

超深走滑断控型凝析气藏特征与勘探关键技术

——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂带为例

李宗杰^{1,2}, 云露¹, 曹自成¹, 韩俊^{1,2}, 陈菁萍², 朱莲花², 李弘艳², 卜旭强²

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化西北油田公司勘探开发研究院, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:塔里木盆地顺北超深层走滑断控型凝析气藏储集体非均质性极强, 缝洞体描述精度要求高, 勘探技术难度大。以顺北4号走滑断裂带为例, 研究走滑断控型凝析气藏特征, 分段构建拉分、挤压、平移以及斜向弱挤压性质的储集体地质模型, 研发形成以“断控缝洞体三维立体量化描述、最优靶点和轨迹设计”为核心的勘探关键技术系列。研究结果表明:超深层走滑断控型储集体具有“栅状”储集结构特征, 结构模型为“一体多栅”;“寒武供烃、断坡输导、断栅控富、多期充注、动态成藏”, 具有高产富集特点。早期原油充注与晚期多幕次差异天然气充注及微弱的次生改造导致凝析气藏差异富集;“以压缩感知拓频”“相控波阻抗反演”和“立体解析技术”为核心的断控缝洞体三维立体量化描述技术, 以及“通源主断面+串珠强波谷+应力场方向”三参数“靶点”空间定位技术, 为高产井靶点优选与轨迹设计提供支撑。上述研究与技术应用支撑实现了顺北4号断裂带“少井高产”, 为超深层碳酸盐岩凝析气藏勘探开发提供了典型案例。

关键词:勘探关键技术;断控缝洞型储集体;凝析气藏;顺北超深层;塔里木盆地

中图分类号:TE357

文献标识码:A

Characteristics and key exploration technologies for ultra-deep strike-slip fault-controlled condensate gas reservoirs: A case study of the No. 4 strike-slip fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin

LI Zongjie^{1,2}, YUN Lu¹, CAO Zicheng¹, HAN Jun^{1,2}, CHEN Jingping², ZHU Lianhua², LI Hongyan², BU Xuqiang²

(1. Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China; 2. Exploration and Development Research Institute, Northwest Oil Field Company, SINOPEC, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

Abstract: The ultra-deep, strike-slip fault-controlled condensate gas reservoirs in the Shunbei area of the Tarim Basin exhibit extremely strong heterogeneity, posing significant challenges to both the characterization precision for fractured-vuggy reservoirs and the advancement of exploration technologies. In this study, we investigate the characteristics of such reservoirs in the No. 4 strike-slip fault zone in the Shunbei area. The reservoir geological models are constructed for segments with pull-apart, compressive, translational, and oblique weak compression properties in the fault zone. Moreover, key exploration techniques are developed, focusing on three-dimensional quantitative characterization of fault-controlled fractured-vuggy reservoirs, along with optimal landing zone selection and trajectory design for high-yield wells. The results indicate that the ultra-deep, strike-slip fault-controlled reservoirs exhibit grid-like structures, corresponding to an integrated reservoir model with multiple grid-like structures. These reservoirs exhibit high hydrocarbon enrichment and production due to multiple factors: supply from the Cambrian source rocks, hydrocarbon transport along fault slopes, hydrocarbon enrichment governed by fault-controlled grid-like structures, multi-stage hydrocarbon charging, and dynamic hydrocarbon accumulation. The mechanisms underlying the differential hydrocarbon enrichment of the condensate gas reservoirs include early-stage oil charging, multi-episodic differential gas charging during the late stage, and weak secondary modifications. Two key exploration technologies are developed, that is, a three-dimensional quantitative

收稿日期:2025-03-10;修回日期:2025-05-08。

第一作者简介:李宗杰(1968—),男,博士、教授级高级工程师,石油天然气地震地质综合研究与勘探管理。E-mail:ljie.xbsj@sinopec.com。

基金项目:国家自然科学基金企业创新发展联合项目(U24B6001, U21B2063);中国石油化工股份有限公司科技部项目(P23078, 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)。

characterization technology for fault-controlled fractured-vuggy reservoirs, which is centered on compressed sensing-based frequency expansion, phase-controlled wave impedance inversion, and three-dimensional analysis, and a spatial positioning technology for landing target zones based on three parameters: source rock-connecting major fault planes, strong beadlike wave troughs, and stress field direction. These technologies provide technical support for the landing zone selection and trajectory design of high-yield wells. The theoretical achievements and technology application in this study have enabled maximum productivity with a minimum number of wells in the No. 4 fault zone within the Shunbei area, providing a typical case for the exploration and exploitation of ultra-deep carbonate condensate gas reservoirs.

Key words: key exploration technology, fault-controlled fractured-vuggy reservoir, condensate gas reservoir, ultra-deep reservoir in Shunbei area, Tarim Basin

引用格式:李宗杰,云露,曹自成,等. 超深走滑断控型凝析气藏特征与勘探关键技术——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂带为例[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(1): 18–33. DOI: 10. 11743/ogg20260102.

LI Zongjie, YUN Lu, CAO Zicheng, et al. Characteristics and key exploration technologies for ultra-deep strike-slip fault-controlled condensate gas reservoirs: A case study of the No. 4 strike-slip fault zone in the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 18–33. DOI: 10. 11743/ogg20260102.

2016年在塔里木盆地顺托果勒低隆起发现了埋深超7 000 m的10亿吨级超深断控型油气藏——顺北油气田,目前已成为中国石化西北油田分公司勘探开发重点地区之一。针对超深断控型油气藏“断裂、储层、成藏”三大关键地质问题,前人在走滑断裂体系^[1–10]、断控缝洞型储集体^[11–15]和油气藏成藏模式^[14–20]等领域开展了大量研究,明确了走滑断裂带具有“控储、控藏、控富”特征,完善了超深断控缝洞型油气成藏理论,丰富了中国超深层海相碳酸盐岩油气勘探理论。随着塔里木盆地勘探开发走向深层领域,油气藏的复杂性和高投资成本给高效勘探开发带来了极大的挑战。

超深层走滑断控型油气藏的“断裂–储层–油气藏”三元耦合关系复杂,展现出同一条断裂带内成藏系统独立、同一条断裂带不同分段内油气赋存有差异及不同储集体储层发育特征和规模不同的三维空间分异规律。顺北油气田在向东部拓展断裂带的勘探开发实践中,面临着油气资源结构由油藏向凝析气藏转变、目的层埋深更大以及目的层温度更高等问题,地质、地球物理和工程协同方面遭遇技术瓶颈。上述诸多因素制约了顺北油田向东高效拓展进程,亟待通过多学科联合攻关建立适配性勘探技术序列。

针对顺北地区超深走滑断控型凝析气藏勘探开发面临的关键科学问题与技术挑战,展开系统分析,主要存在3个核心难点:①储集体内部非均质性显著,优质储层空间展布规律尚未明晰;②大埋深、低地温和高压条件下,对超深层断控缝洞型凝析气藏成藏机理与富集规律的研究不足,高产井主控要素不明;③现有地震成像技术对规模缝洞体识别精度不高,制约储层三维空间的精准定位。鉴于以上关键问题与技术瓶颈,

以塔里木盆地顺北4号断裂带为典型案例,通过构建超深断控缝洞型储集体三维地质模型,开展地质–地球物理多学科联合攻关,研究形成超深走滑断控型凝析气藏勘探的技术体系,实现了储集体空间结构的精准刻画与油气富集规律的系统解析。该成果不仅为顺北地区同类油气藏的高效开发提供了理论支撑与技术路径,更为断控油气藏的勘探开发提供了借鉴。

1 走滑断控型凝析气藏发育地质背景

顺北油气田主体位于塔里木盆地“两隆两坳”之间的顺托果勒低隆起区,现今构造处于相对低洼、构造平缓部位(图1a),区内目前落实18条北东向、近南北向和北西向走滑断裂(图1b)^[17,23–26]。经历早古生代海相、晚古生代早期海–陆过渡相及晚古生代晚期和中–新生代陆相沉积演化过程,地层发育相对齐全,仅部分组段不同程度缺失^[27–28]。其中,寒武纪–奥陶纪发育约3 km厚的海相碳酸盐岩地层(图1d),晚奥陶世沉积约2 km厚的泥岩,志留纪–石炭纪主要发育分布广泛的碎屑岩地层^[6]。前人深入研究了塔里木盆地顺北油气田的石油地质条件,基本明确了其走滑断裂带具有明显的“控储、控藏、控运、控富”特征,烃源岩演化、地温场和构造演化差异是造成顺北地区“西油东气”资源格局的主要因素,在大埋深、高压、低地温梯度以及晚期快速深埋等因素的共同作用下,顺北中、东部地区(包括顺北4号断裂带)下寒武统烃源岩及满加尔坳陷寒武系烃源岩具有早期快速深埋、达到高–过成熟阶段,中期降温保持,晚期再次深埋、达到过成熟阶段的特征,海西运动晚期处于生凝析油气阶段,喜马拉雅运

