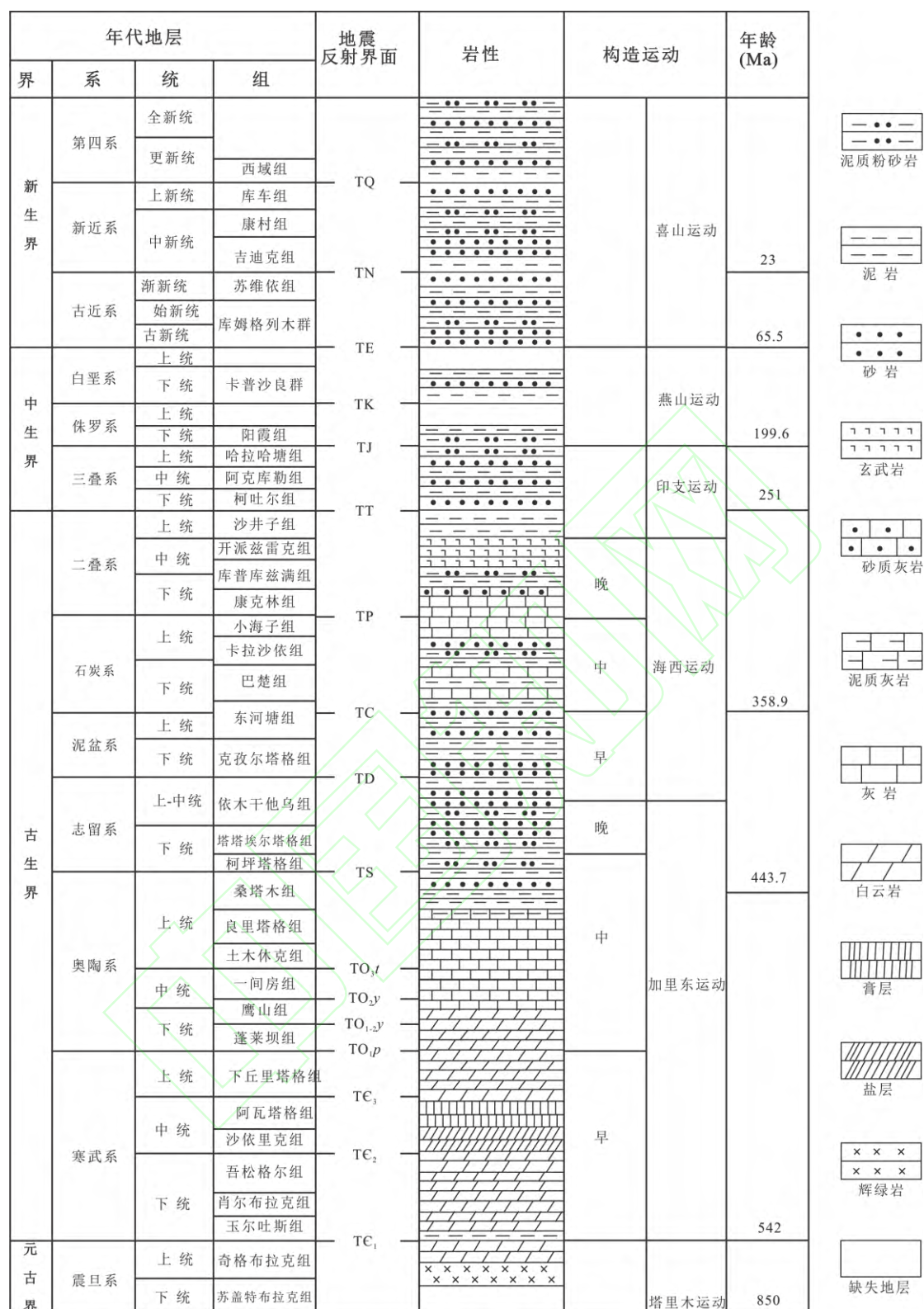


图3 富满油田及邻区地层格架

Fig.3 Stratigraphic framework of Fuman oil field and its adjacent area

2 富满油田古生界走滑断裂发育特征

塔里木盆地台盆区走滑断裂具有典型分区分带特征^[11, 23]。塔北和塔中隆起断裂体系特

征迥异，其中塔北隆起表现为两组小角度 X 型走滑断裂相互交切截止体系，塔中隆起表现为走滑断裂与 NW 向逆冲断层垂直限制交切体系，而富满油田所在的阿满过渡带位于两大断裂体系之间的过渡部位，断裂发育特征同时受到塔北和塔中断裂系统的影响（图 1）。

富满油田矿权内走滑断裂体系复杂，已识别 I 级走滑断裂 16 条，II 级走滑断裂 17 条，总长度超过 700 km。目前油田的重点勘探开发区域主要靠近满加尔凹陷，地球物理资料采集区域也主要集中于该区域。本文利用油田近年新采集的三维地震资料，结合相干及最大似然等属性，对三维工区内走滑断裂开展精细解析，总结了断裂的三维空间展布形态，并重点厘定落实了断裂的活动期次。

2.1 走滑断裂平面展布特征

富满油田三维工区内走滑断裂平面展布具有典型分区发育的特征，可依据平面总体展布形态大致划分为 4 个变形区，包括断裂斜交区、边界限制区、主干断裂发育区以及断裂弱发育区（图 4e）。

