

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

曹自成, 云露, 漆立新, 李海英, 韩俊, 耿锋, 林波, 陈菁萍, 黄诚, 毛庆言

(中国石化西北油田分公司, 新疆乌鲁木齐830011)

摘要:塔里木盆地顺北中部北东向走滑断裂带长期处于油气运聚富集的优势区, 顺北8号走滑断裂带实钻揭示沿断裂带发育断控缝洞型油气藏, 顺北84X井纵向上沿断裂带含油气高度高达1 088 m, 揭示断控缝洞型油气藏含油气高度大、不受现今构造高低控制。为查明断控缝洞型油气藏含油气高度的主控因素, 立足顺北中部奥陶系碳酸盐岩油气藏的成藏地质条件和钻探成果, 开展顺北84X井的储层、圈闭及成藏特征等石油地质条件分析, 为深化断控缝洞型油气藏认识和向深层评价拓展提供支撑。研究表明:①走滑构造破碎是致密碳酸盐岩成储的关键, 其储层发育深度不受碳酸盐岩地层埋深的控制, 在近9 000 m的埋深条件下仍发育断控缝洞型储集体;②上覆巨厚泥岩盖层顶封、两侧致密灰岩侧封、走滑断裂平面分段和纵向分层变形是形成断控缝洞型圈闭的关键;③油-源对比分析表明油气来自寒武系玉尔吐斯组烃源岩, 证实了前期顺北中、东部“寒武多期供烃、构造破裂成储、原地垂向输导、晚期成藏为主、走滑断裂控富”的成藏模式的合理性。顺北84X井的发现揭示塔里木盆地超深层致密碳酸盐岩发育受走滑断裂控制, 储层纵向深度大, 油气充注足, 超深层勘探潜力巨大。

关键词:含油气高度; 超深层; 断控油气藏; 顺北84X井; 顺北地区; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1,000-meter thick in well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications

CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, LI Haiying, HAN Jun, GENG Feng, LIN Bo, CHEN Jingping,

HUANG Cheng, MAO Qingyan

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

Abstract: The NE-trending strike-slip fault zones in the central Shunbei area, Tarim Basin have long been the destination of hydrocarbon migration, accumulation, and enrichment. Drilling has revealed the occurrence of fault-controlled, fractured-vuggy hydrocarbon reservoirs along the No. 8 strike-slip fault zone in the Shunbei area. Along this fault zone, 1 088-m-thick hydrocarbon column has been discovered in well Shunbei 84X. The fault-controlled, fractured-vuggy hydrocarbon reservoirs are characterized by a great hydrocarbon column height, which is independent of the heights of current structures. To identify the primary factors controlling the large hydrocarbon column height of these reservoirs, we examine the characteristics of reservoirs, traps, and hydrocarbon accumulation in well Shunbei 84X, as well as the distribution pattern of fault-controlled, fractured-vuggy hydrocarbon reservoirs within. The results indicate that the tectonic fracturing of strike-slip structures plays a crucial role in the formation of tight carbonate reservoirs. Furthermore, the depth of these reservoirs is not limited by the burial depth of carbonate strata, with fault-controlled fractured-vuggy reservoirs even identified at a burial depth of nearly 9 000 m. The formation of fault-controlled fractured-vuggy traps is primarily influenced by the top sealing capacities of the significantly thick overlying mudstone cap rocks, the side sealing capacities of tight limestones on both sides, and the horizontal segmentation and vertical stratification of strike-slip faults. Oil-source correlation reveals that oil and gas originate from the source rocks in the Cambrian Yuertus

收稿日期: 2023-11-03; 修回日期: 2024-03-04。

第一作者简介: 曹自成(1979—), 男, 研究员, 油气勘探与综合管理。E-mail: caozc.xbsj@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21B2063); 中国石化科技部项目(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)。

Formation, further confirming the hydrocarbon accumulation mode consisting of multiphase hydrocarbon supply from the Cambrian source rocks, reservoir formation by tectonic disruption, in-situ vertical hydrocarbon transport, a predominance of late-stage accumulation, and strike-slip fault-controlled hydrocarbon enrichment in the east-central Shunbei area. The major discovery in well Shunbei 84X in the Shunbei area highlights the presence of strike-slip fault-controlled tight carbonate reservoirs with a large vertical depth and sufficient hydrocarbon charging in the Tarim Basin ultra-deep sequences. These findings suggest the considerable potential for ultra-deep hydrocarbon exploration in the Shunbei area.

Key words: hydrocarbon column height, ultra-deep sequence, fault-controlled hydrocarbon reservoir, well Shunbei 84 X, Shunbei area, Tarim Basin

引用格式: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. DOI:10.11743/ogg20240203.

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. DOI: 10.11743/ogg20240203.