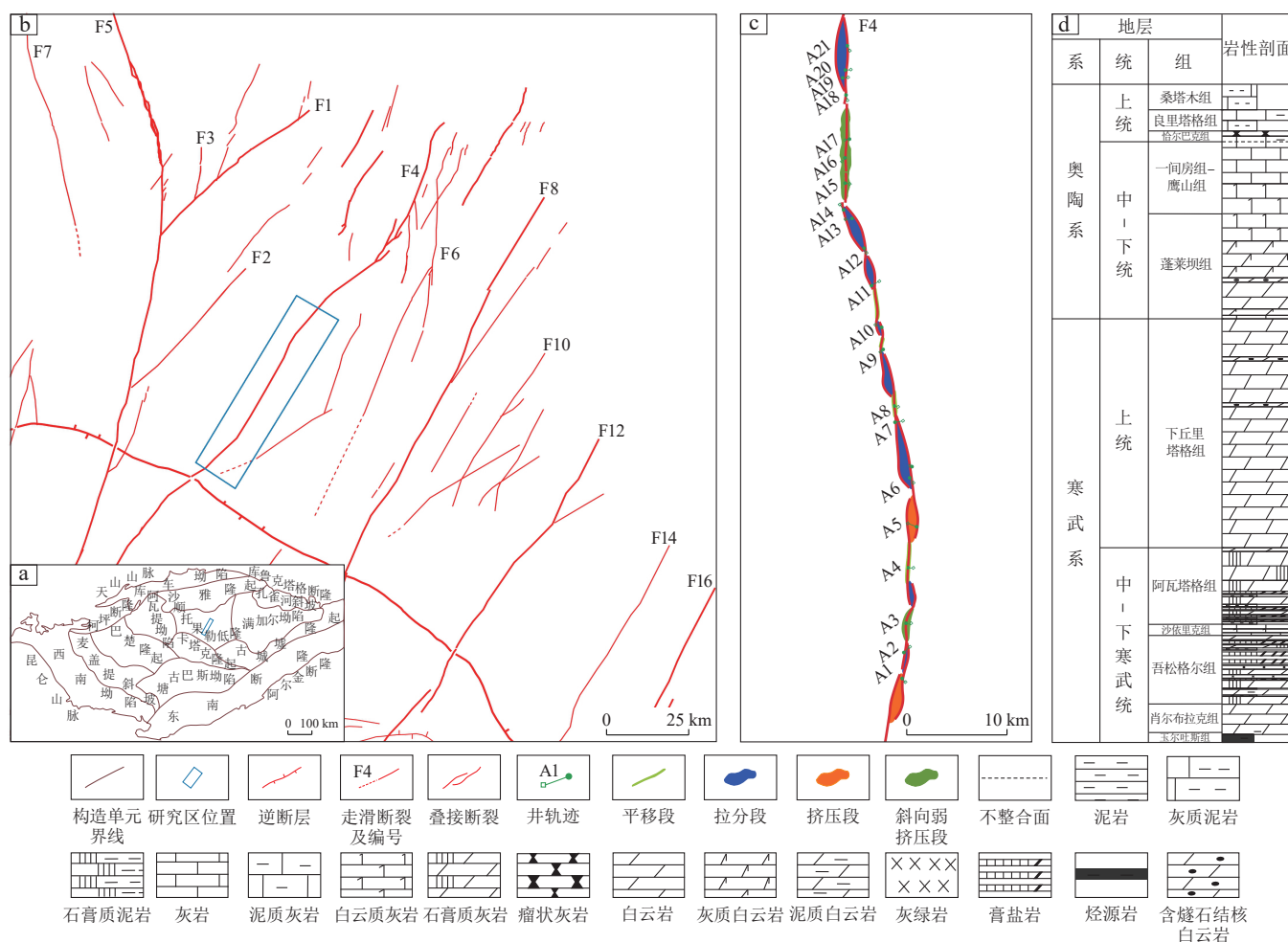


图1 塔里木盆地顺北4号断裂带构造位置(a)、断裂分布(b)、平面分段特征(c)及顺北地区古生界综合柱状图(d)

Fig. 1 Tectonic location (a), fault distribution (b), and planar segmentation (c) of the No. 4 fault zone and composite stratigraphic column of the Paleozoic strata (d) in the Shunbei area, Tarim Basin

期处于生过成熟干气阶段^[1,14-15,29-31]。

顺北4号断裂带位于顺北油气田中部,是塔里木盆地内部发育的一条贯穿卡塔克隆起-顺托果勒低隆起的主干走滑断裂带(图1b),总延伸长度达188 km。平面上,顺北4号断裂带是由多条断裂、多期继承性左行-张扭和递进拼接形成的,依据走向划分为3段,南段、中段和北段分别以挤压段、拉分段和斜向弱挤压段为主(图1c),海西晚期无明显活动迹象;剖面上,该断裂带表现为花状构造:“寒武系-中奥陶统高陡走滑断层”+“上奥陶统-石炭系雁列正断层”分层变形样式^[6,32]。走滑断裂带的分层结构差异是其油气运移和富集程度的主控因素^[32]。该断裂带共经历了3期左行走滑活动,加里东中期Ⅲ幕在塔北-塔中体系对接过程中多段拼贴发育,以压脊变形为主,加里东晚期和海西中-晚期均为雁列正断层活动,表现为斜拉或纯剪活动,整体具有“南、北弱,中部强”的活动特征^[6,32]。

2020—2022年,部署在顺北4号断裂带上的中国石

化顺北41X(A11)井、顺北42X(A3)井以及中国石油满深1井和满深3井均获得重大油气突破^[1,33],证实顺北4号断裂带勘探潜力巨大,并发现了中国国内最大的超深层碳酸盐岩凝析气田,富集程度高。该油气藏埋深达7 300~9 000 m,地层温度高达160~209℃,地层压力高达80~165 MPa,具有“高温高压、储层破碎、藏内组分复杂”的特点,一条断裂带上分布着挥发性油藏、凝析气藏以及轻质油藏^[21]。早期认识到顺北4号断裂带储集体内部发育栅状储集结构,但不同构造样式储集结构分布规律及差异性不清楚,制约优化钻井轨迹设计与油气高效动用。基于顺北4号断裂带形成演化、断裂活动特征及分段性认识,通过对“栅状”储集结构内部结构精细研究,构建走滑断裂“差异分段、一体多栅”规模储集体模式。断-储一体栅状结构模型实现了断裂带内部非均质储层的地质建模,结合不同分段储集体内部栅状结构差异分布特征,提出了断控储集体定向井“大角度、大斜度”的轨迹设计理念,并基于此开展钻

井部署。目前在中国石化矿权顺北4号断裂带内共实施钻井21口,其中20口完试井均获高产工业油气流,落实顺北油气田第一个千亿方凝析气藏富集区。

2 不同分段断-储模型构建

2.1 储集空间特征

顺北超深层断控缝洞型储集体发育于埋深7 500 m以深,是伴随走滑断裂发育而形成的一类特殊储层,基质孔隙度和渗透率差。顺托果勒低隆起长期处于构造较低部位,高能相带欠发育,且中奥陶统一间房组顶面和上奥陶统良里塔格组顶面岩溶作用欠发育,不发育类似塔河油田喀斯特作用形成的岩溶缝洞型储集体^[28]。对顺北油气田12口井奥陶系一间房组-鹰山组岩心全直径物性分析以及氮孔隙度和渗透率数据统计显示,顺北油气田奥陶系一间房组-鹰山组岩心的实测有效孔隙度分布范围为1.50%~4.70%,平均值为2.26%,中值为1.90%,主峰位于1.50%~2.00%;渗透率范围为 $(0.002 \sim 45.500) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均值为 $4.660 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,中值为 $1.170 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,主峰介于 $(0.600 \sim 3.000) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,基质物性差,低于有效储层下限^[34]。

顺北地区在多期构造运动中发育不同级别、不同走向以及不同期次的克拉通内中、小尺度走滑断裂带,走滑断裂多期活动造成奥陶系一间房组-鹰山组碳酸盐岩破裂,形成断层空腔和裂缝等有效储集空间^[1,3]。其中,洞穴带(断层空腔带)是断控缝洞型储集体的优质储集空间,裂缝带是断控缝洞型储集体的重要组成部分^[34]。钻井钻遇洞穴类储层时往往发生放空或失返性漏失,岩心呈大小不等的小碎块,常规电阻率曲线呈明显的箱形低阻特征,电阻率一般小于 $500 \Omega \cdot \text{m}$,测试获高产稳产^[34]。以A17井为例,该井断裂带串珠部位钻进时放空2.68 m,漏失密度为 $1.14 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液 $3\,764.13 \text{ m}^3$,放空及漏失段电阻率曲线呈明显的箱形低阻特征,最低值为 $61.69 \Omega \cdot \text{m}$,平均值为 $355.40 \Omega \cdot \text{m}$ 。该井投产获高产稳产,投产初期12 mm直径油嘴自喷,油压45.11 MPa,产油量686.40 t/d,产气量 $59.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前已累产油量 $10.90 \times 10^4 \text{ t}$,累产气量 $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。钻遇裂缝型储层时,钻井无漏失或小规模漏失,电阻率(RT)明显降低,声波时差(AC)稍增大或无明显异常,成像测井图像上常见高角度裂缝、斜交裂缝和不规则裂缝。断控缝洞型储层非均质性强,通过酸化压裂可沟通井旁洞穴类储层,亦可获高产稳产。以A18井为例,该井钻井中无放空或漏失,测井仅解

释Ⅱ类储层 $2.5 \text{ m}/(1 \text{ 层})$,但通过注入井筒总液量 $3\,108.00 \text{ m}^3$ 并分3段酸化压裂后,明显沟通洞穴类储层,获得高产。测试初期,14 mm直径油嘴自喷,油压48.24 MPa,产油量755.40 t/d,产气量 $75.60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,目前累产油量 $14.90 \times 10^4 \text{ t}$,累产气量 $2.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2 栅状储集结构

基于顺北油气田实钻井井震标定及模型正演分析,断控储层地震响应特征为“断裂+串珠”^[34]。通过对顺北4号断裂带16口钻井放空/漏失检测及测井储层段精细标定,认为放空/漏失段和测井Ⅰ/Ⅱ类储层段均位于强串珠部位,其中放空段多位于“红波谷”中心偏下部位。“断裂+串珠”内部并不完全是储层,而是由多组洞穴带和裂缝带按多种结构样式组成的“栅状结构”^[35]。栅状储集结构指储层中高角度裂缝、溶蚀孔洞或构造裂隙呈规则排列,形成类似“栅栏”(网格状或条带状)的三维空间网络结构,以裂缝连接孤立的洞穴或孔洞,显著提升储层的渗透性和连通性,从而成为油气高效储集和运移的通道。栅状结构中,洞穴带是指钻井过程中有放空或泥浆漏失现象,测井曲线上储层连续发育且电阻率小于 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 的井段;裂缝带是指钻井过程中无放空、无漏失或小规模泥浆漏失,测井曲线上储层电阻率呈齿状降低且数值一般大于 $1\,000 \Omega \cdot \text{m}$ 的井段;洞穴-裂缝带是指测井曲线上储层连续发育、但物性差异较大,一般中部为洞穴带、物性较好、洞穴带两侧发育裂缝带的井段。

以A11井为例,井区平面上位于叠接拉分段,地震剖面上表现为两套“断裂+串珠”反射特征。该井自东向西大井斜角(约 82°)钻穿第一条断裂,钻井特征和常规测井揭示F1处断裂带和裂缝带结构清楚,共发育2组洞穴-裂缝带和1组裂缝带。第一组洞穴-裂缝带宽50.0 m,其中洞穴类储层厚3.5 m,占比7.0%,钻井漏失密度为 $1.25 \sim 1.33 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液 232.50 m^3 ,测井曲线上电阻率呈箱形降低,其数值介于 $377 \sim 486 \Omega \cdot \text{m}$,声波时差明显增大;裂缝类储层宽47 m,钻井无漏失,测井曲线上电阻率呈齿状降低,最小值为 $2\,930 \Omega \cdot \text{m}$,平均值为 $57\,520 \Omega \cdot \text{m}$ 。第二组洞穴-裂缝带宽44.0 m,洞穴类储层厚度为8.5 m,占比19.3%,钻井漏失密度为 $1.20 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液 326.43 m^3 ;裂缝带宽8.0 m,钻井漏失密度为 1.20 g/cm^3 的钻井液 115.52 m^3 。