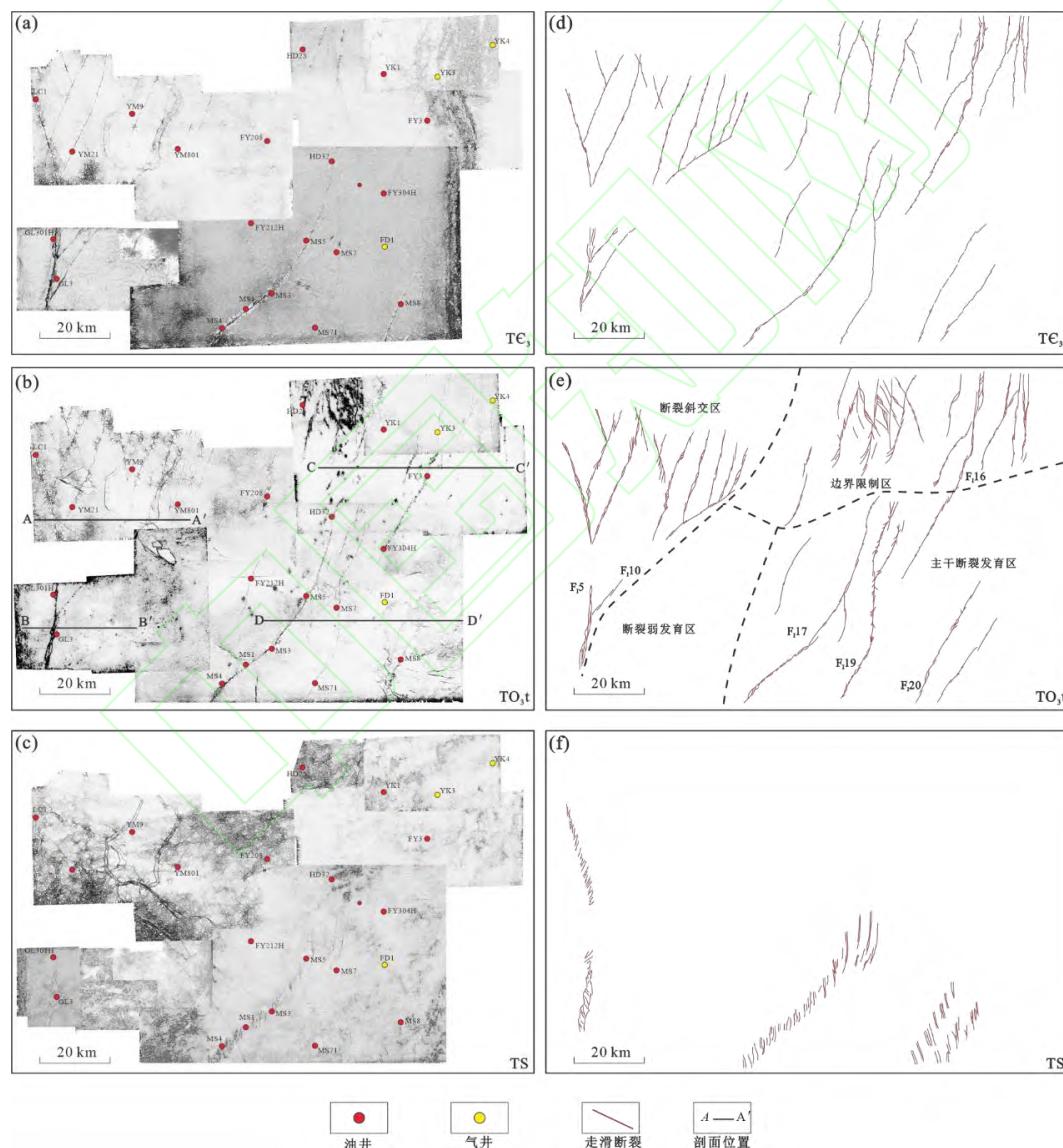


图 4 塔里木盆地富满油田走滑断裂平面特征图(a)上寒武统底面相干；(b)奥陶系一间房组顶面相干；(c)志留系底面相干；(d)上寒武统底面断裂展布特征；(e)奥陶系一间房组顶面断裂展布特征；(f)志留系底面断裂展布特征

Fig.4 Plane characteristic map of strike-slip faults in Fuman Oilfield, Tarim Basin

断裂斜交区位于富满油田三维覆盖区西北部,区内走滑断裂发育数量多、活动性强,以 F_15 和 F_110 两条一级断裂为主干,限制了自塔北隆起中部两组小角度X型断裂向南的持续延伸。边界限制区位于富满油田三维区东北部,区内走滑断裂发育密集,且断裂整体为塔北隆起东部NNE向走滑断裂的向南延续,大部分终止于塔北隆起与阿满过渡带的边界部位,仅 F_116 跨越构造单元边界持续向南。主干断裂发育区位于富满油田三维区东南部,断裂主体为由塔中隆起向北延伸发育的NE向断裂,整体发育规模较大,包括 F_117 和 F_120 两条平面延伸距离超过150km的跨单元大型走滑断裂。断裂弱发育区位于富满油田三维区西南部,区内基本不发育I、II级走滑断裂,仅可从地震上识别出一系列延伸距离短的小型断裂。

研究区内走滑断裂深浅层各关键构造界面断裂展布特征存在显著差异。上寒武底面断裂特征(图4a,d)显示,各区内走滑断裂发育相对较连续,平面上主体以小型断片断续线性相接,或者呈软连接形式叠接, F_15 和 F_117 等大型走滑断裂局部分支断裂,发育羽状或辫状构造。奥陶系一间房组顶面断裂(图4b,e)相较于上寒武统底面,走滑断裂连续性显著增强,活动性增强,走滑派生构造增多,平面上破碎带宽度增大,大量发育分支断层,组合形成辫状、菱形叠接、软连接、马尾、斜列以及羽状等复杂构造样式,并且在边界限制区内NNE向走滑断裂之间相互作用发育连接断层,组合形成平行相邻叠加样式。志留系底界断裂发育特征(图4c,f)显示,浅层雁列式正断层仅沿断裂斜交区及主干断裂发育区内的大型走滑断层发育,包括 F_15 、 F_110 和 F_120 。其中 F_15 北部正断层呈左阶式分布,南部两侧发育长条形aa边界地堑断层,内部正断层呈右阶排列。

2.2 走滑断裂剖面发育特征

受垂向岩性变化以及断裂多期活动影响,塔里木台盆区内走滑断裂普遍具有垂向分层差异变形的特征^[22,38]。根据断裂垂向变形差异以及岩性分布,富满油田古生界走滑断裂垂向上由下至上可划分出3个构造变形层(图5),深部构造变形层(TC_3 之下)、中部构造变形层(TC_3 - TO_{3t})以及浅部构造变形层(TO_{3t} -TP)。深部构造变形层中,基底裂陷与古隆起广泛分布,走滑断裂向下可插入基底,位于裂陷边缘或正断层上方;走滑断层活动性较弱,主要发育直立线性走滑构造,局部在上寒武统底面(TC_3)附近发育分支,发育半花状构造;中寒武统膏盐层整体能干性弱,受局部构造应力变化影响,断层破碎带内发育盐变形构造,包括盐丘、盐席以及盐枕等。中部构造变形层中主要岩性均为碳酸盐岩,走滑断层活动强度大,普遍在一间房组顶面(TO_{3t})附近发育分支断层,组合形成花状构造,并使地层发育显著的上拱或下掉变形。受沉积环境转变影响,浅部构造变形层中岩性转变为碎屑岩,且层内主要发育雁列式正断层,组合形成地堑或半地堑构造。