塔里木盆地是中国陆上最大的含油气盆地,经历了多期构造演化^[1-2],油气资源丰富,勘探潜力大。1984年沙参2井在塔北沙雅隆起奥陶系钻遇工业油气流,揭示了早古生代潜山领域的重大突破,在构造高部位(隆起区)富集油气;1996—1997年沙46井、沙47井和沙48井钻遇高产油气流,宣告塔北隆起奥陶系岩溶缝洞型油气田的发现,进一步认识到油气富集受后期岩溶作用影响,与古构造相关性减弱^[3-5]。经历十几年勘探评价后,2012年在跃参区块部署了跃进1X井、跃进2X井、跃进3X井3口探井,发现了一种与“X”型共轭走滑断裂活动密切相关的油气藏,这种油气藏沿断裂带富集,基本不受构造高低的影响^[5],为后来顺北超深层断控油气藏提供了勘探思路。顺北超深断控缝洞型油气藏的勘探主要分为3个阶段。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^[6]。第二阶段:2015—2019年,在顺北1号带、顺北5号带和顺北7号带都获得工业油气流^[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]。第三阶段,2019年以来,向中东部的顺北4号带等北东向断裂带甩开勘探,相继取得重要突破,实现了顺北4号和顺北8号带的整体控制,深化了走滑断裂控储、控藏和控富的认识^[12-16],展示了顺北地区走滑断裂体系油气富集与良好的勘探潜力。

经过十多年的勘探总结,建立了顺北超深碳酸盐岩油气藏“寒武多期供烃、构造破裂成储、原地垂向输导、晚期成藏为主、走滑断裂控富”成藏模式^[4,17-18],发现顺北7号—顺北12号断裂带油气整体富集,尤其是北东向走滑断裂体系位于环满加尔坳陷油气系统有利指向区,与塔北隆起和塔中隆起共同构成了北塔里木

盆地整体油气连片区,具备形成一个整装大型油气富集区的条件。顺北油区断裂带勘探表明,走滑断裂带具有“控储、控藏、控圈、控运、控富”五位一体的特征^[17],但不同断裂带构造活动差异明显,呈现“一带一世界、一段一油藏”的特征,断控储集体空间分布规律不清^[11]。不同断裂带油气性质差异明显,自西向东气/油比逐渐增加,依次为轻质油藏—凝析气藏—干气藏。顺北地区不同断裂带整体不见底水,但顺北5号带和顺北8号带靠近塔中隆起部位存在少量井见底水,尤其顺北8号带南段在进入碳酸盐岩顶界面260m的储层见明显地层水特征,而中段却揭示了大于700m的油气柱高度,指示了不同断裂带油气水高度不受构造控制,北段油气柱高度未知。为了查明顺北8号带不同段的储层发育特征及含油气高度,开展断裂解析、储层微观分析、超深层断控缝洞体三维地震高精度成像处理、三维量化储层描述、油气藏特征与成藏过程等研究,优选出北段断裂活动性较强且深部通源的位置,以深部“串珠”异常体+断裂面为靶点目标,部署了顺北84X井,探索断控缝洞型圈闭深部储层及含油气性。该井实钻在断裂带附近放空漏失,实际钻进碳酸盐岩目的层深度1088m,测试后获得了重大油气突破,指示断控缝洞型油气藏具备含千米油气柱高度的能力。顺北84X井将顺北中东部油气藏的油气柱高度加深了近300m,在近9000m埋深测试获高产油气流,进一步证实了油气沿断裂带富集并具备超千米含油气层的认识。

1 地质背景

塔里木盆地是一个大型叠合盆地^[1-3],内部发育多个构造单元。顺北油气田位于盆地中部顺托果勒低隆

起,构造上南北分别与沙雅隆起和卡塔克隆起相接,东西方向位于满加尔坳陷与阿瓦提坳陷之间的低梁部位,呈“马鞍形”。塔里木盆地构造演化研究表明,该地区主要经历了4次构造演化,分别为加里东早期(寒武纪—中奥陶世)克拉通边缘拗拉槽与克拉通内弱伸展背景阶段、加里东中晚期—海西早期(中奥陶世—中泥盆世)克拉通隆起形成演化与整体强烈挤压阶段、海西晚期—印支期(早二叠世—侏罗纪)塔北隆起持续抬升与挤压阶段和燕山期—喜马拉雅期古隆起与断裂调整定型阶段^[1-4,19]。顺托果勒地区寒武纪—奥陶纪地层发育齐全,发育一套完整的台地建造旋回,沉积演化与台地的建造过程密切相关^[20-21]。早—中寒武世,台地结构样式由早寒武世肖尔布拉克组沉积期的均匀缓坡,经历肖尔布拉克组—吾松格尔组沉积期的台地锥形,逐步演化成中寒武世具有镶边台缘结构的典型碳酸盐台地,至中寒武世—中奥陶世为碳酸盐台地发育鼎盛时期,中奥陶世—晚奥陶世沉积一套开阔台地相的碳酸盐岩,晚奥陶世桑塔木组沉积时期海平面快速上升,台地进入消亡期。

顺托果勒地区长期的构造演化形成顺北地区复杂断裂体系,发育不同级次、不同期次及不同走向的走滑断裂(图1)。平面上,在5号断裂与1号断裂之间的塔北隆起区发育网状“X”型似共轭断裂体系,平面走向

