

引文: 曾联波, 李浩, 张银涛, 等. 塔里木盆地超深层碳酸盐岩缝洞储集体类型与主控因素[J]. 天然气工业, 2025, 45(10): 141-152.
ZENG Lianbo, LI Hao, ZHANG Yintao, et al. Types and controlling factors of ultra-deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(10): 141-152.

塔里木盆地超深层碳酸盐岩缝洞储集体类型与主控因素

曾联波^{1,2} 李浩^{1,2} 张银涛³ 袁敬一³ 谢舟³ 吕文雅^{1,2} 谭笑林^{1,2}

1. 油气资源与工程全国重点实验室 [中国石油大学(北京)] 2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院

3. 中国石油塔里木油田公司勘探开发研究院

摘要: 超深层碳酸盐岩缝洞储层是塔里木盆地油气增储上产的重要接替领域, 其规模发育规律与分布预测是影响油气勘探成效的关键科学问题。为进一步厘清盆地该类储集体的类型及主控因素, 深化该储层发育规律认识并指导勘探选区。基于盆地地表露头、钻井、测井和三维地震资料, 采用地质、地球物理与人工智能相结合的研究方法, 对储集体特征及控制机制开展了系统研究, 识别出不均匀带状缝洞储集体、串珠状缝洞储集体和层状裂缝储集体3类储集体, 提出了岩石力学层纵向上对缝洞储集体的控制作用。研究结果表明: ①不均匀带状缝洞储集体主要受主干走滑断层控制, 其规模与非均质性受断层分段活动性影响, 叠接段的规模与非均质性明显大于平移段; ②串珠状缝洞储集体主要受次级走滑断层控制, 发育程度因断层部位而异, 以交汇区规模最大, 转折区次之, 端部最小; ③层状裂缝储集体则受区域构造应力场控制, 广泛分布于不同级别的走滑断层间, 非均质性较强; ④3类缝洞储集体在纵向上分布主要受岩石力学层控制, 高脆性岩石力学层更有利于缝洞储集体的发育。结论认为, 不均匀带状缝洞储集体是目前塔里木盆地超深层碳酸盐岩油气勘探开发的主要目标对象, 串珠状缝洞储集体是主干走滑断层之间油气勘探的首选对象, 层状裂缝储集体则是下一步值得探索的潜在对象。

关键词: 塔里木盆地; 超深层; 碳酸盐岩; 缝洞储集体; 走滑断层; 变形特征; 裂缝; 岩石力学层

中图分类号: TE122.1 文献标识码: A DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2025.10.011

Types and controlling factors of ultra-deep fractured-vuggy carbonate reservoirs in the Tarim Basin

ZENG Lianbo^{1,2}, LI Hao^{1,2}, ZHANG Yintao³, YUAN Jingyi³, XIE Zhou³, LYU Wenya^{1,2}, TAN Xiaolin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering//China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geoscience, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 3. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Tarim Oilfield Company, Korla, Xinjiang 841000, China)

Natural Gas Industry, Vol.45, No.10, p.141-152, 10/25/2025. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Ultra-deep carbonate fractured-vuggy reservoirs represent a critical replacement domain for oil and gas reserves and production increase in the Tarim Basin, and their development patterns and distribution prediction are crucial to oil and gas exploration effectiveness. To further clarify the types and main controlling factors of such reservoirs, further understand their development patterns, and guide exploration area selection, this paper systematically studies reservoir characteristics and controlling mechanisms based on surface outcrop, drilling, logging and 3D seismic data, by using a combined method of geology, geophysics, and artificial intelligence. Then, three types of reservoirs are identified, i.e., heterogeneous banded fractured-vuggy reservoirs, bead-like fractured-vuggy reservoirs, and layered fractured reservoirs. Finally, it is proposed that mechanical stratigraphy vertically controls fractured-vuggy reservoirs. The following results are obtained. First, heterogeneous banded fractured-vuggy reservoirs are primarily controlled by primary strike-slip faults, and their scale and heterogeneity are influenced by fault segment activities, with the scale and heterogeneity at the overlapping segment significantly greater than those at the translational segment. Second, bead-like reservoirs are mainly controlled by secondary strike-slip faults, and their development degree varies with fault zones, with the largest at the intersection zones, followed by the bend zones, and the smallest at the tips. Third, layered fractured reservoirs are under the control of regional tectonic stress field, and widely distributed among strike-slip faults of various scales, exhibiting strong heterogeneity. Fourth, the vertical distribution of these three types of fractured-vuggy reservoirs is primarily controlled by mechanical stratigraphy, with high-brittleness mechanical stratigraphy being more conducive to the development of fractured-vuggy reservoirs. In conclusion, heterogeneous banded fractured-vuggy reservoirs are currently the main targets for ultra-deep carbonate oil and gas exploration and development in the Tarim Basin, while bead-like fractured-vuggy reservoirs are the preferred targets for oil and gas exploration between primary strike-slip faults, and layered fractured reservoirs represent the potential targets worthy of further exploration.

Keywords: Tarim Basin; Ultra-deep; Carbonate rock; Fractured-vuggy reservoir; Strike-slip fault; Deformation characteristics; Fracture; Mechanical stratigraphy

基金项目: 国家自然科学基金企业创新发展联合基金重点项目“塔里木盆地超深层走滑断层对碳酸盐岩缝洞储层的控制机理研究”(编号: U21B2062)。

作者简介: 曾联波, 1967年生, 教授, 博士, 本刊编委; 主要从事复杂油气储层成储理论与方法研究工作。地址: (102249) 北京市昌平区府学路18号。ORCID: 0000-0002-6470-8206。E-mail: lbzeng@cup.edu.cn

0 引言

碳酸盐岩缝洞储层（埋藏深度大于 6 000 m）是塔里木盆地超深层油气勘探与开发的重要领域，其成藏条件优越，而规模缝洞储层的发育规律与分布预测是决定油气勘探开发成效的关键科学问题。与受不整合面和古地貌控制的岩溶储层相比，缝洞储层的埋藏深度更大，成因更复杂，分布预测难度更大^[1-3]。阐明缝洞储层的成因机制及主控因素，对超深层碳酸盐岩规模缝洞储层的评价预测及油气勘探开发具有重要意义。

已有勘探开发实践表明，塔里木盆地中北部超深层碳酸盐岩缝洞储层在空间分布上与走滑断层具有高度的相关性，走滑断层活动产生的缝网系统以及沿缝网系统流体流动形成的溶蚀孔洞是超深层碳酸盐岩缝洞储层的主要储集空间^[4-6]。近年来发现和投入开发的富满、顺北等大型油气田主要集中分布在延伸长度几十千米以上、构造变形相对较强的主干走滑断层带上^[7-10]。同时，利用三维地震资料对主干走滑断层之间的弱变形区域进行解释时，也发现了与主干走滑断层控制的缝洞储层具有明显差异的其他类型储集体^[11-13]。因此，开展超深层碳酸盐岩缝洞储集体类型与主控因素的系统研究，对深入认识超深层缝洞储层的发育规律以及下一步油气勘探选区具有重要的指导作用。

近年来，许多学者对塔里木盆地超深层碳酸盐岩缝洞储层进行了大量研究，尤其在主干走滑断层的不同分段对裂缝和缝洞储集体的控制作用研究方面取得了许多认识^[14-25]。笔者基于地表露头、钻测井、三维地震和生产测试资料，以塔里木盆地中北部阿满过渡带奥陶系碳酸盐岩为重点研究对象，采用地质、地球物理和人工智能相结合的方法，系统研究了塔里木盆地超深层主干走滑断层、次级走滑断层及其之间的碳酸盐岩缝洞储集体的分布特征，提出了超深层 3 类碳酸盐岩缝洞储集体的发育特征及其主控因素，可为该区下一步油气勘探开发提供借鉴。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部，总面积达 $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，是中国最大的含油气盆地。塔里木盆地位于欧亚板块南部，西伯利亚板块、哈萨克斯坦板块、柴达木板块和羌塘地块汇合处。盆地北部为天山造山带，西南部为西昆仑山造山带，东南部为阿尔金山造山

