

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

陈利新^{1,2*}, 王胜雷², 姜振学¹, 朱光有³, 苏洲², 侯佳凯³

1 中国石油大学(北京)非常规油气科学技术研究院, 北京 102249

2 中国石油塔里木油田分公司东河油气开发部, 库尔勒 841000

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通信作者, upcclx@126.com

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-26

国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”课题“塔中、库车地区深层-超深层油气成藏过程及有利勘探目标”(2017ZX05008-004-001)资助

摘要 塔里木盆地哈拉哈塘油田奥陶系碳酸盐岩储层非均质性复杂, 亟需开展评价预测研究。本文基于哈拉哈塘油田地质及地震资料, 开展了碳酸盐岩缝洞储层归位、储层空间展布、储层与断裂的匹配关系、井间连通性研究。在此基础上, 依据实钻、测录井资料及生产动态分析, 开展了断控区碳酸盐岩储层缝洞雕刻。研究结果表明: 哈拉哈塘油田断裂系统发育包括加里东早-中时期、加里东晚期-海西早期、海西晚期、燕山期4个阶段; 断裂走向和断裂发育的多期次性是断裂系统的通源性的主控因素; 断块水平滑移的增大将使走滑断裂具有较好的连通性; 断裂的平面扩溶宽度受断裂活动强度以及深部通源分支断层发育程度控制。此外, 为明确潜山岩溶区、层间岩溶区、断控岩溶区碳酸盐岩储层的空间形态与分布特征, 开展了针对性的储层预测, 以反演成果为主, 结合属性、沉积、钻井等资料, 对储层进行多属性综合预测。预测结果显示, 哈拉哈塘油田塔河北区块的潜山岩溶区断裂带的通源性、连通性及扩溶性整体较好, 有利于大型溶蚀孔-缝-洞储集体的形成, 储层平面展布呈连片特征, 储层质量最优, 是未来油气勘探开发的重点区域。研究认识揭示了哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶系断裂发育特征及断控区有利储层的分布区域, 以期有效指导深层-超深层断控区碳酸盐岩油气勘探与开发工作提供依据。

关键词 奥陶系; 断裂系统; 碳酸盐岩; 储层预测; 哈拉哈塘油田

中图分类号: P618.13; TE132

Fault characteristics, reservoir types and distribution prediction in a fault-controlled area in the Ordovician strata of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield

CHEN Lixin^{1,2}, WANG Shenglei², JIANG Zhenxue¹, ZHU Guangyou³, SU Zhou², HOU Jiakai³

1 Institute of Unconventional Petroleum Science and Technology, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

引用格式: 陈利新, 王胜雷, 姜振学, 朱光有, 苏洲, 侯佳凯. 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. 石油科学通报, 2024, 03: 408-421

CHEN Lixin, WANG Shenglei, JIANG Zhenxue, ZHU Guangyou, SU Zhou, HOU Jiakai. Fault characteristics, reservoir types and distribution prediction in a fault-controlled area in the Ordovician strata of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield. Petroleum Science Bulletin, 2024, 03: 408-421. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.030

2 Donghe Oil and Gas Development Department, Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China

3 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

Received: 2024-03-13; Revised: 2024-04-26

Abstract The heterogeneity of Ordovician carbonate reservoirs in the Halahatang Oilfield, Tarim Basin is complex, so it is important to carry out evaluation and prediction research. Based on geological and seismic data from the Halahatang Oilfield, this paper studies carbonate fracture-vuggy reservoir location, reservoir spatial distribution, reservoir and fault matching relationship, and inter-well connectivity. On this basis, according to the actual drilling, logging data and production dynamic analysis, the fracture-cavity carving of carbonate reservoirs in the fault-controlled area is carried out. The results show that the fault system evolution of the Halahatang oilfield includes four stages: Early Caledonian to Middle Caledonian, Late Caledonian to Early Hercynian, Late Hercynian and Yanshan. Fault trends and multiple stages of fault development are the main controlling factors for the generation of the fault systems. The increase of the horizontal slip of the fault block will give the strike-slip faults better connectivity. The plane diffusing width of the fault is controlled by the intensity of fault activity and the development degree of deep through-source branch faults. In addition, in order to clarify the spatial morphology and distribution characteristics of carbonate reservoirs in buried hill karst areas, interlayer karst areas and fault-controlled karst areas, targeted reservoir prediction is carried out. Based on inversion results, multi-attribute comprehensive prediction is carried out by combining the data such as attributes, sedimentation and drilling. The prediction results show that the fracture zone in the buried-hill karst area of the Tahebei block of the Halahatang Oilfield has good overall source permeability, connectivity and diffusion-solubility, which is conducive to the formation of large-scale solution pore-fracture-cave reservoirs, and the plane distribution of the reservoirs is continuous with the best reservoir quality, which is the key area of oil and gas exploration and development in the future. The study reveals the development characteristics of Ordovician faults and the distribution areas of favorable reservoirs in the fault-controlled area of the Tahebei Block, Halahatang Oilfield, in order to provide a basis for effectively guiding carbonate oil and gas exploration and development in the deep-ultra-deep fault-controlled areas.

Keywords Ordovician; fault system; carbonate; reservoir prediction; Halahatang Oilfield

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.03.030

0 引言

塔里木盆地是我国西部最大的海相含油气盆地,在塔北和塔中两大古隆起的下古生界奥陶系深层-超深层碳酸盐岩层系发现了丰富的油气资源^[1-2],已形成重要的深层-超深层油气产区^[3-4]。其中,塔北隆起哈拉哈塘油田是主体埋深超过 7000 m 的晚海西期整装大型油田^[5-6],诸多学者对研究区奥陶系的储层特征及成因^[7-9]、油气成藏^[10-12]、缝洞体刻画^[13-14]等做了大量研究。早期勘探实践证实^[15-16],优越的石油地质条件是大油田形成的基础,地质认识的突破是发现复杂大型油田的关键,物探技术进步是大油田勘探开发的保障,勘探开发一体化是碳酸盐岩快速增储上产的有效途径。

塔北隆起哈拉哈塘油田下古生界碳酸盐岩层段走滑断裂发育,纵向上构造样式复杂多样,地震剖面上表现为花状、半花状、直立状等特征^[17-19]。研究区有利储层以奥陶系鹰山组-一间房组的缝-洞型碳酸盐岩为主,其发育程度和分布受大型走滑断裂及岩溶作用的控制^[20],在断裂附近形成局部富集的断溶体油气藏,在地震上以强串珠状反射为主^[21-23]。这类断溶体油气藏具有单井产量高、油气柱高度大的特点,但同

时也具有单井产能下降快、稳产困难的风险^[24-26]。前人对大型走滑断裂体系开展了大量研究,包括塔北隆起、塔中隆起及阿满过渡带内部,提出走滑断裂在平面上表现出分级、分区和分带发育的特点,沿着断裂走向可划分为多个断层段,断裂发育演化过程具有多期变形,表现在纵向上具有分层特征^[27-29],对于走滑断裂体系控制储层发育、控制油气成藏和富集方面也取得了诸多新认识^[30-32]。

塔河北区块是哈拉哈塘油田的重要产区之一,主要包括齐满、哈 6、新垦、热瓦普、金跃和其格等五个区块,继哈拉哈塘地区哈 7 井 2009 年在奥陶系一间房组实现勘探突破,获得日产油 301 m³、折日产气 4700 m³ 的高产油气流之后,已落实亿吨级的储量规模,实现快速的增储上产^[33-34]。塔河北区块主要油气藏分布与富集受到走滑断裂体系的控制,但相关分析与研究较少,特别是在有利储层展布与断裂的关系、有利储层分布的精细刻画方面报道较少,增加了深层油气勘探部署与后期开发策略方面的难度,亟需进一步加强工作。因此,本研究针对该问题,主要基于塔河北连片处理的三维地震资料,开展储层展布与断裂的关系、缝洞储层归位、缝洞储层空间展布特征研究,

实现缝洞储层预测, 并且进一步探究已钻井间的连通性, 为下一步深层油气勘探部署提供可靠依据。

1 构造与沉积地层发育特征

塔里木盆地哈拉哈塘地区走滑断裂发育类型多样, 平面上表现为明显的分段性, 活动期次上具有多期性与继承性发育的特点^[35-36]。塔河北区块构造特征较为简单, 整体表现为一个向西南倾没的大型鼻状构造, 具有北东高、南西低的特点, 区块内部由于广泛发育的北东、北西向两组“X”剪切断裂而复杂化。其中, 奥陶系桑塔木组由南向北方向发生削蚀尖灭, 可划分为东部鼻隆区、中部平台区及西部背斜区三部分, 构造整体比较平缓(图1)。塔河北区块作为轮南低凸起的一部分, 整体是在前震旦系变质基底上形成的长期发育的巨型古隆起, 震旦纪至泥盆纪以发育海相沉积地层为主, 石炭纪至二叠纪发育海陆交互相沉积, 自三叠纪以后主要发育陆相沉积地层^[37-38]。塔河北区块没有明显的地层缺失、叠覆情况, 因此各井钻遇地层基本一致, 自上而下为新生界第四系, 新近系库车组、