为NNE向和NNW向,呈菱形形状相互交切。顺北地区主要发育单剪型走滑断裂,以顺北5号断裂为界,可将其划分为东西两区。顺北5号断裂以东的4号、8号、12号等断裂主体走向大致为NE30°,构成NE向近平行断裂体系。5号断裂以西的7号、9号、11号等断裂主体走向大致为NW20°,构成NW向近平行断裂体系^[8,10,22]。纵向上,寒武系—中奥陶统主要发育压扭走滑断裂,表现为高陡直立样式,倾角近90°,其往往消失在上奥陶统泥岩塑性层;上古生界及中生界碎屑岩地层主要发育张扭断裂。高陡走滑断裂不仅断穿深部的玉尔吐斯组烃源岩,且改造了寒武系—中、下奥陶统厚约3 000 m的致密碳酸盐岩,形成了沿断裂带分布具有一定规模的断控储集体,对油气运聚和富集成藏具有重要的控制作用。因此玉尔吐斯组烃源岩和一间房组及鹰山组的断控缝洞型储集体及上覆巨厚泥岩,形成了良好的受走滑断裂带控制的生—储—盖组合。

2 顺北84X井超千米含油气重大发现

顺北8号断裂带位于顺托果勒低隆起区的中部核心位置,属于顺北中部的北东向断裂体系(图1),其自塔中隆起向北延伸至满加尔坳陷内部,长度约

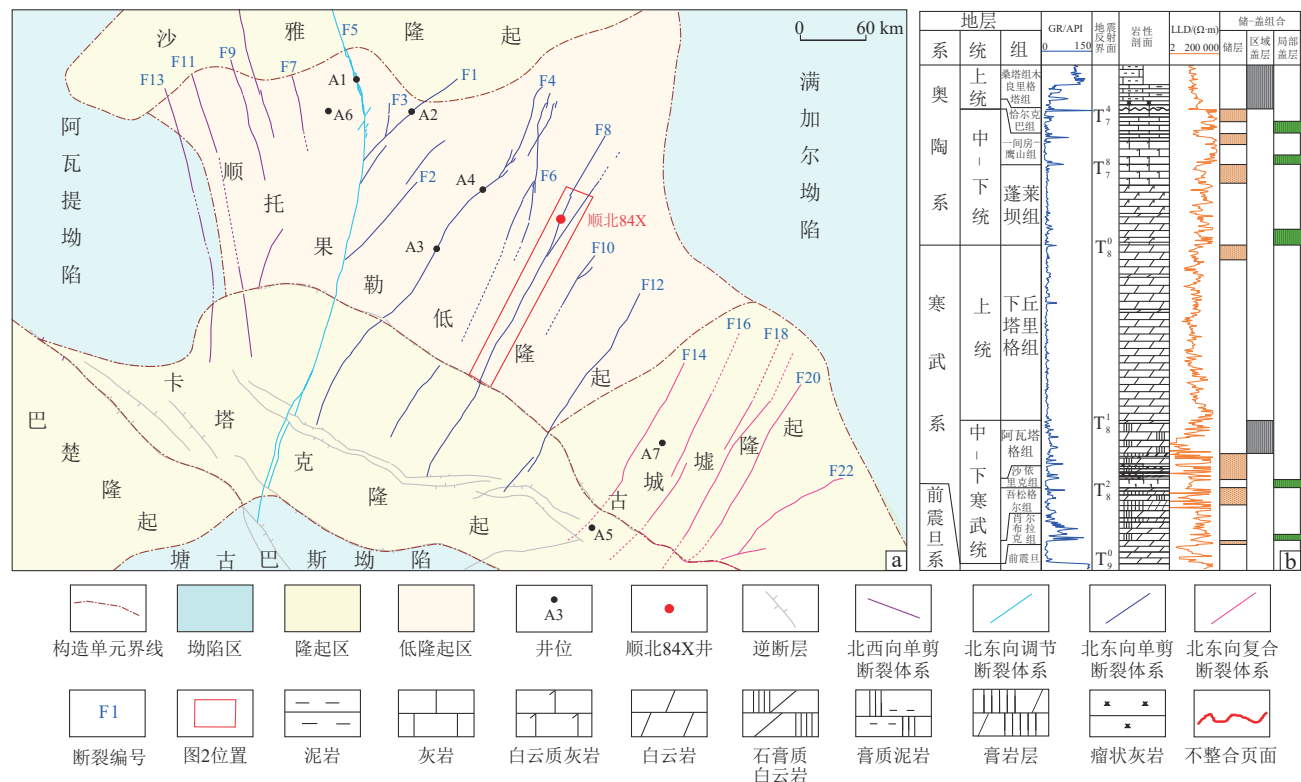


图1 顺北地区下古生界断裂带分布(a)及地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Distribution of the Lower Paleozoic fault zones in (a) and composite stratigraphic column of (b) the Shunbei area

180 km。顺北8号断裂带与顺北地区典型断裂带一致,具有明显的分段演化特征,其平面上可划分为南段(NE31°)、中段(NE28°)和北段(NE26°)3个分段,整体具有从南向北逆时针旋转的特征,其中北段在晚期变形过程产生分支断裂,与主干断裂小角度相交,整体呈现为向北发散的Y形构造样式。