研究区内各变形区内断层剖面特征存在显著差异。断裂斜交区内(图6,剖面AA'),深部构造层中基底裂陷结构清晰,发育大型基底正断层;大型走滑断层直插基底,如 F_15 和 F_110 ,而且区内走滑断层整体活动弱,呈直立走滑,不发育分支断层;部分仅在早期活动的走滑断层向上终止于中寒武统内部,未持续活动至碳酸盐岩顶面。中部构造变形层中,在一间房组顶面附近,断层活动强烈,发育分支断层,且地层发育显著变形;构造层内部发育一系列层内走滑断层,向上未断至一间房组顶面,向下未插入下部构造层,但地震剖面断距清晰,且普遍发育地震串珠结构。浅部构造层中仅 F_15 上部发育正断层及相关地堑结构,其余部位整体地层发育平缓,局部受后期火成岩活动影响,地层变形强烈。

断裂弱发育区内(图6,剖面BB')无大型走滑断裂发育,深部构造变形层内基底整体结构均一,仅在局部发育小型裂陷,且无走滑断裂插入基底; F_15 断裂附近,有部分走滑断裂活动终止于上寒武统底面附近,属于隐伏断裂。中部构造变形层中断层活动强度较弱,未发育一二级断层,仅发育一系列碳酸盐岩层内断裂,分布于上寒武统-中奥陶统内,且普遍未断至一间房组顶面(TO_{3t}),剖面上断距清晰、地震串珠结构显著。浅部构造层中,由于下部走滑断层未发生活化,地层产状平缓未被错断形成正断层。

边界限制区（图 6，剖面 CC'）内，下部构造层中基底结构不均一，正断层分布广泛，裂隙与古隆起交替分布，走滑断层活动性弱，呈线性直立走滑，主干断层两侧基本不发育分支断层。中部构造层内走滑断层发育密集，活动强烈，主体终止于一间房组顶面，并发育分支断层形成花状构造；地震剖面特征显示，在中奥陶统内部沿层密集发育一系列串珠结构，并且碳酸盐岩层内断层广泛分布；逆冲断层发育，断面清晰，向上可断穿一间房组顶面，向下顺层滑脱于中寒武统膏盐岩内部。上部构造变形层内地层结构稳定，未发育浅层正断层。

主干断裂发育区（图 6，剖面 DD'）内，下部构造变形层中基底整体处于大型裂隙斜坡边缘，少量基底正断层零星分布，大型主干走滑断层向下直插基底，如 F₁₇ 和 F₁₂₀，两侧发育分支断层，在上寒武统底面（TC₃）附近发育花状构造。中部构造变形层内，区内一级断裂均向上断至一间房组顶面，分支断层在主干两侧分散展布，组合形成花状构造；地震剖面上地震串珠结构广泛分布于碳酸盐岩内部，且有清晰断距，指示在大型走滑断裂之间广泛发育层间断层。浅部构造层中，在大型走滑断层上部发育正断层，分布于上奥陶统至石炭系内，组合形成地堑构造。

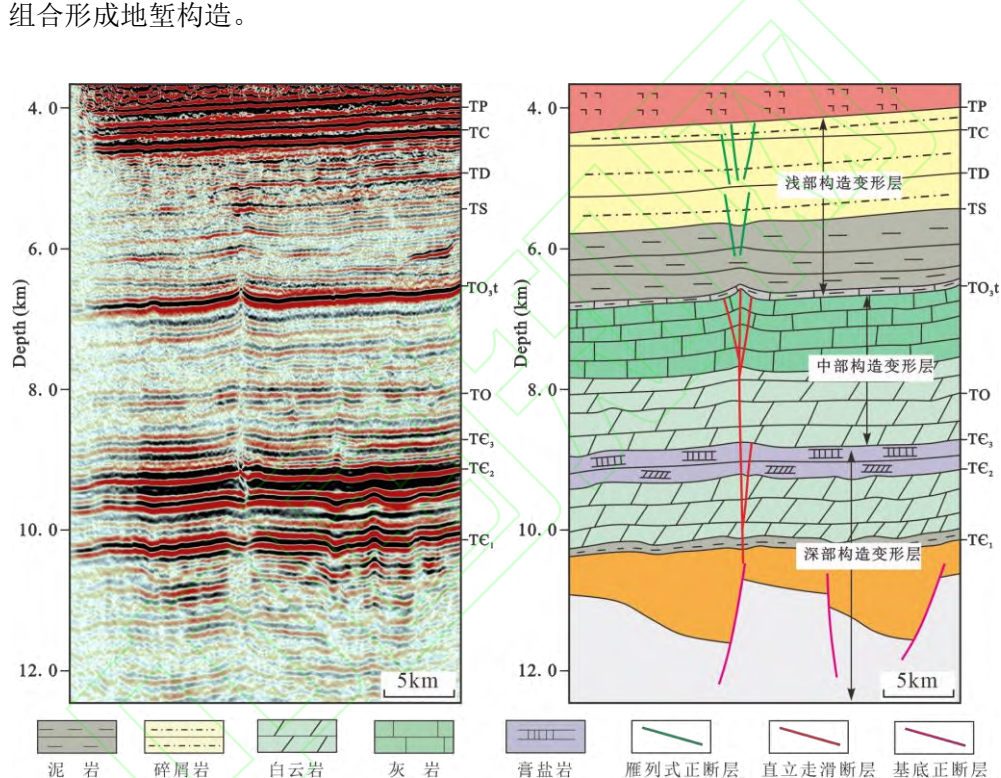


图 5 塔里木盆地富满油田走滑断裂分层差异变形结构

Fig.5 Layered deformation structure of strike-slip faults in Fuman Oilfield, Tarim Basin

