

塔里木盆地顺北地区中部低序级走滑断裂全方位一体化勘探实践

云露,曹自成,李海英,韩俊,黄超,张庆

(中国石化 西北油田分公司,新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要:塔里木盆地顺北地区中部主干断裂带间的低序级走滑断裂带处于油气运聚富集的优势区,成藏条件优越。但地质上低序级断裂带发育机理不清,难以有效识别,精细表征难度大;工程上,钻完井周期长、成本高。针对这些难题开展了研究-部署一体化、地质-物探一体化、勘探-开发一体化、地质-工程一体化和技术-经济一体化全方位勘探实践。全方位一体化勘探实践有效提升了低序级断裂带的勘探效率和效益。通过地质-物探一体化,建立了低序级断裂带解释模式,利用小面元、宽方位技术提升小断裂绕射波采样的完整性,采用高覆盖技术提高了沙漠区超深层信号的能量与信噪比,实现了低序级断裂带地震识别从“看不见”到“看得清”的突破。通过勘探开发一体化,进行立体解剖并迭代油藏模型,在精细雕刻的基础上形成“单井控断、平面居中、纵向最优、多揭断棚”的井轨迹设计技术,整体统筹支撑少井高产转采。通过地质-工程一体化,提高了钻井地质风险和地应力预测精度,支撑一体化井口及井身结构优选,推进了安全优快中靶。通过技术-经济一体化支撑采集、钻井、资料录取和酸压改造全业务链源头优化降本,提升了勘探质量和效益。实践表明,低序级断裂带是超深层油气勘探的重要领域。低序级走滑断裂带的活动强度虽然相对较弱,但其密集发育的裂缝网络可以导致储集层的大规模破碎,有利于油气的储存和运移。跳出主干断裂带,快速落实低序级断裂带亿吨级增储区带阵地,可以实现主干断裂带之外新类型油气突破,开拓新的油气勘探领域。

关键词:超深层;断控油气藏;一体化勘探;低序级断裂;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE132

文献标识码:A

Fully integrated exploration practices for low-order strike-slip faults in the central Shunbei area of the Tarim Basin

YUN Lu, CAO Zicheng, LI Haiying, HAN Jun, HUANG Chao, ZHANG Qing

(Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: In the central Shunbei area of the Tarim Basin, low-order strike-slip faults situated between major faults are identified as the destination of hydrocarbon migration and enrichment, exhibiting favorable conditions for hydrocarbon accumulation. However, hydrocarbon exploration targeting these faults faces both geological and engineering challenges. Geologically, the developmental mechanisms of the low-order faults remain poorly understood, complicating their effective identification and fine characterization. Regarding engineering, well drilling and completion operations proves prolonged and costly. To address these challenges, we implement all-round exploration practice that integrates research and deployment, geology and geophysics, exploration and exploitation, geology and engineering, and technology and economy. These integrated practices have effectively enhanced the efficiency and benefits of exploration targeting low-order faults in the central Shunbei area. The geology-geophysics integration facilitates the establishment of an interpretation mode of low-order faults. This mode improves the integrity of the diffraction wave-based sampling of small faults using small-bin and wide-azimuth (WAZ) acquisition techniques. Furthermore, it enhances the energy and signal-to-noise ratios of signals from ultra-deep strata in deserts through high-

收稿日期:2025-02-18;修回日期:2025-04-21。

第一作者简介:云露(1972—),男,教授级高级工程师,石油地质综合研究。E-mail:yunl8_xbsj@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U24B6001,U21B2063);中国石化科技部项目(P24136,P24172);新疆维吾尔自治区天山英才计划优秀工程师项目(顺北超深碳酸盐岩油气藏高效勘探开发)。

fold coverage. Consequently, a breakthrough is achieved in the seismic identification of low-order faults, transforming them from previously undetectable to clearly identifiable. The exploration-exploitation integration allows three-dimensional analysis of drilled wells and iterative optimization of reservoir models. In combination with detailed characterization, a well trajectory design technique is developed. This technique is distinguished by its ability to control faults using a single well, select optimal anomalous targets in the central portions of fault planes horizontally, select optimal cave reservoirs vertically, and identify multiple barrier-shaped hydrocarbon reservoirs along fault zones. The exploration-exploitation integration provides robust support for efficient oilfield development with fewer wells, high single-well production, and direct transformation of exploratory wells to production wells through holistic planning. The geology-engineering integration enhances the accuracy of geostress prediction and drilling-related geological risks, while also enabling the optimization of integrated wellhead and casing programs. As a result, this integration facilitates the safe, precise, and quick landing of wells in the pay zones of the low-order faults. The technology-economy integration drives the optimization and cost reduction at source for the entire chain comprising seismic acquisition, well drilling, logging, and acid fracturing, thereby enhancing exploration quality and economic benefits. These exploration practices demonstrate that low-order fault zones represent significant targets in ultra-deep hydrocarbon exploration. Despite their relatively low activity intensities, low-order strike-slip fault zones exhibit dense fracture networks, which can induce extensive reservoir fracturing, conducive to hydrocarbon storage and migration. Beyond major fault zones, we quickly identify low-order faults with the potential for a reserve growth of up to 100 million tonnes. This facilitates breakthroughs made in new-type hydrocarbon exploration, expanding horizons for hydrocarbon exploration.

Key words: ultra-deep reservoir, fault-controlled hydrocarbon reservoir, integrated exploration, low-order fault, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式: 云露, 曹自成, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北地区中部低序级走滑断裂全方位一体化勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 1-17. DOI: 10. 11743/ogg20260101.

YUN Lu, CAO Zicheng, LI Haiying, et al. Fully integrated exploration practices for low-order strike-slip faults in the central Shunbei area of the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 1-17. DOI: 10. 11743/ogg20260101.

深层-超深层海相碳酸盐岩蕴藏着丰富的油气资源, 是油气勘探的重要方向, 塔里木盆地顺北地区经历了多期构造演化^[1-3], 油气资源丰富, 勘探潜力大。自顺北油气田发现以来, 该地区的油气勘探取得了重大突破, 油气勘探主要集中在走滑断裂带, 走滑断裂带对油气的储存和运移具有重要的控制作用。顺北超深断控缝洞型油气藏的勘探主要分为3个阶段。①第一阶段: 2012—2015年, 顺北东部(顺南地区)顺南1井测试获得低产气流, 后续顺南4井等井获得高产气流, 率先在断裂带勘探取得突破, 证实了顺北东部油气富集与走滑断裂相关^[4-6]。②第二阶段: 2015—2019年, 在顺北1号断裂带、顺北5号断裂带和顺北7断裂号带均获得工业油气流^[7], 证实了顺北主干断裂带整体含油, 明确了走滑断裂控储和控藏特征^[8-11]。③第三阶段, 2019年以来, 向中部的顺北4号等北东向断裂带甩开部署相继取得重要突破, 实现了顺北4号和顺北8号断裂带的整体控制, 深化了走滑断裂控

储、控藏、控富的认识^[12-16], 展示了顺北中部走滑断裂体系油气富集与良好的勘探潜力。塔里木盆地经历了多期构造叠加改造, 地质条件复杂, 随着勘探工作的不断深入, 主干断裂带基本探明, 带间发育的低序级断裂带是资源接续的现实阵地, 成为勘探的重要目标。

研究表明, 低序级走滑断裂带虽然活动强度相对较弱, 但其密集发育的裂缝网络可以导致储集层大规模破碎, 对油气的储存和运移具有重要影响^[17-18]。本文旨在通过对顺北中部低序级走滑断裂带的全方位一体化勘探实践进行总结, 探讨低序级断裂带在超深层油气藏勘探中的重要性和应用前景, 为未来超深层油气资源的高效开发提供理论依据和技术支持。具体而言, 低序级断裂带勘探的关键在于明确低序级断裂的发育机理, 识别有利区带分布, 克服地震上常规观测系统采集与成像方法识别难度大的问题, 提升精细表征能力, 优化工程上的钻完井周期和成本, 降低效益勘探

的不确定性。通过研究-部署一体化、地质-物探一体化、勘探-开发一体化、地质-工程一体化和技术-经济一体化等多方面的实践,实现主干之外新的油气突破,开拓新的勘探领域。

1 地质背景及挑战

1.1 地质背景

顺北地区位于塔里木盆地中部的顺托果勒低隆起区,是塔里木盆地构造活动相对稳定的一级构造单元。该区域东西分别与满加尔坳陷和阿瓦提坳陷相接,南北则与卡塔克隆起及沙雅隆起相邻,整体呈现“马鞍形”构造格局^[19-26]。

塔里木盆地是一个大型叠合盆地,主要经历了加里东早期克拉通内弱伸展构造运动、加里东中、晚期—海西早期的挤压低隆起形成演化、海西晚期—印支期塔北隆起持续抬升与挤压活动,以及燕山期—喜马拉雅期古隆起与断裂调整定型等4期构造运动^[27-31]。这些构造运动导致了盆地内部先存构造(例如破裂或断层)在板内应力集中作用下再活动形成克拉通内走滑

断裂,克拉通内走滑断裂与大型走滑断裂(板块边界型和嵌入碰撞型等)有着明显差异,前者的滑移距通常在数百米—数千米左右,而后者滑移距多在数百千米尺度,将这种克拉通内发育的走滑位移在数千米内的走滑断裂定义为板内中小尺度走滑断裂^[32-34]。

根据不同断错标志实测了顺北地区走滑断裂水平滑移距,多在1.0 km左右;前期研究表明顺北及邻区主干走滑断裂水平滑移距与平均分段长度成正比^[35-38]。文中基于滑移距和延伸长度将区内断裂划分为主干断裂和低序级断裂,其中主干断裂的长度一般大于60 km,滑移距一般大于0.6 km;低序级断裂相对于主干断裂滑移距和延伸长度较小,包括次级断裂和隐伏断裂,低序级断裂长度一般小于60 km,滑移距一般小于0.6 km(图2)。在空间分布上,低序级断裂主要发育于主干断裂体系的两侧或分支部位。研究表明,这些低序级断裂与主干断裂具有相似的运动学属性,但在展布特征和活动性方面存在显著差异。具体而言,在寒武系—中奥陶统中,低序级断裂多为高陡直立的走滑构造,倾角普遍大于85°;而在上奥陶统、古生界和中生界碎屑岩层中,倾角通常小于60°。从断面特征来看,低序级断裂宽度一般在数米—数十米范围内。但