近两年,中国石化西北油田分公司对顺北8号带开展了系统的勘探评价,并先后在中段与南段获得了重大的油气突破,但仍面临着断裂带内部油水界面复杂等问题,例如靠近塔中斜坡的顺北8号带南段在进山(进奥陶系碳酸盐岩目的层深度)264 m位置钻遇了地层水,中段A11井在主断裂上进山734 m的位置获得油气,且未见水。基于构造演化与断裂带内油气富集差异的认识,提出向北其油气充注高度可能大于750 m的认识。为评价断控缝洞型油气藏底界及纵向含油气高度,探索顺北8号断裂带北段平移段“断裂+串珠”储层发育情况与含油气性,探明断裂带内部或周边呈现“串珠”“杂乱”“线性弱反射”等能量异常是否为断控缝洞型储集体地震响应特征,以及超深层、高压和高温下油气特征,在顺北8号主干断裂带北段实施部署了顺北84X井。

2.1 测试情况

顺北84X井于2022年4月26日开钻,2023年1月6日完钻。该井钻至中-下奥陶统鹰山组下段深度9 195.00 m处完钻,垂深8 937.77 m,井底视位移644.54 m,进山垂深1 088 m。目的层共见6层22 m油气显示,其中含气4层18 m,弱含气2层4 m(图2)。2023年2月5日对裸眼段深度8 334.52~9 195.00 m进行常规测试,测试初期14 mm油嘴,油压37.36 MPa,日产石油496.4 t,日产天然气 $65.3 \times 10^4 \text{ m}^3$,折算油气当量1 017 t/d。

2.2 油气层特征

顺北84X井仅在井底发生一次放空漏失,与测井解释的Ⅰ类储层位置对应,指示着钻遇了规模断控缝洞型储集体,而随钻过程中的录井油气显示与测井解释的Ⅲ类储层无明显的对应关系,表明该井的出油点即井底断裂发育位置(深度9 084.5~9 086.0 m,宽度1.5 m)。利用试井过程中的静(流)温、压数据可以快速测算凝析气藏的含油气高度^[23],基于该方法计算出顺北8号带气-水界面平均深度为8 882.42 m(图3)。其中,顺北84X井静压测试油管下放深度6 400 m,测

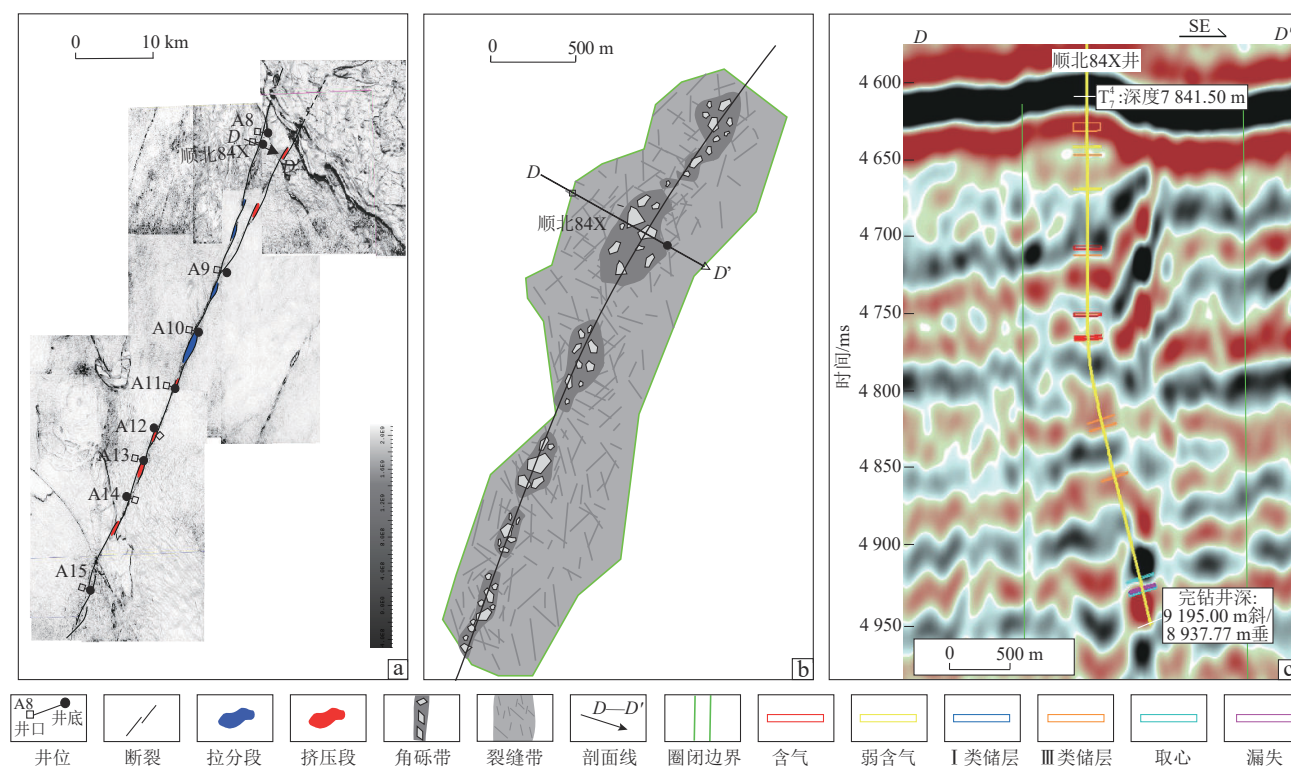


图2 顺北地区顺北8号断裂带相干属性与分段性叠合图(a)、顺北84X井圈闭特征(b)及地震剖面(c)