带^[26]。主要研究区位于塔里木盆地中北部的阿满过渡带，其东部紧邻满加尔凹陷，南北分别为塔中隆起和塔北隆起，构造形态呈鞍状。在晚奥陶世的近南北压应力作用下，阿满过渡带与塔北隆起、塔中隆起同时抬升形成，但构造抬升幅度较低，沉积地层厚度更大^[26]。阿满过渡带发育一系列北东—南西向走滑断层（如断层 F₁5、F₁10、F₁17、F₁19、F₁20、F₁21 等）（图 1a），这些大型走滑断层被称为干走滑断层，具有明显的分层变形特征，自下而上可划分为下寒武统盐下构造层、中寒武统膏盐岩构造层、上寒武统一奥陶统碳酸盐岩构造层与上奥陶统一二叠系碎屑岩构造层。在这 4 个构造层内，走滑断层的平面构造样式分别表现为线性构造、辫状构造、叠接构造与雁列构造，在剖面上则表现为多层花状构造与直立断层的组合^[10,14,18,20]。受主干断层差异活动性的影响，在它们之间的弱变形区内存在一系列起调节作用的次级走滑断层^[12]。次级走滑断层的走向主要有北东—南西向和北西—南东向两组，活动性较差，发育层位限制在上寒武统一奥陶统。

该区自晚寒武世至晚奥陶世发育一套较为完整的海侵沉积序列。丘里塔格组岩性以灰白色白云岩为主，蓬莱坝组岩性以灰褐色灰质白云岩为主，鹰山组下段岩性由底部的灰色白云质石灰岩过渡到上部的灰色泥晶石灰岩，上段岩性以灰色泥晶石灰岩为主，一间房组岩性以砂屑泥晶石灰岩为主（图 1b）。本次研究的目的层为中一下奥陶统一间房组—鹰山组，其岩性致密，储层基质孔隙度小于 1.5%，渗透率小于 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。目前开发的油气藏主要为受主干走滑断层控制的缝洞型储集体。

2 缝洞储层的储集空间特征

按照储集空间的类型，超深层碳酸盐岩缝洞储层可以划分为裂缝型储层与裂缝—孔洞型储层^[1-3,6-9]。裂缝型储层的储集空间主要为构造裂缝，其次还有少量的成岩裂缝以及沿裂缝发生溶蚀作用形成的溶蚀孔洞。裂缝型储层在常规测井响应中以较高的声波时差与较低的电阻率与围岩区分（图 2a），其内部的构造裂缝在成像测井中显示为暗色正弦曲线（图 2b），倾角较大。断层附近的裂缝型储层连通性较好，在钻井过程中以气测曲线值上升、钻时下降或轻微漏失为识别特征。在水平井段岩心上，构造裂缝呈陡立状近平行分布，形成了独特的栅状缝网系统（图 2d）。裂缝是流体流动的主要通道，为超深层碳酸盐岩岩溶

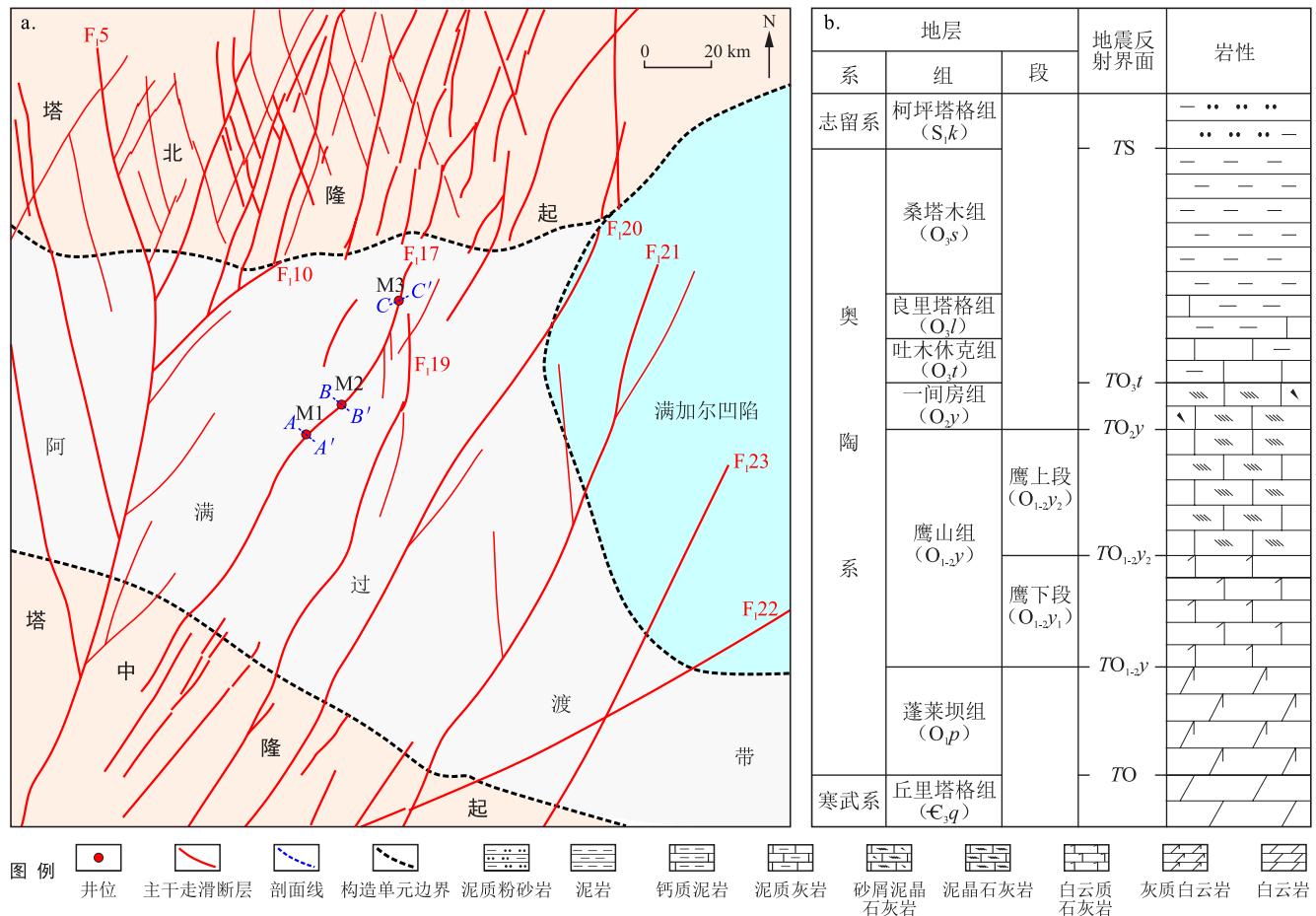


图1 塔里木盆地中北部构造单元分布与奥陶系地层综合柱状图

作用发育奠定了良好的基础。

裂缝 - 孔洞型储层是在裂缝形成的基础上，流体沿裂缝活动产生溶蚀作用形成的，主要的储集空间包括构造裂缝和次生溶蚀孔洞。裂缝 - 孔洞型储层相比于裂缝型储层具有更高的声波时差与更低的电阻率（图 2a），密集发育的裂缝 - 孔洞型储层在成像测井中表现为构造裂缝连接小片暗色孔洞（图 2c），在地震剖面中表现为强振幅或杂乱反射。在岩心和铸体薄片上，裂缝 - 孔洞型储层是最为常见的储集空间组合类型（图 2e、f），裂缝中通常可见有机质充填，这表明裂缝既是重要的储集空间，也是主要的渗流通道，并沟通了溶蚀孔洞，是缝洞储层及其有效性的关键因素。在钻井过程中，裂缝 - 孔洞型储层以规模性的钻井液漏失为特征（图 2a）。

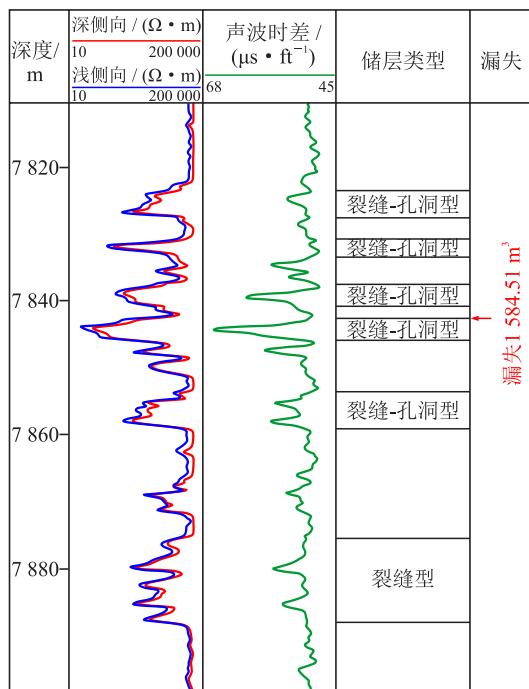
根据地表露头以及基于三维地震与人工智能结合的缝洞储集体精细刻画，在宏观上，上述裂缝及其次生溶蚀孔洞构成的碳酸盐岩缝洞储集体表现出不均匀带状缝洞储集体、串珠状缝洞储集体和层状裂缝储集体 3 种主要类型。