据顺北4号断裂带实际钻井统计,单井平均钻遇2~3个洞穴-裂缝带或裂缝带栅状储层,单个洞穴-裂缝带平均厚度32.0 m,单个裂缝带平均厚度6.5 m(图2)。

关于断控缝洞型储层栅状结构成因,早期研究者

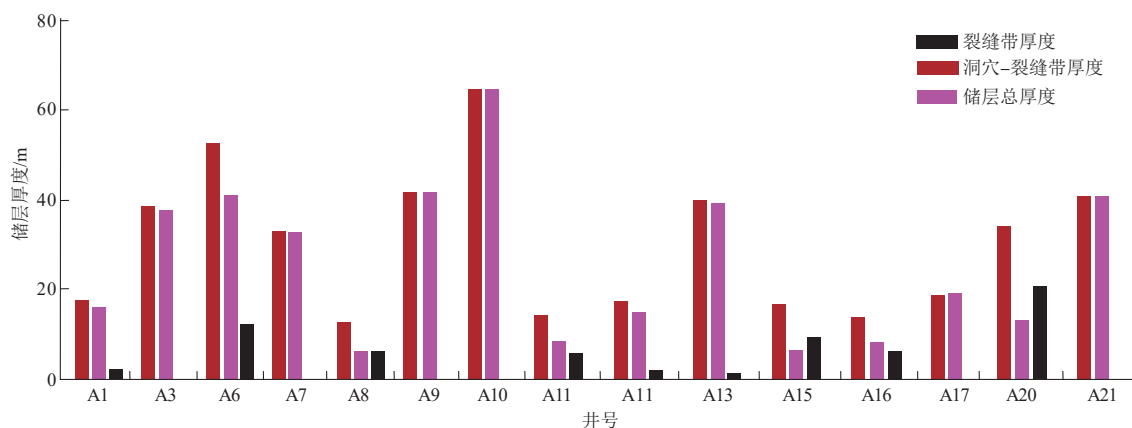


图2 顺北4号断裂带储层厚度统计柱状图

Fig. 2 Statistics of reservoir thickness in the No. 4 fault zone within the Shunbei area

结合走滑断裂带内部结构解析、顺北实际钻井资料和物理模拟,认为走滑断裂呈现多期递进式演化特征,单次走滑构造破碎形成高渗裂缝带,多期(幕次)构造走滑活动在早期高渗裂缝带附近形成多个次级高渗裂缝带,即多幕次走滑递进式演化形成多个缝洞(栅状结构)集合系统^[35]。顺北4号走滑断裂带经历多幕次左行走滑递进演化,形成“栅状”储集体发育区,最大滑移距位置为储集体发育的最有利区。据统计,不同应力性质走滑断裂带的洞穴-裂缝带和裂缝带占比不同,北东向断裂体系洞穴-裂缝带发育,北西向断裂体系则以裂缝带为主^[34]。

2.3 不同分段规模储集体发育模型

走滑断裂的分段性指同一条断裂带沿不同走向分布,且在几何形态、运动学特征及力学机制上存在显著差异的现象,是走滑断裂的基本特征之一^[33-44]。前人基于应力场分析提出,塔里木盆地走滑断裂分段性的形成主要受区域应力衰减^[45]、局部应力差异和多期断裂活动叠加改造^[8,45]等因素控制。顺北地区典型断裂带(如顺北1号、4号、5号和8号断裂带)已有明确的分段划分方案,断裂带沿走向被划分为多个独立构造段^[6,8,45]。其中,拉分段受局部拉张应力主导,表现为正断层、张性破裂及负花状构造,反映断裂带在伸展环境下的垂向位移与张裂特征;挤压段由局部挤压应力控制,发育逆冲断层、密集剪切破裂带及正花状构造,指示断裂带的垂向压缩与侧向挤压变形;平移段和斜向弱挤压段以走滑剪切应力为主导,主要表现为断层两盘水平相对滑动,同时主断层围岩中发育与主变形带呈小角度相交的次级断层,体现纯剪切断层作用的几何响应,两者的区别在于平移段为纯走滑作用形成,变形集中于水平面上,而斜向弱挤压段为走滑-挤压

复合作用的结果,垂向变形虽弱但可辨识,是断裂带受区域应力场作用而复杂化的表现。

研究表明,走滑断裂的分段拼贴演化是控制储集体差异发育的关键机制。顺北4号断裂带共分为16段,包括拉分段、挤压段、平移段以及斜向弱挤压段(图1c)。根据不同分段构造变形特征、储层厚度及应力场参数,构建“差异分段、一体多栅”的储层模型^[35]。

顺北4号断裂带以左行活动为主,为单断裂带,即平移段在应力作用下形成一个中部位移量大的主断面,基岩破碎严重,储层规模大,末端剪切应力集中,滑移量小,常形成以倾滑活动为主的马尾(或羽状)构造,成储规模有限。平移段为单断裂面和1组缝洞系统,即呈“单断单栅”特征(图3c)。前文所述A8井位于平移段的中部,钻井无漏失,以裂缝型储层为主,通过大规模的酸压沟通井周洞穴类储层获得高产。

受持续的左行走滑作用影响,部分断裂带走向与剪切方向呈小角度相交,形成斜向弱挤压段,因应力的偏转会在主断面附近形成间隔距离较大的多个次级裂缝带,地震剖面多表现为“单断裂+单串珠”,测井表现为单断裂面发育2组及以上缝洞系统,即呈“单断多栅”特征^[35-36],其中主断裂面发育洞穴型储层,次级裂缝带以裂缝型储层为主。如A3井位于斜向弱挤压段,钻进至中部断裂面附近发生失返性漏失,测试获得高产油气流,也是顺北4号断裂带首口获得高产的探井。前文所述的A17井位于一斜向弱挤压段的中部,钻井钻遇放空和规模较大的钻井液漏失,测井显示洞穴类储层发育,测试高产稳产。

两条断裂带端部发生左接拼接并持续演化,形成走滑断裂的叠接拉分段,可分为以走滑活动为主的叠接部位和以倾滑活动为主的桥接部位。其中,叠接部位走向与主应力方向一致,走滑破碎作用强,形成规模

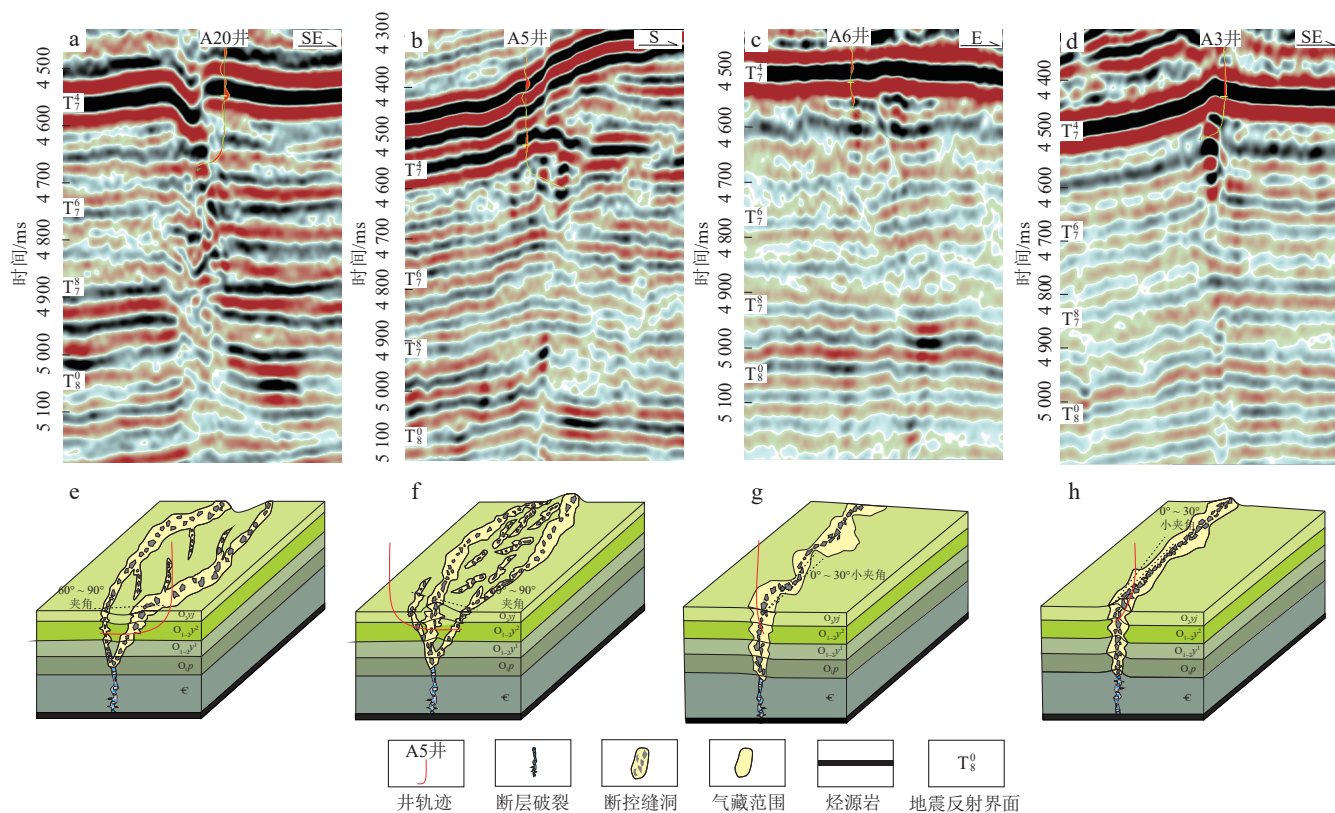


图3 过顺北4号断裂带不同构造样式地震剖面与栅状结构模型示意图

Fig. 3 Seismic profiles showing different structural styles crossing the No. 4 fault zone in the Shunbei area and corresponding models of the grid-like structures

a—d. 分别为过A20井、A5井、A4井及A3井地震剖面; e—h. 分别为拉分段、挤压段、平移段和斜向弱挤压段栅状结构模型示意图

O_{2j} . 奥陶系一间房组; O_{1-2}^{j2} . 奥陶系鹰山组上段; O_{1-2}^{j1} . 奥陶系鹰山组下段; O_{1p} . 奥陶系蓬莱坝组; ϵ . 寒武系