Fig. 2 Coherent attribute map with superimposed segmentation for the No. 8 fault zone in the Shunbei area (a) and the trap characteristics (b) and seismic profile (c) of well Shunbei 84X

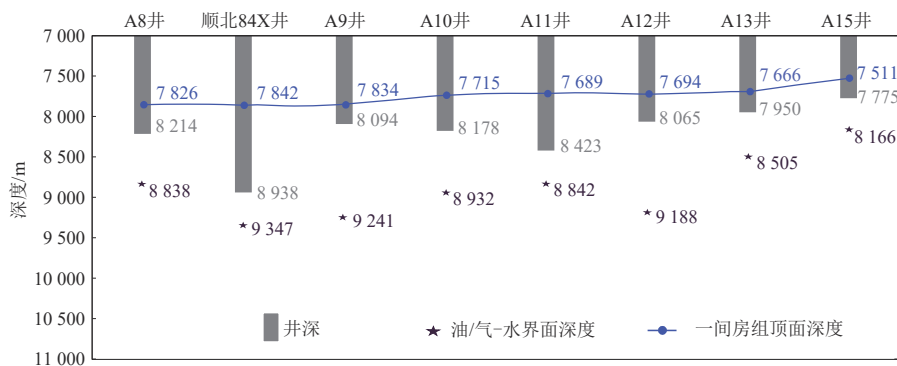


图3 顺北地区顺北8号断裂带气-水界面分布

Fig. 3 Diagram showing the distribution of gas-water contacts in the No. 8 fault zone in the Shunbei area

试静压 87.12 MPa, 原油密度为 0.485 g/cm^3 , 由上述方法推算出顺北 84X 井气-水界面深度为 9 347.16 m, 其油气高度 1 841.16 m, 揭示断控缝洞型储集体致密碳酸盐岩地层侧封能力好, 油气充注足可以形成含油气高度超千米的断控缝洞型油气藏。

2.3 油气藏性质

顺北 84 X 井原油密度为 0.776 g/cm^3 , 动力黏度为 $1.56 \text{ MPa}\cdot\text{s}$, 凝固点为 -7°C , 含蜡量为 0.06 %, 含硫量为 2.70 %, 天然气甲烷含量为 86.37 %, 氮气含量为 2.43 %, 二氧化碳含量为 1.48 %, 在流体类型三角图中位于湿气区。顺北 84X 井油藏中部地层压力为 87.12 MPa、地层温度为 190.19°C , 地层压力远大于临界凝析压力, 流体在地层条件下呈单一气相。井流物分类组成 C_1+N_2 (甲烷和氮气含量) 为 78.95 %, $\text{C}_{2-6}+\text{CO}_2$ (乙烷至己烷烃含量和二氧化碳含量) 为 13.17 %, C_{7+} (庚烷以上烷烃含量) 为 7.41 %。地层流体相态特征表现为临界压力 36.44 MPa, 临界温度 16.51°C , 露点压力为 43.68 MPa, 地-露压差为 33.96 MPa, 临界凝析压力为 44.21 MPa, 临界凝析温度为 352.70°C 。在定容衰竭过程中最大反凝析压力为 15.00 MPa, 最大反凝析液量 11.29 %, 地面凝析油含量 502.66 g/cm^3 (图 4)。

结合顺北 8 号断裂带原油的密度、黏度及凝固点等参数对原油性质分析可知, 该断裂带油气藏均为凝析气藏, 并且含硫量及含蜡量较低。流体性质在平面上存在很大差异, 南段气油比明显高于北段, 而原油密度低于北段。纵向上, 顺北 84X 井原油性质参数与条带上较浅的钻井相比差异不大, 仅其原油密度相对较高, 干燥系数低于浅层。顺北 8 号带原油密度、含硫量和含蜡量略低于西侧顺北 4 号带, 东侧顺北 12 号带勘探井揭示其为干气藏, 天然气密度较低, 甲烷含量较高。

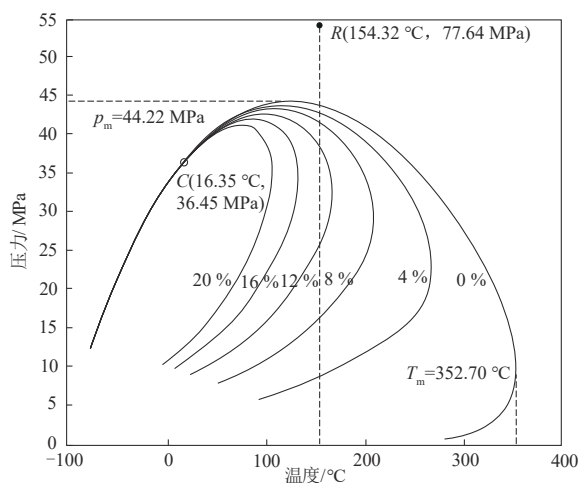


图4 顺北地区顺北84X井凝析气藏烃类流体相态

Fig. 4 Phase diagram for hydrocarbon fluids in condensate gas reservoirs in well Shunbei 84X, Shunbei area