康村组、吉迪克组, 古近系, 中生界白垩系、侏罗系、三叠系, 古生界二叠系、石炭系、泥盆系、志留系、奥陶系。北部潜山区奥陶系与上覆志留系不整合接触, 缺失奥陶系上统部分地层, 主要产油气层系为奥陶系中统的一间房组。

2 断裂多期演化及扩溶特征

哈拉哈塘油田塔河北区块下古生界存在大规模共轭走滑断裂带, 走滑断裂不仅对改善碳酸盐岩储层渗流特征具有重要建设性作用, 对油气运聚成藏也具有重要控制作用^[29, 39]。但随着油藏评价与开发的不断深入, 发现研究区断裂活动强、断裂断距小、具有多期性、平面组合关系复杂, 并且岩溶活动期次多, 发育多种、多期的岩溶区带, 因此断裂解释多解性强, 断裂解释难度大^[28, 39]。因此, 本文通过开展地震资料叠后解释性处理精细描述断裂, 深入分析断裂格局, 分期次对断裂进行精细刻画, 突出北东、北西向活动期次的差异性, 局部采用多层相干、平剖结合、立体解释手段, 力求干枝准确, 提高断裂平面相干精度。通

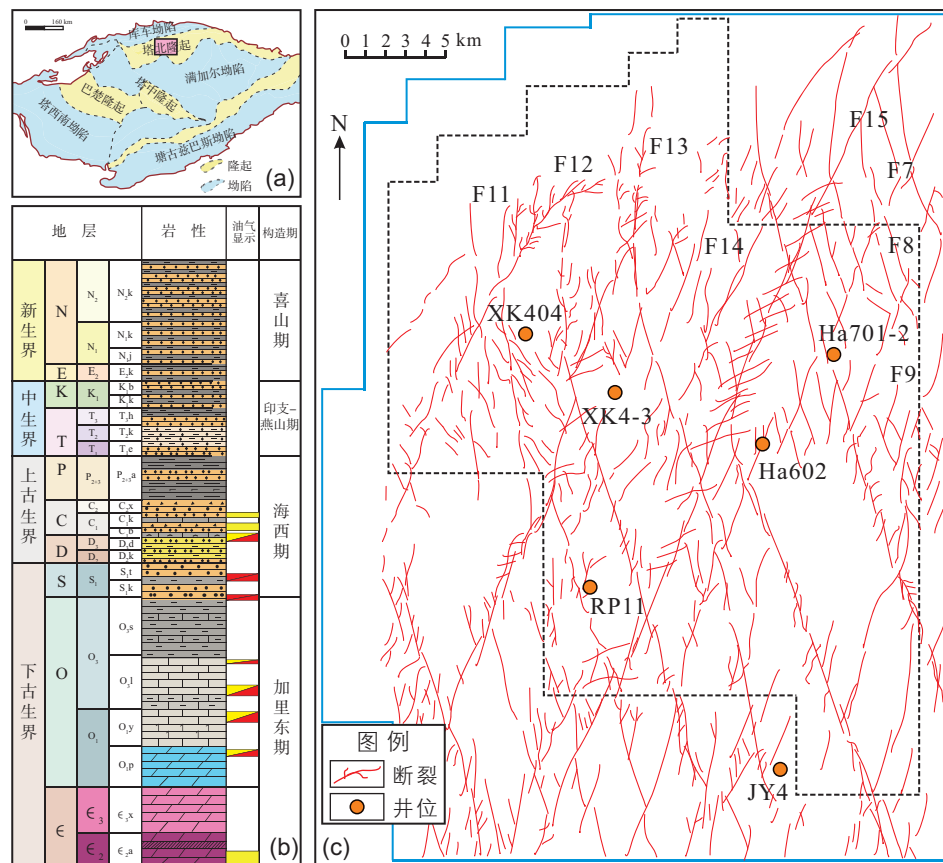


图1 哈拉哈塘油田塔河北区块构造位置、地层分层表与奥陶系一间房组断裂分布图

Fig. 1 Structure location, stratification table and fault distribution of Ordovician Yijianfang Formation in Tahebei Block, Halahatang Oilfield

过精细研究, 断裂展布规律更加清楚, 主干、分支断裂特征更加明显, 断裂控藏更加明确。

2.1 断裂多期发育特征

根据断裂的展布方向、断开的层位、区域构造应力场背景分析等, 将塔河北区块断裂系统的活动划分为四期(图 2)。

①加里东中期形成的断裂: 加里东中期, 周缘洋盆停止扩张并持续向塔里木板块发生俯冲, 造成盆内整体由加里东早期的弱伸展应力环境转变为近南北向的区域挤压应力环境, 由右行力偶产生了旋转型剪应力场, 形成了北东-南西向的同向走滑断裂及其伴生的北西~南东向次级同向断裂、近南北向的断裂和近东西向断裂体系。

②加里东晚期-海西早期形成的断裂: 加里东晚期-海西早期, 在北北西-南南东向构造应力的作用下, 对加里东早-中期近南北向区域挤压旋转型剪应力场形成的断裂进行不同程度改造, 绝大部分断裂进一步活动, 并形成了大量的北东-南西向、北西-南东向、近南北向、近东西向小断裂。本期所形成断裂

是大气淡水渗流主要通道, 对奥陶系岩溶型储层的发育起到非常重要的控制作用。

③海西晚期形成的断裂: 海西晚期, 在北西-南东向挤压应力作用下, 特别是二叠纪晚期的火山活动, 造成该地区多数断层再次活动, 在西南部形成了与火成岩刺穿相关断层, 本期断裂与海西晚期大面积油气充注期相匹配。

④燕山期形成的断裂: 燕山中晚期, 在挤压应力松弛作用的背景下, 北东-南西向古生界走滑断裂再次活动, 撕裂中生界地层, 形成一组北东走向、雁列状展布的正断层。

以塔河北区块东北部的F15断裂带为例, 其具有明显的分段、分期次特征(图 3)。F15断裂南段剖面(图 3b)断裂活动性较弱, 基本定型于加里东中期, 大量走滑断裂终止于奥陶系碳酸盐岩层顶部; 中段剖面(图 3c、d)识别出 3 期活动, NW 向与 NE 向走滑断裂向上延伸至二叠系, 向下并入主干断裂带, 并以张扭构造叠加在奥陶系压扭构造之上, 表明研究区二叠纪存在走滑断裂活动; 北段剖面(图 3e、f)断裂活动较剧烈且持续活动, 同样可识别出至少 3 期断裂活动, 基本定型于喜山期。尽管 NE 向走滑断裂向上多以雁列断裂消失在中生界, 但一些走滑断裂可继承性发育并断至古近系, 具有较大的断距, 且与下部断裂特征相似, 无显著的断裂间断特征, 揭示晚期走滑断裂活动期为古近纪。

2.2 断裂的通源性、连通性及扩溶性评价

哈拉哈塘油田奥陶系油气藏的分布和富集与断裂密切相关, 储层的发育规模和断裂断开层位以及活动强度控制本区的油气富集^[40], 断裂的通源性、连通性、扩溶性是其控藏的 3 大原因。断裂通源性受岩性、断裂面的形态和粗糙度等因素的影响, 通源性的强弱直接影响着储层的有效性和流体运移的效率^[41]; 断裂的连通性与其分布、长度、断层面的完整性以及与其它断裂的位置关系密切相关, 良好的连通性可增强储层的有效性, 提高油气的开采效率^[42]。此外, 断裂带由于伴生裂缝系统较为发育, 易成为流体运移及活动的区域, 有利于溶蚀孔洞的形成以及溶解作用的进行, 增强储层的孔隙和渗透性。对于岩溶性地质体系而言, 断裂带的扩溶性会对储层的发育和流体运移产生重要影响^[43]。因此, 深入研究断层的通源性、连通性和扩溶性, 可更全面地理解断裂对于储层性质和油气勘探开发的影响, 为合理评价储层潜力和优化开发方案提供科学依据。

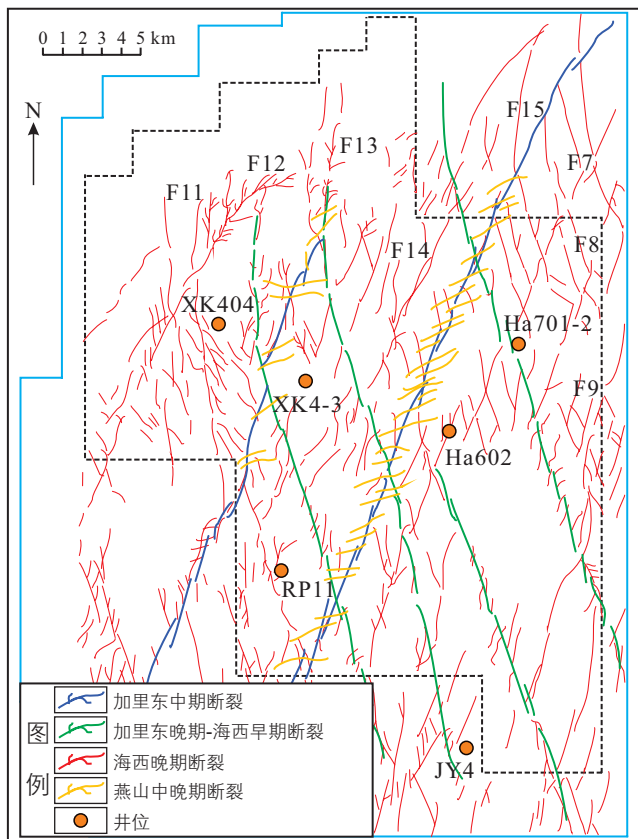


图 2 哈拉哈塘油田塔河北区块断裂分期图
Fig. 2 Fault stage map of Tahe north block in Halahtang Oilfield