储集体; 桥接部位走向与主应力方向不一致, 以垂向活动为主, 构造破碎作用弱, 储集体不发育, 即形成多断单栅结构。以A13井为例, 井区平面上位于叠接拉分段, 该井自西向东大井斜角先后钻穿拉分构造的叠接部位和桥接部位, 其中叠接部位漏失密度为 $1.29 \sim 1.37 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液 $2\,026.10 \text{ m}^3$, 测井解释Ⅱ类储层厚 6.5 m , Ⅲ类储层厚 21.5 m ; 桥接部位亦有储层发育, 测井解释Ⅱ类储层厚 6.0 m , Ⅲ类储层厚 6.5 m , 但钻井未钻遇漏失, 说明该区以裂缝型储层为主, 储层规模有限。

当两条断裂带端部右接拼接时, 经演化会形成走滑断裂的叠接挤压段, 断裂带内部应力复杂, 在侧接段内部形成R剪切和正(逆)断层等次级断裂带, 发育复杂的缝网系统, 形成非均质性强的缝洞型储集体^[35-36], 即“多断多栅”结构。如A5井从西往东侧钻穿过左行右阶的叠接挤压段, 钻遇2条断层。其中, 第一条断层常规测井和成像测井清晰揭示裂缝带和裂缝-洞穴带结构, 共发育8组裂缝带和2组裂缝-洞穴带。裂缝带宽 $2.5 \sim 47.0 \text{ m}$, 钻井无放空、无漏失或小规模漏失; 裂缝-洞穴带宽 $23.0 \sim 44.0 \text{ m}$, 其中洞穴带宽度 $9.0 \sim 11.0 \text{ m}$, 占比 $27\% \sim 39\%$, 该井在第一组裂缝-洞穴带

(埋深 $8\,084.78 \sim 8\,086.98 \text{ m}$) 层段放空 2.2 m , 漏失密度为 $1.16 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ 的钻井液 $6\,320.56 \text{ m}^3$ 。

结合顺北4号断裂带及相邻断裂带(顺北1号、6号和8号断裂带)的36口钻井测井解释孔隙度数据, 采用加权平均法(按储层厚度加权), 对不同分段的储层物性进行统计分析(表1)。拉分段孔隙度最高, 挤压段最低, 与走滑应力作用下张性破碎增强储、渗的机制一致; 斜向弱挤压段物性介于拉分段与平移段之间, 印证其复合应力场特征。洞穴带拉分段厚度平均值为 43.0 m (最大值 55.0 m), 挤压段厚度仅 17.0 m ; 裂缝带挤压段厚度平均值为 11 m , 显著高于其他分段。

3 断控缝洞型凝析气藏特征

3.1 油气特征

顺北4号断裂带凝析油气主要生产层位是奥陶系一间房组和鹰山组, 储层埋深集中在 $7\,300 \sim 7\,850 \text{ m}$ 。由南往北油气特征差异分布, 原油密度呈现南低北高趋势, 天然气干燥系数与气/油比均呈现南高北低趋

表1 顺北断裂带不同分段储集体参数统计

Table 1 Parameters of reservoirs in different segments of the fault zones in the Shunbei area

分段类型	井数量/口	测井孔隙度/%	洞穴带厚度/m (范围/平均值)	裂缝带厚度/m (范围/平均值)	洞穴-裂缝带体积占比/%
平移段	10	9.7	(20~48)/34	(4~12)/7	63
挤压段	6	7.8	(10~25)/17	(8~15)/11	28
拉分段	12	11.2	(25~55)/43	(3~8)/5	70
斜向弱挤压段	8	8.4	(15~40)/27	(5~12)/8	52

势,局部异常波动。顺北4号断裂带见地层水井4口,进奥陶系碳酸盐岩深度分别为342,517,638,和783 m,且矿化度差异大,断裂带内没有统一油-水界面,水体规模较小,以局部封存水为主。

顺北4号断裂带油气井原油密度(20℃)主要分布在0.764~0.793 t/m³,平均值为0.779 t/m³,黏度1.28~2.34 mPa·s,硫含量0.005%~0.340%,蜡含量1.14%~4.36%,凝固点-11.35℃,初馏点52.20~82.00℃,原油属于低黏度、低凝固点、低初馏点、低含硫及含蜡-高含蜡的轻质油。天然气相对密度分布在0.669~0.714,平均值为0.690;甲烷含量81.36%~85.40%,平均含量83.35%;乙烷平均含量3.49%;丙烷平均含量1.16%。天然气干燥系数分布在90.0%~96.7%。气/油比分布在955~6510 m³/t(图4)。结合顺北4号断裂带烃类流体性质以及典型钻井流体PVT相态分析,认为该断裂带发育典型凝析气藏。

顺北4号断裂带14口钻井静温、静压资料显示,地层压力系数介于1.054~1.190,平均值为1.130,中部地层压力介于86.61~91.65 MPa,气藏地温梯度介于2.00~2.13℃/(100 m),中部地层温度介于160.18~170.59℃,沿断裂带地层压力系数呈中段高、南段和北段略低的特征,但均属于正常温度-压力系统。

3.2 凝析气藏分布规律

顺北4号断裂带自南向北呈挥发性油藏—凝析气藏—轻质油藏的变化特征。凝析气藏段内,生产气/油比具有中间高,向南、北逐渐降低的特征;凝析油含量呈干气—低含量凝析油—中含量凝析油—高含量凝析油、凝析气—超临界凝析气逐渐变化的特征;原油密度整体偏轻,也具有中间高,向南、北逐渐增大的趋势;天然气干燥系数和CO₂含量沿断裂带自北向南逐渐变大,A12井以南天然气为临界干气状态,干燥系数接近95.0%,CO₂含量高达11.51%(图4)。

顺北4号断裂带油气性质及非烃及油气成熟度变化规律揭示其凝析气藏并非1期油气充注形成。顺北4号断裂带中、南段及北段A16井原油碳同位素偏重且天然气中CO₂含量明显增高,说明天然气中含有较高比例的原油裂解气,揭示该带凝析气藏非单一期次充注形成。天然气为原油裂解气与干酪根裂解气的混成因气。同一断裂带原油裂解程度差异大,如北段A20井和南段A3井的原油裂解程度约为20%,中段A11井约为80%;天然气成熟度北段为原油伴生气,向南演变为高熟凝析气,直至过成熟裂解气。尤其是位于中段的A16井,其原油成熟度特征与北段一致,但其天

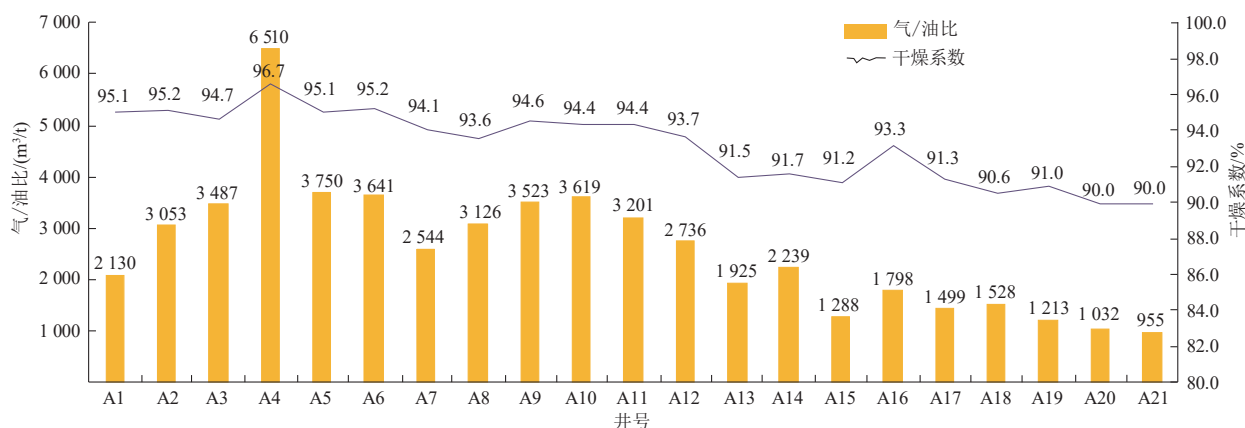


图4 顺北4号断裂带天然气干燥系数和气/油比变化趋势(自南向北)

Fig. 4 Variation trends for the natural gas drying coefficients and gas/oil ratios across the No. 4 fault zone in the Shunbei area (S-N)

然气成熟度却异常地匹配中、南段的高熟特征。这一原油与天然气成熟度的显著矛盾,揭示A16井至少经历了2期不同成熟度油气的充注——早期形成匹配原油成熟度的流体,后期则充注了高成熟天然气。因此,油气性质、非烃特征及油气成熟度空间变化规律充分证实顺北4号带凝析气藏是多期次油气充注的产物。

3.3 凝析气藏成藏主控因素

3.3.1 主力烃源岩

近些年,下寒武统玉尔吐斯组烃源岩已被认为是塔里木盆地台盆区海相油气藏的主力烃源岩^[1]。顺北油气田钻井目前最深钻至蓬莱坝组,还没有钻井钻遇寒武系烃源岩,塔北隆起上已有钻井钻遇玉尔吐斯组优质烃源岩^[33,37],可借鉴不同构造位置下寒武统玉尔吐斯组野外露头 and 钻井岩心样品进行气源对比分析。天然气及其生气母质干酪根碳同位素分布表明,顺北地区天然气主要来自下寒武统玉尔吐斯组,其原油和凝析油生物标志物分布与轮探1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩的生物标志物分布较一致(图5),其成烃生物可能主要来自底栖藻类或为底栖藻类和浮游藻类的混合贡献^[37]。

3.3.2 有机质差异热演化

从顺北4号断裂带的气藏特征看,同一断裂带上

的烃类虽同为凝析气藏,且其均来自下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,但其气/油比、天然气干燥系数和原油成熟度差异较大。顺北4号断裂带原油成熟度总体表现为北高南低,最北部原油的成熟度(镜质体反射率 R_o)平均值可达1.27%~1.53%(如A21井和A20井),A21凝析油热成熟度甚至高于F5断裂带最南端的原油,而顺北4号断裂带最南端A1井原油的热成熟度平均值仅为1.10%。此外,就自北向南4号断裂带原油的热成熟度分布来看,并未出现单调递减的现象,在A13井和A7井局部均出现成熟度高值。总体上,顺北4号带凝析油除最北部热成熟度高(介于1.27%~1.53%)外,整体上热成熟度大概介于1.10%~1.20%。