C. 临界温度-压力; T_m . 临界凝析温度; R. 地层温度-压力; p_m . 临界凝析压力

3 顺北84X井超千米油气成藏条件

3.1 油气来源

塔里木盆地存在多套海相烃源岩, 满加尔坳陷区中-下寒武统、中-下奥陶统、本地部下寒武统及西部阿瓦提断陷中-上奥陶统烃源岩均可作为顺北地区提供油气^[24-26], 哪个层系是主力烃源岩一直存在争议。通过顺北 84X 井饱和烃和烃质分析, 并且与寒武系玉尔吐斯组进行甾烷类生物标志化合物进行对比分析, 结合顺北地区储层条件进一步确定顺北地区油气来自寒武系玉尔吐斯组源岩。

生物标志化合物一直在油源研究中扮演着重要的角色, 如萜烷类、甾烷类及三萜系列生物标志化合物都是在油-源研究中常用地用于判断原油及烃源岩成熟

度及沉积环境的参数^[26-28]。基于顺北原油成熟度高的演化特征,多种生物标志化合物特征都已消失或特征不明显,仅甾烷类生物标志化合物特征保留下来,可用于判断油气的演化与来源。 C_{27} 甾烷通常来源于低等水生生物和藻类, C_{29} 甾烷可以来源于藻类和陆源高等植物。顺北84X井、顺北4号断裂带A3井及苏盖特布拉克剖面泥岩奥陶系原油的甾烷类系列化合物具有相似特征, C_{27} 、 C_{28} 、 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$ 规则甾烷表现为不规则“V”字形分布, C_{27} 甾烷及 C_{29} 甾烷丰度较高而 C_{28} 甾烷丰度较低(图5)。规则甾烷相对于重排甾烷丰都较高,这些相同特征指示奥陶系原油和寒武系烃源岩有良好的亲缘性,指示其都为典型的海相原油(表1)。顺北84X井进山深度较大(1 088 m),A3井进山深度较小(455 m),两口井原油与苏盖特布拉克剖面下寒武统玉尔吐斯组泥岩中烃源岩具有良好的亲缘性,证明顺北

地区深部及浅部油气藏中的油气均来自下部的玉尔吐斯组源岩。

3.2 断裂控储、控圈作用

3.2.1 储层发育特征

顺北断控缝洞型储集体以裂缝型储层为主,钻遇放空、漏失均认为是规模储层的随钻响应特征^[29],顺北84X井在井底断裂发育位置钻遇放空,放空井段深度9 085.64~9 086.83 m,长度1.19 m,并伴随着失返性漏失(泥浆密度1.30 g/cm³),本井完井前累计漏失钻井液4 077.34 m³,指示断控缝洞型储集体规模可观。