3 不均匀带状缝洞储集体

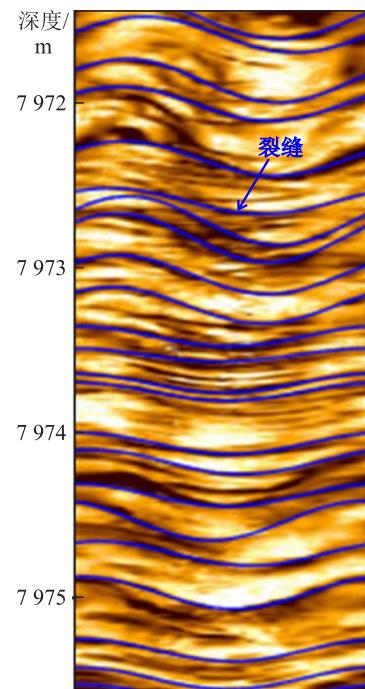
3.1 不均匀带状缝洞储集体特征

不均匀带状缝洞储集体主要沿主干走滑断层的走向分布，缝洞储集体的宽度在横向和纵向上具有明显变化。不均匀带状缝洞储集体的规模相对较大，储层的有效性和连通性相对较好，是目前塔里木盆地超深层碳酸盐岩油气开发的主力储集体类型。根据研究区主干走滑断层的构造解释与储层反演结果，主干走滑断层具有明显的差异分段变形特征，在横向可以划分为叠接拉分段、叠接挤压段与平移段 3 种典型的分段^[4,7,10]，不同分段的缝洞储集体发育规律各不相同。

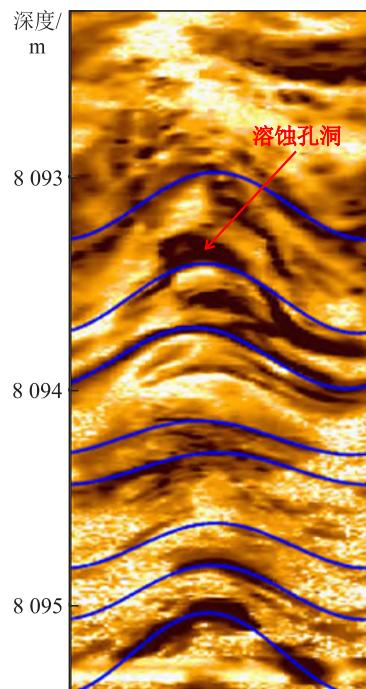
叠接拉分段的断层叠置和活动方式表现为左阶左行。在形成演化过程中，叠接拉分段整体为拉伸应力状态，最大主应力垂直，中间主应力和最小主应力水平，在剖面上形成逐级下掉的“负花状”断层组合样式，其边界断层具有正断层性质，内部发育多条分支断层（图 3a）。叠接挤压段的断层叠置和活



a. 缝洞储层测井响应特征



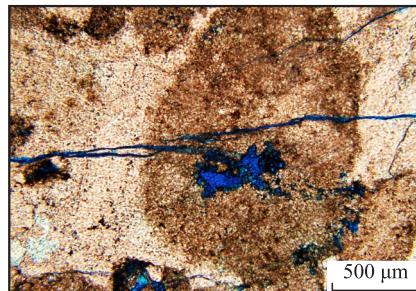
b. 裂缝型储层成像测井响应特征



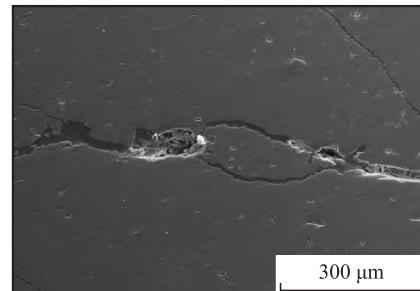
c. 裂缝-孔洞型储层成像测井响应特征



d. M1井, 井深7 980.41 m, 鹰上段, 泥晶灰岩, 发育棚状缝网系统, 岩心



e. M2井, 井深7 776.27 m, 鹰上段, 砂屑泥晶灰岩, 沿裂缝发育溶孔, 铸体薄片



f. M3井, 井深8 075.31 m, 鹰上段, 泥晶灰岩, 裂缝与溶孔部分被有机质充填, 扫描电镜

图 2 缝洞储层储集空间发育特征图

注: 1 ft=0.304 8 m。

动方式表现为右阶左行, 其形成演化过程中处于挤压应力状态, 最小主应力垂直, 最大主应力和中间主应力水平, 在剖面上形成中间高于两侧的“正花状”断层组合样式(图3b)。平移段主要表现为单条走滑断层的纯走滑活动, 在走滑断层的形成演化过程中, 中间主应力垂直, 最大主应力和最小主应力水平, 剖面上表现为单一直立断层样式(图3c)。

从5个不同叠接拉分段的统计结果来看, 叠接拉分段内部的缝洞储集体发育范围较大, 缝洞储层的平均宽度和厚度分别可达1 450 m与712 m, 裂缝及溶蚀孔洞发育程度更高的优质储层(孔隙度>5%)主要分布在其两侧的拉分区内, 尤其是靠近断距较大的边界断层一侧的区域(图3d)。叠接挤压段内部的缝洞储集体发育范围也较大。从5个不同叠接挤压段的统计结果来看, 缝洞储层平均宽度和厚度分别可达

1 387 m与701 m, 但裂缝与溶蚀孔洞发育程度更高的优质储层主要集中分布在叠接段的中部(图3e)。走滑断层平移段周围的缝洞储集体发育范围和发育程度整体小于上述叠接段。从5个不同平移段的统计结果来看, 缝洞储层平均宽度和厚度仅为814 m与407 m, 裂缝及其溶蚀孔洞主要集中分布在断层附近的区域内(图3f)。

3.2 不均匀带状缝洞储集体的主控因素

3.2.1 岩石力学层控制了储集体的纵向分布层位

主干走滑断层发育的4个不同构造层分别对应了4套岩石力学性质差异较大的岩石力学层, 不同岩石力学层力学性质的差异促使主干断层在应力作用下具有不同的变形特征^[5,18,23,25]。中奥陶统顶面作为区域内上下岩石力学性质差异最大的岩石力学界面,