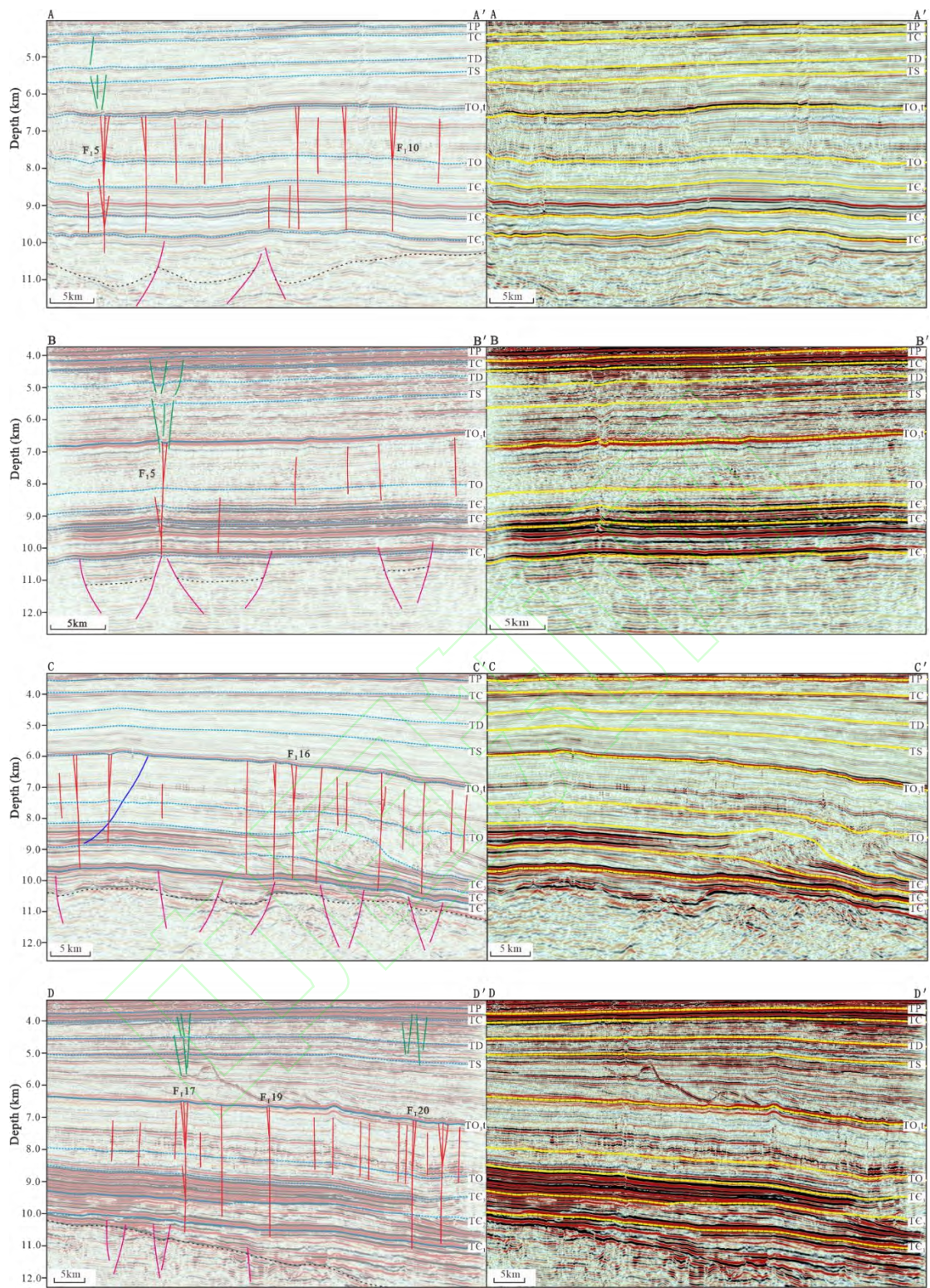


图6 塔里木盆地富满油田走滑断裂剖面发育特征（剖面位置见图4）

Fig.6 Typical seismic sections of sttrike-slip faults in Fuman Oilfield, Tarim Basin (the location is shown in Fig. 4)

2.3 走滑断裂活动期次

在对研究区三维资料精细解释的基础上，结合走滑断裂与地层的交切关系、破碎带内地层变形特征、不整合面与同沉积构造的发育位置以及断裂运动学特征，对富满油田走滑断裂

的演化过程进行恢复，整体可大致厘定出 3 个主要活动期次，分别为中晚寒武世、中晚奥陶世以及志留-石炭纪（图 7）。

中晚寒武世时（图 7a），研究区内走滑断层整体活动性较弱，主体呈线性直立走滑，不发育分支，但部分大型走滑断层活动较强（F₁₅ 和 F₁₇），于上寒武统底面附近发育花状构造，在中寒武统及上寒武统破碎带内发育局部角度不整合，且破碎带隆起翼部有同沉积增厚现象（图 6，剖面 BB'）。在断裂弱发育区以及斜交终止区内发育隐伏断裂，走滑断层向上活动终止于中寒武统和上寒武统内，指示断层在中晚寒武世存在活动（图 6，剖面 AA'，BB'）。

中晚奥陶世时（图 7a），走滑断层活动剧烈，断层主干附近发育分支，终止于一间房组顶面（TO_{3t}）附近，组合形成花状构造，而且一间房组顶面（TO_{3t}）褶皱变形强度最大，往上地层变形强度逐渐减弱，直至志留系底面（TS）之下趋于平缓（图 6，剖面 AA'），表明走滑断层活动在中奥陶世末达到峰值，并延续至晚奥陶世。研究区内，在主干走滑断层之间中下奥陶统内普遍发育层内次级断层，向上终止于中奥陶统内，向下消亡于下奥陶统和上寒武统内，且串珠结构沿断面发育，主体分布于中奥陶统内（图 6，剖面 AA'，BB'，DD'），表明断层在中奥陶世发生活动，并未持续活动至中奥陶世末。

研究区内浅层雁列式正断层平面上沿大型走滑断裂分布（图 4c），剖面上正断层分布于上奥陶统-石炭系内，形成地堑构造，并且在地堑内志留-石炭系均具有同沉积增厚现象，发育生长地层（图 6，剖面 AA'，BB'，DD'），表明富满油田走滑断裂的活化主要发生于中志留-石炭纪（图 7c）。