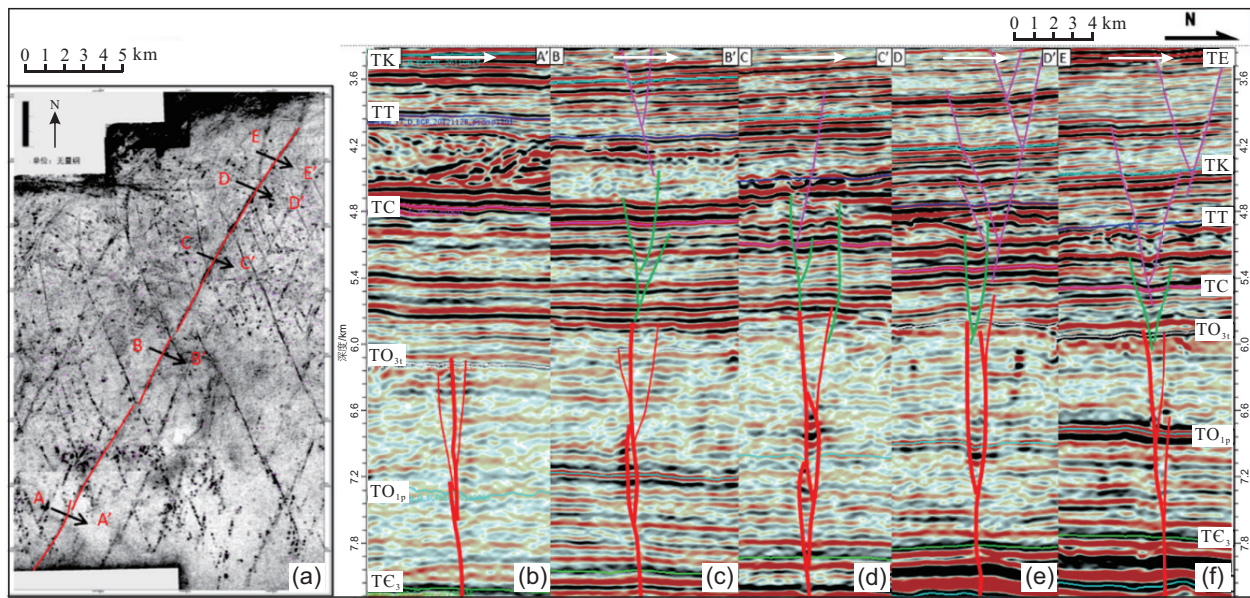


图3 哈拉哈塘油田塔河北区块F15断裂分段-分期活动特征(图3a为一间房组相干平面;图3b-f为F115断裂典型地震剖面)
Fig. 3 Activity characteristics of F15 fault sections-stages in Tahe north block, Halahatang Oilfield

注: TE-古近系底界; TK-白垩系底界; TT-三叠系底界; TC-石炭系底界; TO_{3t}-上奥陶统一间房组顶界; TO_{1p}-下奥陶统蓬莱组底界; TC₃-上寒武统顶界。

2.2.1 断裂通源性评价

断裂的通源性与其走向关系较为密切, NE、NW走向主干断裂均具有通源性, 通源品质不仅受控于早期近南北向纯剪应力机制的影响, 也受控于深部伴生次级断裂的发育程度, 加里东中期NE走向断裂垂向以“多花状构造”为主, NW走向断裂垂向以“单花状构造”为主。整体上NE走向断裂在加里东中期活动强度大, 形成复杂的垂向疏通通道, 为后期油气的运移提供了有利条件, 而NW走向断裂垂向以“单花状构造”为主, 通源品质差。北部通源性好的油源断裂以NE向主干断裂和分支断裂为主; 南部NE和NW向均有通源优势断裂, 但分支通源很少。此外, NE走向钻井的高效井比例更高, 也是一种间接证据。塔里木盆地寒武统底部玉尔吐斯组黑色页岩已被证实为台盆区中下奥陶统碳酸盐岩大型油气田的主力供烃源岩^[43-44], 从地震剖面上可见主要走滑断裂均沟通该套烃源岩(图3), 良好地沟通了源和储。塔北地区油气成藏相关研究表明晚海西期是最主要的成藏时期, 目前已发现的油气储量主要都为该时期聚集成藏的, 其分布受到走滑断裂晚期开启活动的控制^[19, 39, 45], 说明走滑断裂具有较好的通源性。

断裂的分段特征对其通源性也有一定的影响, 叠覆段通源性最好, 斜裂及线性段通源性差。以F7断裂带不同分段通源性为例: 北部辫状段为硬连接, 断裂端部叠覆会形成压性隆起, 通源性最好, 线性段通源

性较差(图4)。

哈拉哈塘地区至少经历了加里东中期、晚期和海西早期3期大的构造运动^[42], 形成了大量走滑断裂, 而影响研究区断裂通源性的另外一大因素就是断裂发育的多期次性。前期研究认为, 哈拉哈塘地区NW向与NE向共轭走滑断裂形成于中奥陶世末期, 相继滑动而非同时运动可能是共轭断裂的重要形成机制^[46]。然而, 这两组走滑断裂并非完全对称发育, 演化过程与变形程度存在差异^[27]。断裂分析表明, NE向断裂活动期次主要为加里东中-晚期, 海西期、燕山-印支时期少量断层活动, 以通源垂向运移为主; 海西中晚期NW向断裂继承性活动, 调节为主, 通源为辅; 喜山期部分NE向断裂复活破坏油藏, NW向断裂南段靠近烃源岩接受喜山期油气充注(图5)。

2.2.2 断裂连通性评价

断裂的连通性可依据断裂带附近钻井动态的显示是否为连通井组以及连通井组的平面组合样式进行评价。若同一条断裂带上相近钻井在测试阶段具有压力动态连通的特征, 并且投产后地层压力显示一定的协同变化, 则指实该断裂带具有一定的连通性。基于对断裂带附近钻井动态显示和平面组合样式的综合判断研究, 确定了不同井区钻井的连通情况以及连通井区的分布(图6), 如图6a所示, XK5井区钻井连通性较好。总体来看, 北部走滑断裂活动强度较大, 其中叠覆段的平面及垂向样式具有连通优势; 东部断裂的平

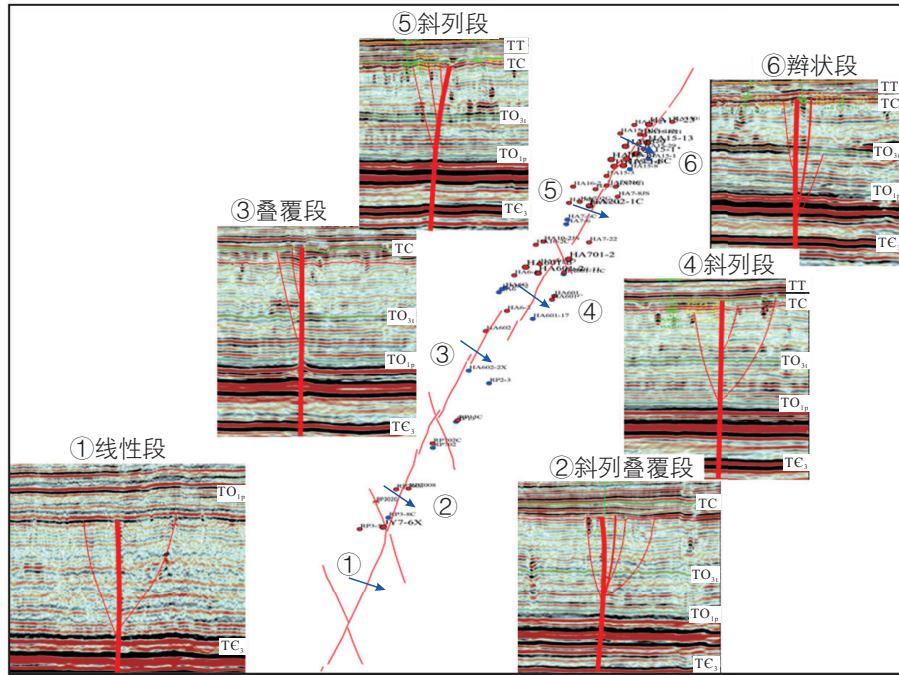


图 4 哈拉哈塘油田塔河北区块 F7 断裂带不同分段通源性

Fig. 4 Different sections of F7 fault zone in Tahe north block of Halahatang Oilfield are source conduction