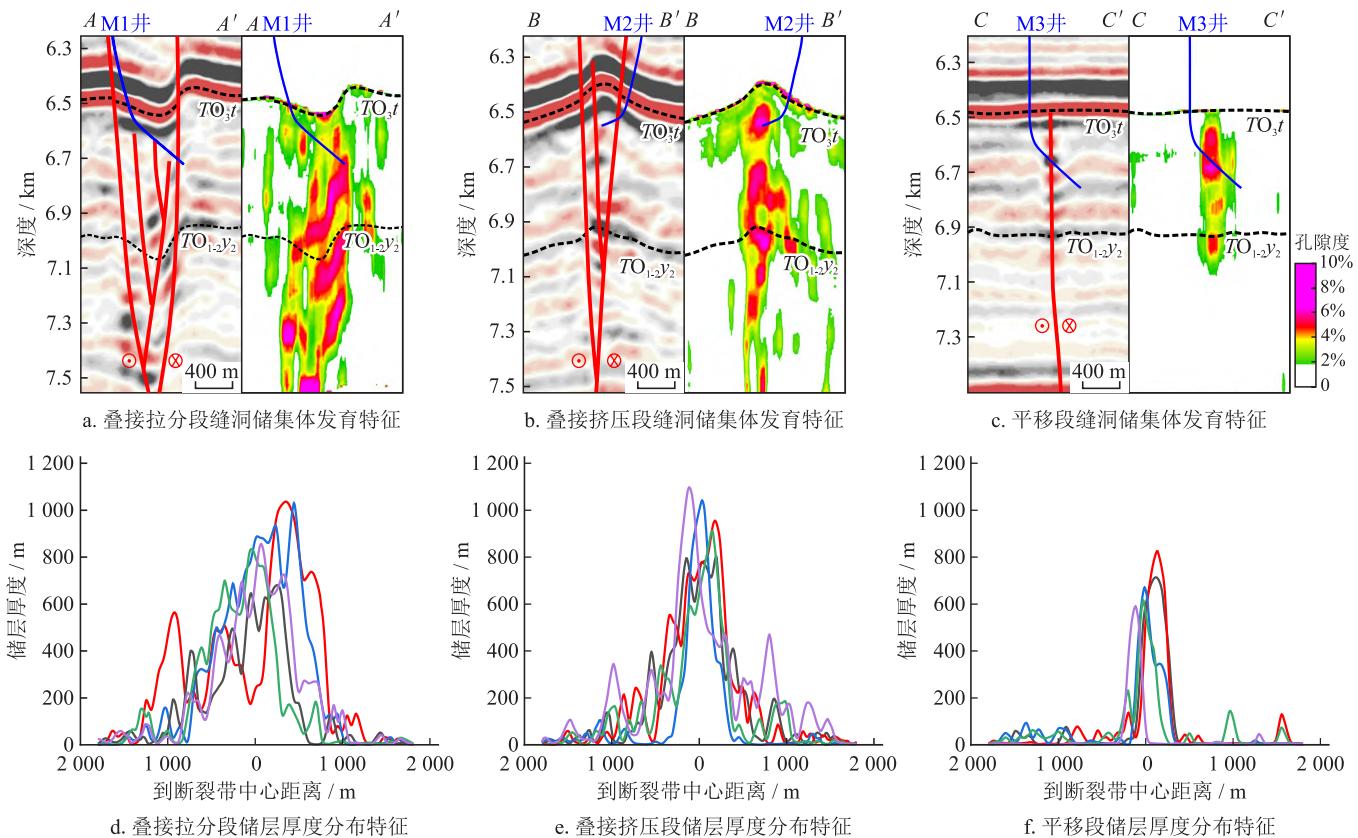


图3 不均匀带状缝洞储集体发育特征图

注: 图d—f不同线条颜色代表不同分段。

多数主干走滑断层主体穿过这一界面后,很难与上部雁列断层相连。这使得不均匀带状缝洞储集体的发育层位被限制在寒武系至中奥陶统,且由于断层对流体向上寒武统—中奥陶统碳酸盐岩构造层浅部的输导,其主体部分位于中奥陶统顶面以下的一间房组和鹰山组(图3)。

3.2.2 主干走滑断层不同分段的活动性控制了储集体的规模与非均质性

叠接段的两条边界断层的活动在其之间形成了宽大的断层破碎带,成为缝洞储集体发育的良好基础。叠接拉分段内的正断层与叠接挤压段内的逆断层均具有较大的垂向断距,不仅有利于裂缝的发育,也增强了对各类流体的输导能力,从而控制了较大规模缝洞储集体的形成。另外,在叠接段内部,优质储层呈连片发育,规模也较大(图3a、b)。平移段内部仅发育以纯走滑活动为主的单一走滑断层,断层活动性较差,断层相关的裂缝发育带规模较小,因此缝洞储集体发育的规模要小于两种叠接段。平移段内部的优质储层发育规模较小,基本呈独立分布(图3c)。以F₁₇断裂带为例,叠接拉分段与叠接挤压段的油井平均累计产油量分别为 11.2×10^4 t与

10.1×10^4 t,而平移段仅为 3.1×10^4 t^[27],说明叠接段较强的断层活动强度与储集体规模使得油井获得了较大的产能。

叠接段较为复杂的应力状态造成了其缝洞储集体较强的非均质性。由于拉伸应力的传递效应较差,叠接拉分段内部分支断层的断距小于边界断层,因此其断裂带中心的缝洞储集体厚度要小于两侧的厚度。同时,叠接拉分段边界断层断距较大一侧的缝洞储集体厚度也更大,物性更好,其储层厚度分布曲线具有明显的不对称性(图3a、d)。挤压应力的传递效应较强,使得向叠接挤压段中部构造变形愈发剧烈,且边界断层的断距趋于一致。因此叠接挤压段中部的缝洞储集体厚度与孔隙度都要大于两侧,且储层厚度分布曲线表现出较好的对称性(图3b、e)。平移段内的纯剪切应力状态使得缝洞储集体仅围绕着断层面发育,非均质性较弱。

4 串珠状缝洞储集体

4.1 串珠状缝洞储集体特征

串珠状缝洞储集体是指在地震响应上为串珠状

反射的独立分布的缝洞体系(图4),与上述不均匀带状缝洞储集体的杂乱反射或不规则强振幅反射特征存在明显的差异。串珠状缝洞储集体的规模相对较小,主要与次级走滑断层的关系密切。根据塔里木盆地北部碳酸盐岩地层地表露头观察,在小尺度断层附近,通常发育呈串珠状分布的缝洞储集体(图4a),断层主要分布在缝洞储层的中间位置,与地震剖面上的串珠状反射响应极为相似(图4c)。由于超深层碳酸盐岩地层致密,渗透率极低,断层及其相关裂缝是超深层碳酸盐岩地层流体流动和产生岩溶作用的通道,这些呈串珠状分布的缝洞储集体主要由尺度相对较小的次级走滑断层控制形成^[5,12-13]。

超深层次级走滑断层的埋藏深度大,活动性相对较差,同时断层地震响应又被串珠状反射遮蔽,使得次级走滑断层的识别难度大。针对研究区次级走滑断层识别难题,通过创新训练样本对前人的卷积神经网络断层识别模型进行迁移训练^[28-31],使用训练后的模型较好刻画了次级走滑断层的分布规律。同时,应用三维地震数据计算的结构张量属性^[32],对串珠

状缝洞储集体的平面轮廓进行了刻画。从串珠状缝洞储集体与次级走滑断层分布关系看(图4b),可以将串珠状缝洞储集体分为断层交汇型、断层端部型和断层转折型3种基本类型。次级走滑断层的活动性整体上相对较差,但是断层的交汇处、端部和转折处3个部位是其应力相对集中的区域^[33-34],裂缝的发育程度相对较高,有利于流体活动和次生溶蚀孔洞的形成,因此串珠状缝洞储集体主要在次级走滑断层的交汇部位、端部和转折部位发育,从而形成断层交汇型、断层端部型和断层转折型3种类型。

4.2 串珠状缝洞储集体的主控因素

4.2.1 岩石力学层控制了储集体的纵向分布层位

在剖面上,串珠状缝洞储集体主要集中分布在鹰山组下段的地层中,而在鹰山组上段地层中的串珠状缝洞储集体数量明显变少(图4c)。根据前期研究成果^[31],鹰山组上段与下段为两套具有力学性质差异的岩石力学层。鹰山组上段岩性以泥晶石灰岩和砂屑泥晶石灰岩为主,基岩的平均弹性模量为62 GPa,