顺北84X井常规测井资料表明井周发育4套储层段,分别位于一间房组中部和鹰山组中上部、中下部、下部,其中Ⅰ类1.5 m/1层(放空段),Ⅲ类29.5 m/8层

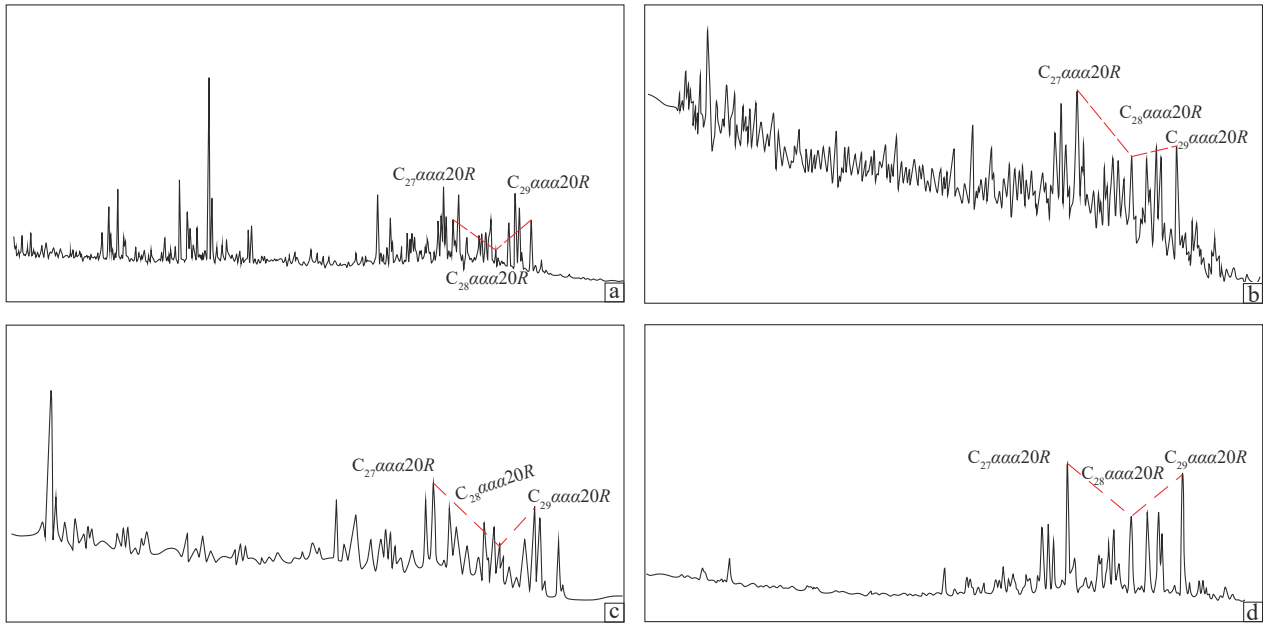


图5 塔里木盆地奥陶系原油与寒武系玉尔吐斯组烃源岩 m/z 217 质谱对比

Fig. 5 Comparison of m/z 217 mass chromatograms between the Ordovician crude oil and the Cambrian Yuertusi Formation's source rocks in the Tarim Basin

a. A3井,一间房组+鹰山组;b. 顺北84X井,鹰山组+蓬莱坝组;c. A5井,沙依里克组;d. 苏盖特布拉克剖面,寒武系

表1 顺北地区奥陶系原油与下寒武统烃源岩生标参数对比

Table 1 Comparison of biomarker parameters between the Ordovician crude oil and the Lower Cambrian source rocks in the Shunbei area, Tarim Basin									
采样点	样品	层位	3类规则甾烷相对含量/%			$T_s/(T_s+T_m)$	重排甾烷/ 规则甾烷	C_{21}/C_{23} 三环萜烷	G/C_{30} 藿烷
			$C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$	$C_{28}\alpha\alpha\alpha 20R$	$C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$				
A3井	原油	一间房组+鹰山组	35	20	45	0.403	0.184	0.538	—
顺北84X井	原油	鹰山组+蓬莱坝组	38	26	36	0.537	0.459	—	—
苏盖特布拉克剖面	泥岩	玉尔吐斯组	36	30	34	0.440	0.170	0.790	0.295

注:甾烷系列生物标志物参数: $C_{27}\alpha\alpha\alpha 20R$ 、 $C_{28}\alpha\alpha\alpha 20R$ 、 $C_{29}\alpha\alpha\alpha 20R$,重排甾烷/规则甾烷;萜烷系列生物标志物参数: $T_s/(T_s+T_m)$ 、 C_{21}/C_{23} ;藿烷生物标志物参数: G/C_{30} 。

(图6a)。第一个储层发育段(一间房组中部)深、浅侧向电阻率基本重合,AC变化较微弱,综合评价为Ⅲ类储层,有效性较差,该段储层以诱导缝为主,发育少量微-细裂缝。第二个储层发育段(鹰山组中上部)整体电阻率较高,基本在 $10\,000\ \Omega\cdot\text{m}$ 以上,AC无明显变化,井径较平直,储层欠发育,分析可能是孔隙型储层,电阻率值基本分布在 $397\sim 5\,479\ \Omega\cdot\text{m}$,孔隙度值基本分布在 $0.85\%\sim 1.84\%$,综合评价为Ⅲ类储层。第三个储层发育段(鹰山组中下部)电阻率较鹰山组中上部

降低明显,尤其在井径扩径处电阻率下降严重,AC略微下降(图6b),推测是白云质含量的增加,岩性和电性相关性较好,可能是孔隙型储层,电阻率值分布在 $189\sim 1\,140\ \Omega\cdot\text{m}$,孔隙度为 $2.33\%\sim 4.60\%$,综合评价为Ⅲ类储层。第四个储层发育段(鹰山组下部)在井漏放空处电阻率呈明显尖峰状降低,该处储层发育与断裂匹配性较好,其电阻率值为 $32\sim 32.4\ \Omega\cdot\text{m}$,孔隙度为 $5.20\%\sim 5.60\%$,同时AC增大明显(图6c),综合评价为Ⅰ类储层。