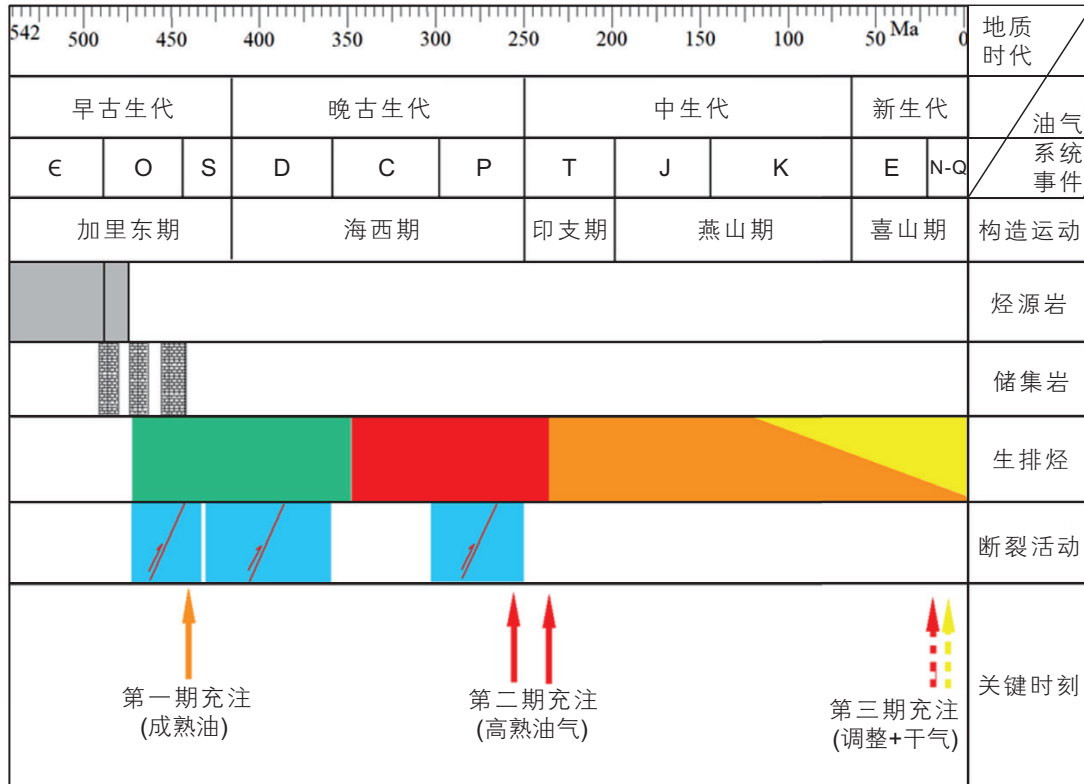


图 5 哈拉哈塘油田塔河北区块油气运移期次

Fig. 5 Oil and gas migration period of Tahe north block in Halahatang Oilfield

面组合样式显示北部叠覆段和辫状段的活动强度较大，断块水平滑移增大走滑断裂具有较好的连通性；而南部共轭交切处及斜列断层集中处的断裂连通性较好

(图 6)。

2.2.3 断裂扩溶性评价

在进行断裂破碎带扩溶宽度定量表征时，由于钻

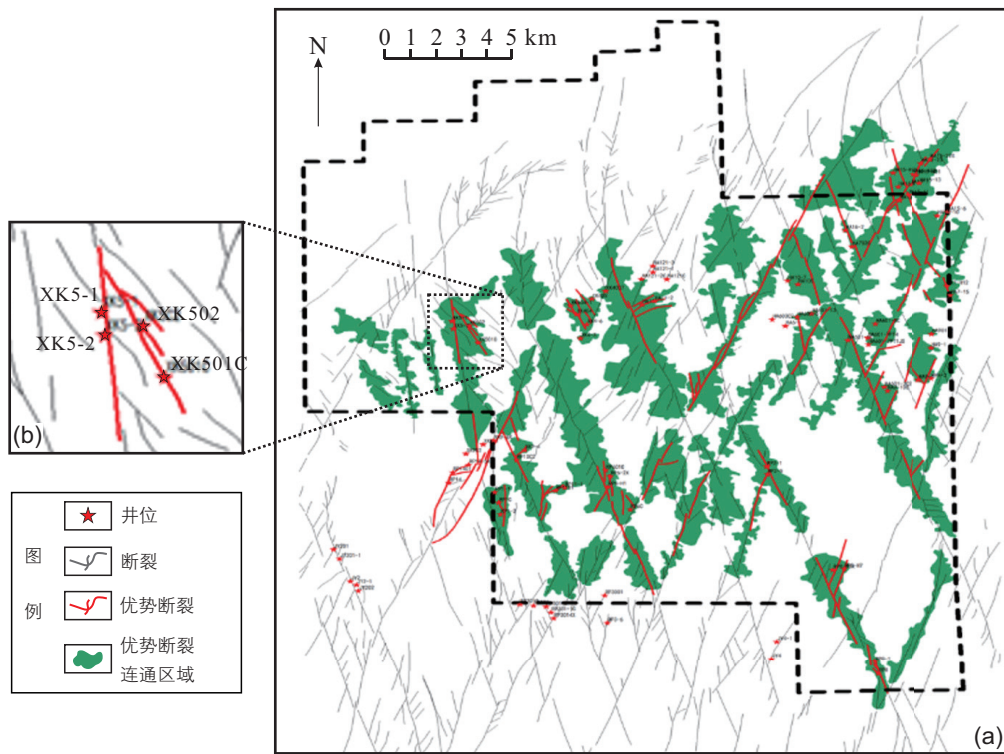


图6 哈拉哈塘油田塔河北区块断裂宽度与连通井组平面图

Fig. 6 Fault width and connected well group plan of Tahe north block in Halahatang Oilfield

井钻遇断裂破碎带时发生漏失, 根据多口钻井漏失点门槛确定张量、相干、波阻抗3种属性的断裂破碎带门槛, 使用该门槛值作为断裂的平面扩溶宽度。北部区域地层抬升剥蚀幅度大, 经风化溶蚀后缝洞储层片状展布, 断裂扩溶性改造程度高, 部分NE向断裂及断控区, 扩容性一般, 优势扩溶性断裂破碎带面积大于 1.5 km^2 、扩溶面积大于 20 km^2 , 北部的断裂带扩溶性一般较好, 在平面展布呈连片特征; 整体扩容性效果, 潜山岩溶区>层间岩溶-顺层改造区>层间岩溶-台缘叠加区>断控岩溶区, 指示潜山岩溶区可能更有利于大型溶蚀孔-缝-洞储集体的形成。

塔河北区块内断裂三性品质整体较好, 其中I类品质占比46%, NE向断裂带优于NW向(图7), 表现为: ①NE走向断裂带属于三性评价较好, 压扭性叠覆段构造特征明显, 断裂活动强度更大, 深部通源分支断层发育, 北部断裂带扩溶性较强, 缝洞储层沿分支断裂横向发育; ②NW走向断裂带三性评价一般, 南部区断裂斜列分支发育, 扩溶性和连通性较好。

3 断控区储层发育特征与预测

断控区储层发育受控于断层活动、构造变形、破碎带等因素, 断控区内储层通常具有多次构造位移和

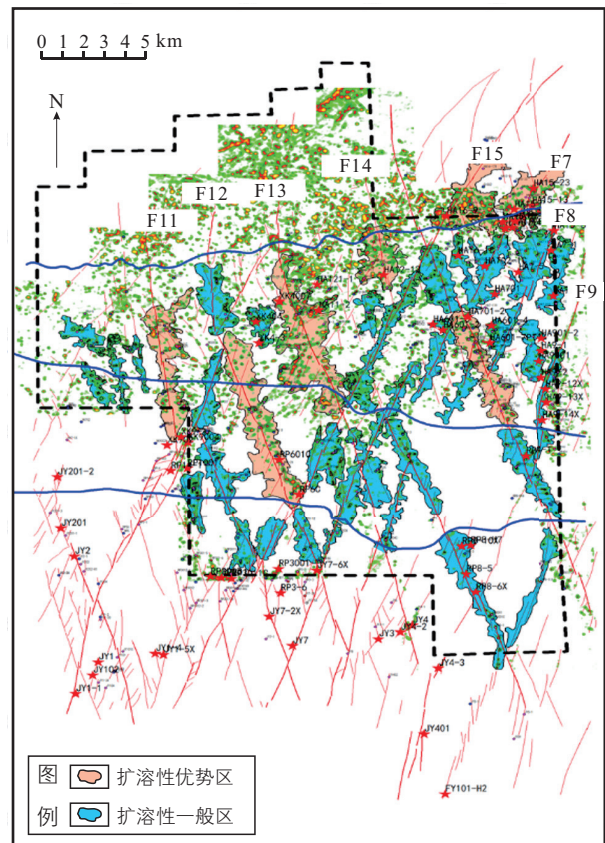


图7 哈拉哈塘油田塔河北区块断裂扩溶性评价平面分布图

Fig. 7 Fault diffusivity evaluation plane distribution map of Tahe north block in Halahatang Oilfield