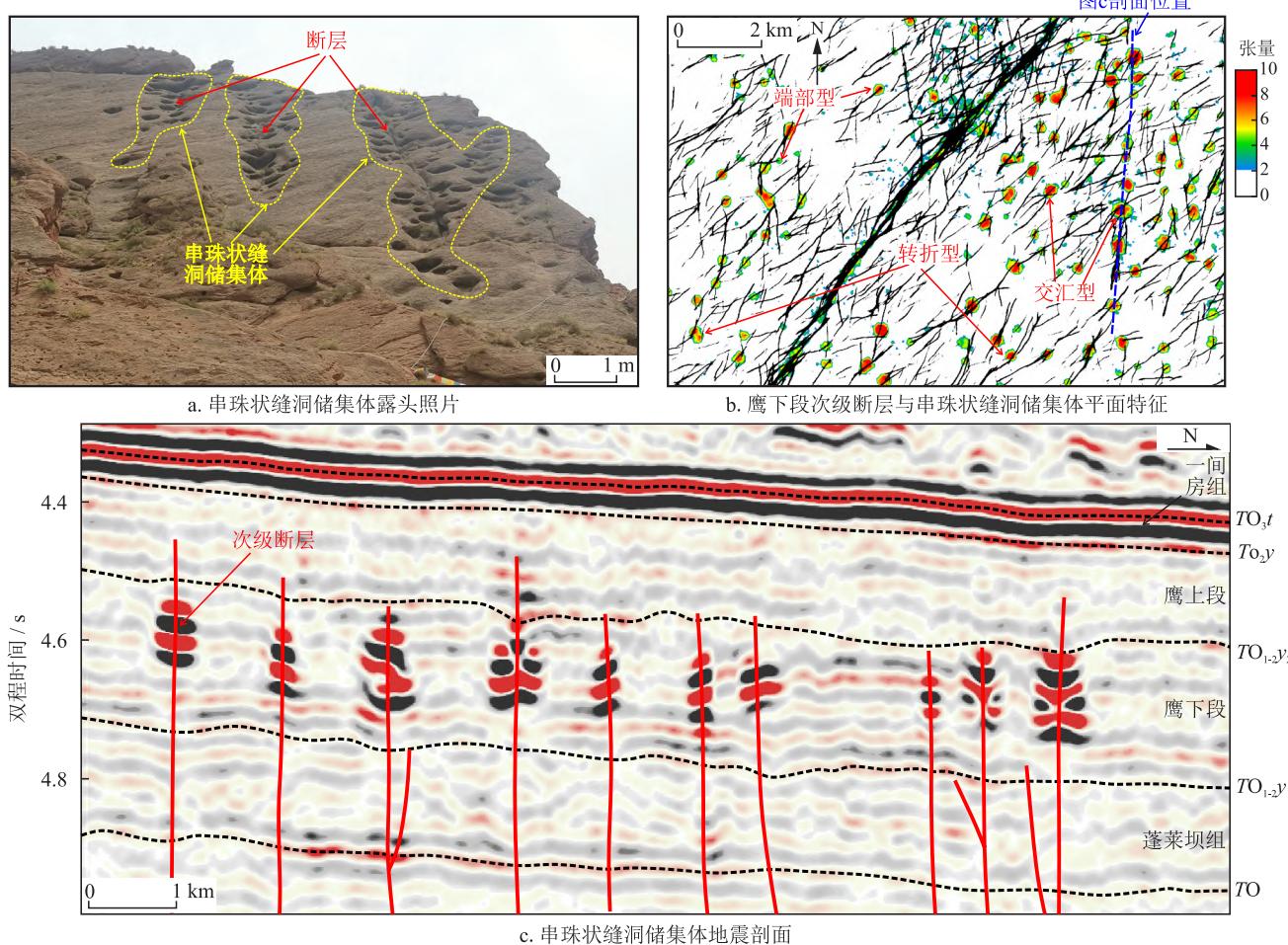


图4 串珠状缝洞储集体发育特征图

平均泊松比为 0.27, 平均脆性指数(弹性模量与泊松比比值^[35])为 230。鹰山组下段岩性以白云质石灰岩为主, 基岩的平均弹性模量为 71 GPa, 平均泊松比为 0.28, 平均脆性指数为 254。由于鹰山组上段岩层脆性的降低, 原有应力难以维持次级走滑断层向上扩展, 多数次级走滑断层终止在鹰山组上段与下段的界面附近(图 4c)。鹰山组下段岩层的白云石含量与脆性明显大于上段, 次级走滑断层及其缝网系统的发育程度更高, 更有利于流体的活动及其溶蚀孔洞的形成。因此鹰山组下段高脆性岩石力学层内串珠状缝洞储集体发育程度更高, 且集中分布在鹰山组下段顶面下部(图 4c)。

4.2.2 次级走滑断层不同部位的活动性控制了储集体的发育规模

采用相同尺寸网格对串珠状缝洞储集体进行三维建模, 可以得到单一储集体的网格数量, 从而可以利用串珠状缝洞储集体内部网格数量来定量评价串珠状缝洞储集体的规模大小, 网格数量越多, 说明储集体的规模越大, 反之则规模越小。交汇型串珠状缝洞储集体主要分布在两条或两条以上的次级走滑断层交汇的部位, 是应力集中部位, 因此交汇型串珠状缝洞储集体的规模相对较大, 内部网格平均数量为 2 581(图 5a)。次级走滑断层的转折部位同样是局部应力的相对集中区, 因而转折型串珠状缝洞储集体的规模也较大, 内部网格平均数量为 2 210, 略低于交汇型串珠状缝洞储集体。次级走滑断层端部型串珠状缝洞储集体的内部网格平均数量为 1 537, 反映端部型串珠状缝洞储集体的规模相对较小。

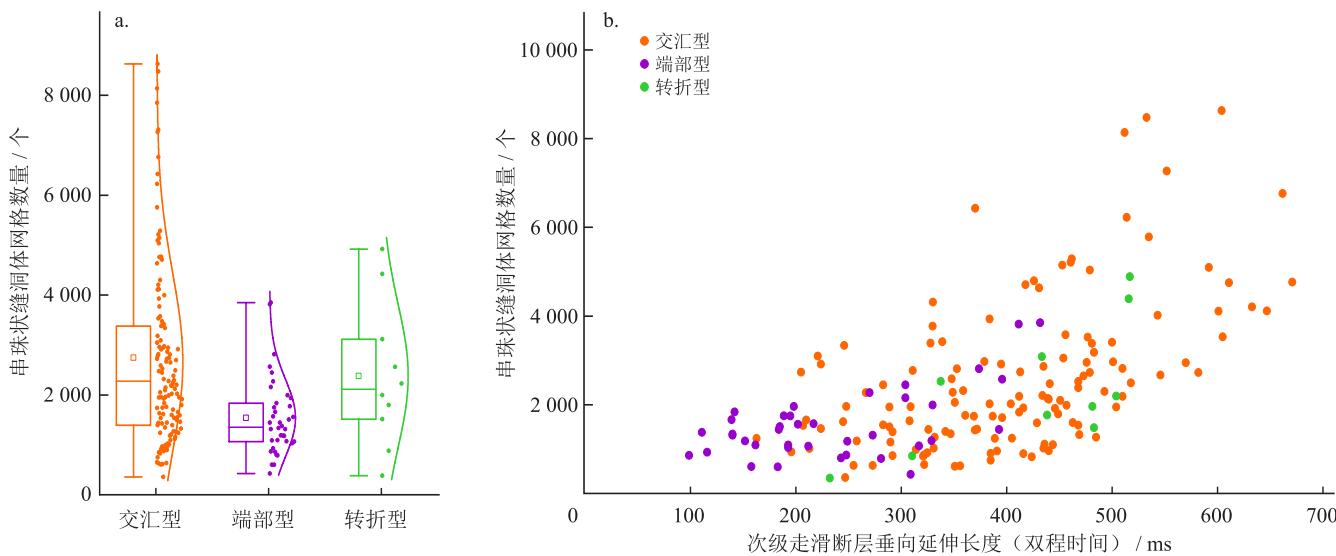


图 5 不同类型串珠状缝洞储集体规模及其与次级走滑断层垂向延伸长度的关系图

通过统计不同规模次级走滑断层对应的串珠状缝洞储集体规模发现, 串珠状缝洞储集体的内部网格数量与相关的次级走滑断层垂向延伸长度之间呈较好的正相关关系(图 5b), 尤其是当垂向延伸长度大于 400 ms(约 1 200 m)时, 这种正相关关系更加明显。这表明次级走滑断层的规模越大, 垂向延伸长度越大, 断层的活动性就越强, 越有利于缝网系统及其溶蚀孔洞的发育, 因而其形成的串珠状缝洞储集体规模也就越大; 相反, 次级走滑断层的规模越小, 断层的活动性变弱, 控制的缝网系统及其溶蚀孔洞的发育规模和发育程度变小, 因而其形成的串珠状缝洞储集体规模也越小。

5 层状裂缝储集体

5.1 层状裂缝储集体特征

层状裂缝储集体是指呈层状分布的裂缝发育层(图 6)。层状裂缝储集体分布在主干走滑断层和次级走滑断层之间的广大区域, 具有分布范围广和裂缝连通性好的特点。在地表露头区, 层状裂缝储集体在平面上主要发育北东—南西向和北西—南东向 2 组呈“X”形的共轭剪切裂缝(图 6a), 在剖面上具有明显的分层发育特征, 不同层位内部裂缝发育程度具有较大的差异(图 6b)。基于相干能量梯度振幅属性的蚂蚁追踪技术得到的地震尺度裂缝检测结果剖面上不同层位的裂缝发育程度也相差较大, 并且存在一个裂缝密度显著高出其他层的薄层, 与露头剖面类似(图 6c)。同时, 地震尺度裂缝在平面上也具有明显的共轭发育特征(图 6d)。