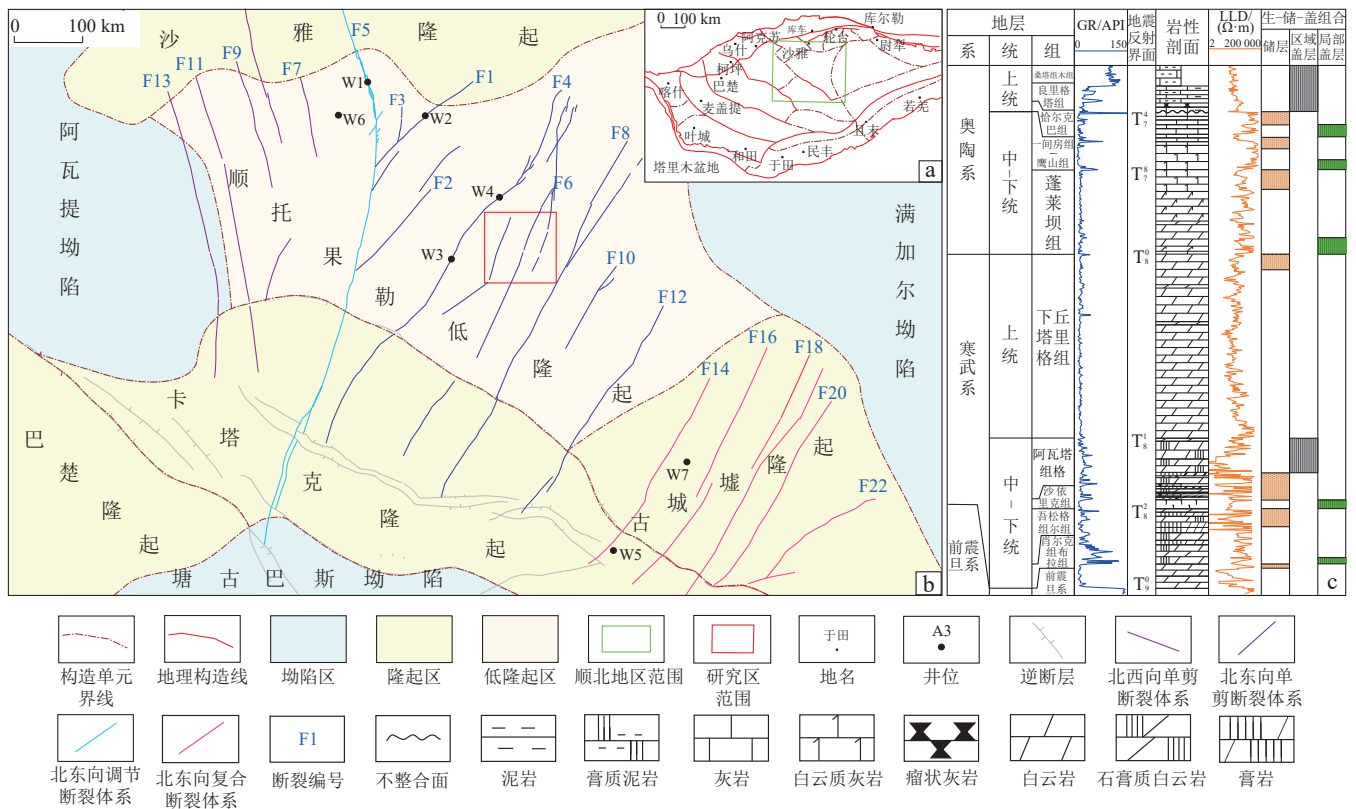


图1 塔里木盆地顺北地区构造位置(a)、下古生界断裂带分布(b)及地层综合柱状图(c)(据文献[8]修编)

Fig. 1 Maps showing the tectonic location (a), the Lower Paleozoic fault zone distribution (b), and the composite stratigraphic column (c) of the Shunbei area, Tarim Basin (modified after reference [8])

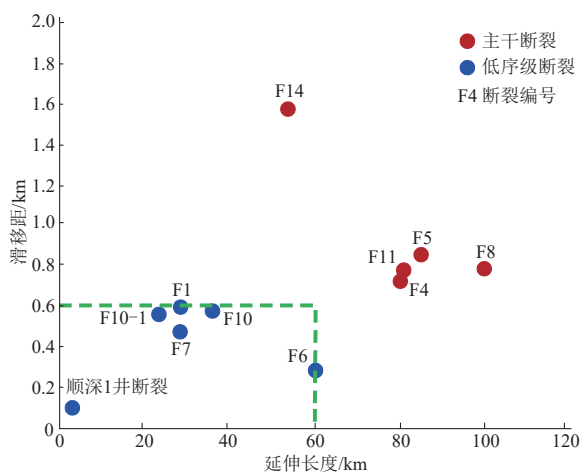


图2 塔里木盆地顺北地区板内中、小尺度走滑断裂滑移距-延伸长度交汇图

Fig. 2 Cross plot of the slip distance vs. length of small-scale intraslab strike-slip faults in the Shunbei area, Tarim Basin

在断裂交汇或分支部位,可能形成较宽的破碎带,其规模可达数百米。这种空间变异反映了区域应力场的变化和多期构造活动的影响。

尽管低序级断裂的滑移量和断距明显小于主干断裂体系,但它们在局部地区仍表现出较高的活动性特征。这种次级破裂系统对区域构造演化和资源分布也

具有重要的作用。低序级断裂对周围岩层的改造作用形成了复杂的网络裂缝型储层。这些储层主要由裂缝带、角砾岩带和微裂隙组成,具有较高的孔隙度和渗透性,不仅是油气运移的重要通道,也是油气聚集和储存的主要储层,形成了沿走滑断裂带分布的“窄、长”条带状油气藏。通过对低序级断裂的识别和研究,可以更好地理解顺北地区的构造特征和油气成藏机制,为油气勘探和开发提供重要的理论依据。

1.2 面临的挑战

前期顺北地区的勘探主要集中在主干走滑断裂带,规模较小的低序级断裂带在发育机理、精细表征和效益勘探等方面需要进一步开展研究,主要面临以下具体的挑战:

1) 地质方面,低序级断裂带发育机理不清,有利区带分布不明(图3a)。顺北地区走滑断裂具有“分层变形、分段演化”的构造变形特征,断层空间结构复杂,不同断裂带的活动性存在明显差异(图3b)。低序级断裂带受控于主干走滑断裂带,但是其具体的发育特征和成因机理不明确,使得准确识别和刻画断裂带的形态、位置及相互关系变得困难,同时活动性差异会影

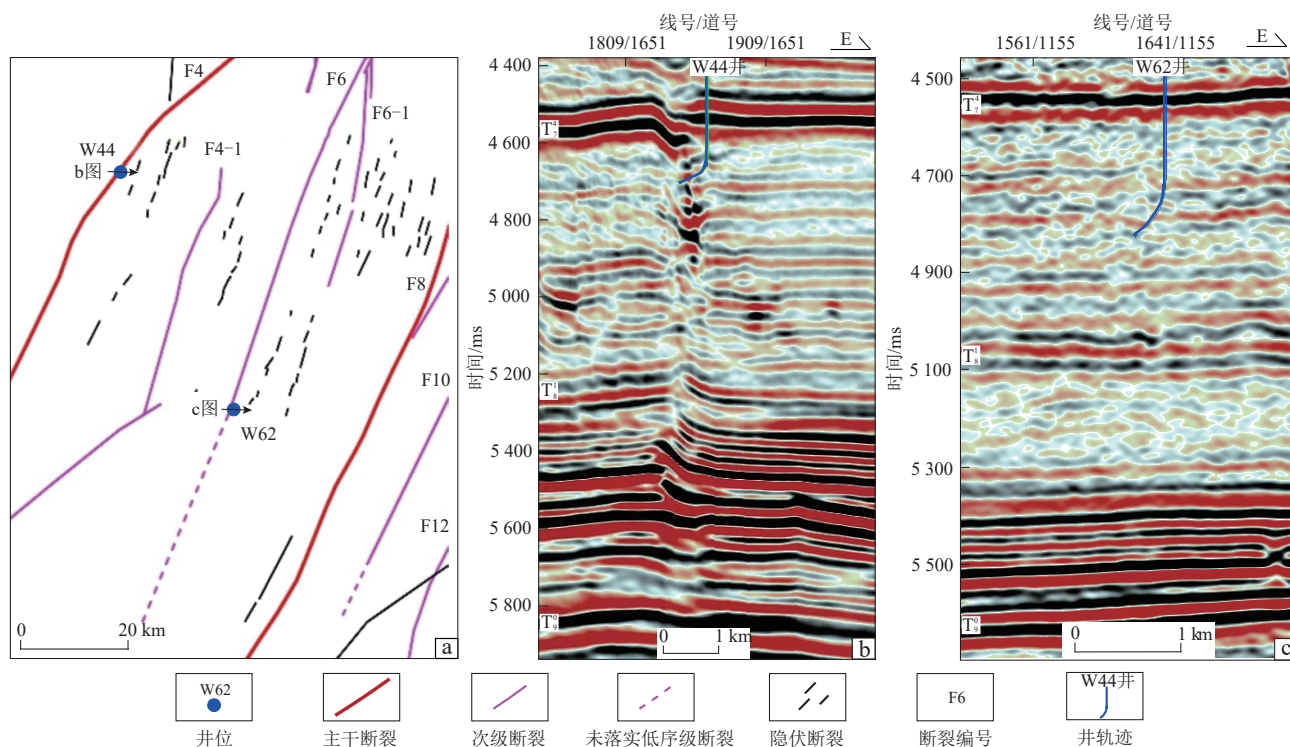


图3 塔里木盆地顺北中部走滑断裂展布(a)、主干断裂地震剖面(b)及低序级断裂地震剖面(c)(160次覆盖,面元25 m × 25 m,横/纵比0.47)

Fig. 3 Distribution map of strike-slip faults (a) and seismic profiles of major (b) and low-order faults (c) in the Shunbei area, Tarim Basin (fold of coverage ; 160; bin: 25 m × 25 m; aspect ratio: 0.47)

响油气的运移和聚集,给勘探目标的确定和资源评价带来不确定性。

2) 物探方面,低序级断裂带地震精细识别难度大,储层表征挑战分辨率极限(图3c)。从图2可以看出,低序级断裂带规模较小,一般宽度小于500 m,延伸长度小于70 m,滑移距小于100 m,断距约10 m左右。常规的地震资料在分辨率上难以清晰地识别这些小断层,埋深7 000 m以深大沙漠区反射波成像理论分辨率约为58 m(1/4地震波长),大于低序级断裂断距,地震精细表征难,导致对断裂带的精确位置和空间形态预测不够准确,影响勘探部署和井位目标优选的合理性。

3) 效益勘探方面,由于低序级断裂的规模小、分布复杂,油气藏非均质性强。钻井过程中会遇到更多的地质风险,如井壁稳定性差、易漏失、易垮塌等。但是储层规模与单井产能不明,工程风险(高压盐水、复杂压力系统、局部应力等)的地质精细预测难,钻完井周期长,成本高,导致效益勘探面临不确定性。

2 全方位一体化勘探主要做法

围绕低序级断裂带效益勘探,以提高单井产量、增加规模可动用储量和降低储量发现成本为目标,在主干走滑断裂带地质-工程一体化勘探的基础上,继续深化形成“五个一体化”勘探实践(图4),为高质量建设“深地工程”提供坚实保障。

2.1 研究-部署一体化明确分类部署层次

针对顺北低序级走滑断裂带发育机理不清的难题。首先,通过区域多期应力和构造之间的解析,认为顺北地区位于塔里木盆地腹部,处于卡塔克隆起和沙雅隆起的鞍部,受控于盆缘多期挤压作用,在刚性块体内部形成多序级走滑调节断层,主干断裂带间具备发