断裂破碎作用导致的多段储层^[47-48]。因此,首先要通过地震勘探、测井解释、岩心描述等方法厘定断控区储层类型的多样性及其发育特征^[49],以地震反演成果为主,结合属性、沉积、钻井等资料,借助地质模型对断控区储层进行多属性模拟预测,揭示储层分布,预测断控区有利储层的空间展布及其勘探潜力。

3.1 断控区储层基本特征

哈拉哈塘油田塔河北区块不同岩溶区带具有不同的岩溶作用背景。潜山岩溶区岩溶垂向分带清楚,表层岩溶带和径流溶蚀带岩溶缝洞系统比较发育,岩心、薄片以及成像测井资料显示溶蚀孔洞和微裂缝发育较好(图 8),受多期岩溶作用叠加改造,志留系超覆沉积物对岩溶缝洞具有充填破坏作用;层间岩溶区暗河管道系统发育,受岩溶层组类型(吐木休克组区域隔水层之下)、良里塔格组岩溶期明暗河特征、断裂展布控制,缝洞发育层位主要集中于一间房组,局部为鹰山组上部。断控岩溶区流出型暗河管道系统或缝洞体储层发育,主要层位为一间房组,暗河沿断裂延伸在地层因地表河流深切至一间房组区域流出形成区域排泄基准,暗河管道充填程度低。

3.2 有利储层预测方法

在对塔河北区块储层开展分布预测时,由于构造、断裂、地层、储层和沉积现象复杂,反演沉积模型构建难度大;纵向上储层空间组合多样,横向上不同区域主力储层发育程度不同,表层岩溶储层薄,地震资料分辨率低,因此精确识别储层空间展布难度大^[50-51];此外,在层间岩溶区与断控岩溶区,常规反演只能反演

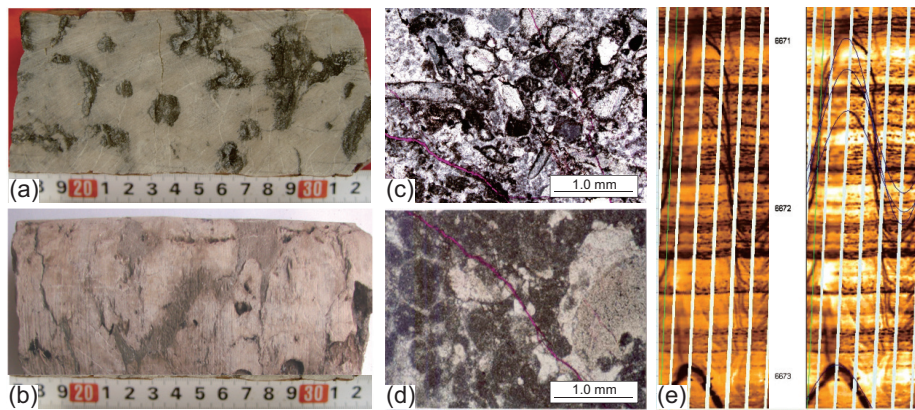
出洞穴型储层,对于裂缝型和孔洞型储层的准确评价需要进一步提升,实现碳酸盐岩缝洞型储层内幕构型较为困难。针对上述问题,分别开展不同的预测研究:

①针对构造和沉积现象复杂,反演沉积模型构建难的问题。采取两步走的方略,一方面在构造解释系统中加强断层精细解释,初步理清断层间的交切关系,断层与层位的切割关系;另一方面依托高精度三维插值模型,达到精细的反演要求。

②针对表层岩溶储层薄,地震资料分辨率低,精确识别储层空间展布难度大,该次采用高分辨率反演方法,结合区域地质认识调整反演参数已达到预期的效果。

③针对裂缝-孔洞型储层,采用结构张量属性识别杂乱边界,进行相控约束序惯指示雕刻,基于结构张量的缝洞边界技术是利用梯度矢量描述地质体的倾角和方位,采用梯度张量矩阵的谱分解描述地震数据的结构特征,可消除弯曲地层的影响,有效度量断裂、河道、礁体内部纹理、平行与亚平行结构、倾斜层理、波状层层理等地质现象。断裂和裂缝则采用相干体或蚂蚁体进行确定性雕刻,结合地震反演,实现了碳酸盐岩储层内幕构型。

塔河北区块存在地震资料品质差、断裂破碎、小断层识别不清的复杂区,利用断层保护滤波技术实现定量解释,通过优化选择性滤波,计算方位角和倾角的相关函数,有效识别隐形的小断层。在实际运用中,从红粉考虑了倾角和方位角的信息,更能反映地震资料的“隐性”不连续,获得小断层及裂缝发育程度的精细解释。在此基础上,通过PCA(数据降维)变量简化技术对数据进行降维,将地震数据转换成



(a) Ha9 井, 6620.9 m, 溶蚀孔洞发育; (b) AD4 井, 6262.6 m, 溶蚀孔和裂缝发育; (c) Ha9 井, 6625.1 m, 亮晶棘屑藻砂屑灰岩, 见未充填构造缝, 颗粒沥青质浸染; (d) Ha9 井, 6618.5 m, 亮晶砂屑灰岩, 见未充填构造缝; (e) Ha601 井, 裂缝发育, 发生钻井液漏失

图 8 研究区典型岩心、薄片及成像测井特征

Fig. 8 Typical core, wafer and imaging logging characteristics in the study area

Wheeler(层序域)域数据,分离长、短旋回,压制长旋回,突出短旋回,达到增强缝洞的目的。进一步开展正演分析,通过研究区已钻井分析,建立正演剖面,储层为波谷反射特征,剖面中多个串珠反射特征是由多个洞穴形成的(图9)。

3.3 有利储层分布雕刻

哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶系碳酸盐岩缝洞体储层主要是由洞穴、孔洞和裂缝组成,在叠加地震数据体上对应串珠、片状、杂乱三种地震响应特征。利用敏感属性确定不同类型的异常特征范围,继而确定缝洞储层量化雕刻范围,在地震相轮廓范围的约束下使缝洞体量化描述更合理、更准确。针对串珠状反射—洞穴储层,该类反射类型主要为点状或者团块状的强振幅,利用相控波阻抗反演属性雕刻其空间展布轮廓范围;针对片状反射—孔洞储层,其地震特征为连续中强反射,采用张量属性来雕刻片状反射空间轮廓范围;对于杂乱反射—裂缝储层,其地震特征表现为不连续、杂乱反射,采用蚂蚁体属性来雕刻杂乱反射空间的展布范围。下面根据不同的区带分别举例分析:

1) 潜山岩溶区: 哈拉哈塘油田潜山岩溶区岩溶垂

向分带清楚,发育表层岩溶带和水平潜流带,同时叠加加断溶体。北部以潜山岩溶区的哈16储量单元中油藏单元HA16-11为例进行雕刻,该区前期形成的大范围破碎带与后期岩溶水系改造作用叠加形成宽度变化大、较分散的缝洞体储层。层间岩溶缝洞体储层沿走滑断裂带更为发育,在走滑断层破碎带之外也有发育,储层质量最优且呈片状展布,形成层状风化壳油藏(图10)。

2) 层间岩溶区: 层间岩溶区的明河旁残丘及暗河体系发育;层间岩溶—台缘叠加区叠加良里塔格组台缘沉积,一间房、良里塔格组均发育储层。受断裂多期活动的影响,该区主干断裂与次级断裂形成宽度变化较大的不规则破碎带,呈团块状展布。层间岩溶—顺层改造区以哈8储量单元中HA8-2PT2油藏单元为例(图11),层间岩溶—台缘叠加区以哈9储量单元中RP4-1油藏单元为例进行雕刻建模(图12)。

3) 断控岩溶区: 断控岩溶区储层沿断裂纵向发育,沿破碎带横向展布。断控区以热普7储量单元中油藏单元RP7006为例,发育的缝洞体储层距断层核较近,多紧邻走滑断裂破碎带发育,形成一系列与走滑断裂走向重合的线状展布的储层(图13)。线性分布的缝洞体储层的纵向深度大,但横向展布宽度相对有限。