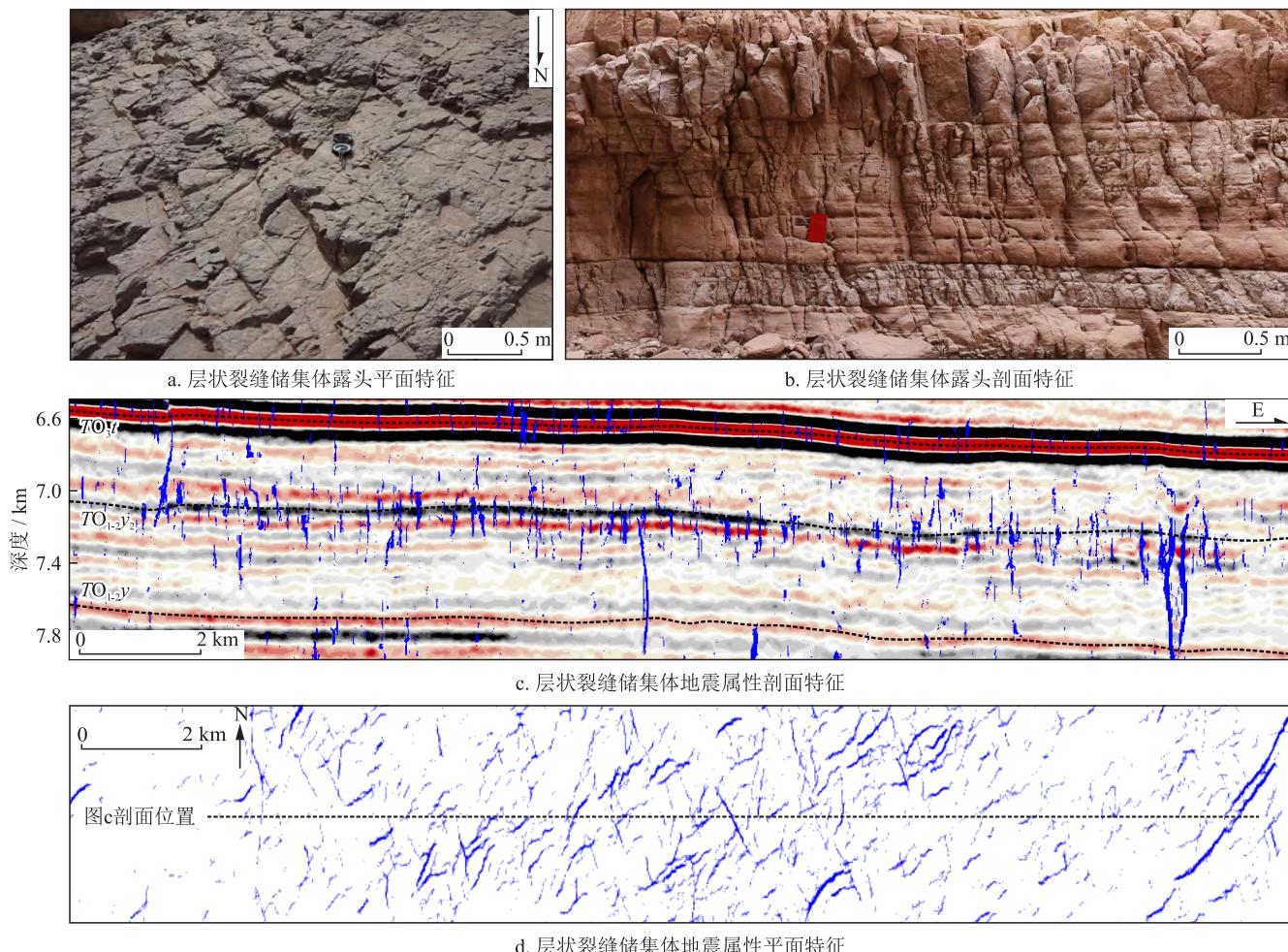


图 6 层状裂缝储集体发育特征图

5.2 层状裂缝储集体的主控因素

5.2.1 区域构造应力场控制了储集体内裂缝的平面分布样式

层状裂缝储集体内部两组共轭剪切裂缝的走向与塔北地区的“X”形共轭走滑断层的走向基本一致(图 6a、d), 2 组共轭剪切裂缝的锐夹角平分线方向与晚奥陶世水平最大主应力方向一致, 反映它们都是在晚奥陶世近南北向区域构造应力场作用下形成的产物^[26]。

5.2.2 岩石力学层控制了储集体的纵向分布特征

在地表露头剖面上, 岩石力学层的厚度与裂缝发育程度具有一定的相关关系^[5]。岩石力学层厚度越小, 裂缝的间距和规模越小, 密度越大; 相反, 岩石力学层厚度越大, 裂缝的间距和规模也相应越大, 密度越小(图 6b)。虽然目前由于缺少钻井实测数据, 无法对层状裂缝储集体进行脆性评价, 但在地震剖面上层状裂缝储集体的裂缝密集发育层位具有上部强波谷(黑色同相轴)和下部强波峰(红色同相轴)

的响应特征, 指示该层具有比上下岩层更低的纵波阻抗(图 6c)。这说明在地震尺度上层状裂缝储集体也受到高脆性岩石力学层的控制作用, 且当上下围岩的脆性较低时, 大部分裂缝的扩展也会受到岩石力学界面的限制。

6 缝洞储集体的成因讨论

塔里木盆地 3 类碳酸盐岩缝洞储集体发育的主要控制因素是区域构造应力场、走滑断层活动性与岩石力学层, 它们在成因上存在一定关联性。

6.1 区域构造应力场为 3 类缝洞储集体的形成与分布提供了动力条件

区域构造应力场控制主干和次级走滑断层及其相关裂缝的形成, 同时还控制了走滑断层之间构造裂缝的形成与分布。塔里木盆地重磁勘探结果揭示阿满过渡带的前寒武系内发育北东向先存基底薄弱带, 这有助于断层的成核与扩展^[36]。加里东中期(中

奥陶世晚期—晚奥陶世) 塔里木板块南部特提斯洋在中奥陶世开始向中昆仑岛弧俯冲消减, 并最终闭合^[37-38], 其远源效应在塔里木盆地中北部产生了近南北向挤压应力。在该应力与基底先存构造的共同作用下, 自塔中隆起向阿满过渡带产生了一系列北东—南西向主干走滑断层(图1a)。这些走滑断层体系的形成机制仍然可以用安德森模式来解释, 但是受基底先存构造的控制, 与其共轭发育的北西—南东向断层并不发育(图1a)。不均匀带状储集体在宏观上沿主干走滑断层发育, 其内部的裂缝形成机制符合里德尔剪切模式^[39], 包括与主干走滑断层走向近平行或小角度相交的Y、R、P破裂(走向 $15^{\circ} \sim 60^{\circ}$)和与主干走滑断层走向呈大角度相交的T破裂(走向 $330^{\circ} \sim 340^{\circ}$)(图7a)。北东—南西主干走滑断层一定程度上调节了塔中隆起北缘逆断层的逆冲作用^[36], 这使得不同走滑断层的水平滑移距存在一定差异。主

干断层之间的区域由于滑移距的差异会存在旋转应力场^[12,40-41], 从而产生一系列起调节作用的次级走滑断层。次级断层的走向主要为北东—南西向, 与主干走滑断层的走向平行或小角度相交(图7b)。次级走滑断层在平面上呈分段排列的特征, 应力的扰动会使其弯曲或相互交切, 成为串珠状缝洞储集体发育的有利部位(图4)。层状裂缝储集体内的裂缝在相同的应力条件下形成, 呈“X”形共轭剪切分布, 与塔北隆起内不受基底构造控制的“X”形共轭走滑断层体系相同(图1a、7c)。加里东晚期至海西期的区域水平最大主应力方向主要为北东—南西向^[42-46], 该应力促进了层状裂缝储集体中北东—南西裂缝的发育, 北西—南东裂缝的发育则受到抑制, 使得北东—南西裂缝在数量上占有一定的优势(图6c、7c)。另外, 从平面上来看, 层状裂缝储集体内裂缝分布具有较强的非均质性(图6d), 这主要与岩相变化造成的局部应力变化有关。

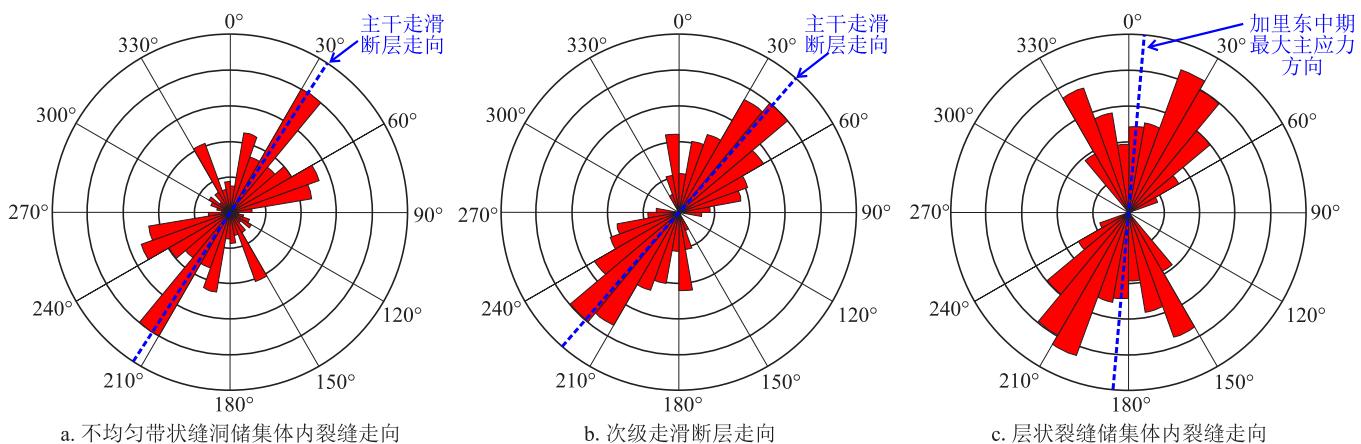


图7 缝洞储集体相关裂缝与断层走向玫瑰花图

6.2 走滑断层的差异变形控制了缝洞储集体的规模与内部非均质性

主干和次级走滑断层的差异变形控制了不同分段的局部应力与应变特征, 从而控制了不均匀带状缝洞储集体和串珠状缝洞储集体的规模与内部非均质性。在主干走滑断层的叠接段内, 断面不仅具有相对水平位移, 也具有局部拉分或挤压应力场造成的垂向位移。因此叠接段的活动性要大于平移段, 叠接段不均匀带状缝洞储集体规模和内部非均质性也大于平移段(图3、8)。形成次级走滑断层的幕式旋转应力造成次级走滑断层平面延伸长度较短, 活动性远小于主干走滑断层, 难以形成带状储集体。但是次级走滑断层的交汇处、转折处和端部在断层形成后的演化过程中具有更显著的应力集中程度, 因