前人结合古构造演化特征恢复油气主要成藏期海西晚期烃源岩顶面相对埋深^[24,46-48]。结果显示,在主成藏期顺北4号断裂带中段和南段对应的玉尔吐斯组埋藏深度明显大于北段,即顺北4号断裂带北段对应的玉尔吐斯组烃源岩成熟度应低于中段和南段。顺北4号断裂带钻井气/油比特征与下伏寒武系烃源岩热演化特征具有较好的一致性。结合顺北4号断裂带钻井在储层的实测温度分析,认为顺北4号断裂带北段的储层温度相较于中段和南段明显低约 $\pm 4^\circ\text{C}$,并且该断裂带中段储层温度相对最高,与该断裂带钻井气/油比也具有较好的一致性。无论是烃源岩对应的埋深或是储层对应的温度,其主要影响的是有机质(源岩和烃类)热演化,因此顺北4号断裂带

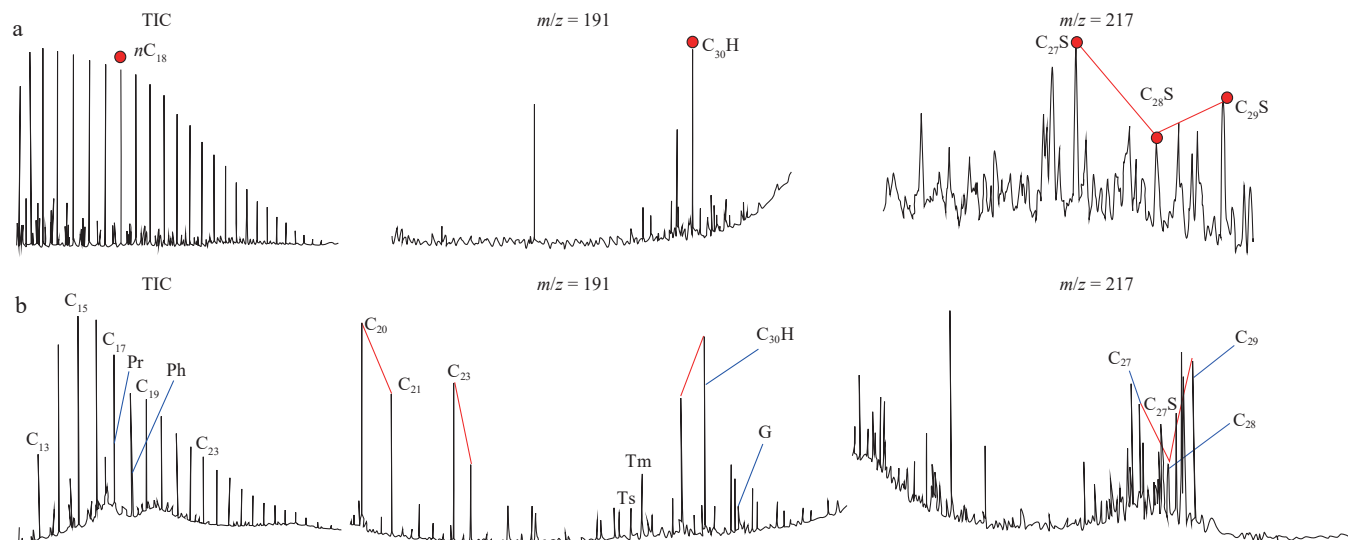


图5 顺北4号断裂带A10井原油与邻区轮探1井烃源岩饱和烃色谱-质谱

Fig. 5 Chromatography-mass spectrometry of crude oil from well A10 in the No. 4 fault zone, Shunbei area, and saturated hydrocarbon from well Luntan 1 nearby

a. A10井,奥陶系一间房组-鹰山组,原油,埋深7 800.00~8 587.04 m; b. 轮探1井,寒武系玉尔吐斯组,烃源岩,埋深8 647.00 m (TIC为总离子流图; nC_{18} 为正十八烷; C_{15} 为15碳化合物; C_{17} 为17碳化合物; C_{19} 为19碳化合物; C_{23} 为23碳化合物;Pr为姥姘烷;Ph为植烷;H为藿烷;G为伽马蜡烷;Ts为18 α (H)-22,29,30三降藿烷;Tm为17 α (H)-22,29,30三降藿烷;X-N为25-降藿烷类化合物;S为甾烷。)

凝析油气的流体性质主要受到有机质差异热演化的影响^[38]。

3.3.3 多期成藏

顺北地区走滑断裂多期活动,并且走滑断裂是顺北断控型油气藏主要输导通道,亦具有控输、控储和控藏的作用^[23-24,39]。断裂的多期活动可能会导致油气多期成藏。

基于顺北4号断裂带A5井和A13井四回次岩心样品的系统观测与岩石学分析,揭示奥陶系浅灰色泥晶灰岩中发育多期次裂缝-脉体系统,包括溶蚀沟充填方解石细脉、被垂直脉切割的早期方解石脉、斜交裂缝方解石晶体以及垂直裂缝石英脉。为精确厘定不同期次油气充注事件,采用多参数耦合分析方法。通过流体包裹体测温、阴极发光岩相学及原位方解石U-Pb同位素定年技术,构建“岩心-薄片-包裹体-同位素定年”综合图版,确定不同期次原油包裹体年龄,揭示构造活动与油气成藏的耦合机制。最终在该断裂带识别出了6期裂缝化作用,包括5期方解石脉和1期石英脉(图6)。

第1期裂缝化作用生成雁列状方解石脉,细粒、脉壁平直,橘红色阴极发光,未见溶蚀,反映加里东中期(470~457 Ma)的早期构造活动形成初始裂缝,未受显著流体改造(图6a,c);第2期裂缝化作用生成垂直石英脉,粗粒石英(靛蓝色阴极发光)部分被方解石(暗橘红色)交代,原生盐水包裹体均一温度92.3~102.4℃、盐度(NaCl浓度)21.50%,指示高温-高盐度流体环境,投点埋藏史结果表明包裹体形成于440~430 Ma,对应加里东晚期(图6d-f);第3期裂缝化作用生成斜向方解石脉,可见其切割早期方解石细脉,脉壁平直,未见溶蚀,橙黄色阴极发光,原生盐水包裹体盐度19.74%(低于第2期裂缝化作用),加里东晚期构造抬升导致大气淡水混入,盐度降低,U-Pb同位素定年结果表明该石脉形成于海西早期(408~385 Ma)(图6g-i);第4期裂缝化作用生成近水平雁列方解石脉,脉壁平直,未见溶蚀,暗褐色阴极发光,次生盐水包裹体盐度8.18%(显著低于第3期裂缝化作用),推测为海西中期抬升加剧淡水混合使包裹体盐度进一步降低,形成于海西晚期(303~277 Ma)(图6j-l);第5期裂缝化作用生成近垂直方解石脉,粗粒,橘红色阴极发光,溶蚀明显,含衬边沥青,表明此期方解石脉可能形成于油气充注之后,流体包裹体显微测温结果表明,与油同期的盐水包裹体均一温度在108.1~115.6℃,平均盐度为8.52%,投点埋藏史结果表明油气开始充注发生在340~252 Ma,推测该期裂缝可能形成于250 Ma以

后,对应于印支期(255~230 Ma)(图6m-o);第6期裂缝化作用生成水平方解石脉,粒粗,见少量溶蚀,暗褐色阴极发光,脉内沿裂纹的次生盐水包裹体平均盐度9.57%(略高于第5期裂缝化作用),表明其形成于持续埋藏阶段,无显著淡水干扰,对应于燕山晚期(98~64 Ma)(图6p-r)。

通过对顺北4号断裂带奥陶系储层流体包裹体的系统研究,发现该区域存在3期油气充注事件。在断裂带一间房组裂缝充填石英脉次生裂纹中,检测到亮蓝色荧光油包裹体(均一温度38.5~43.0℃)、富气相油包裹体和天然气包裹体3类烃类流体,其同期对应盐水包裹体均一温度分别为107.8~116.9,119.8~126.4和128.6~139.0℃,盐度依次为6.74%~10.24%,7.17%~11.46%及8.14%~14.25%。鹰山组裂缝充填方解石脉次生裂纹亦揭示类似特征,亮蓝色荧光油包裹体均一温度为32.7~54.6℃,对应盐水包裹体均一温度107.3~116.3℃、盐度8.14%~9.88%;富气相油包裹体同期盐水包裹体均一温度117.3~128.7℃,盐度6.74%~7.73%;天然气包裹体同期盐水包裹体均一温度138.5~156.1℃,盐度10.73%~12.05%。综合光谱参数与地质年代学分析,顺北4号断裂带3期充注特征显著:第1期荧光光谱主峰位于490~500 nm范围内, QF_{535} (荧光光谱中荧光淬灭因子在535 nm处的响应值)值0.6~0.8的亮蓝色荧光油包裹体为标志,发生于海西中-晚期(350~252 Ma);第2期富气相油包裹体主峰波长约450 nm, QF_{535} 值为0.4~0.6,充注时间为燕山晚期(140~60 Ma);第3期天然气包裹体则形成于喜马拉雅运动晚期(20~3 Ma)。这一多期次充注序列揭示了顺北4号断裂带晚古生代-新生代持续演化的复杂油气成藏过程。

通过多期次裂缝体系综合解析及流体包裹体年代学测定,为顺北4号断裂带油气成藏时序研究建立关键的地质年代约束框架。基于裂缝网络多世代发育特征识别和包裹体微区原位测年数据的系统整合,揭示深部油气运聚过程与构造活动的时-空耦合关系,为厘定该区复杂构造背景下油气成藏动力学机制提供了重要的年代学证据。

3.4 油气富集模式

顺北4号断裂带走滑断控缝洞型碳酸盐岩油气藏以走滑断裂带构造破裂作用为主,多种成因叠加改造形成裂缝-洞穴型储集体,上覆泥岩及泥灰岩盖层封盖致密碳酸盐岩,走滑断裂叠接分段形成侧向遮挡。