育低序级断裂的条件;其次,通过野外露头观测,顺北中、东部的走滑断裂离散元和多组系砂箱模拟,明确主干走滑断裂夹持区应力集中,易于形成与主干断裂成因相关、走向相近或小角度相交的低序级断裂,提出派生分支、伴生次级两类发育模式。

针对低序级断裂带有利区带分布的难题。借鉴前期主干断裂带勘探实践经验,张扭应力区以洞穴类储层为主,压扭应力区以裂缝型储层为主。开展了有限元数值应力模拟(图5),从图中看出,顺北地区北部处于张扭应力区,易发育洞穴类型储层。同时考虑油、气区经济效益差别大,油区经济效益明显好于气区,而北部为高含凝析油的凝析气藏,向南、向东逐渐过渡为高气/油比凝析气藏和干气藏。因此按照“先大(低序级断裂延伸长度大)后小、先张(张扭应力区)后压、先油(高含凝析油凝析气藏)后气”的部署思路,确定优先评价顺北地区北部的低序级走滑断裂带。

2.2 地质-物探一体化实现精细识别表征

地质上结合野外露头,对比分析主干走滑断裂带与低序级走滑断裂带的几何学和运动学等特征,建立了主干断裂带间低序级断裂带的解释模式,为地震采集和融合处理的针对性方案设计提供地质依据,在物探采集与处理上,通过模型正演和现场试验相结合的方式,利用小面元、宽方位技术提升小断裂绕射波采样的完整性,采用高覆盖技术提高沙漠区的超深层信号的能量与信噪比,实现低序级断裂带地震识别从“看不见”到“看得清”的突破。物探解释上,结合人工断裂解释约束,应用机器学习智能断裂检测新技术,并创新加入专家指导解析标签模型,新落实北东向低序级断裂17条,累计长度154 km,支撑中部低序级断裂带的勘探评价与井位部署,同时,融合利用五维角道集等叠后、叠前多套数据体,准确辨别断裂和缝洞的波场特征,开展低级序断裂带空间结构精细解释,实钻吻合率

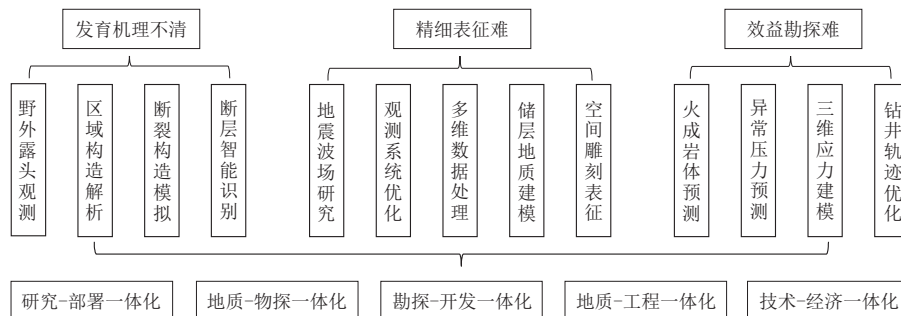


图4 塔里木盆地顺北地区全方位一体化勘探流程图

Fig. 4 Flow chart showing the fully integrated exploration practices implemented in the Shunbei area, Tarim Basin

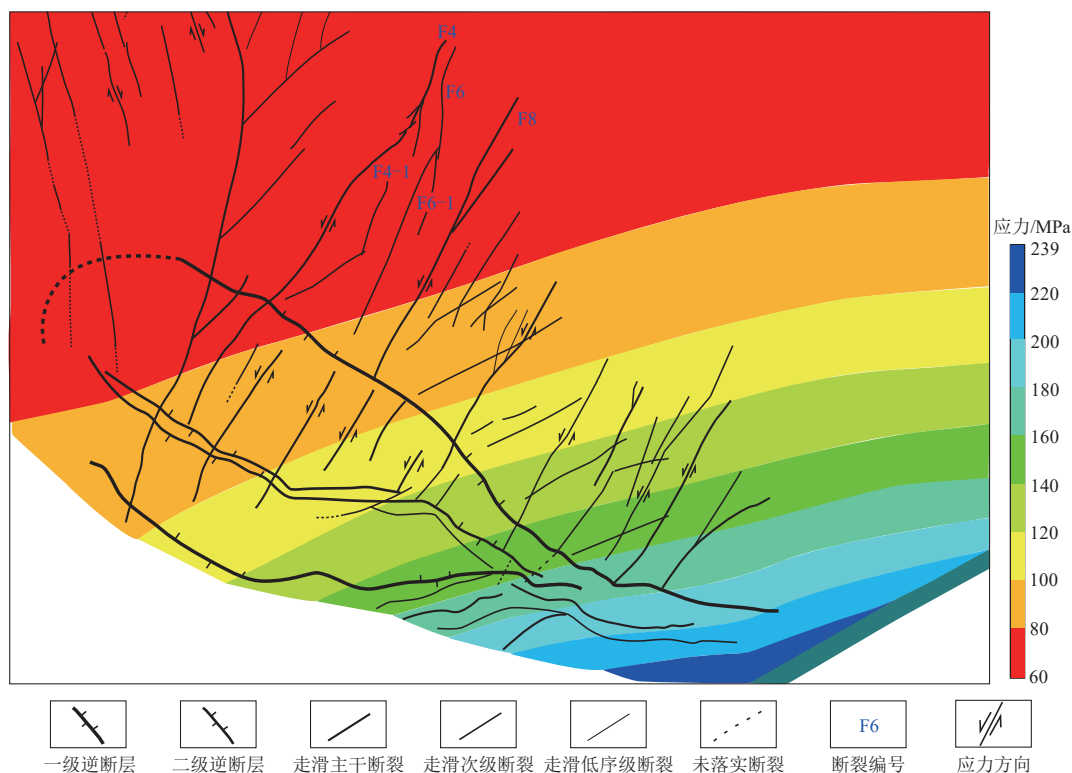


图5 塔里木盆地顺北地区有限元数值模拟应力分布

Fig. 5 Stress distribution map of the Shunbei area, Tarim Basin, derived from finite element numerical simulation

94 %,实现”定性描述“到“定量刻画”的转变。

2.3 勘探-开发一体化支撑少井高产转采

在勘探方面,通过开展走滑断裂演化模拟的砂箱实验,并结合实钻井的立体解剖分析,迭代优化低序级断裂带地质模型,证实低序级断裂带处于幼年-青年期,平面上呈雁列状展布,由若干断片侧向拼接形成,断片间连通性弱,实钻动态验证断片间钻井均不连通(如图6,顺北6号、4-1号和6-1号低序级断裂带完钻的20口井中,高产井达19口,目前尚未发现连通井组),同时根据钻井、测井和录井资料的进一步分析,深化了走滑断裂带“一体多栅”储层结构模型,揭示了低序级断裂带单断片“中部对称、两端不对称”的栅状差异特征,明确了低序级断裂带中部的储层有效性好,指导井位部署与设计思路。在开发方面,建立了低序级断裂带“结构梯度张量”与“单道相似性”空间结构精细雕刻技术,形成了“单井控断、平面居中、纵向最优、多揭断栅”的井轨迹设计理念。应用该理念后,顺北6号低序级断裂带的钻井放空率达到75.0 % (4号带36.4 %),酸压率下降到36 % (4号带93 %)。在勘探-开发整体统筹中,围绕“滚动评价、井网构建,探明-动用-转采一体化”等核心目标,实现探井井均探明千米、井均可采等指标相比8号带分别提

高2.6 km和 19.8×10^4 t油当量,支撑低序级断裂带少井高产。

2.4 地质-工程一体化推进安全优快中靶

针对低序级断裂带弱变形特征及高压盐水层、复杂压力系统等工程风险,地质层面通过火成岩体识别、志留系盐水层预测和异常压力分析等技术迭代优化,将综合预测准确率提升至89 %,支撑井口安全位置优化;工程层面基于地质预测结果将四开井身结构调整为三开方案,并配套高效钻井工艺,使平均建井周期从118天缩短至99天。同步开展三维地应力场建模技术攻关,基于保幅去噪叠前地震数据实施弹性参数反演,实现井周地应力方向预测误差控制在 15° 以内,有效提升了井壁稳定性的控制精度,降低了井筒复杂时效。

针对顺北超深断控缝洞型油气藏的地表沙漠覆盖、目的层埋深大、储层非均质性强等技术难题^[39-44],建立了“前后方联动-多专业融合”的协同机制,地球物理环节通过采集质控标准化,将采集周期由72 d压缩至29 d;处理环节采用多域并行处理技术配合四重质控,将处理周期由315 d降至243 d;解释环节应用机器学习与多属性融合技术,将解释周期由100 d缩短至72 d;井位部署实施前置运行管理,将钻前准备

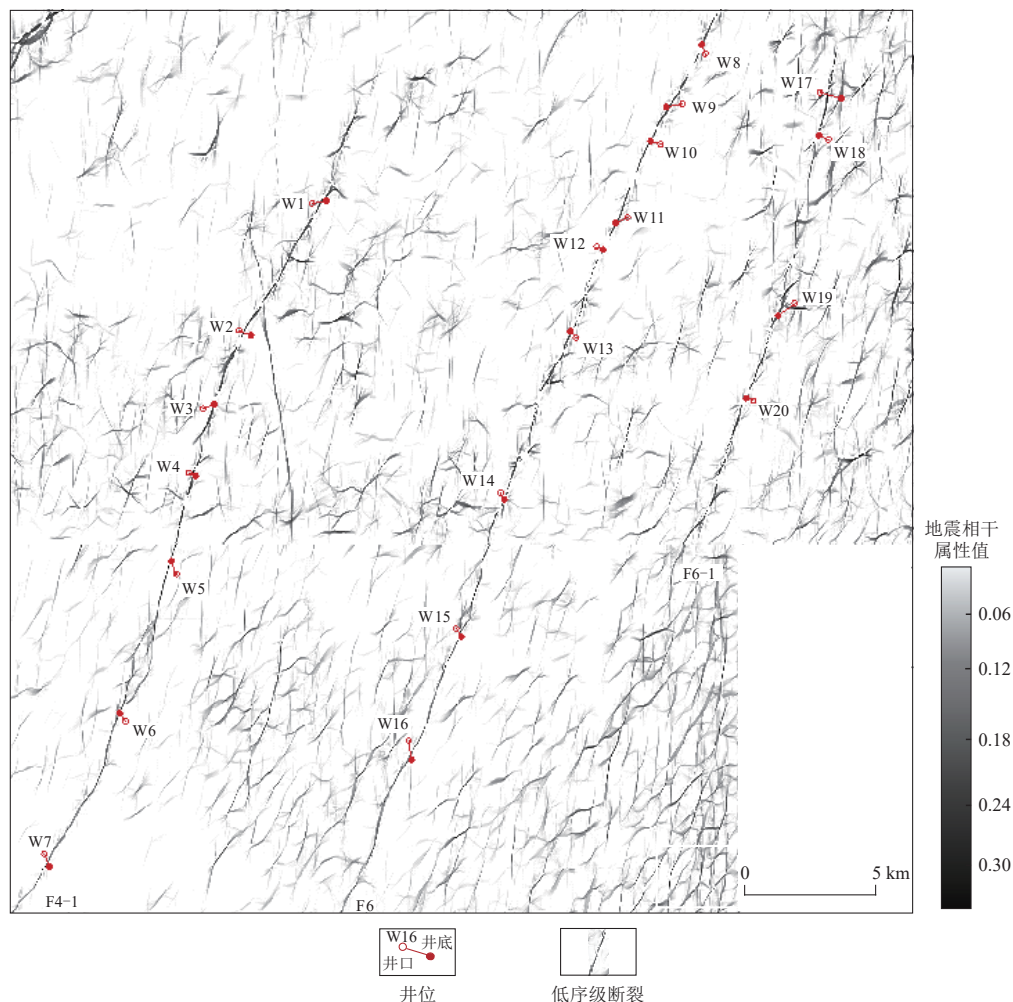


图6 塔里木盆地顺北地区中部低序级走滑断裂带井位分布

Fig. 6 Well location map of the low-order strike-slip fault zones in the central Shunbei area, Tarim Basin