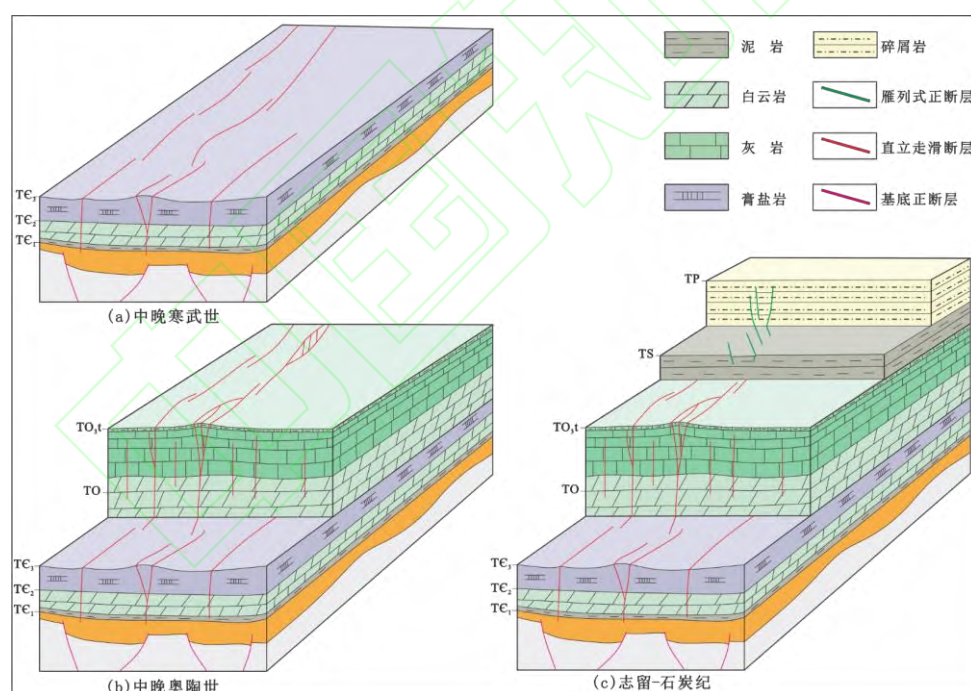


图 7 塔里木盆地富满油田走滑断裂分期演化模式

Fig.7 Multi-stages evolution model of strike-slip faults in Fuman Oilfield, Tarim Basin

研究区内走滑断裂的运动方向在不同发育时期也发生变化，其中以 F₁₅ 断裂最为典型。F₁₅ 断裂的地震水平切片显示该断裂运动方向改变，8400 m 切片对应上寒武统（图 8b），该切片显示 F₁₅ 断裂整体为右旋走滑断裂。上奥陶统内 F₁₅ 断裂南段变为左旋断裂（图 8c），北段运动方向保持右旋，反应了在中晚奥陶世该断裂活动并且运动方向发生改变。志留系相干切片显示 F₁₅ 断裂为雁列式断裂（图 8d），雁列断裂排列方向和剖面上的地层增厚表明该断裂在志留纪活化，并且继承中晚奥陶世的运动方向。

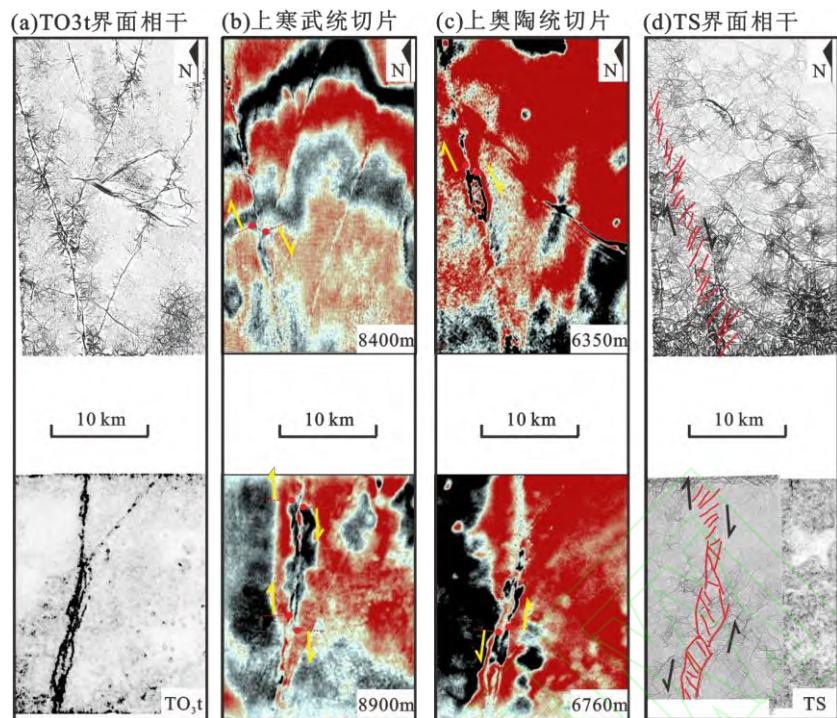


图 8 F₁₅ 断裂水平切片
Fig.8 F₁₅ fault horizontal section

3 圈闭类型及特征

富满油田沿走滑断裂带取得了一系列油气突破，成功钻获了众多高产油气井，且均分布于走滑断裂破碎带内^[3, 14]（图 9）。综合富满油田及邻区顺北油田油气藏特征，并对比了塔中及塔中隆起油气成藏规律，前人对阿满过渡带走滑断裂控藏模式进行了总结，建立了原地生烃、垂向运聚、分段富集的垂向复式断控油气成藏模式^[1, 3]。沿走滑断裂破碎带在奥陶系碳酸盐一间房组及鹰山组内广泛缝洞型储集体^[39-42]（图 9），且上奥陶统内发育厚层泥岩及泥灰岩，具有良好的垂向封闭性，同时走滑断裂周边侧向上未发生破碎的碳酸盐岩整体致密，基本不具备储、渗能力，具有极佳的侧向遮挡条件，因此富满油田内走滑断裂带圈闭要素完整，且整体属于断控缝洞型碳酸盐岩圈闭。