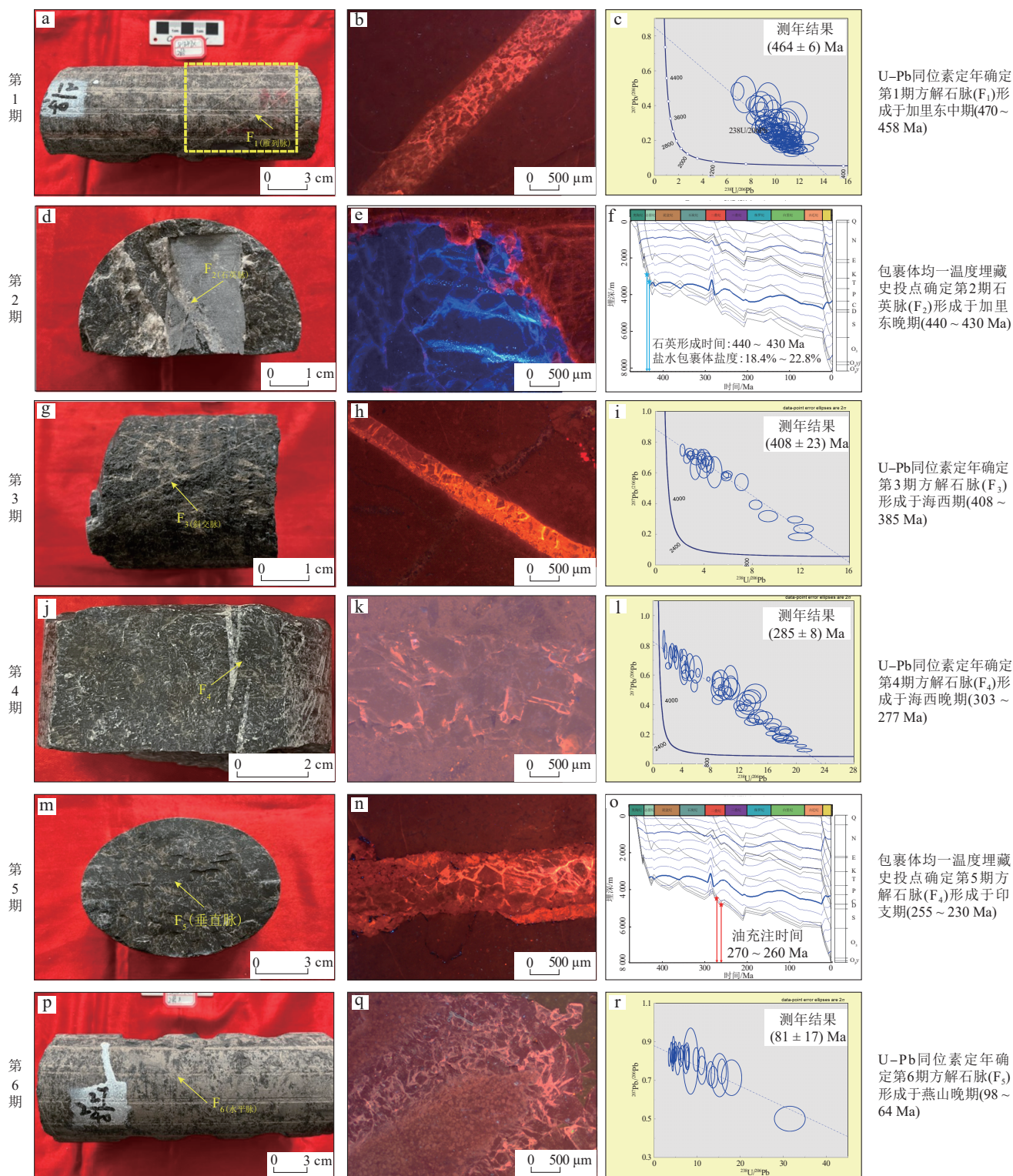


图6 顺北4号断裂带钻井裂缝充填物定年图版

Fig. 6 Dating results of fracture fillings from wells drilled in the No. 4 fault zone, Shunbei area

a—c. A5井,埋深8351.10~8351.25 m, F_1 期雁列脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物U-Pb同位素定年图版;d—f. A13井,埋深7725.28 m, F_2 期石英脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物包裹体均一温度-埋藏史定年图版;g—i. A13井,埋深7725.28 m, F_3 期斜交脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物U-Pb同位素定年图版;j—l. A3井,埋深7416.85 m, F_4 期方解石脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物U-Pb同位素定年图版;m—o. A5井,埋深8352.40~8352.60 m, F_5 期垂直脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物包裹体均一温度-埋藏史定年图版;p—r. A5井,埋深8352.40~8352.60 m, F_6 期水平脉(岩心照片)、胶结物荧光显示(荧光薄片照片)、胶结物U-Pb同位素定年图版

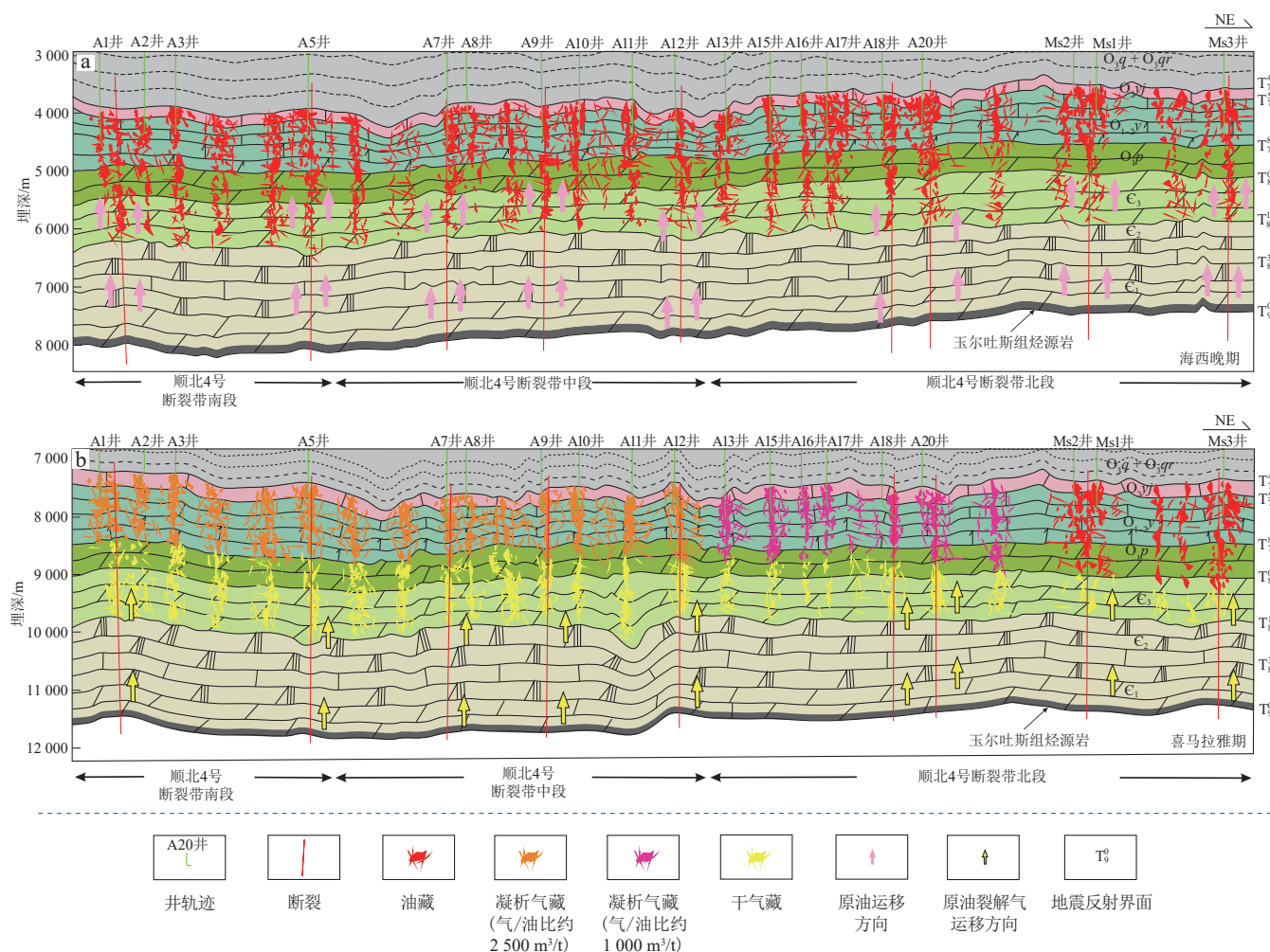


图7 顺北4号断裂带油气藏成藏模式

Fig. 7 Hydrocarbon accumulation patterns of reservoirs in the No. 4 fault zone, Shunbei area

a. 早期油充注; b. 晚期原油裂解气充注

油气藏平面沿主干走滑断裂带呈窄、不规则“条带体”分布,纵向油气柱高度大,横向连通性较差,具有明显的穿层性和不规则性特点。

结合有机质差异演化、多期充注特征及微弱的次生改造作用,认为顺北4号带油气成藏模式为“早期油充注、晚期不同强度的天然气多幕次差异充注以及微弱的次生改造作用”形成的凝析气藏。该类凝析气藏成藏的主要特点是,早期生油高峰或生油窗晚期原油先充注成藏,晚期不同强度的天然气多幕次差异充注对先存油藏进行气侵改造,随着气/油比的提高,最终形成凝析气藏。晚期天然气充注情况主要受有机质差异演化影响,次生改造主要包括热裂解作用及硫酸盐热化学还原反应(TSR),该研究区存在次生改造但很弱,并非主控因素^[38]。气侵差异化改造导致凝析气藏气/油比、干燥系数、甲基双金刚烷含量以及硫化氢含量等参数发生变化,其改造程度取决于有机质差异演

化程度、断裂段分段性和断裂活动性等。顺北4号断裂带中、北段为高含凝析油的凝析气藏,而中、南段为低含凝析油的凝析气藏。

基于前期建立的“寒武供烃、垂向输导、晚期成藏、断裂控富”油气成藏理论模型,通过系统开展油气来源解析、断裂输导效能评价、储层成因机制与展布特征以及成藏期次厘定等关键地质问题的研究,在勘探理论层面,确立了“立足本地烃源岩、追踪通源走滑断裂带、锁定晚期规模成藏”的立体勘探策略。通过多要素协同演化分析,创新性构建了“源-断-储-藏”四位一体的动态成藏模式,进而在顺北4号断裂带建立了“寒武供烃、断坡输导、断栅控富、多期充注、动态成藏”的高产富集模式(图7)。该模式有效阐释了顺北地区大型超深层断控缝洞型凝析气藏的富集规律,为中国目前规模最大的超深层(埋深>8000 m)断裂控储型凝析气田勘探开发提供了指导。