周期从145 d优化至97 d;钻井工程通过三维地应力建模与井身结构优化,将钻完井周期由184 d降至120 d。全流程一体化实施使物探工程周期缩减5个月,钻井工程周期缩短112 d,实现了勘探开发效率系统性提升。

2.5 技术-经济一体化提升勘探质量效益

基于技术-经济一体化理念,系统构建了覆盖地震采集、钻井工程、资料录取及完井改造的全流程优化体系。地震采集阶段优化三维观测系统设计,在保证数据和质量的前提下减少820.9 km²施工面积,采集、处理和解释分别提速61%,25%和50%,支撑井位部署效率提升;钻井阶段应用地质-工程一体化方法优化井轨迹和钻具组合,规避易漏失、易垮塌等高风险地层,钻井成本降低29%;资料录取阶段针对低序级断裂带优化VSP部署原则,单井节约成本160万元;完井改造阶段通过裂缝模拟与多向喷射酸压工艺提高缝洞

体沟通率,单井改造成本降低300万元。

建立“项目长-震长-井长-储长”四长联动机制,明确分工与协同责任。项目长统筹技术组织与问题协调,震长保障地震资料质量与井位部署,井长负责全周期井位优化与资料统筹,储长主导储量研究与储产协同。该机制通过跨专业协作,实现整体运行效率提升45%,钻井复杂时间减少16%。

在全程管控和决策方面,以“基础研究精细化、方案设计再优化、实施风险最小化”为原则,在方案设计中强化专家作用,通过迭代学习形成标准化模板。地质与工程深度协同,地质提供复杂地层风险预测,工程配套工艺技术,协同解决现场难题。实践表明,技术-经济一体化策略显著提升了勘探开发效益,顺北中部6号断裂带较邻区顺北8号断裂带探井均探明储量增加37%,单井贡献储量提升12%,井均可采油气量增长180%,综合成本下降27%。该成果验证了全流程优化在复杂油气藏开发中的有效性。

3 全方位勘探一体化关键技术

3.1 低序级断裂带精细识别表征技术

3.1.1 构造与断裂发育模式

通过对比野外不同级别断裂露头,探究了主干断裂带与低序级断裂带在几何学和运动学特征方面的差异与联系,构建了发育于主干断裂带间的低序级断裂带的解释模式,为地震资料采集与处理环节提供了精准的地质依据,进而设计出更具针对性的方案,提高地震资料对复杂断裂系统的识别与表征能力。

前人研究表明,塔里木盆地北部走滑断裂体系是盆内逆冲断裂向北推挤时形成的伴生调节构造。中奥陶世末期,塔里木盆地腹部受到与西昆仑造山相关的NE向挤压作用,形成了NW向吐木休克断裂、塔中I号断裂和塔中南缘断裂;晚奥陶世末期,受塔里木盆地东、南缘阿尔金造山和南侧昆仑洋的俯冲NW向挤压作用,形成向北、西方向突出的弧形逆冲断裂系统^[11]。吐木休克断裂带、塔中南缘断裂带和弧形逆冲断裂带等共同控制了板内走滑断裂系统的发育。顺北地区的低序级断裂带表现出明显的分区性、雁列性和共轭性特征。以顺北5号断裂带为界,东部区域以东北向(NE向)低序级断裂带为主,走向大致为NE30°左右,断裂带多与主干断裂(如顺北4号和顺北8号断裂)平行或近平行发育,呈雁列状排列,其分区性反映了区域构造应力场的NE向挤压作用,导致了NE向断裂的发育。西部区域以北西向(NW向)低序级断裂带为主,走向大致为NW20°左右,断裂带同样呈雁列状排列,与主干断裂(如顺北7号和顺北11号断裂)平行或近平行发育,其分区性反映了区域构造应力场的NW向挤压作用。

低序级断裂带在平面上多呈雁列状展布,是走滑断裂体系的典型表现。雁列状断裂带的形成与走滑断裂的运动学特征密切相关,反映了断裂带在滑动过程中产生的剪切变形。雁列状断裂带的间距一般在几百米到数千米之间,反映了区域构造应力场的不均匀性。在某些区域,低序级断裂带可能呈帚状展布,即从主干断裂带向外逐渐分叉,形成多条次级断裂。帚状展布反映了断裂带在传播过程中的分异特征,同时也表明了区域构造应力场的复杂性。在某些区域,低序级断裂带可能表现出共轭性特征,即发育两组走向相反的断裂带,共轭性特征反映了区域构造应力场的多向性

以及构造变形的复杂性。共轭断裂带的交汇点形成的构造节点是构造变形最为集中的区域,也是油气成藏的有利部位。在构造节点附近,断裂带的破碎带和裂缝网络最为发育,为油气的储存和运移提供了有利条件。

在纵向上,低序级断裂带的发育模式和特征表现出明显的分层性,与地层的力学性质和构造演化阶段密切相关。顺北地区的低序级断裂带出现在寒武系—中奥陶统,低序级断裂带主要表现为压扭性走滑断裂,倾角较陡,通常接近90°,多发育在碳酸盐岩地层中,对厚层碳酸盐岩进行了构造破碎改造,形成了大量的裂缝带和角砾岩带。压扭性断裂带的发育与区域构造应力场的挤压作用密切相关,反映了加里东中期构造运动的影响。

3.1.2 地震采集处理清晰成像

通过模型正演和现场试验(图7a,b),基于Nyquist空间采样定理,利用小面元($\leq 12.5\text{ m} \times 25.0\text{ m}$)提升小断裂采样密度;基于地震波场统计叠加理论,高覆盖大于396次(图7c)压制噪声提升深层信噪比;基于地震波各向异性传播理论,宽方位,横/纵比大于0.6(图7c)突出高陡断裂各向异性特征,建立了技术经济的小面元、高覆盖、宽方位地震采集观测系统^[45],提升了小断裂绕射波采样的完整性,通过对比过W62井不同观测系统采集、相同成像方法的地震剖面(图3c,图7e),发现新采集资料剖面信息更丰富、成像更清晰,目的层主频从18 Hz提升到20 Hz、有效频宽从6~43 Hz拓宽到3~39 Hz、倍频程由2.8个提高到3.7个、信噪比由6提升至8,实现了低序级断裂带地震识别从“看不见”到“看得清”的突破。

3.1.3 机器学习智能检测断裂

人工智能断裂检测技术,是近年来断裂检测方法发展的热门领域。主要是通过神经网络模型对原始样本标签开展训练学习,得到断裂检测识别模型。目前主流的模型样本库多是基于三维点扩散函数生成的合成地震数据或其衍生数据,会导致在实际应用过程中输入地震数据与模型不匹配。顺北低序级走滑断裂带垂向断距小,检测结果存在不同程度的欠拟合与过拟合,难以控制断裂识别结果的可靠性。针对低序级断裂带识别的难题,根据断裂形成机制和构造演化的地质认识、实际地震数据特征(垂向断距、波形变化)以及断裂体系划分经验,融合钻井放空漏失数据(漏失量、放空宽度)与测井解释断裂参数(裂缝密度、

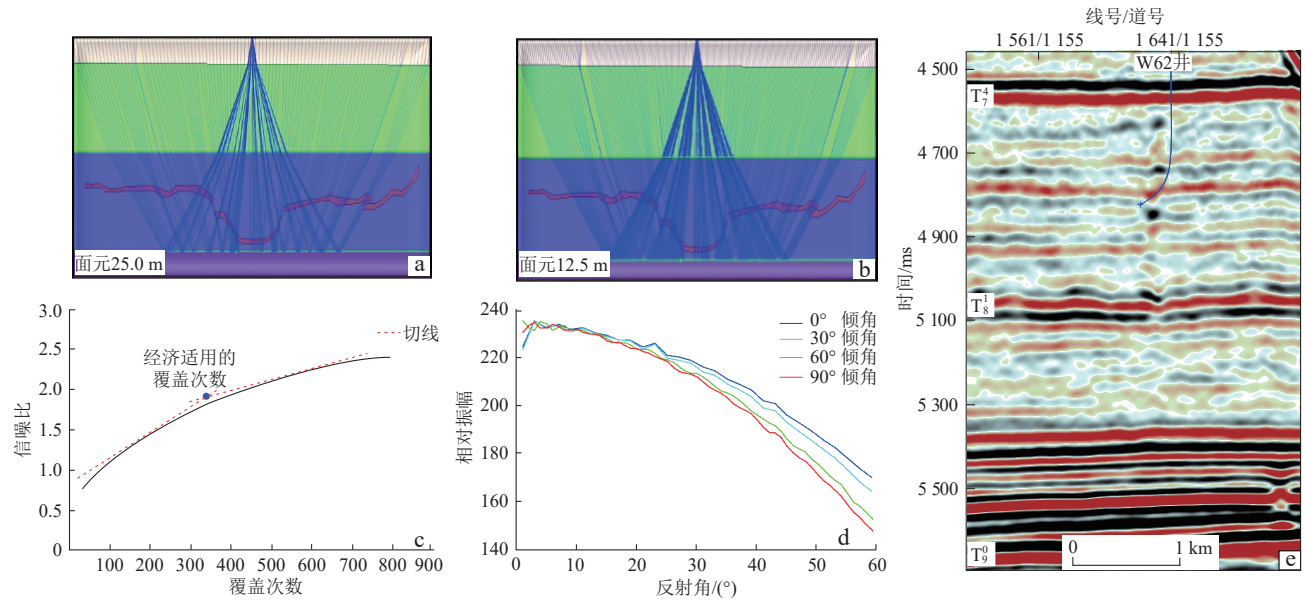


图7 地震采集模型正演、现场试验参数优选以及处理和成像效果

Fig. 7 Optimal parameter selection based on forward modeling using a seismic acquisition model and field experiments and a resulting seismic profile

a. 25.0 m采集面元的射线追踪模拟;b. 12.5 m采集面元的射线追踪模拟;c. 现场试验奥陶系信噪比与覆盖次数关系;d. 不同倾角振幅各向异性特征;e. 过W62井叠前时间偏移成像地震剖面(396次覆盖,12.5 m×25.0 m面元,横/纵比0.816)