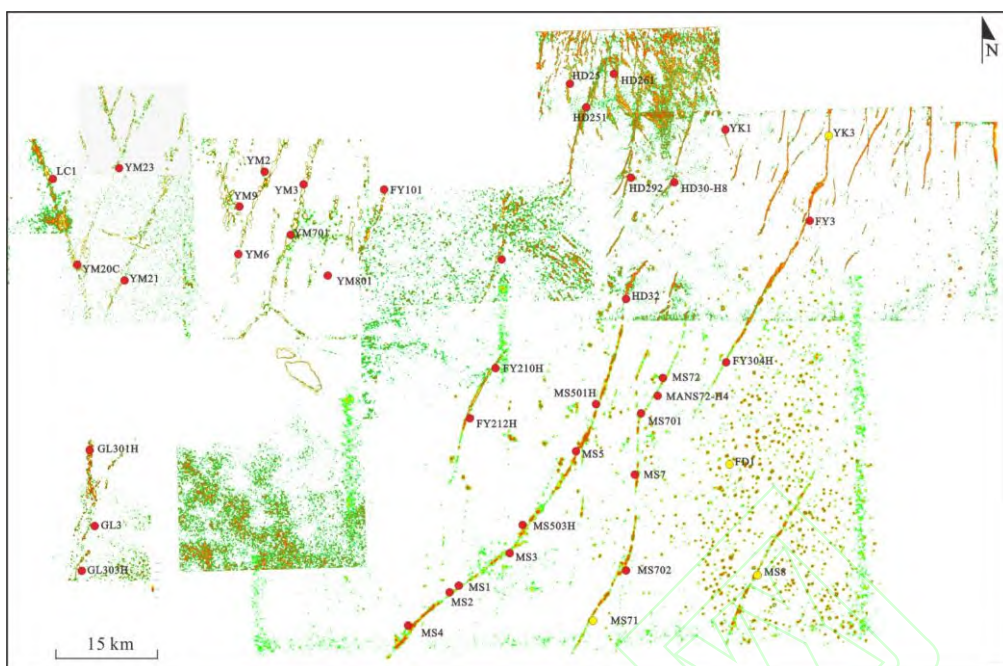


图 9 塔里木盆地富满油田一间房组顶面储层振幅变化率(位置见图 1)

Fig.9 Reservoir characteristics of Yijianfang Formation in Fuman Oilfield, Tarim Basin (the location is shown in Fig. 1)

断控缝洞型圈闭的形成受走滑断裂形成机制和演化过程影响，其整体特征与走滑断裂几何学密切相关，断裂空间展布特征影响了储层发育规模及位置，因此根据断裂平面几何学发育特征可划分出六类圈闭，分别为羽状型、辫状型、线性型、马尾状型、菱形叠接型以及软连接型（图 10）。

羽状型圈闭分布于走滑断裂主位移带内，主干断层两侧发育 R 破裂和 P 破裂，平面组合形成羽状构造。受派生构造充分发育的影响，断裂平面上破碎带宽度大，造成储集体平面上分布范围广泛，并且分支断层远离主干的位置储集体发育条件逐渐变差；剖面上，断裂整体破碎强度适中，主干断层两侧普遍发育分支，但除主干断层剖面串珠显示可向下延续较深，分支断层控制的缝洞型储层主要分布于一间房组顶面附近。缝洞型储集体在两侧致密碳酸盐岩基岩和上覆厚层泥岩的遮挡条件下，组合形成羽状型圈闭，代表性典型井组有 MS7、Mans72-H4 等，圈闭内储集体连通性较好，单井产能较高、累积产量较高。

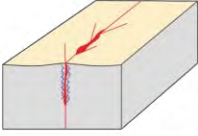
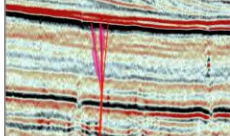
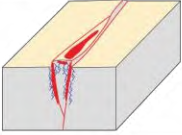
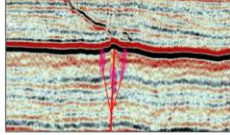
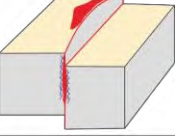
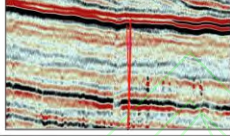
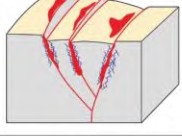
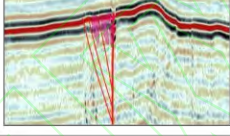
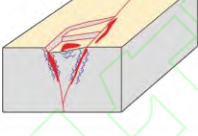
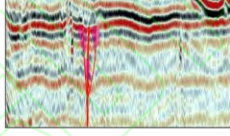
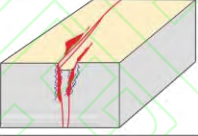
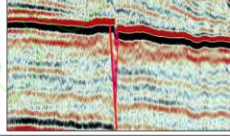
圈闭类型		圈闭形态			典型井组
		平面形态	立体模式图	地震剖面	
断控缝洞型圈闭	羽状				MS7、Mans72-H4 Mans72-H7 Mans71-H5
	辫状				MS1、MS2 MS20C、MS21 MS3
	线性				FY210H、FY504H MS72、FY304H
	马尾状				HD292H、HD30-H8 YM9
	菱形叠接				YM601、YM6 YM251H、YM701
	软连接				MS503H、MS7-H3 YK3、HD251 FY302H

图 10 塔里木盆地富满油田断控缝洞型圈闭类型

Fig.10 Genetic types of fault-controlled fracture-vaggy traps in Fuman Oilfield, Tarim Basin

辫状型圈闭常分布于走滑断裂的强变形部位，平面形态上呈糖葫芦串状分布，储集体平面分布范围广，两侧断片夹持的断块破碎剧烈，发育有效裂缝及溶蚀孔洞储层。剖面上，断裂形态常呈正花状构造或者半花状构造，主干断裂两次发育有分支，且断层活动强度大，破碎带内地层形变剧烈，发生强烈破碎作用，裂缝及溶蚀孔洞充分发育，除典型的地震串珠外，断裂破碎带内表现杂乱强反射。富满油田辫状构造控制的储集体在上奥陶统盖层和中奥陶统侧向遮挡的结合下，形成了辫状型圈闭，代表性典型井组有 MS1、MS2、MS3 等，主要分布于活动性强的大型走滑断裂带之上，且这类圈闭单井产量极其高，部分试油可达日产千吨，且递减慢、产量稳定、累产高。