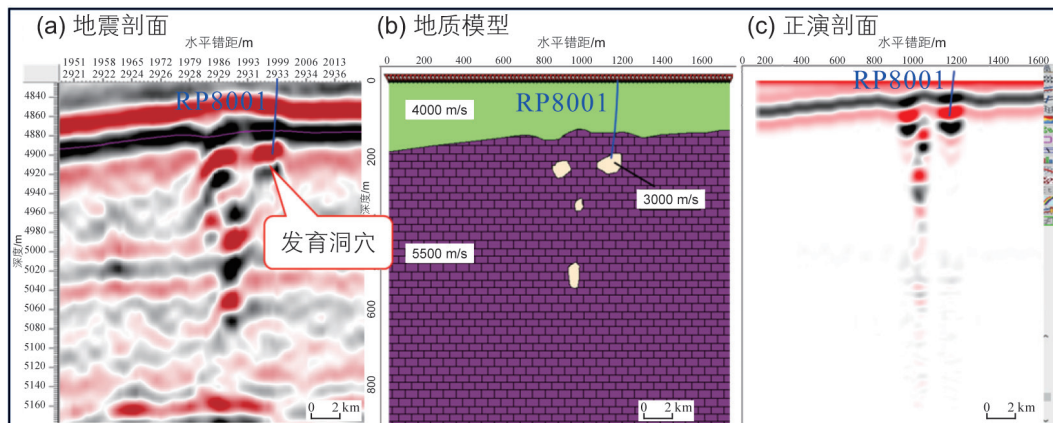


图9 哈拉哈塘油田塔河北区块储层正演剖面

Fig. 9 Forward reservoir profile of Tahebei block, Halahatang Oilfield

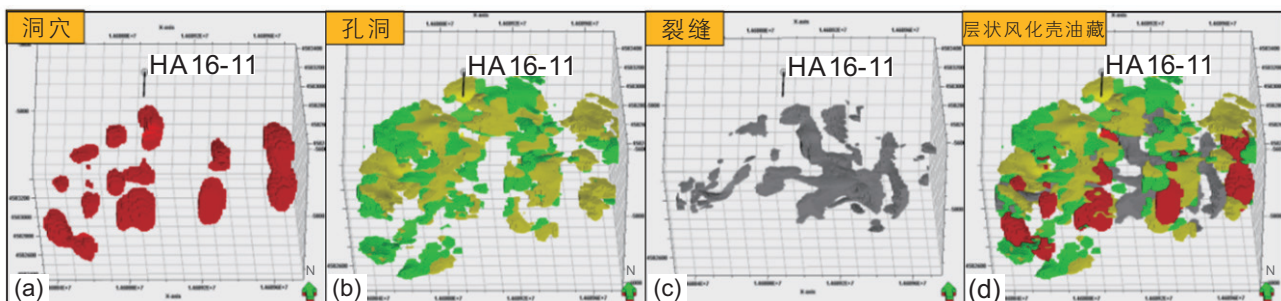


图10 哈拉哈塘油田塔河北区块HA16-11油藏单元雕刻

Fig. 10 Engraving of reservoir unit HA16-11, Tahe north block, Halahatang Oilfield

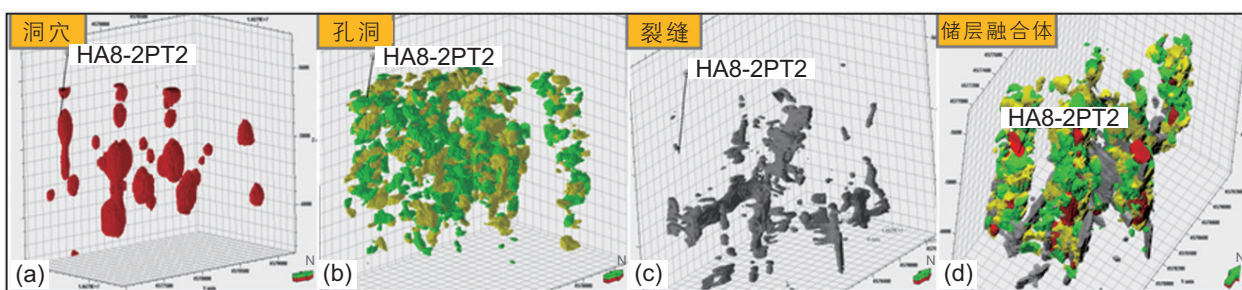


图 11 哈拉哈塘油田塔河北区块层间岩溶-顺层改造区 HA8-2PT2 油藏单元雕刻

Fig. 11 Unit engraving of HA8-2PT2 reservoir in the north block of Tahe, Halahatang Oilfield

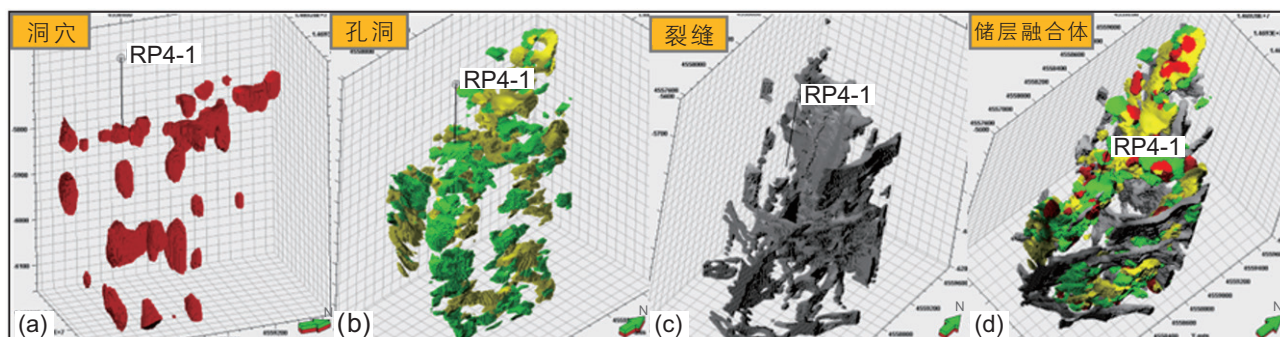


图 12 哈拉哈塘油田塔河北区块层间岩溶-台缘叠加区 RP4-1 油藏单元雕刻

Fig. 12 RP4-1 reservoir unit engraving in platform margin superposition area of Tahe north Block, Halahatang Oilfield

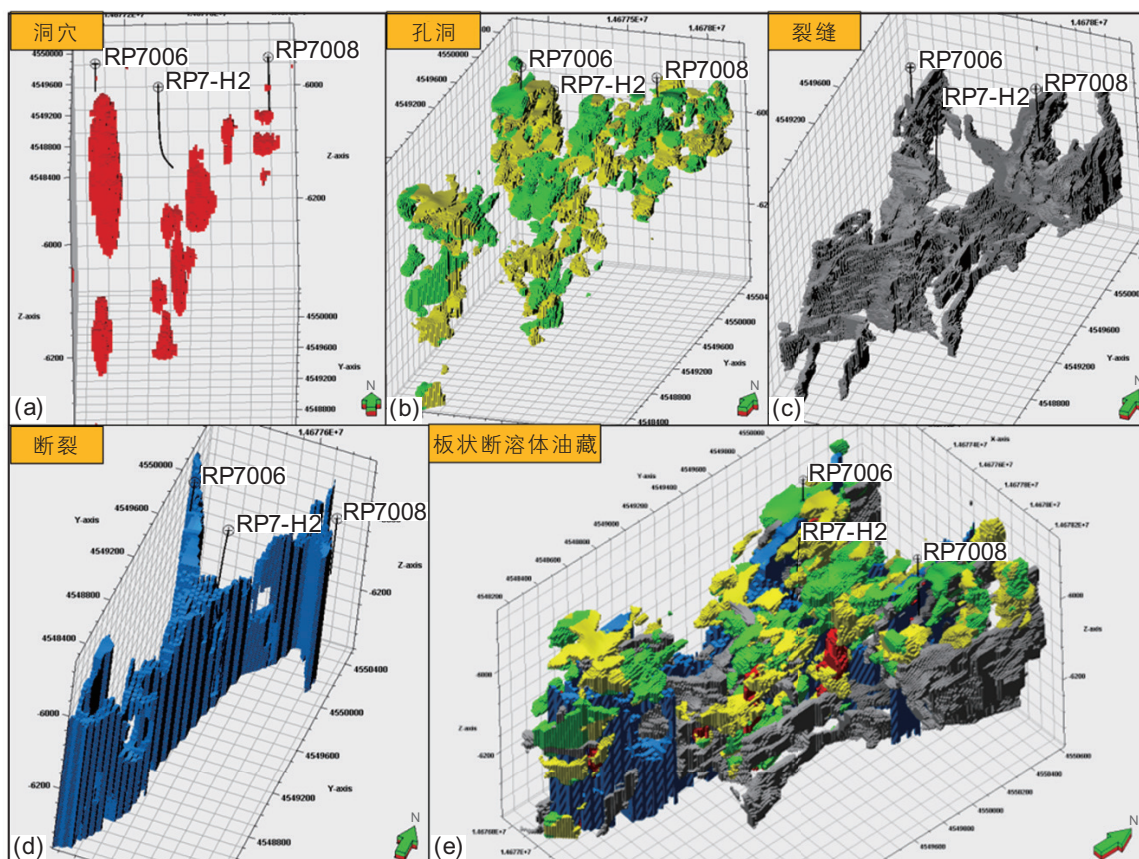


图 13 哈拉哈塘油田塔河北区块断控岩溶区 RP7006 油藏单元雕刻

Fig. 13 Engraving of RP7006 reservoir unit in fault-controlled karst area of Tahe north block, Halahatang Oilfield