方位角、破碎带判别指标),确保标签既符合理论模型又能反映实际资料中的细微异常,在此基础上构建物理约束明确的训练标签,采用迭代式训练机制,动态优化地震属性与地质参数的映射关系,抑制模型偏差,新模型与实际地震资料特征更加契合。精细解释断裂标签的加入,不仅提高了模型的适用性,同时将地质认识、解释经验和断裂体系划分等系统思想也纳入模型,从而在模型检测断裂时对检测结果起到了控制作用。相关技术应用在顺北43井东三维工区,从前期蓬莱坝组-鹰山组相干属性断裂检测结果(图8a)看出低序级断裂带未能得到明显识别,而机器学习相干属性断裂带检测结果(图8b)成功识别出17条北东向低序级断裂带,总长154 km,支撑中部低序级断裂带的勘探评价与30口勘探开发井位部署。

3.1.4 地震道集空间结构精细解释

在优化采集的基础上,通过融合角度域偏移成像、五维角道集等叠后和叠前多套数据体,利用断裂带棱柱体与缝洞散射波场的方向性差异,准确辨别断裂和缝洞波场特征,开展低级序断裂带空间结构精细解释。在叠后偏移成像剖面上,断裂带和缝洞体均表现为“串珠”异常响应特征,但是在角道集上,断裂表现为“离散的点”、缝洞体表现为“连续的线”这种地震特征,因此可以利用角道集对断裂和缝洞体进行识别。该技术在

低序级断裂带上的W61井进行了应用(图9a),利用角道集识别轨迹钻遇的第一个“串珠”特征为断裂(图9b),井底的“串珠”特征为缝洞体(图9c),与该井压裂电磁监测结果可以相互验证。压裂电磁监测结果显示(图9d):压裂液在第一个“串珠”A点处表现为对称齿状、压降明显、停泵压力低,垂直井轨迹的压裂距离分别为73 m和63 m,认为储层呈“栅状”储集结构,是断裂与缝洞的表现特征;压裂液在第二个“串珠”B点处表现为非对称齿状、无明显压降、停泵压力较高,垂直井轨迹的压裂距离分别为63 m和48 m,储层呈“网状”储集结构,是缝洞的表现特征。叠后和叠前地震多套数据的联合应用提升了低级序断裂空间结构的精细解释精度,实钻吻合率达94%,实现了低级序断裂带从“定性描述”到“定量刻画”的转变。

3.2 低序级断裂带勘探-开发一体化“少井高产”井轨迹设计技术

3.2.1 储层结构模型解析

低序级断裂带处于断裂演化的幼年—青年期,平面上呈雁列状展布,由若干断片侧向拼接形成(图10a),断片间连通性弱,在纵向上和横向上表现出显著的非均质性,实钻动态验证断片间的钻井均不连通。

前期开展的相干检测断裂(图10b),未明显识别

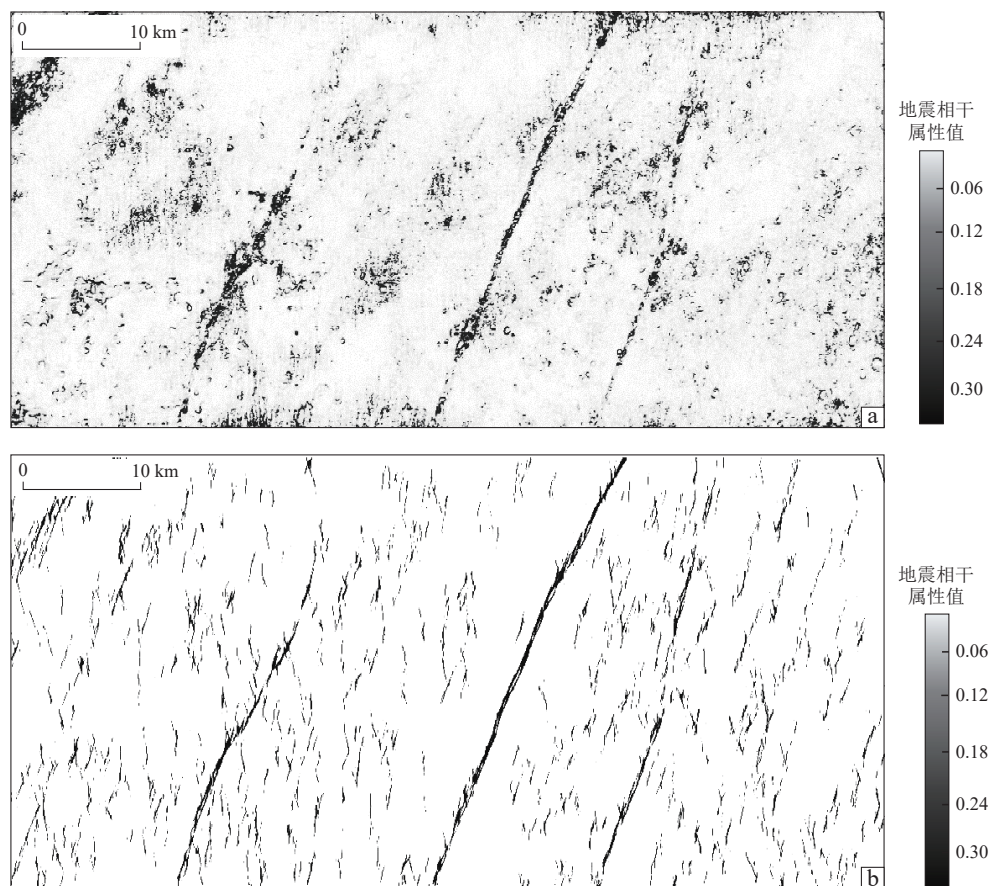


图8 塔里木盆地顺北地区顺北43井东蓬莱坝组-鹰山组三维相干属性断裂检测图(a)及机器学习相干属性断裂检测图(b)

Fig. 8 Detection results of faults in the Penglaiba-Yingshan formations in well Shunbei 43 within the eastern 3D seismic acreage of Shunbei area, Tarim Basin: (a) based on coherence attributes; (b) based on coherence attributes and machine learning

出低序级断裂带在平面上的雁列展布特征。后期通过钻井和五维角道集等资料准确识别断裂后,加入了人工解释的断裂标签,多次迭代优化机器学习低序级断裂带解释模型,获得了较清晰的低序级断裂带平面检测结果(图10c),从图中可以看出,低序级走滑断裂带呈雁列分布特征,各断面之间叠置排列,但是互不沟通,导致连通性较差。根据三维地震资料精细解释得到的断裂特征进一步明确了主干走滑断裂带和低序级断裂带之间的差异,指导了井位部署的原则,为实现少井高产提供了理论依据。

纵向上,通过分析断裂不同位置钻井的储层结构差异,深化了“一体多栅”储层结构模型。W10井钻遇的是断面1的中间部位,W11井钻遇的是断面1的南端和断面2的北端(图11a),从测井解释结果看(图11b, c),断裂中部储层规模较大,且储层在断面两边呈对称分布,而在断裂的端部,储层规模不如中部大,且储层呈不对称分布。揭示了低序级断裂带单断片储层“中部对称、两端不对称”的栅状差异,明确了低序级断裂带中部储层有效性更好,指导井位部署与设计

(图11d),实现多层动用和高效开发。

3.2.2 井轨迹设计

在低序级断裂带储层结构模型解析的基础上,形成了“单井控断、平面居中、纵向最优、多揭断栅”井轨迹设计理念,针对单断面,在平面上优选断面中部的异常目标,在纵向上通过“结构梯度张量”与“单道相似性”雕刻技术,优选最优的洞穴型储层为靶点。图12为一口钻井的井轨迹优化设计过程(图12a),该井钻遇“串珠”边的断面时发生失返漏失(图12b),在“串珠”中部发生放空(图12c),空间雕刻图显示钻遇了优质储层(图12d)。通过低序级断裂带井轨迹技术的应用,顺北6号断裂带钻井放空率达到75.0%(顺北4号断裂带钻井放空率36.4%),酸压率从顺北4号断裂带的93%下降到36%。

3.3 低序级断裂带地质-工程一体化技术

与顺北4号和8号主干断裂带相比,顺北6号低序级断裂带的变形较弱,主要表现为两方面:①上覆地

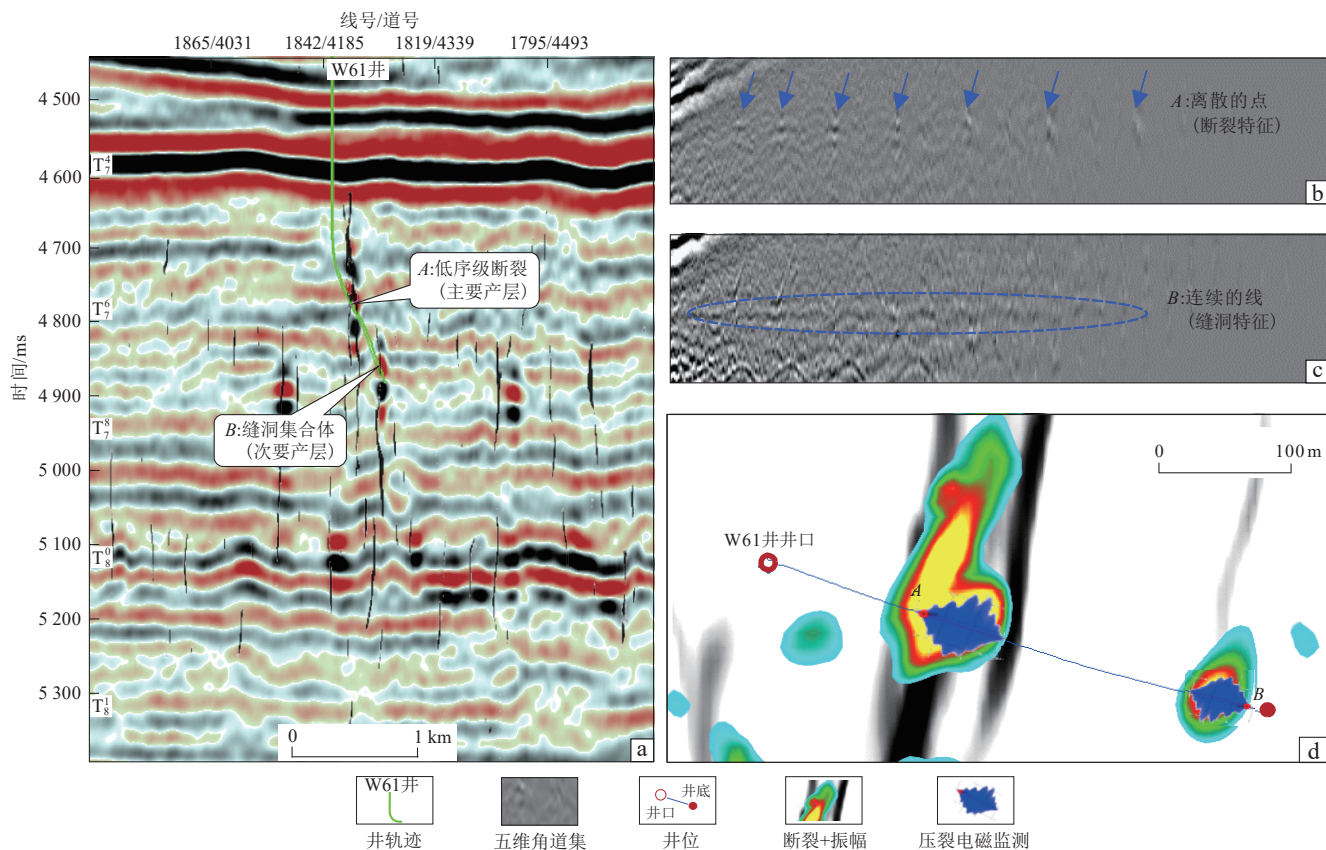


图9 塔里木盆地顺北地区过 W61 井地震和机器学习断裂叠加剖面(a)、A 点低序级断裂五维角道集特征(b)、B 点缝洞集合体五维角道集特征(c)及 W61 井断裂、地震异常和压裂电磁监测叠加图(d)