此在这些区域可以形成串珠状缝洞储集体。交汇处汇集两条及以上的次级走滑断层, 活动性最强, 串珠状缝洞储集体规模最大; 断层转折处存在局部张扭或扭转应力场, 串珠状缝洞储集体规模相对小于交汇处; 断层端部断层垂向延伸长度较小, 串珠状缝洞储集体规模相对最小(图4、5)。

6.3 岩石力学层控制了不同缝洞储集体在纵向上的差异分布

不同层位的岩石力学性质差异使其应力和应变分布各不相同。主干走滑断层承载了研究区最大的构造变形, 在4个不同岩石力学层内表现出线性构造、辫状构造、叠接构造与雁列构造等差异变形特征。上寒武统一中奥陶统碳酸盐岩构造层内岩石脆性较高, 发育变形强烈的叠接构造, 控制不均匀带状缝洞储集

体主要在该层内发育(图3、8)。鹰山组上下段之间岩石脆性的较大差异控制了该区大部分次级走滑断层从深部延伸至鹰山组下段,很难扩展至鹰山组上段,使得串珠状缝洞储集体主要发育在脆性较高的鹰山组下段(图4c、8)。层状裂缝型储集体在碳酸盐岩层系内的各套岩层内均有发育,但是不同岩层厚度和脆性的差异控制了其内部裂缝的间距和规模(图6、8),其中脆性程度更高的岩石力学层更有利于裂缝发育,是层状裂缝储集体的主要发育层位。

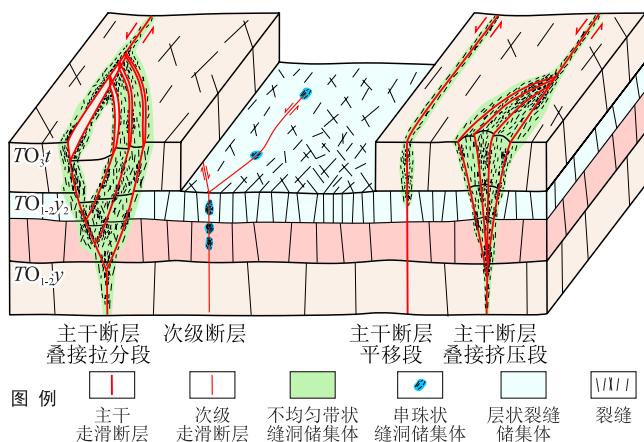


图8 不同类型缝洞储集体发育模式图

7 结论与建议

1) 塔里木盆地超深层碳酸盐岩主要发育不均匀带状缝洞储集体、串珠状缝洞储集体和层状裂缝储集体3种储集体类型。不均匀带状缝洞储集体主要受主干走滑断层和岩石力学层的控制,主干走滑断层不同分段的活动性控制了储集体的平面分布,表现为叠接段的储层规模和非均质性明显大于平移段;岩石力学层控制了储集体纵向分布的差异性。

2) 串珠状缝洞储集体主要受次级走滑断层和岩石力学层的控制,可以分为断层交汇型、断层转折型和断层端部型3种类型。断层交汇型的规模最大,其次是断层转折型,断层端部型的规模相对较小。串珠状缝洞储集体的规模与其内部次级走滑断层的垂向延伸长度具有较好的正相关关系,其纵向分布受岩石力学层的控制,在脆性较高的鹰山组下段最为发育。

3) 层状裂缝储集体主要受区域构造应力场和岩石力学层的控制,区域构造应力场控制了裂缝的性质、产状及其平面展布,研究区主要表现为呈“X”形的共轭剪切裂缝分布特征;裂缝储集体的纵向分布同样受岩石力学层的控制,脆性指数高的岩石力

学层有利于裂缝储集体的发育,表现出层状分布的典型特征。

4) 不均匀带状缝洞储集体需要加强储集体内部非均质性精细刻画和连通性评价,以增加储量的动用程度,提高开发效果。受次级走滑断层控制的串珠状缝洞储集体同样可以有较大的规模,同时次级走滑断层的垂向延伸长度也较大,能够有效沟通下寒武统烃源岩,是主干走滑断层之间弱变形区油气勘探的首选目标区。层状裂缝储集体分布范围广,同样可以具备有较好的储集条件,值得进一步探索,但需要加强裂缝的分布预测和油气横向运移路径的研究,优选有利的勘探区域。

参 考 文 献

- [1] 沈安江,胡安平,乔占峰,等.深一超深层碳酸盐岩储层发育与保持机理[J].中国科学:地球科学,2024,54(11):3403-3420.
SHEN Anjiang, HU Anping, QIAO Zhanfeng, et al. Development and preservation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. SCIENTIA SINICA Terra, 2024, 54(11): 3403-3420.
- [2] 赵文智,沈安江,潘文庆,等.碳酸盐岩岩溶储层类型研究及对勘探的指导意义——以塔里木盆地岩溶储层为例[J].岩石学报,2013,29(9):3213-3222.
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, PAN Wenqing, et al. A research on carbonate karst reservoirs classification and its implication on hydrocarbon exploration: Cases studies from Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2013, 29(9): 3213-3222.
- [3] 鲁新便,杨敏,汪彦,等.塔里木盆地北部“层控”与“断控”型油藏特征——以塔河油田奥陶系油藏为例[J].石油实验地质,2018,40(4):461-469.
LU Xinbian, YANG Min, WANG Yan, et al. Geological characteristics of "strata-bound" and "fault-controlled" reservoirs in the northern Tarim Basin: Taking the Ordovician reservoirs in the Tahe Oil Field as an example[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2018, 40(4): 461-469.
- [4] 曾联波,毛哲,刘国平,等.走滑断层对裂缝分布的控制——来自离散元数值模拟的启示[J].中国科学:地球科学,2024,54(1):152-171.
ZENG Lianbo, MAO Zhe, LIU Guoping, et al. Controls of strike-slip fault on fractures: Insight from 3D discrete element simulation[J]. SCIENTIA SINICA Terra, 2024, 54(1): 152-171.
- [5] 曾联波,宋逸辰,韩俊,等.塔里木盆地构造流体作用对超深层断控碳酸盐岩缝洞型储层的控制[J].石油勘探与开发,2025,52(1):128-139.
ZENG Lianbo, SONG Yichen, HAN Jun, et al. Control of structure and fluid on ultra-deep fault-controlled carbonate fracture-vug reservoirs in Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2025, 52(1): 128-139.
- [6] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,