4 “栅状”储集体描述与井轨迹设计技术

4.1 模型正演定识别模式

基于研究区钻井、录井、测井和地震等信息,结合“栅状结构”储层地质模型,建立顺北4号断裂带单井正演模型。以A5井为例(图8),从实钻地质特征图可以看出,该井共有4套储层,内部有多个漏失点,可见规模储集体发育。以依据测井数据计算出的各类储层实际速度为基础,结合实际地质体长/宽比,建立正演模型。通过波动方程模拟和Kirchhoff偏移成像实现“栅状”储集体的正演模拟。从正演模拟结果看,“栅状结构”在地震剖面上整体表现为“串珠”状反射。当储集体横向间距小于20 m时,不能形成独立的串珠;宽度小于10 m的断裂带在地震上无明显响应特征;储集体和断裂带之间为突变接触或渐变接触,有无速度突变界面对地震响应特征影响较小。

顺北4号断裂带高产井多为强振幅串珠形态,通过对多口井建立精细地质模型进行正演模拟,认为串珠的形成主要受具有一定尺度规模的Ⅰ类和Ⅱ类储层影响。强振幅串珠是多个储集体组成的“栅状结构”的综合地震响应结果,储集体物性越好,速度越低,对应的串珠振幅能量越强,其波形特征主要受低速、低密度

储集体的尺度和组合特征影响,而受相对高速的断裂带影响小。

4.2 量化雕刻定规模

在正演模拟和井震标定的基础上,确定栅状储集结构主要表现为“串珠”状强反射,而断裂和裂缝主要表现为“线性弱反射”^[41-43]。基于这一特征,对地震相分别进行敏感属性优选,确定应用瞬时能量属性表征洞穴发育区,断层自动提取(AFE)属性表征断裂-裂缝发育区,再将分类预测结果融为一体,实现断控栅状储集体地震相的刻画。

在断控缝洞体地震相刻画的基础上,利用两级岩性嵌套算法,兼顾测井和地震信息,构建断控缝洞体反演初始模型,反映出断控缝洞体空间的强非均质性,最终获得断控缝洞体的波阻抗等信息,用以估算断控缝洞体储量参数。图9是顺北4号断裂带相控反演的结果,储层结构特征清楚,不同反射类型在反演结果上均有响应,利用钻井异常、测井成果、钻时、完井方式和产能等多因素评价储层预测可靠性,埋深7 300 m以深规模储集体预测与实钻井吻合率达到88%。应用三维体雕刻技术,结合相控反演和储层分类预测结果,对储集体进行三维空间的雕刻,实现量化描述。同时,结合断控缝洞体三维空间形态,直观进行目标靶点的优选,为储量计算和目标评价提供支撑。

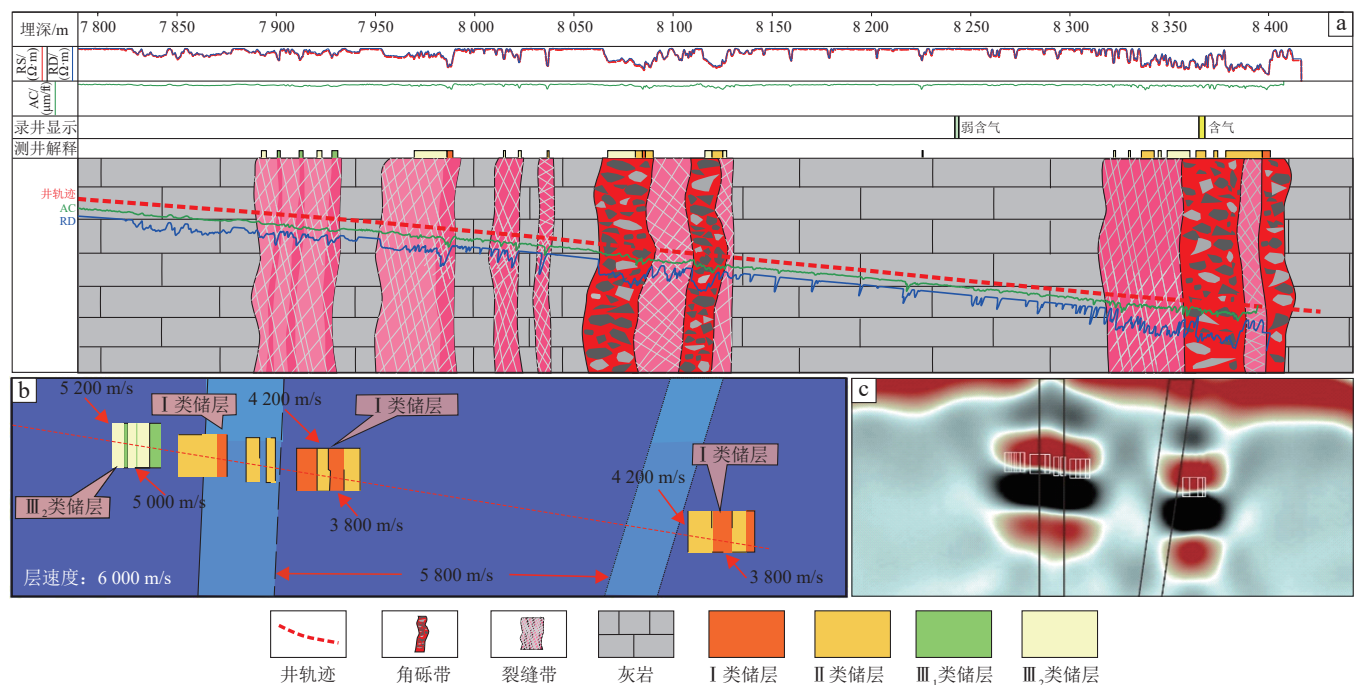


图8 顺北4号断裂带A5井“栅状结构”图(a)、断-栅结构正演模拟(b)及地震剖面(c)

Fig. 8 Grid-like structures (a), forward modeling diagram of fault-controlled grid-like structures (b) and corresponding seismic section (c) in well A5 within the No. 4 fault zone, Shunbei area

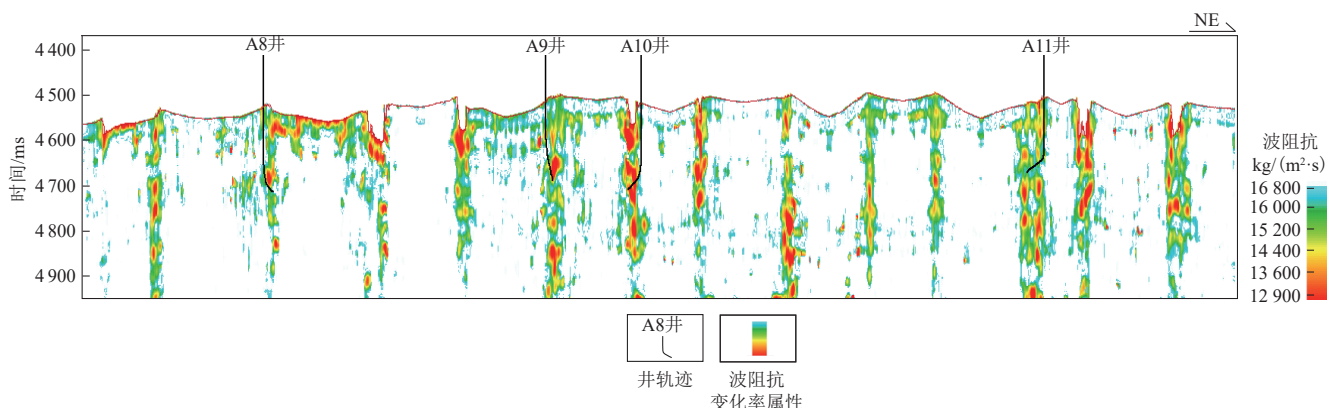


图9 顺北4号断裂带过A8—A9—A10—A11井相控波阻抗反演剖面

Fig. 9 Profile showing phase-controlled wave impedance inversion across wells A8, A9, A10 and A11 in the No. 4 fault zone, Shunbei area

4.3 模式指导定轨迹

在栅状储集体精细描述的基础上,结合储层发育的不同模式,以最大程度揭穿储集体为目标,按照“单体单栅、一体多栅、多体多栅”不同类型的储集结构,有针对性地设计钻井轨迹。对于单体单栅储集结构,由于储集体集中发育,横向宽度小,井轨迹应采用小夹角顺穿储层的方式,角度应小于 30° ,在最大范围揭示储集体的同时,能够保障井壁的稳定;对于一体多栅的储集结构,由于储集体横向分段发育,采用 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的中夹角斜穿储集体,该井型比 30° 以内斜穿方式的钻揭地层长度提高了1.8倍,在提高储层钻揭程度的同时,有利于酸溶堵漏,在实施酸压施工的过程中满足缝内暂堵,保障最大程度沟通储层;对于多体多栅储集结构,由于储集体整体分散、局部集中,考虑钻井能力,设计大角度横穿,狗腿度应小于 $15^\circ/(30\text{ m})$,在多穿储集体的同时满足完井精准分段酸压要求(图3)。

5 结论

1) 基于顺北4号断裂带形成演化、断裂活动特征、断裂分段性及储集空间认识,构建了走滑断裂“差异分段、一体多栅”规模储集体模式,建立了“断-储”一体的“栅状结构”模型。顺北4号断裂带共发育8个拉分段、2个挤压段、4个平移段和2个弱斜向挤压段,平移段和弱斜向挤压段为单断裂面和1组缝洞系统,即单断、单栅特征;拉分段和挤压段表现为2条及以上断裂面组合断裂带,内部发育多组缝洞系统,即多断、多栅特征。结合不同分段储集体内部栅状结构差异分布特征,提出了断控储集体定向井“大角度、大斜度”的轨迹设计理念,支撑钻井部署。

2) 顺北4号断裂带油气特征表现为典型的凝析气藏特征,油气藏平面沿主干走滑断裂带呈窄、不规则“条带体”分布,纵向油气柱高度大,横向连通性较差的油气藏,具有明显的穿层性的不规则性特点。结合有机质差异演化、多期充注特征以及微弱的次生改造作用,认为顺北4号断裂带油气成藏模式为“早期油充注、晚期不同强度的天然气多幕次差异充注以及微弱的次生改造作用”形成的凝析气藏。

3) 基于顺北4号断裂带“断-储”一体的“栅状结构”模型,针对不同分段规模储集体,形成了储集体三维立体量化与精细描述技术。在栅状储集体精细描述的基础上,结合储层发育的不同模式,以最大程度揭穿储集体为目标,按照“单体单栅、一体多栅、多体多栅”不同类型的储集结构,有针对性的设计钻井轨迹。单体单栅储集结构采用小夹角($< 30^\circ$)顺穿储层的方式;一体多栅的储集结构,采用 $30^\circ \sim 50^\circ$ 的中夹角斜穿储集体的方式;多体多栅储集结构设计大角度横穿,狗腿度应小于 $15^\circ/(30\text{ m})$ 。通过超深层断控储集体有利靶点的三维空间精准定位,提高钻井成功率,降低工程风险,节约钻井成本。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.