Fig. 9 Superimposed profile crossing well W61 showing seismic interpretation and machine learning-based fault detection results (a), five-dimensional interpretation of angle gather characteristics of low-order faults at points A (b) and B (c), and a superimposed diagram showing faults, seismic anomalies, and fracturing electromagnetic monitoring results for the well (d) in the Shunbei area, Tarim Basin

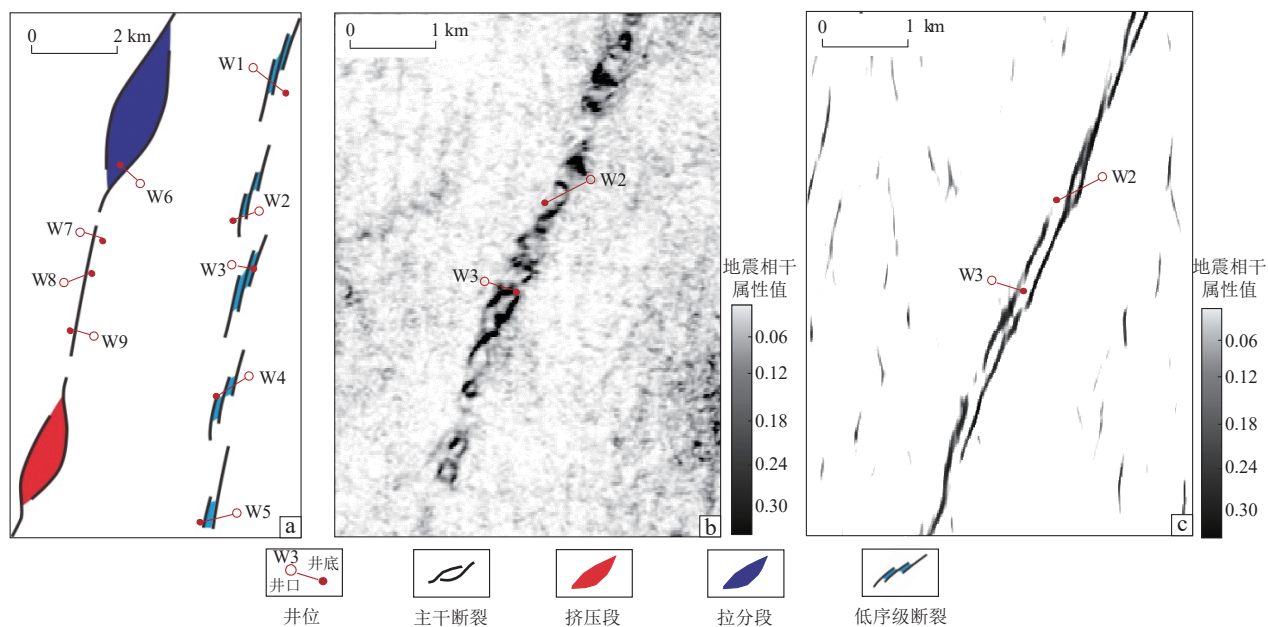


图10 塔里木盆地顺北地区主干断裂与低序级断裂平面结构示意图(a)、低序级断裂相干属性检测图(b)及机器学习低序级断裂相干属性检测图(c)

Fig. 10 Diagrams showing planar structures of major and low-order faults (a) and coherence attribute-based (b) and coherence attribute- and machine learning-based detection results of low-order faults (c) in the Shunbei area, Tarim Basin

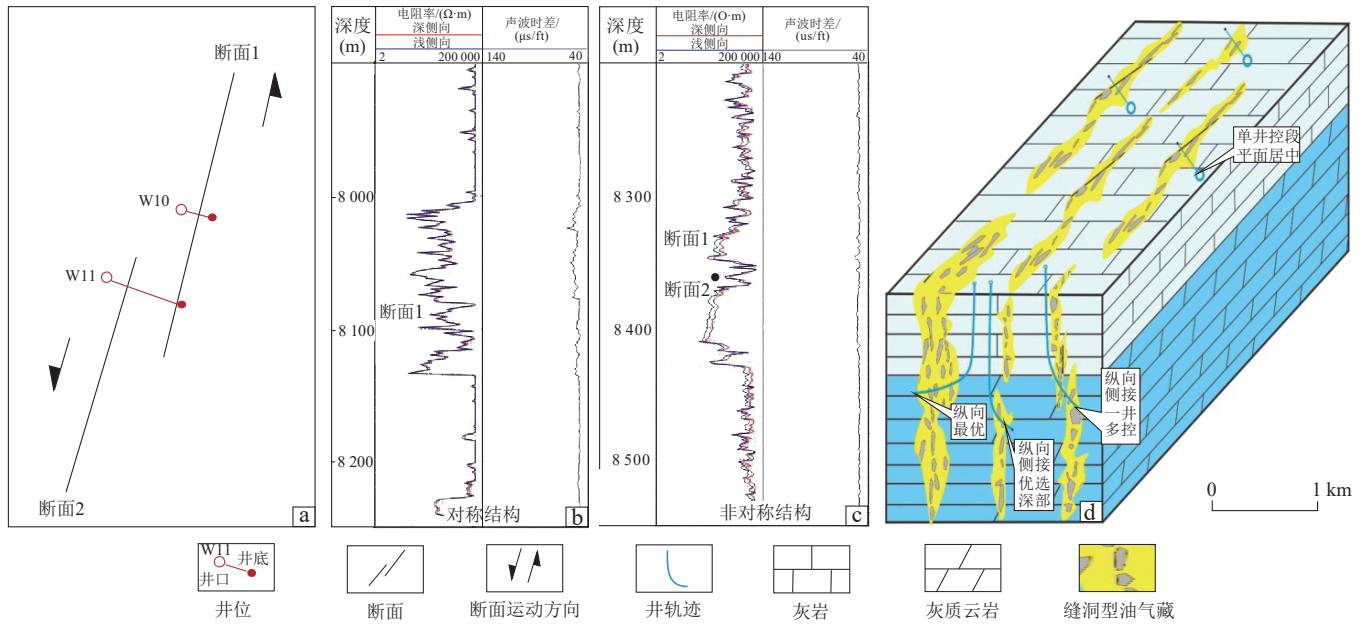


图11 塔里木盆地顺北地区低序级断裂断面平面结构示意图(a)、断面中部W10井测井曲线(b)、断面末端W11井测井曲线(c)及低序级断裂钻井井轨迹设计示意图(d)

Fig. 11 Diagrams showing the planar structure of two low-order fault sections (a), well logs from well W10 in the middle of section No. 1 (b), well logs from well W11 at the end of section No. 2 (c), and well trajectory design targeting low-order faults (d) in the Shunbei area, Tarim Basin

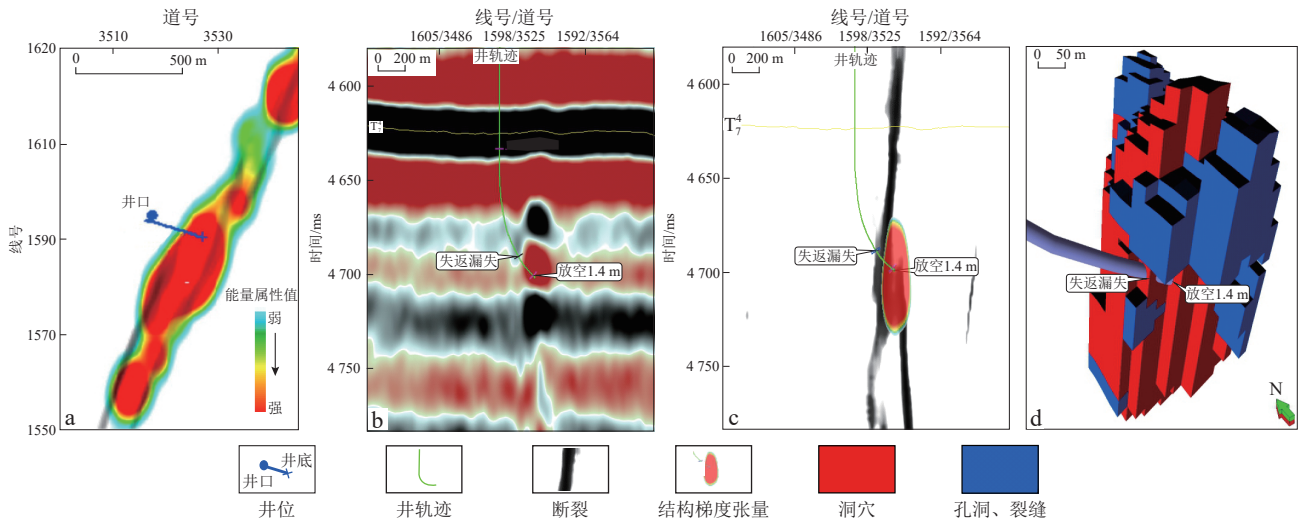


图12 塔里木盆地顺北地区钻井机器学习断裂与地震异常叠合图(a)、过井地震剖面(b)、过井断裂和地震异常叠加剖面(c)及钻井储集体空间雕刻图(d)

Fig. 12 Superimposed diagram showing machine learning-based fault detection results and seismic anomalies of a well (a), seismic profile crossing the well (b), superimposed profile crossing the well showing faults and seismic anomalies (c), and spatial carving diagram of reservoirs encountered in the well (d) in the Shunbei area, Tarim Basin

层不发育雁列断裂;②目的层断裂断距小、断裂样式主要为平移断层。在不同的地质背景条件下,与主干断裂带相比较,顺北中部低序级断裂带钻井过程中面临的主要风险也不同,低序级断裂带的志留系地层中,钻遇盐水层时常常发生溢流,目的层异常高压发育,复杂的压力及应力系统导致工程风险高、钻井周期长、成本