线性型圈闭常分布于单条走滑断裂的弱变形部位，平面上呈线性分布，不发育分支断层，储集体平面上侧向延伸范围小，仅局限于主干断层两侧。剖面上断裂变形强度相对较弱，仅发育主干，储集体也集中于主干断层破碎带核部，常为裂缝型储层，地震上表现为杂乱弱反射。储集体在上覆泥岩和旁侧基岩的遮挡下，组合形成了线性型圈闭，代表性井组有 FY210H、MS72 等，较同一断裂的其他类型圈闭，这类圈闭单井产量更低，且储集体连通性差非均质性强。

马尾状圈闭分布于断裂的尾端，平面上呈帚状向外撒开，分支断裂发育密集，破碎带横向宽度大，储集体平面分布范围广。剖面上主干断层在一侧，另一侧发育反向调节断层，整

体活动强度较大,地层变形剧烈,使裂缝型储层充分发育,剖面上表现为杂乱中强反射,在盖层与侧向基岩的遮挡下,组合形成了马尾状圈闭,代表性井组有 HD292H 和 YM9 等,圈闭内储集体分布密集,但非均质性较强,单井初始产能较高,但不稳定。

菱形叠接型圈闭分布于走滑断裂叠接区,属于硬连接,两条主干断裂之间发育次级断层沟通相接,破碎带宽度大,储集体分布范围广泛。剖面上主干断层分布于两侧,中部发育次级断裂,受叠接方位以及断层活动方向的影响,张扭和压扭构造均可发育,储集体主要沿主干和次级断层分布,剖面上呈浅层强反射,与侧向遮挡物及上覆盖层组合形成菱形叠接型圈闭,代表性井组有 YM601 和 YM6 等,圈闭内储集体纵向连通性较好,但横向连通性较差,造成普遍单井产能适中,但不同井产能递减快慢差异大。

软连接型圈闭分布于走滑断裂叠接区内,但整体活动性弱,两条主干断裂直接不直接相连,且叠接区内不发育次级断层相接。剖面上仅有两侧的主干断裂发育,形态上及断裂活动强度类似线性型,且缝洞型储集体主要在主干断层核部发育,在侧向与垂向盖层的遮挡下,形成了软连接型圈闭,代表性井组有 MS503H、YK3 及 HD251 等,圈闭内储集体横向分布范围窄,但纵向连通性较好,单井产量与下伏烃源岩发育条件相关,下伏烃源岩沉积厚度大,则单井产量较高,且累产较高。

4 结论

1) 富满油田三维工区内走滑断裂平面展布具有典型分区发育的特征,可依据平面总体展布形态大致划分为 4 个变形区,包括断裂斜交区、边界限制区、主干断裂发育区以及断裂弱发育区。

2) 根据断裂垂向变形差异以及岩性分布,富满油田古生界走滑断裂垂向上由下至上可划分出 3 个构造变形层,深部构造变形层(TE_3 之下)、中部构造变形层(TE_3 - TO_{3t})以及浅部构造变形层(TO_{3t} -TP)。深部构造变形层中,基底裂陷与古隆起广泛分布,走滑断层活动性较弱。中部构造变形层中,走滑断层活动强度大,普遍在一间房组顶面(TO_{3t})附近发育分支断层,组合形成花状构造。浅部构造变形层中,主要发育雁列式正断层,组合形成地堑或半地堑构造。

3) 富满油田走滑断裂的演化过程整体可大致厘定出 3 个主要活动期次,分别为中晚寒武世、中晚奥陶世以及志留-石炭纪。断裂弱发育区内隐伏断裂活动终止于中晚寒武世,而其余断裂变形区内大部分断裂活动终止于中晚奥陶世,仅有部分晚期活化的大型走滑断层持续活动至志留-石炭纪。

4) 断控缝洞型圈闭的体特征与走滑断裂几何学密切相关,断裂的空间展布特征影响了储层发育规模及位置,可划分出 6 类圈闭,分别为羽状型、辫状型、线性型、马尾状型、菱形叠接型以及软连接型。

参考文献

- [1] 王清华,杨海军,汪如军,等.塔里木盆地超深层走滑断裂断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 Q H, YANG H H, WANG R J, 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.]
- [2] 杨学文,田军,王清华,等.塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域[J].中国石油勘探,2021,26(4):17-28.[YANG X W, TIAN J, WANG Q H, et al. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep formations in Tarim Basin[J]. China Petroleum

Exploration, 2021, 26(4): 17-28.]

[3] 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 J, YANG H J, ZHU Y F, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oil field, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 971-985.]

[4] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 124-136. [LIU Y Q, DENG S. Structural analysis of intraplate strike-slip fault with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 124-136.]

[5] 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.

[6] 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(05): 878-888. [DENG S, LI H L, ZHANG Z P, 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(05): 878-888.]

[7] 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(05): 1136-1145. [WANG Q H. Differential deformation and evolution characteristics of the no.17 strike-slip fault zone in the Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(05): 1136-1145.]

[8] 王清华, 杨海军, 李勇, 等. 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[J]. 地学前缘, 2022, 29(06): 239-251. [WANG Q H, YANG H J, LI Y, et al. Control of strike-slip fault on the large carbonate reservoir in Fuman, Tarim Basin-a reservoir model[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(06): 239-251.]

[9] 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 Q, ZHANG Y T, CHEN S, et al. Analysis of 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.]

[10] 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 Y T, CHEN S, LIU Q, et al. Development characteristics and evolution model of F₁19 fault in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Geoscience, 2023, 37(2): 283-295.]

[11] 宋兴国, 陈石, 杨明慧, 等. 塔里木盆地富满油田F₁16断裂发育特征及其对油气分布的影响[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(3): 99-109. [SONG X G, CHEN S, YANG M H, et al. Development characteristics of F₁16 fault in Fuman oilfield of Tarim Basin and its influence on oil and gas distribution[J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(3): 99-109.]

[12] 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.]

[13] 黄少英, 宋兴国, 罗彩明, 等. 塔北隆起X型走滑断裂成因机制的新解释[J]. 现代地质, 2021, 35(6): 1797-1808. [HUANG S Y, SONG X G, LUO C M, et al. Formation mechanism of

the conjugate strike-slip faults in the Tabei Uplift[J]. *Geoscience*, 2021, 35(6): 1797-1808.]

[14] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(02): 335-349. [SONG X G, CHEN S, XIE Z, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(02): 335-349.]

[15] 陈平, 能源, 吴鲜, 等. 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[J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(01): 33-42. [CHEN P, NENG Y, WU X, et al. Stratification and segmentation characteristics and tectonic evolution of Shunbei No.5 Strike-Slip Fault Zone in Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(01): 33-42.]