- [3] 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 their hydrocarbon significance: A case study of No. 1 fault and No. 5 fault in Shunbei area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(7): 906–923.
- [4] 林波, 云露, 张旭, 等. 一种板内小尺度走滑断层平面分段研究方法——以塔里木盆地顺北5号断层中北段为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1006–1018.
LIN Bo, YUN Lu, ZHANG Xu, et al. A method for plane segmentation of small-scale intraplate strike-slip faults: a case of the middle-north segment of Shunbei No. 5 fault in Tarim Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1006–1018.
- [5] 林波, 云露, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断层空间结构及其油气关系[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1344–1353, 1400.
LIN Bo, YUN Lu, LI Haiying, et al. Spatial structure of Shunbei No. 5 strike-slip fault and its relationship with oil and gas reservoirs in the Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1344–1353, 1400.
- [6] 刘雨晴, 邓尚. 板内中小滑移距走滑断裂发育演化特征精细解析——以塔里木盆地顺北4号走滑断裂为例[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(1): 124–136.
LIU Yuqing, DENG Shang. Structural analysis of intraplate strike-slip faults with small to medium displacement: A case study of the Shunbei 4 fault, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(1): 124–136.
- [7] 刘雨晴, 邓尚, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北及邻区走滑断裂体系差异发育特征及成因机制探讨[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 95–109.
LIU Yuqing, DENG Shang, ZHANG Jibiao, et al. Characteristics and formation mechanism of the strike-slip fault networks in the Shunbei area and the surroundings, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 95–109.
- [8] 邓尚, 李慧莉, 张仲培, 等. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 878–888.
DENG Shang, LI Huili, ZHANG Zhongpei, et al. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 878–888.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 张继标, 邓尚, 韩俊, 等. 多期构造应力控制走滑断控储层发育机理与差异性研究——以塔里木盆地顺北地区为例[J]. 石油实验地质, 2024, 46(4): 775–785.
ZHANG Jibiao, DENG Shang, HAN Jun, et al. Study on development mechanism and variability of strike-slip fault-controlled reservoirs regulated by multi-stage structural stress: A case study of the Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(4): 775–785.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 漆立新, 丁勇. 塔里木盆地顺北地区东西部海相油气成藏差异[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1): 20–28.
QI Lixin, DING Yong. Differences in marine hydrocarbon accumulation between the eastern and western parts of Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2023, 45(1): 20–28.
- [16] 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.

- [17] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层发育机理新认识与特深层油气勘探方向[J]. 地学前缘, 2023, 30(6): 1-13.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Huili, et al. New insights into the formation mechanism of deep-ultra-deep carbonate reservoirs and the direction of oil and gas exploration in extra-deep strata [J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(6): 1-13.
- [18] 宋兴国, 陈石, 谢舟, 等. 塔里木盆地富满油田东部走滑断裂发育特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2): 335-349.
SONG Xingguo, CHEN Shi, XIE Zhou, et al. Strike-slip faults and hydrocarbon accumulation in the eastern part of Fuman oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2): 335-349.
- [19] 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.
- [20] 张艳秋, 陈红汉, 王燮培, 等. 塔里木盆地富满油田走滑断裂带通源性评价[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(3): 787-800.
ZHANG Yanqiu, CHEN Honghan, WANG Xiepei, et al. Assessment of connectivity between source rocks and strike-slip fault zone in the Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(3): 787-800.
- [21] 胡文革. 塔里木盆地顺北地区不同断裂带油气充注能力表征研究与实践[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(3): 528-541.
HU Wenge. Study and practice of characterizing hydrocarbon charging capacity of different fault zones, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(3): 528-541.
- [22] 胡文革, 马龙杰, 汪彦, 等. 关于塔里木盆地深层油气藏高效开发的实践与思考[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 519-528.
HU Wenge, MA Longjie, WANG Yan, et al. Application and reflections on efficient development of deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin [J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 519-528.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 马永生, 蔡勋育, 黎茂稳, 等. 深层-超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 692-707.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Maowen, et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates [J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 692-707.
- [27] 赵锐, 赵腾, 李慧莉, 等. 塔里木盆地顺托果勒地区中下奥陶统鹰山组与一间房组沉积相与旋回地层[J]. 东北石油大学学报, 2019, 43(4): 1-16.
ZHAO Rui, ZHAO Teng, LI Huili, et al. Sedimentary facies and cyclic stratigraphy of Yingshan and Yijianfang formations of Lower-Middle Ordovician in Shuntuoguole area, Tarim Basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2019, 43(4): 1-16.
- [28] 彭军, 夏梦, 曹飞, 等. 塔里木盆地顺北一区奥陶系鹰山组与一间房组沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2022, 34(2): 17-30.
PENG Jun, XIA Meng, CAO Fei, et al. Sedimentary characteristics of Ordovician Yingshan Formation and Yijianfang Formation in Shunbei-1 area, Tarim Basin [J]. Lithologic Reservoirs, 2022, 34(2): 17-30.
- [29] 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.
- [30] 张钰, 曹自成, 陈红汉, 等. 顺北地区不同走滑断裂带奥陶系油气成藏期次及其贡献度差异性[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2168-2188.
ZHANG Yu, CAO Zicheng, CHEN Honghan, et al. Difference of hydrocarbon charging events and their contribution percentages to Ordovician reservoirs among strike-slip fault belts in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2168-2188.
- [31] 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.
- [32] 李海英, 韩俊, 陈平, 等. 塔里木盆地顺北4号走滑断裂带变形特征及有利区评价[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(2): 127-135.
LI Haiying, HAN Jun, CHEN Ping, et al. Deformation and favorable area evaluation of Shunbei No. 4 strike-slip fault zone in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(2): 127-135.
- [33] 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(3): 13-23.

- YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25 (3): 13-23.
- [34] 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.
- [35] 张煜, 李海英, 陈修平, 等. 塔里木盆地顺北地区超深断控缝洞型油气藏地质-工程一体化实践与成效[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(6): 1466-1480.
- ZHANG Yu, LI Haiying, CHEN Xiuping, et al. Practice and effect of geology-engineering integration in the development of ultra-deep fault-controlled fractured-vuggy oil/gas reservoirs, Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43 (6): 1466-1480.
- [36] 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.
- [37] 曹自成, 云露, 平宏伟, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系天然气地球化学与成因[J/OL]. 地质科技通报: 1-16[2025-02-21]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240099>.
- CAO Zicheng, YUN Lu, PING Hongwei, et al. Geochemistry and origin of Ordovician natural gas in Shunbei area of Tarim Basin [J/OL]. Bulletin of Geological Science and Technology: 1-16[2025-02-21]. <https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240099>.
- [38] 彭威龙, 邓尚, 张继标, 等. 深层海相凝析油气藏成因机制与富集主控因素——以塔里木盆地顺北4号断裂带为例[J]. 天然气地球科学, 2024, 35(5): 838-850.
- PENG Weilong, DENG Shang, ZHANG Jibiao, et al. Genetic mechanism and main controlling factors of deep marine condensate reservoirs: A case study of the Shunbei No. 4 fault zone in Tarim Basin, NW China [J]. Natural Gas Geoscience, 2024, 35(5): 838-850.
- [39] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5): 831-839.
- JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuoguole area of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5): 831-839.
- [40] 刘军, 李伟, 龚伟, 等. 顺北地区超深断控储集体地震识别与描述[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(2): 238-245.
- LIU Jun, LI Wei, GONG Wei, et al. Seismic identification and description of ultra-deep fault-controlled reservoirs in Shunbei area [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(2): 238-245.
- [41] 漆立新. 塔里木盆地顺北地区海相超深碳酸盐岩油气勘探物探技术需求与创新应用[J]. 石油物探, 2023, 62(3): 381-394.
- QI Lixin. Technical demand and innovative application of geophysical exploration technology for marine ultra-deep carbonate rocks in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023, 62(3): 381-394.
- [42] 李宗杰, 杨子川, 李海英, 等. 顺北沙漠区超深断溶体油气藏三维地震勘探关键技术[J]. 石油物探, 2020, 59(2): 283-294.
- LI Zongjie, YANG Zichuan, LI Haiying, et al. Three-dimensional seismic exploration method for ultra-deep fault-related dissolution reservoirs in the Shunbei desert area [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2020, 59(2): 283-294.
- [43] 廖茂辉, 刘军, 龚伟, 等. 顺北地区断控缝洞型储层反射特征与预测技术探讨[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(6): 703-710.
- LIAO Maohui, LIU Jun, GONG Wei, et al. Discussion on reflection characteristics and prediction technology of fault-controlling fractured-vuggy reservoir in Shunbei area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(6): 703-710.
- [44] AYDIN A, NUR A. The types and role of stepovers in strike-slip tectonics [M]//BIDDLE K T, CHRISTIE-BLICK N. Strike-Slip Deformation, Basin Formation, and Sedimentation. Denver, CO: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 1985: 35-44.
- [45] 冯建伟, 郭宏辉, 汪如军, 等. 塔里木盆地塔北地区深层走滑断裂分段性成因机制[J]. 地球科学, 2023, 48(7): 2506-2519.
- FENG Jianwei, GUO Honghui, WANG Rujun, et al. Segmentation genesis mechanism of strike-slip fracture of deep carbonate rocks in Tabei area, Tarim Basin [J]. Earth Science, 2023, 48(7): 2506-2519.
- [46] 邱华标, 印婷, 曹自成, 等. 塔里木盆地塔中北坡走滑断裂特征与奥陶系油气勘探[J]. 海相油气地质, 2017, 22(4): 44-52.
- QIU Huabiao, YIN Ting, CAO Zicheng, et al. Strike-slip fault and Ordovician petroleum exploration in northern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22(4): 44-52.
- [47] 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.
- [48] 云露, 曹自成, 耿锋, 等. 塔里木盆地塔北台盆地奥陶系油气分布有序性[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 15-30.
- YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, et al. Regularity of the Ordovician hydrocarbon system distribution in the Tabei non-foreland area of the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46 (1): 15-30.

(编辑 张 晟)