控制难度大。通过加强风险预警优化井身结构、地应力建模优化轨迹及前后联动缩减周期这3项举措,降低了钻井风险、减少了钻井运行周期、提高了勘探效率。

3.3.1 地质风险地震预警优化井身结构

顺北地区上覆地层和奥陶系目的层地质条件复

杂,二叠系火成岩、侵入岩、志留系盐水层以及目的层异常高压导致钻井面临漏失、溢流和掉块等风险,井身结构设计难度大。结合地质成因分析,在地震资料精细标定的基础上,利用地震属性预测和反演技术,分别建立了基于地震相反演的二叠系火成岩预测技术、基于地震甜点属性的侵入岩预测技术、基于内幕层位精细追踪的盐水层预测技术以及基于断裂连通性判别的目的层异常高压预测技术^[7]。基于风险预警结果,通过避开二叠系漏失风险高、志留系溢流风险高和侵入岩掉块风险大的区域优选井口位置^[46]。钻井工程方面,构建了井筒强化技术体系,通过二叠系—上奥陶统桑塔木组长裸眼合揭,实现井身结构由前期四级结构优化为目前的三级结构,平均钻井周期由118 d缩短到99 d。

3.3.2 高精度三维地应力建模优化轨迹

低序级走滑断裂带缝洞储集体的地应力非均质性

强,且地应力方向的空间分布复杂,这导致钻井过程中常发生卡钻现象,给钻井轨迹设计和运行带来一系列挑战。因此,开展了低序级断裂带三维地应力预测。高精度的弹性参数预测是地应力预测精度的关键,前期的弹性参数预测主要基于叠后资料包含的运动学信息,通过反演获取纵波阻抗信息,再利用岩石物理模型求取弹性参数。本文利用叠前地震资料的振幅和相位等动力学信息,通过反演求取岩石密度、纵-横波速度和泊松比等岩石物理参数,弥补了叠后资料的不足。建立了基于叠前反演的三维地应力预测流程,在全方位道集保幅去噪的基础上,采用三项式AVO反演方法,基于5~6个不同的Zoeppritz线性方程,使用抗噪的全道集二次拟合直接求解技术,得到10个不同的弹性地震参数(弹性参数反射率)。通过单井确定性反演,获取密度、纵-横波速度、杨氏模量和泊松比等岩石物理参数,从而获得高精度的弹性参数数据。在此基础上,通过井数据和实验数据分析校正,开展岩石物

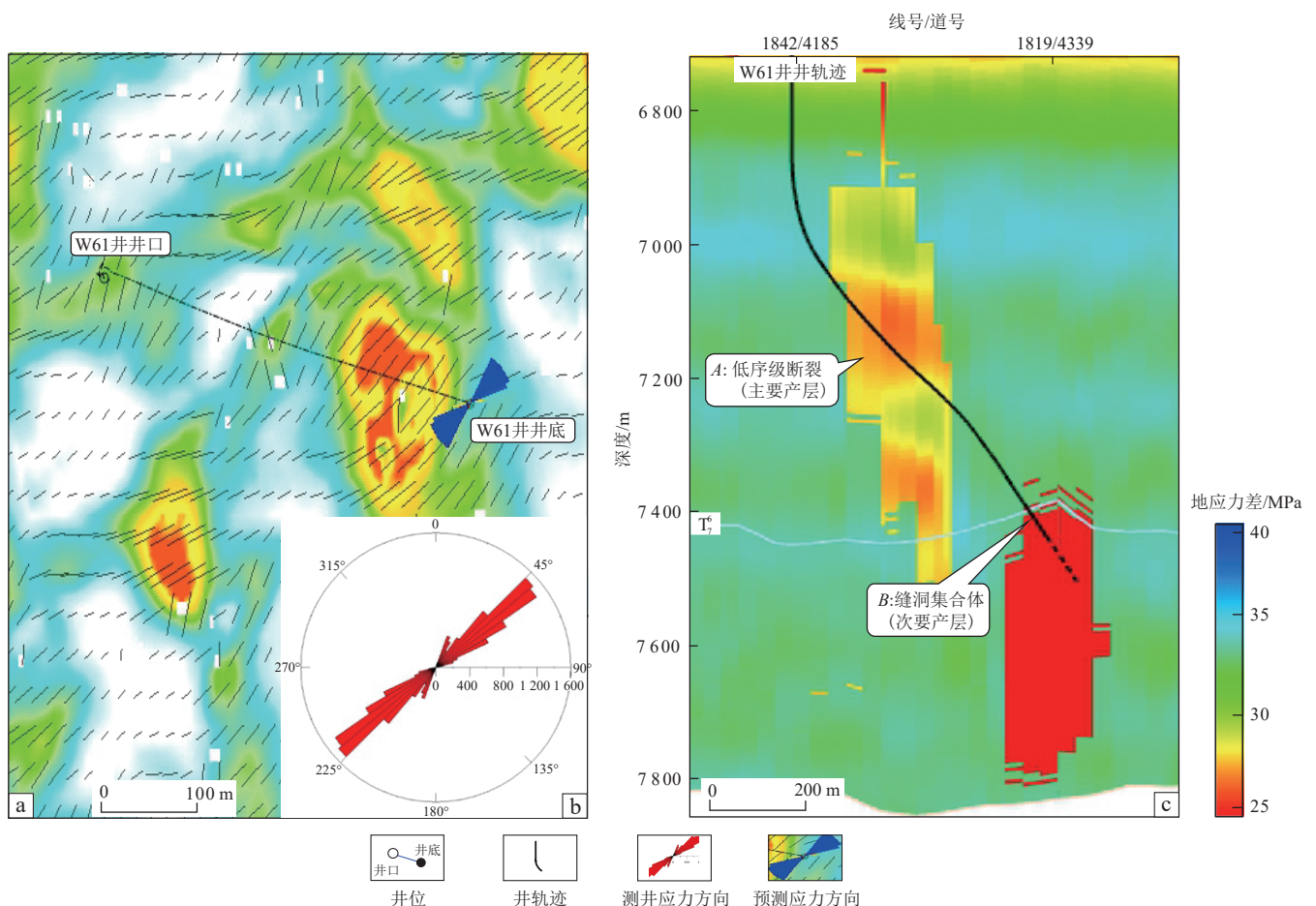


图13 塔里木盆地顺北地区W61井区最大水平主应力方向预测平面图(a)、测井解释最大水平主应力方向玫瑰花图(b)及过W61井地应力差剖面(c)

Fig. 13 Diagrams showing the predicted (a) and log-derived (b) directions of maximum horizontal principal stress in well block W61 and profile crossing this well showing in situ stress differences (c) in the Shunbei area, Tarim Basin

理建模和地应力建模,求取地应力预测模型,并在弹性数据的基础上计算三维地应力。通过对比分析,三维地应力预测与单井实测数据的吻合率达到85%,井周地应力方向预测误差小于15°。

通过钻井井壁稳定性分析,认为井轨迹与最大水平主应力夹角越大,井壁稳定性越好,同时钻遇的有效裂缝越多。在靶点处,应力差相对较低,这有利于后期的酸压改造,从而为井轨迹设计和降低井筒复杂时效提供了有力支撑。图13a为W61井钻前地应力方向预测图,图中线条的方向代表预测的地应力方向,线条长短代表预测地应力的相对大小(颜色亦代表大小,白色代表地应力相对较小、红色代表地应力相对较大),预测的最大水平主应力方向为NE50°~70°,考虑到井壁稳定性,设计井轨迹与最大水平主应力方向近似垂直,实钻后测井解释最大水平主应力方向49°(图13b),实钻过程中井壁未发生垮塌。图13c为地应力差剖面图,图中冷色调代表地应力差大、暖色调代表地应力差小。根据地应力差剖面可以看出,低序级断裂带和缝洞发育的A点和缝洞发育的B点的地应力差均为低值,表明储层较为发育,与实钻过程中出现的放空漏失现象和生产情况相匹配。

4 结论

本文通过对塔里木盆地顺北中部低序级走滑断裂带的全方位一体化勘探实践,深入探讨了低序级断裂带在超深层油气藏勘探中的重要性及其检测技术的应用前景,为未来超深层油气资源的高效开发提供了理论依据和技术支持。研究中明确了低序级断裂带的发育机理,精确识别了有利区带的分布,克服了地震上常规观测系统采集与成像方法识别难度大的问题,提升了精细表征能力,优化了工程上的钻完井周期和成本,降低了效益勘探的不确定性。

1) 低序级断裂带是超深层油气勘探的重要领域。尽管低序级走滑断裂带的活动强度相对较弱,但其密集发育的裂缝网络可以导致储集层的大规模破碎,对油气的储存和运移具有重要影响。通过全方位一体化勘探实践,实现了主干断裂带之外新的油气突破,开拓了新的勘探领域。

2) 全方位一体化勘探实践有效提升了低序级断裂带的勘探效率和效益。通过研究-部署一体化、地质-物探一体化、勘探-开发一体化、地质-工程一体化和技术-经济一体化等多方面的实践,明确了低序级断裂带的发育机理和有利区带分布,实现了从“看不