[16] HAN X Y, TANG L J, DENG S, et al. Spatial characteristics and controlling factors of the strike-slip fault zones in the northern slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin: Insight from 3D seismic data[J]. *Acta Geologica Sinica - English Edition*, 2020, 94(2): 516-529.

[17] 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.

[18] SUN Q Q, FAN T L, GAO Z Q, et al. New insights on the geometry and kinematics of the Shunbei 5 strike-slip fault in the central Tarim Basin, China[J]. *Journal of Structural Geology*, 2021, 150: 104400.

[19] 罗彩明, 梁鑫鑫, 黄少英, 等. 塔里木盆地塔中隆起走滑断裂的三层结构模型及其形成机制[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 118-131. [LUO C M, LIANG X X, HUANG S Y, et al. Three-layer structure model of strike-slip faults in the Tazhong Uplift and its formation mechanism[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 118-131.]

[20] ZHANG, Yintao, WU, Guanghui, WANG, Junfang, et al. A new growth model of fault attributes in a strike - slip fault system in the Tarim Basin[J]. *Acta geologica Sinica (Beijing)*. 2020, 94(5): 1373-1380.

[21] 邓尚, 刘雨晴, 刘军, 等. 克拉通盆地内部走滑断裂发育、演化特征及其石油地质意义: 以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2021, 45(6): 1111-1126. [DENG S, LIU Y Q, LIU J, et al. Structural styles and evolution models of intracratonic strike-slip faults and the implications for reservoir exploration and appraisal: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2021, 45(6): 1111-1126.]

[22] DENG S, LI H L, ZHANG Z P, et al. Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(1): 109-137.

[23] 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.

[24] JIANG T W, HAN J F, WU G H, et al. Differences and controlling factors of composite hydrocarbon accumulations in the Tazhong uplift, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 229-241.

[25] 何登发, 贾承造, 德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64-77. [HE D F, JIA C Z, DE S, et al. Formation and evolution of Polycyclic superimposed Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(1): 64-77.]

[26] 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 D F. Formation, evolution, geologic framework and hydrocarbon occurrence of multicycle superimposed sedimentary basins in China[J]. *Geoscience Frontier*, 2022,

29(6): 24-59.]

- [27] 许志琴, 李思田, 张建新, 等. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 1-22. [XU Z Q, LI S T, ZHANG J X, et al. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(1): 1-22.]
- [28] 邬光辉, 邓卫, 黄少英, 等. 塔里木盆地构造—古地理演化[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 305-321. [WU G H, DENG W, HUANG S Y, et al. Tectonic-paleogeographic evolution in the Tarim Basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(2): 305-321.]
- [29] 邬光辉, 陈鑫, 马兵山, 等. 塔里木盆地晚新元古代-早古生代板块构造环境及其构造-沉积响应[J]. 岩石学报, 2021, 37(8): 2431-2441. [WU G H, CHEN X, MA B S, et al. The tectonic environments of the Late Neoproterozoic-Early Paleozoic and its tectono-sedimentary response in the Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2021, 37(8): 2431-2441.]
- [30] ZHU G Y, CHEN W Y, YAN H H, et al. Sinian tectonic evolution and distribution of source rocks in northwest Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 144: 105826.
- [31] LI C X, WANG X F, LI B L, et al. Paleozoic fault systems of the Tazhong Uplift, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 39(1): 48-58.
- [32] 李传新, 贾承造, 李本亮, 等. 塔里木盆地塔中低凸起北斜坡古生代断裂展布与构造演化[J]. 地质学报, 2009, 83(8): 1065-1073. [LI C X, JIA C Z, LI B L, et al. Distribution and tectonic evolution of the Paleozoic fault system, the north slope of Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 83(8): 1065-1073.]
- [33] 高俊, 龙灵利, 钱青, 等. 南天山:晚古生代还是三叠纪碰撞造山带?[J]. 岩石学报, 2006, 22(5): 1049-1061. [GAO J, LONG L L, QIAN Q, et al. South Tianshan: A late Paleozoic or a Triassic orogen?[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(5): 1049-1061.]
- [34] HAN B F, HE G Q, WANG X C, et al. Late Carboniferous collision between the Tarim and Kazakhstan - Yili terranes in the western segment of the South Tian Shan Orogen, Central Asia, and implications for the northern Xinjiang, western China[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011, 109(3-4): 74-93.
- [35] 朱日祥, 赵盼, 赵亮. 新特提斯洋演化与动力过程[J]. 中国科学:地球科学, 2022, 52(1): 1-25. [ZHU R X, ZHAO P, ZHAO L. Tectonic evolution and geodynamics of the Neo-Tethys Ocean. *Science China Earth Sciences*[J]. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(1): 1-25.]
- [36] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 62-72. [YANG H J, CHEN Y Q, TIAN J, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 62-72.]
- [37] 朱光有, 胡剑风, 陈永权, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩地球化学特征与形成环境[J]. 地质学报, 2022, 96(6): 2116-2130. [ZHU G Y, HU J F, CHEN Y Q, et al. Geochemical characteristics and formation environment of source rock of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in well Luntan 1 in Tarim Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(6): 2116-2130.]
- [38] 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, 837354.
- [39] 云露. 顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 136-142. [YUN L. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 136-142.]

-
- [40] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统“断控”缝洞系统划分与形成机制[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 54-68. [HUANG C, YUN L, CAO Z C, et al. Division and formation mechanism of fault-controlled fracture-vug system of the middle-to-lower Ordovician, Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 54-68.]
- [41] 云露, 朱秀香. 一种新型圈闭: 断控缝洞型圈闭[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(1): 34-42. [YUN L, ZHU X X. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(1): 34-42.]
- [42] 陈立新, 王胜雷, 姜振学, 等. 哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶系断裂发育特征及断控区储层类型与分布预测[J]. 石油科学通报, 2024, 9(3): 408-421. [CHEN L X, WANG S L, JIANG Z X, et al. Fault characteristics, reservoir types and distribution prediction in a fault-controlled area in the Ordovician strata of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield[J]. Petroleum science Bulletin, 2024, 9(3): 408-421.]

作者简介: 陈石(1986年—), 博士, 副教授, 主要从事含油气盆地构造分析研究, chenshi4714@163.com。