- 2022, 49(1): 1-17.
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1): 1-17.
- [7] 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.
- [8] 张煜, 毛庆言, 李海英, 等. 顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 1-13.
- ZHANG Yu, MAO Qingyan, LI Haiying, et al. Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 1-13.
- [9] 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.
- [10] 何松高, 邓尚, 刘雨晴, 等. 克拉通内走滑断裂空间结构及派生构造新样式: 以塔里木盆地顺北 12 号断裂为例 [J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2136-2150.
- HE Songgao, DENG Shang, LIU Yuqing, et al. New structural style of spatial architecture and derived structure of intracratonic strike-slip faults: A case study of Shunbei No.12 fault, Tarim Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2136-2150.
- [11] YANG Ping, SUN S Z, LIU Yonglei, et al. Origin and architecture of fractured-cavernous carbonate reservoirs and their influences on seismic amplitudes[J]. The Leading Edge, 2012, 31(2): 140-150.
- [12] 李相文. 富满油田致密灰岩断控储层地震预测方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- LI Xiangwen. Seismic prediction method of tight limestone fault controlled reservoir in Fuman Oilfield[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2022.
- [13] TAN Xiaolin, ZENG Lianbo, SHE Min, et al. Impact of burial dissolution on the development of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs: Insights from high-temperature and high-pressure dissolution kinetic simulation[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2025, 99(1): 228-242.
- [14] 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(6): 239-251.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, LI Yong, 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(6): 239-251.
- [15] 罗志锋, 程龙, 谢耀增, 等. 基于“扩缝串洞”理念的超深层小缝洞群碳酸盐岩储层改造数值模拟 [J]. 天然气工业, 2024, 44(5): 80-95.
- LUO Zhifeng, CHENG Long, XIE Yaozeng, et al. Numerical simulation of stimulation in ultra-deep small-scale fractured-vuggy carbonate reservoirs based on the concept of "fracture expanding and vug connecting"[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(5): 80-95.
- [16] 李凤磊, 林承焰, 任丽华, 等. 基于地质成因的走滑断裂带岩溶缝洞型储层连通性与剩余油分布模式——以塔里木盆地为例 [J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 315-334.
- LI Fenglei, LIN Chengyan, REN Lihua, et al. Connectivity and residual oil distribution patterns of fractured-vuggy karst reservoirs in strike-slip fault zone: A case study of the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 315-334.
- [17] 黄诚, 云露, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺北地区中一下奥陶统“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 Cheng, YUN Lu, CAO Zicheng, 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.
- [18] YAO Yingtao, ZENG Lianbo, MAO Zhe, et al. Differential deformation of a strike-slip fault in the Paleozoic carbonate reservoirs of the Tarim Basin, China[J]. Journal of Structural Geology, 2023, 173: 104908.
- [19] SUN Qingqing, FAN Tailiang, HOLDSWORTH R E, et al. The spatial characterization of stepovers along deeply-buried strike-slip faults and their influence on reservoir distribution in the central Tarim Basin, NW China[J]. Journal of Structural Geology, 2023, 170: 104849.
- [20] SUN Qingqing, FAN Tailiang, GAO Zhiqian, 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.
- [21] 樊太亮, 高志前, 吴俊. 塔里木盆地深层碳酸盐岩建造 - 改造作用与多类型储层有序性分布 [J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 1-18.
- FAN Tailiang, GAO Zhiqian, WU Jun. Formation and modification of deep-burial carbonate rocks and orderly distribution of multi-type reservoirs in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 1-18.
- [22] 尹帅, 张子阳, 王濡岳, 等. 中国深层 / 超深层油气勘探储层地质力学研究进展、挑战及展望 [J]. 天然气工业, 2025, 45(4): 33-47.
- YIN Shuai, ZHANG Ziyang, WANG Ruyue, et al. Research progress, challenges, and prospects of reservoir geomechanics in deep and ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Natural Gas Industry, 2025, 45(4): 33-47.
- [23] 曹东升, 曾联波, 黄诚, 等. 多尺度岩石力学层对断层和裂隙发育的控制作用 [J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2535-2556.
- CAO Dongsheng, ZENG Lianbo, HUANG Cheng, et al. Control of multi-scale mechanical stratigraphy on development of faults and fractures[J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2535-2556.
- [24] FERRILL D A, MORRIS A P, MCGINNIS R N, et al. Mechanical stratigraphy and normal faulting[J]. Journal of Structural

- Geology, 2017, 94: 275-302.
- [25] CHEN Jiajun, HE Dengfa, TIAN Fanglei, et al. Control of mechanical stratigraphy on the stratified style of strike-slip faults in the central Tarim Craton, NW China[J]. Tectonophysics, 2022, 830: 229307.
- [26] DENG Shang, ZHAO Rui, KONG Qiangfu, et al. Two distinct strike-slip fault networks in the Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin: Hydrocarbon accumulation, distribution, and controlling factors[J]. AAPG Bulletin, 2022, 106(1): 77-102.
- [27] 谭笑林, 张银涛, 吕文雅, 等. 超深层走滑断裂典型分段及其内部缝网系统发育的差异性研究——以塔里木盆地富满地区F₁₇断裂带为例 [J]. 地质论评, 2025, 71(4): 1403-1413.
- TAN Xiaolin, ZHANG Yintao, LYU Wenya, et al. A study on the variability in the distribution of fracture networks in typical segments of ultra-deep strike-slip faults: A case study of the F₁₇ fault in the Fuman area, Tarim Basin[J]. Geological Review, 2025, 71(4): 1403-1413.
- [28] WU Xinming, LIANG Luming, SHI Yunzhi, et al. FaultSeg3D: Using synthetic data sets to train an end-to-end convolutional neural network for 3D seismic fault segmentation[J]. Geophysics, 2019, 84(3): IM35-IM45.
- [29] LI Xiao, LI Kewen, XU Zhifeng, et al. Fault-Seg-LNet: A method for seismic fault identification based on lightweight and dynamic scalable network[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, 127(Part A): 107316.
- [30] DOU Yimin, LI Kewen, DONG Minghui, et al. FaultSSL: Seismic fault detection via semisupervised learning[J]. Geophysics, 2024, 89(3): M79-M91.
- [31] LI Hao, HAN Jun, HUANG Cheng, et al. Identification and distribution patterns of the ultra-deep small-scale strike-slip faults based on convolutional neural network in Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Science, 2025, 22(8), 3152-3167.
- [32] 汪如军, 孙冲, 袁敬一, 等. 基于结构张量的走滑断裂破碎带地震识别——以富满油田超深层碳酸盐岩为例 [J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4): 475-482.
- WANG Rujun, SUN Chong, YUAN Jingyi, et al. Seismic identification of strike-slip fault damage zones based on structure tensor analysis: A case study of ultra-deep carbonate rocks in Fuman Oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4): 475-482.
- [33] KIM Y S, PEACOCK D C P, SANDERSON D J. Fault damage zones[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(3): 503-517.
- [34] PEACOCK D C P, DIMMEN V, ROTEVATN A, et al. A broader classification of damage zones[J]. Journal of Structural Geology, 2017, 102: 179-192.
- [35] ZHANG Bo, ZHAO Tao, JIN Xiaochun, et al. Brittleness evaluation of resource plays by integrating petrophysical and seismic data analysis[J]. Interpretation, 2015, 3(2): T81-T92.
- [36] 邬光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制 [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.
- [37] LI Sanzhong, ZHAO Shujuan, LIU Xin, et al. Closure of the Proto-Tethys ocean and Early Paleozoic amalgamation of microcontinental blocks in east Asia[J]. Earth-Science Reviews, 2018, 186: 37-75.
- [38] ZHANG Qichao, WU Zhenhan, CHEN Xuanhua, et al. Proto-Tethys oceanic slab break-off: Insights from early Paleozoic magmatic diversity in the West Kunlun Orogen, NW Tibetan Plateau[J]. Lithos, 2019, (346/347): 105147.
- [39] 邓辉, 李果营, 杨海风, 等. 走滑应变椭圆模型的改进及应用举例 [J]. 地球科学进展, 2019, 34(8): 868-878.
- DENG Hui, LI Guoying, YANG Haifeng, et al. Improvement and application of Riedel shear system[J]. Advances in Earth Science, 2019, 34(8): 868-878.
- [40] SCHREURS G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation[J]. Geology, 1994, 22(6): 567-570.
- [41] 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.
- [42] 陈石, 梁鑫鑫, 张银涛, 等. 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]. 石油科学通报, 2025, 10(1): 1-15.
- CHEN Shi, LIANG Xinxin, ZHANG Yintao, et al. Development characteristics of Paleozoic strike-slip fault and its control on traps in Fuman Oilfield, Tarim Basin[J]. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(1): 1-15.
- [43] 李国会, 李世银, 李会元, 等. 塔里木盆地中部走滑断裂系统分布格局及其成因 [J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 30-37.
- LI Guohui, LI Shiyin, LI Huiyuan, et al. Distribution pattern and formation mechanism of the strike-slip fault system in the central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3): 30-37.
- [44] 黄雷, 刘池洋, 刘永涛, 等. 鄂尔多斯盆地内部走滑断层分层发育模式及意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(5): 1554-1568.
- HUANG Lei, LIU Chiyan, LIU Yongtao, et al. Development model of vertical stratification for the strike-slip fault in the Ordos Basin and its significance[J]. SCIENTIA SINICA Terra, 2025, 55(5): 1554-1568.
- [45] HUANG Lei, LIU Chiyan, WANG Zhao, et al. An alternative formation mechanism for strike-slip fault in stable intracratonic basin[J]. Journal of Structural Geology, 2025, 191: 105292.
- [46] 王珍, 唐大卿, 康志江, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带中北段发育特征及控藏作用 [J]. 地球科学, 2023, 48(11): 4117-4134.
- WANG Zhen, TANG Daqing, KANG Zhiqiang, et al. Development characteristics and its role in controlling oil and gas accumulation of mid-north part of Shunbei No.5 strike-slip fault zone in Tarim Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(11): 4117-4134.

(修改回稿日期 2025-08-26 编辑 王斌)