4 结论

1) 哈拉哈塘油田塔河北区块断裂具有多期次发育特征, 采用分频重构与属性级联组合技术有效改善了地震资料断裂成像, 基于新地震资料, 精确调整了研究区断裂组合与分段特征, 落实断裂活动期次, 深化断裂三性评价, 落实了区内断裂通源性、连通性与扩溶性特征。NE走向断裂带属于三性评价较好, 压扭性叠覆段构造特征明显, 断裂活动强度更大, 深部通源分支断层发育, 北部断裂带扩溶性较强, 缝洞储层沿分支断裂横向发育; NW走向断裂带三性评价一般, 南部区断裂斜列分支发育, 扩溶性和连通性较好。

2) 采用南北分区差异化相控反演技术, 精确归位不同区带储层空间展布特征, 北部岩溶相及南部断控相, 分区进行地震相控波阻抗反演预测, 凸显储层非均质性, 解决南北缝洞储层能量及形态不同的问题。大型缝洞体储层在走滑断裂带更为发育, 具有“先断后溶、断裂促溶”的演化特征。北部潜山岩溶区采用子波分解重构+地震正演+波形指示反演, 储层具有片状分布模式; 中部层间岩溶区采用PCA缝洞增强处理+结构张量+低频相控反演, 受断裂多期活动的

影响, 该区主干断裂与次级断裂形成宽度变化较大的不规则破碎带, 呈团块状展布; 南部断控岩溶区采用PCA缝洞增强处理+断控体轮廓刻画+低频相控反演, 南部储层受断裂的影响较大, 储层沿破碎带横向展布, 具有线性分布模式。总体来说, 哈拉哈塘油田塔河北断控区的有利储层预测均取得了较好效果, 北部潜山岩溶区断裂带的通源性、连通性及扩溶性整体较好, 有利于大型溶蚀孔-缝-洞储集体的形成, 储层平面展布呈连片特征, 储层质量最优, 是未来油气勘探开发的重点区域, 这也进一步证实了该预测方法的实用性和准确性。

3) 哈拉哈塘油田塔河北区块奥陶系碳酸盐岩缝洞体储层主要是由洞穴、孔洞和裂缝组成, 在叠加地震数据体上对应串珠、片状、杂乱三种地震响应特征。通过波阻抗反演、结构张量、相干-蚂蚁体三种属性统计, 分区划分了哈拉哈塘油田储层的门槛值。根据缝洞型碳酸盐储层的特点, 不同储层类型采用不同的雕刻方法。洞穴型储层采用相控波阻抗反演进行确定性雕刻, 溶蚀孔洞采用结构张量属性识别杂乱边界, 进行相控约束序贯指示雕刻, 断裂和裂缝采用相干体或蚂蚁体进行确定性雕刻, 能够获得最好的断控区碳酸盐岩储层雕刻效果。

参考文献

- [1] 朱光有, 曹颖辉, 闫磊, 等. 塔里木盆地 8000 m 以深超深层海相油气勘探潜力与方向[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(06): 755-772. [ZHU G Y, CAO Y H, YAN L, et al. Exploration potential and direction of deep-ultra-deep Marine oil and gas in Tarim Basin over 8000 m[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(06): 755-772.]
- [2] 贾承造, 张水昌. 中国海相超深层油气形成[J]. 地质学报, 2023, 97(09): 2775-2801. [JIA C Z, ZHANG S C. Ultra-deep marine hydrocarbon formation in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(09): 2775-2801.]
- [3] 邹才能, 翟光明, 张光亚, 等. 全球常规-非常规油气形成分布、资源潜力及趋势预测[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(01): 13-25. [ZOU C N, ZHAI G M, ZHANG G Y, et al. Global conventional and unconventional oil and gas formation distribution, resource potential and trend prediction[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(01): 13-25.]
- [4] 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(04): 17-28. [YANG X W, TIAN J, WANG Q H, et al. Understanding of ultra-deep oil and gas geology and favorable exploration fields in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(04): 17-28.]
- [5] QI Y, SUN P, CAI C, et al. Phase fractionation controlling regional distribution of diamondoids: A case study from the Halahatang oil field, Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2022, 140: 105674.
- [6] YI L, LIU Z, CHEN Z, et al. Thermal maturity, source characteristics, and migration directions for the Ordovician oil in the central Tabei Uplift, Tarim Basin: Insight from biomarker geochemistry[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2020, 189: 106975.
- [7] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力-哈拉哈塘地区奥陶系碳酸盐岩岩溶型储层特征及成因[J]. 沉积学报, 2011, 29(03): 465-474. [NI X F, ZHANG L J, SHEN A J, et al. Characteristics and genesis of Ordovician carbonate karst reservoirs in Imali-Halahatang area, Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(03): 465-474.]
- [8] 淡永, 邹灏, 梁彬, 等. 塔北哈拉哈塘加里东期多期岩溶古地貌恢复与洞穴储层分布预测[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(03): 304-312. [TAN Y, ZOU H, LIANG B, et al. Caledonian multi-stage karst palaeo-geomorphology restoration and prediction of cave reservoir distribution in Halahatang, Northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(03): 304-312.]
- [9] 高计县, 唐俊伟, 张学丰, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系一间房组碳酸盐岩岩心裂缝类型及期次[J]. 石油学报, 2012, 33(01): 64-

73. [GAO J X, TANG J W, ZHANG X F, et al. Types and stages of fractures in carbonate core of Ordovician Yijianfang Formation in Halahatang area, Tabei[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(01): 64–73.]
- [10] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(03): 827–844. [ZHU G Y, YANG H J, ZHU Y F, et al. Geological characteristics and rich accumulation of carbonate rocks in Halahatang area, Tarim Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(03): 827–844.]
- [11] 陶小晚, 张义杰, 段书府, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘油田原油聚集过程与密度多变成因[J]. *石油学报*, 2015, 36(04): 405–415. [TAO X W, ZHANG Y J, DUAN S F, et al. Oil accumulation process and causes of variable density in Halahatang Oilfield, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(04): 405–415.]
- [12] 石书缘, 刘伟, 姜华, 等. 塔北哈拉哈塘地区古生代断裂-裂缝系统特征及其与奥陶系岩溶储层关系[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(12): 4568–4577. [SHI S Y, LIU W, JIANG H, et al. Characteristics of Paleozoic fault-fracture system and its relationship with Ordovician karst reservoir in Halahatang area, Northern Tarim Basin[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2015, 46(12): 4568–4577.]
- [13] 彭更新, 但光箭, 郑多明, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区三维叠前深度偏移与储层定量雕刻[J]. *中国石油勘探*, 2011, 16(Z1): 49–56+172. [PENG G X, DAN G J, ZHENG D M, et al. 3D prestack depth migration and quantitative reservoir carving in Halahatang area, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2011, 16(Z1): 49–56+172.]
- [14] 闫玲玲, 刘全稳, 张丽娟, 等. 叠后地质统计学反演在碳酸盐岩储层预测中的应用: 以哈拉哈塘油田新垦区块为例[J]. *地学前缘*, 2015, 22(06): 177–184. [YAN L L, LIU Q W, ZHANG L J, et al. Application of post-stack geostatistical inversion to carbonate reservoir prediction: A case study of the new reclamation block in Halahatang Oilfield[J]. *Earth Science Frontiers*, 2015, 22(06): 177–184.]
- [15] XIAO Z, LI M, HUANG S, et al. Source, oil charging history and filling pathways of the Ordovician carbonate reservoir in the Halahatang Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 73: 59–71.
- [16] 杨海军, 张银涛, 关宝珠, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘奥陶系缝洞型碳酸盐岩油田的勘探发现与评价探明[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(02): 113–122. [YANG H J, ZHANG Y T, GUAN B Z, et al. Exploration discovery and evaluation of Ordovician fracture-vuggy carbonate oil field in Harahatang, Tarim Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2023, 28(02): 113–122.]
- [17] 杨海军, 邓兴梁, 张银涛, 等. 塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(03): 13–23. [YANG H J, DENG X L, ZHANG Y T, et al. Major discoveries and significance of Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoir exploration in Well Manshen 1, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(03): 13–23.]
- [18] 何治亮, 陆建林, 林娟华, 等. 中国海相盆地原型-改造分析与油气有序聚集模式[J]. *地学前缘*, 2022, 29(06): 60–72. [HE Z L, LU J L, LIN J H, et al. Prototype-reconstruction analysis and ordered accumulation model of oil and gas in marine basins in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(06): 60–72.]
- [19] ZHANG Z, GUANGYOU Z, HAN J, et al. Genesis and preservation of the giant ultradeep Hadexun petroleum accumulation in the Tarim Basin, China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022: 109249.
- [20] ZHANG Z, ZHU G, ZHANG Y, et al. The origin and accumulation of multi-phase reservoirs in the east Tabei uplift, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 98: 533–553.
- [21] 陈利新, 潘文庆, 梁彬, 等. 轮南奥陶系潜山表层岩溶储层的分布特征[J]. *中国岩溶*, 2011, 30(03): 327–333. [CHEN L X, PAN W Q, LIANG B, et al. Distribution characteristics of subsurface karst reservoir in Ordovician buried hill in south China[J]. *Carsologica Sinica*, 2011, 30(03): 327–333.]
- [22] 胡明毅, 付晓树, 蔡全升, 等. 塔北哈拉哈塘地区奥陶系鹰山组——一间房组岩溶储层特征及成因模式[J]. *中国地质*, 2014, 41(05): 1476–1486. [HU M Y, FU X S, CAI Q S, et al. Characteristics and genetic models of karst reservoirs in the Ordovician Yingshan-Yijianfang Formation, Halahatang area, Northern Tarim Basin[J]. *Geology of China*, 2014, 41(05): 1476–1486.]
- [23] 金之钧, 刘全有, 云金表, 等. 塔里木盆地环满加尔凹陷油气来源与勘探方向[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(03): 310–320. [JIN Z J, LIU Q Y, YUN J B, et al. Hydrocarbon source and exploration direction in Huanmanjia Sag, Tarim Basin[J]. *Science in China: Earth Sciences*, 2017, 47(03): 310–320.]
- [24] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(03): 347–355. [LU X B, HU W G, WANG Y, et al. Characteristics and development practice of carbonate fault solution reservoir in Tahe area[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(03): 347–355.]
- [25] 孙崇浩, 朱光有, 郑多明, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区超深碳酸盐岩缝洞型储集层特征与控制因素[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(05): 1028–1036. [SUN C H, ZHU G Y, ZHENG D M, et al. Characteristics and controlling factors of ultra-deep carbonate fracture-vuggy-type reservoirs in Halahatang area, Tarim Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(05): 1028–1036.]
- [26] 丁志文, 汪如军, 陈方方, 等. 断溶体油气藏成因、成藏及油气富集规律——以塔里木盆地哈拉哈塘油田塔河南岸地区奥陶系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(02): 286–296. [DING Z W, WANG R J, CHEN F F, et al. Genesis, accumulation and hydrocarbon enrichment of fault-solution reservoirs: A case study of the Ordovician in the south bank area of Tahe, Halahatang Oilfield, Tarim

- Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(02): 286–296.]
- [27] 杨海军, 邬光辉, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析[J]. *地质科学*, 2020, 55(01): 1–16. [YANG H J, WU G H, HAN J F, et al. Structural analysis of strike-slip faults in Tarim Craton basin[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2020, 55(01): 1–16.]
- [28] 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(05): 990–8+1073. [DENG S, LI H L, HAN J, et al. Activity characteristics and geological significance of the middle section of Shunbei 5 strike-slip fault in Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(05): 990–8+1073.]
- [29] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1296–1310. [HAN J F, SU Z, CHEN L X, et al. Reserve-controlling effect and exploration potential of strike-slip faults in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1296–1310.]
- [30] 关宝珠, 张程, 李世银, 等. 塔里木盆地塔中隆起缝洞型碳酸盐岩油气藏三级描述与效益开发[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(12): 1766–1778. [GUAN B Z, ZHANG C, LI S Y, et al. Tertiary description and benefit development of fracture-var-type carbonate reservoir in Tazhong Uplift, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(12): 1766–1778.]
- [31] 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(01): 54–68. [HUANG C, YUN L, CAO Z C, et al. Division and formation mechanism of Middle-Lower Ordovician fault-controlled fracture-cave system in Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(01): 54–68.]
- [32] SU J, WANG X, YANG H, et al. Hydrothermal alteration and hydrocarbon accumulations in ultra-deep carbonate reservoirs along a strike-slip fault system, Tarim Basin, NW China[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, 203: 108605.
- [33] 马立平, 李允. 缝洞型油藏物质平衡方程计算方法研究[J]. *西南石油大学学报*, 2007, (05): 66–8+200–1. [MA L P, LI Y. Study on calculation method of material balance equation for fracture-vuggy reservoir[J]. *Journal of Southwest Petroleum University*, 2007, (05): 66–8+200–1.]
- [34] 宋红伟, 张智, 任文博. 缝洞型碳酸盐岩油藏物质平衡法计算储量探讨[J]. *天然气勘探与开发*, 2012, 35(01): 32–5+49+81. [SONG H W, ZHANG Z, REN W B. Reserves calculation by mass balance method in fracture-vuggy carbonate reservoirs[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2012, 35(01): 32–5+49+81.]
- [35] ZHAO X, WU C, MA B, et al. Characteristics and genetic mechanisms of fault-controlled ultra-deep carbonate reservoirs: A case study of Ordovician reservoirs in the Tabei paleo-uplift, Tarim Basin, western China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 254: 105745.
- [36] 王新新, 崔德育, 孙崇浩, 等. 哈拉哈塘油田A地区断裂特征及其控油作用[J]. *地质力学学报*, 2019, 25(06): 1058–1067. [WANG X X, CUI D Y, SUN C H, et al. Fault characteristics and oil control in Area A of Halahatang Oilfield[J]. *Chinese Journal of Geomechanics*, 2019, 25(06): 1058–1067.]
- [37] 汤良杰. 塔里木中生宙盆地演化主要阶段[J]. *地学前缘*, 1997, (Z2): 322–328. [TANG L J. Main stages of evolution of Tarim basin in Phanerozoic[J]. *Earth Science Frontiers*, 1997, (Z2): 322–328.]
- [38] 何登发, 李德生, 童晓光. 中国多旋回叠合盆地立体勘探论[J]. *石油学报*, 2010, 31(05): 695–709. [HE D F, LI D S, TONG X G. Stereoscopic exploration of multi-cycle superposed basins in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2010, 31(05): 695–709.]
- [39] 马德波, 邬光辉, 朱永峰, 等. 塔里木盆地深层走滑断层分段特征及对油气富集的控制: 以塔北地区哈拉哈塘油田奥陶系走滑断层为例[J]. *地学前缘*, 2019, 26(01): 225–237. [MA D B, WU G H, ZHU Y F, et al. Segmentation characteristics of deep strike-slip faults and their control on oil and gas enrichment in Tarim Basin: a case study of Ordovician strike-slip faults in Halahatang Oilfield, Tarim Area[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(01): 225–237.]
- [40] 李阳, 康志江, 薛兆杰, 等. 中国碳酸盐岩油气藏开发理论与实践[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(04): 669–678. [LI Y, KANG Z J, XUE Z J, et al. Theory and practice of carbonate reservoir development in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(04): 669–678.]
- [41] 漆立新. 塔里木盆地顺北超深断溶体油藏特征与启示[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(01): 102–111. [Qi L X. Characteristics and implications of ultra-deep fault solution reservoirs in Shunbei, Tarim Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(01): 102–111.]
- [42] 陈利新, 贾承造, 姜振学, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩富油模式与主控因素[J]. *石油学报*, 2023, 44(06): 948–961. [CHEN L X, JIA C Z, JIANG Z X, et al. Oil-rich model and main controlling factors of carbonate rocks in Halahatang area, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(06): 948–961.]
- [43] ZHU G, CHEN F, WANG M, et al. Discovery of the lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(10): 2123–2151.
- [44] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(01): 8–21. [ZHU G Y, CHEN F R, CHEN Z Y, et al. Discovery and basic characteristics of high-quality source rocks of Cambrian Yuertusi Formation, Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(01): 8–21.]
- [45] ZHU G, MILKOV A V, ZHANG Z, et al. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China[J]. *AAPG Bulletin*, 2019, 103(7): 1703–1743.
- [46] 杨威, 周刚, 李海英, 等. 碳酸盐岩深层走滑断裂成像技术[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(02): 246–252. [YANG W, ZHOU G, LI H Y,

- et al. Imaging technique of strike-slip fault in deep carbonate rock[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(02): 246–252.]
- [47] ZENG S, QIU N, LI H, et al. Generation and distribution of overpressure in ultra-deep carbonate reservoirs controlled by intra-cratonic strike-slip faults: The Ordovician of Shuntuoguole area in the Tarim Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2023, 158: 106515.
- [48] GUO R, ZHANG S, BAI X, et al. Hydrothermal dolomite reservoirs in a fault system and the factors controlling reservoir formation-A case study of Lower Paleozoic carbonate reservoirs in the Gucheng area, Tarim Basin[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 120: 104506.
- [49] WANG X, WANG J, CAO Y, et al. Characteristics, formation mechanism and evolution model of Ordovician carbonate fault-controlled reservoirs in the Shunnan area of the Shuntuogole lower uplift, Tarim Basin, China[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 145: 105878.
- [50] 邓兴梁, 闫婷, 张银涛, 等. 走滑断裂断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[J]. *天然气工业*, 2021, 41(03): 21–29. [DENG X L, YAN T, ZHANG Y T, et al. Characteristics of strike-slip fault-controlled carbonate reservoirs and ideas for well location deployment: A case study in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(03): 21–29.]
- [51] 江同文, 昌伦杰, 邓兴梁, 等. 断控碳酸盐岩油气藏开发地质认识与评价技术—以塔里木盆地为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(03): 1–9. [JIANG T W, CHANG L J, DENG X L, et al. Geological understanding and evaluation techniques of fault-controlled carbonate reservoir development: A case study of Tarim Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(03): 1–9.]

(编辑 付娟娟)