见”到“看得清”的地震识别突破,优化了井轨迹设计,降低了钻井风险和成本,提高了单井产量和储量发现效率。

3) 技术-经济一体化显著降低了勘探成本,提高了勘探质量效益。通过技术创新和全业务链源头优化降本,地震采集、钻井、资料录取和酸压改造等环节的成本均得到有效控制,支撑了低序级断裂带的效益勘探。同时,建立的“项目长、震长、井长、储长”四长联动运行机制,保障了全方位一体化运行的长效机制,大幅提升了运行效率和勘探质量。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油性[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊1): 1-8.
JIA Chengzao, WEI Guoqi. Structural characteristics and hydrocarbon potential in Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(S1): 1-8.
- [2] 贾承造. 塔里木盆地构造特征与油气聚集规律[J]. 新疆石油地质, 1999, 20(3): 177-183.
JIA Chengzao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177-183.
- [3] 云露,曹自成. 塔里木盆地顺南地区奥陶系油气富集与勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 788-797.
YUN Lu, CAO Zicheng. Hydrocarbon enrichment pattern and exploration potential of the Ordovician in Shunnan area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 788-797.
- [4] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3): 38-51.
QI Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 38-51.
- [5] 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(1): 102-111.
QI Lixin. Characteristics and inspiration of ultra-deep fault-karst reservoir in the Shunbei area of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 102-111.
- [6] 漆立新,云露,曹自成,等. 顺北油气田地质储量评估与油气勘探方向[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 127-135.
QI Lixin, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Geological reserves assessment and petroleum exploration targets in Shunbei oil & gas field [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 127-135.
- [7] 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.
- [8] 曹自成, 云露, 漆立新, 等. 塔里木盆地顺北地区顺北84X井超千米含油气重大发现及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 341-356.
- CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, et al. A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1,000-meter thick in Well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 341-356.
- [9] 邓尚, 邱华标, 刘大卫, 等. 克拉通内走滑断裂成因与控藏机制研究进展——以塔里木盆地北部为例[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1211-1225.
- DENG Shang, QIU Huabiao, LIU Dawei, et al. Advances in research on the genetic mechanisms of intracratonic strike-slip fault system and their control on hydrocarbon accumulation: A case study of the northern Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1211-1225.
- [10] 张红波, 周雨双, 沙旭光, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂隆起段发育特征与演化机制[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 321-334.
- ZHANG Hongbo, ZHOU Yushuang, SHA Xuguang, et al. Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No. 5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 321-334.
- [11] 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 Shang, LIU Yuqing, LIU Jun, 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.
- [12] 马永生, 何治亮, 赵培荣, 等. 深层—超深层碳酸盐岩储层形成机理新进展[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- MA Yongsheng, HE Zhiliang, ZHAO Peirong, et al. A new progress in formation mechanism of deep and ultra-deep carbonate reservoir [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(12): 1415-1425.
- [13] 云露, 邓尚. 塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J]. *石油学报*, 2022, 43(6): 770-787.
- YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike-slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: A case study of Shunbei oil and gas field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(6): 770-787.
- [14] 刘建章, 蔡忠贤, 滕长宇, 等. 塔里木盆地顺北地区克拉通内走滑断裂带中—下奥陶统储集体方解石脉形成及其与油气充注耦合关系[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 125-137.
- LIU Jianzhang, CAI Zhongxian, TENG Changyu, et al. Coupling relationship between formation of calcite veins and hydrocarbon charging in Middle-Lower Ordovician reservoirs in strike-slip fault zones within craton in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 125-137.
- [15] 李慧莉, 高键, 曹自成, 等. 塔里木盆地顺托果勒低隆起走滑断裂带流体时空分布及油气成藏意义[J]. *地学前缘*, 2023, 30(6): 316-328.
- LI Huili, GAO Jian, CAO Zicheng, et al. Spatial-temporal distribution of fluid activities and its significance for hydrocarbon accumulation in the strike-slip fault zones, Shuntuoguole low-uplift, Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 316-328.
- [16] 朱秀香, 曹自成, 隆辉, 等. 塔里木盆地顺北地区走滑断裂带压扭段和张扭段油气成藏实验模拟及成藏特征研究[J]. *地学前缘*, 2023, 30(6): 289-304.
- ZHU Xiuxiang, CAO Zicheng, LONG Hui, et al. Experimental simulation and characteristics of hydrocarbon accumulation in strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 289-304.
- [17] 李映涛, 邓尚, 张继标, 等. 深层致密碳酸盐岩走滑断裂带核带结构与断控储集体簇状发育模式: 以塔里木盆地顺北4号断裂带为例[J]. *地学前缘*, 2023, 30(6): 80-94.
- LI Yingtao, DENG Shang, ZHANG Jibiao, et al. Fault zone architecture of strike-slip faults in deep, tight carbonates and development of reservoir clusters under fault control: A case study in Shunbei, Tarim Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 80-94.
- [18] 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 Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra-deep Ordovician fault-karst reservoirs in Shunbei area [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 136-142.
- [19] 汤良杰. 塔里木盆地构造演化与构造样式[J]. *地球科学*, 1994, 19(6): 742-754.
- TANG Liangjie. Evolution and tectonic patterns of Tarim Basin [J]. *Earth Science*, 1994, 19(6): 742-754.
- [20] 云露. 顺北东部北东向走滑断裂体系控储控藏作用与突破意义[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(3): 41-52.
- YUN Lu. Controlling effect of NE strike-slip fault system on reservoir development and hydrocarbon accumulation in the eastern Shunbei area and its geological significance, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(3): 41-52.
- [21] 吕心瑞, 孙建芳, 李红凯, 等. 塔里木盆地深层碳酸盐岩缝洞型油藏精细地质建模技术[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1195-1210.

- LYU Xinrui, SUN Jianfang, LI Hongkai, et al. Fine geological modelling technology for deep fractured-vuggy carbonate oil reservoirs in the Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1195–1210.
- [22] 乔俊程, 常少英, 曾溅辉, 等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(5): 1226–1246.
- QIAO Juncheng, CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, et al. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(5): 1226–1246.
- [23] 高永进, 尹成明, 刘丽红, 等. 塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组烃源岩特征[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 1064–1078.
- GAO Yongjin, YIN Chengming, LIU Lihong, et al. Characteristics of source rocks in the Cambrian Xiaerbulake Formation in the northwestern Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 1064–1078.
- [24] 高志前, 樊太亮, 李岩, 等. 塔里木盆地寒武-奥陶纪海平面升降变化规律研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2006, 36(4): 549–556.
- GAO Zhiqian, FAN Tailiang, LI Yan, et al. Study on eustatic sea-level change rule in Cambrian-Ordovician in Tarim Basin[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2006, 36(4): 549–556.
- [25] 李政, 徐兴友, 宋来亮, 等. 伊朗卡山区块原油地球化学特征[J]. *石油勘探与开发*, 2005, 32(5): 130–133.
- LI Zheng, XU Xingyou, SONG Lailiang, et al. Oil geochemical characteristics in the Kashan Block, Iran[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(5): 130–133.
- [26] MIAO Miaoqing, SUN Zhichao, XUE Zongan, et al. The Lower Cambrian Xiaerbulake formation in the Tarim Basin as a potential carbonate source rock[J]. *Energy Geoscience*, 2024, 5(2): 100238.
- [27] MACHEL H G. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers[J]. *Hydrogeology Journal*, 1999, 7(1): 94–107.
- [28] ZHAO Yanyan, WEI Wei, SANTOSH M, et al. A review of retrieving pristine rare earth element signatures from carbonates[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2022, 586: 110765.
- [29] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. *Earth-Science Reviews*, 2000, 52(1/3): 1–81.
- [30] 韩俊, 曹自成, 邱华标, 等. 塔中北斜坡奥陶系走滑断裂带与岩溶储集体发育模式[J]. *新疆石油地质*, 2016, 37(2): 145–151.
- HAN Jun, CAO Zicheng, QIU Huabiao, et al. Model for strike-slip fault zones and karst reservoir development of Ordovician in northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2016, 37(2): 145–151.
- [31] 黄诚. 叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(3): 379–389.
- HUANG Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: A case study of Shunbei area, Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2019, 41(3): 379–389.
- [32] 郭宏辉, 冯建伟, 赵力彬. 塔里木盆地博孜一大北地区被动走滑构造特征及其对裂缝发育的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(4): 962–975.
- GUO Honghui, FENG Jianwei, ZHAO Libin. Characteristics of passive strike-slip structure and its control effect on fracture development in Bozi-Dabei area, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(4): 962–975.
- [33] 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 Lu, ZHU Xiuxiang. A new trap type: Fault-controlled fracture-vuggy trap[J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 34–42.
- [34] 林波, 张旭, 况安鹏, 等. 塔里木盆地走滑断裂构造变形特征及油气意义——以顺北地区1号和5号断裂为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(7): 906–923.
- LIN Bo, ZHANG Xu, KUANG Anpeng, et al. Structural deformation characteristics of strike-slip faults in Tarim Basin and its hydrocarbon significance: A case of Shunbei No. 1 fault and No. 5 fault[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(7): 906–923.
- [35] 李海英, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区走滑断裂与断溶体圈闭识别描述技术[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 107–120.
- LI Haiying, LIU Jun, GONG Wei, et al. Identification and characterization of strike-slip faults and traps of fault-karst reservoir in Shunbei area[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 107–120.
- [36] 卜旭强, 王来源, 朱莲花, 等. 塔里木盆地顺北油气田奥陶系断控缝洞型储层特征及成藏模式[J]. *岩性油气藏*, 2023, 35(3): 152–160.
- BU Xuqiang, WANG Laiyuan, ZHU Lianhua, et al. Characteristics and reservoir accumulation model of Ordovician fault-controlled fractured-vuggy reservoirs in Shunbei oil and gas field, Tarim Basin[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2023, 35(3): 152–160.
- [37] 曹自成, 路清华, 顾忆, 等. 塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(5): 975–984.
- CAO Zicheng, LU Qinghua, GU Yi, et al. Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(5): 975–984.
- [38] 王斌, 赵永强, 何生, 等. 塔里木盆地顺北5号断裂带北段奥

- 陶系油气成藏期次及其控制因素[J]. 石油与天然气地质, 2020, 41(5): 965-974.
- WANG Bin, ZHAO Yongqiang, HE Sheng, et al. Hydrocarbon accumulation stages and their controlling factors in the northern Ordovician Shunbei 5 fault zone, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(5): 965-974.
- [39] 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 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.
- [40] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究进展[J]. 石油实验地质, 2021, 43(5): 737-748.
- MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Advances in basic research on the mechanism of deep marine hydrocarbon enrichment and key exploitation technologies [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(5): 737-748.
- [41] 乔占峰, 于洲, 余敏, 等. 中国古老超深层海相碳酸盐岩储集层成因研究新进展[J]. 古地理学报, 2023, 25(6): 1257-1276.
- QIAO Zhanfeng, YU Zhou, SHE Min, et al. Progresses on ancient ultra-deeply buried marine carbonate reservoir in China [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2023, 25(6): 1257-1276.
- [42] 王雷, 韩长伟, 刘永彬, 等. 塔里木盆地震旦系石油地质条件分析及有利区优选[J]. 河南科学, 2019, 37(10): 1651-1658.
- WANG Lei, HAN Changwei, LIU Yongbin, et al. Petroleum geologic characteristics and favorable area screening of Sinian, Tarim Basin of China [J]. Henan Science, 2019, 37(10): 1651-1658.
- [43] 唐鹏飞, 刘宇, 齐士龙, 等. 大尺寸致密砂岩露头水力压裂物理模拟实验[J]. 断块油气田, 2021, 28(3): 397-402.
- TANG Pengfei, LIU Yu, QI Shilong, et al. Physical simulation experiment on hydraulic fracturing of large-scale tight sandstone outcrop [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(3): 397-402.
- [44] 郭旭升, 胡宗全, 李双建, 等. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 461-474.
- GUO Xusheng, HU Zongquan, LI Shuangjian, et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata [J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 461-474.
- [45] 李宗杰, 李海英, 王立歆, 等. 全方位局部角度域偏移成像技术在顺北油气田的应用[J]. 石油物探, 2023, 62(5): 902-911.
- LI Zongjie, LI Haiying, WANG Lixin, et al. Application of full-azimuth local angle domain migration imaging technology to the Shunbei Oilfield [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(5): 902-911.
- [46] 杨敏, 鲍典, 焦保雷, 等. 塔里木盆地顺北油气田少井高产地质工程一体化做法与关键技术[J]. 中国石油勘探, 2024, 29(3): 45-57.
- YANG Min, BAO Dian, JIAO Baolei, et al. Practice of geology and engineering integration and key technologies for high-yield production with few wells in Shunbei Oil and Gas Field in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2024, 29(3): 45-57.

(编辑 刘格云)