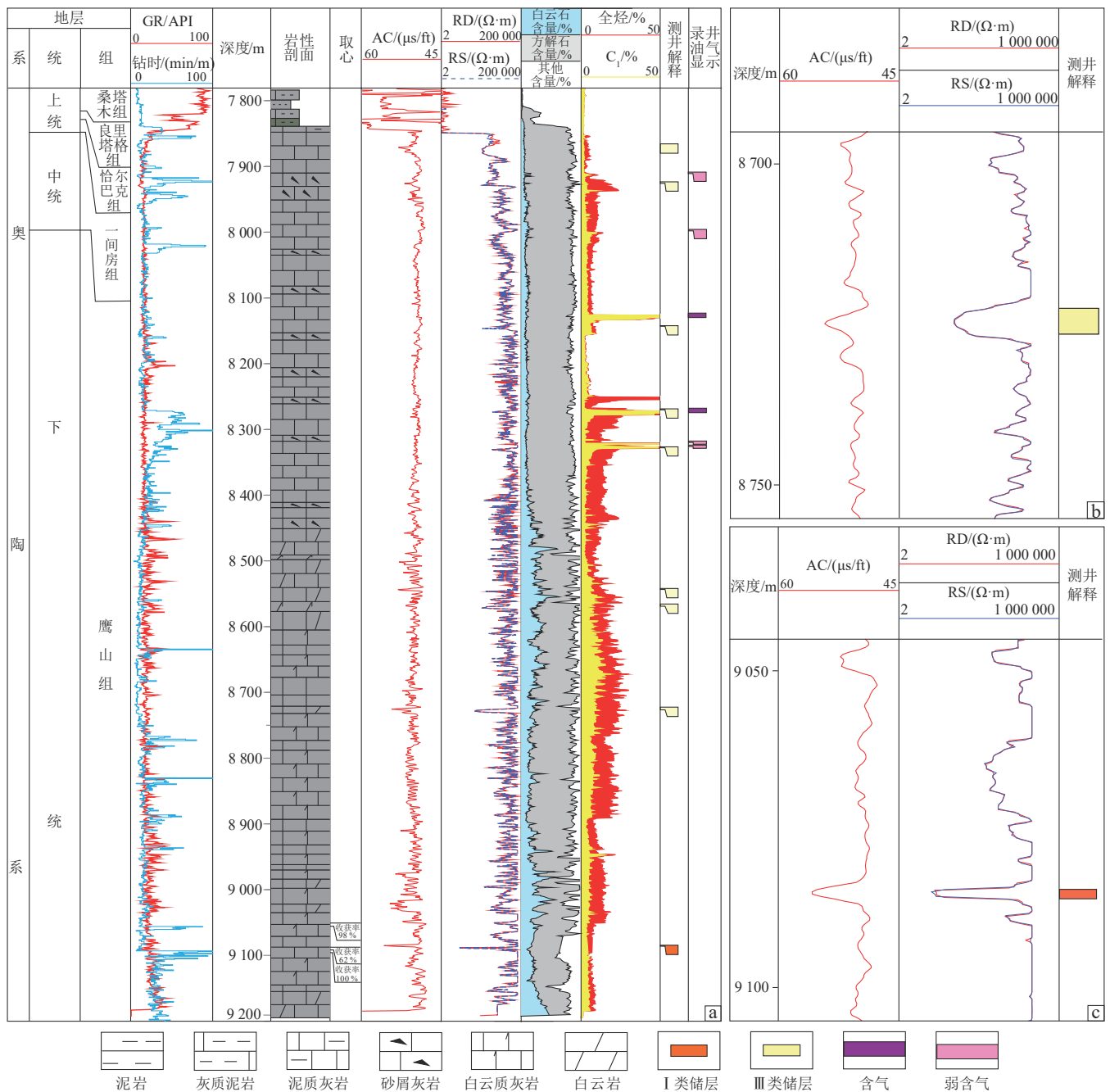


图6 顺北地区顺北84X井奥陶系综合柱状图(a)及储层测井特征(b,c)

Fig. 6 Composite column (a) and reservoir logs (b, c) of the Ordovician strata in well Sunbei 84X in the Shunbei area

顺北84X井地震精细标定漏失放空井段位于断裂带附近,为红色串珠处,测井解释为I类缝洞型储层(图2)。在鹰山组下部能量异常部位共取心3回次,其中第1回次揭示远离断裂的串珠能量左边界位置,第2、第3回次则是针对断裂位置(即串珠能量中心的放空段)连续取心(图7)。在远离断裂的基岩取心上岩心致密,仅见少量开启的裂缝被方解石充填,裂缝规模有限(图7b),在断裂带位置的取心上能见到明显的破碎角砾岩和裂缝发育(图7c—g),其裂缝多被后期方解石胶结。在断裂带储层发育位置附近能见到明显受控于走滑断裂带构造破碎形成的“破碎角砾—裂缝带—基岩”栅状储集体构造组合特征,揭示该井的深层储集体发育与浅层的栅状结构成因机制具有一致性,其成因是致密块体在走滑剪切构造破碎作用下破碎角砾滑动调整而成。值得注意的是后期流体对该储层的充填改造作用,整体上看,早期裂缝充填严重,但是后期构造活动及烃类侵位保留下来的部分未充填改造的裂缝,即是本次钻揭的规模缝洞型储集体。

顺北84X井压力恢复双对数曲线呈现两个“凹子”形态(图8),表明本井发育两套储集体,其中近井筒储

集体的地层系数为 $842 \text{ mD} \cdot \text{m}$;远井导数曲线再次出现径向流特征,其地层系数为 $198 \text{ mD} \cdot \text{m}$,且持续时间大于130 h,表明两套储层连通性好,说明断控缝洞型储集体近井发育多套缝洞体。

3.2.2 储层成因机制

顺北84X井岩心见砂屑—含砾屑高能滩相发育,但粒间多充填嵌晶方解石,破坏了早期的格架孔(图9a),因此推断储层发育主要与断裂作用密切相关。在第2、第3回次取心井段见多类型断裂破碎样式,其中在第2回次可见杂乱破碎的岩心破碎特征,指示在断裂深部挤压破碎程度增强,形成基质与方解石胶结物经历二次断裂破碎的杂乱破碎样式(图9b, d),在第3回次可见与断裂破碎相关的角砾岩发育,挤压破碎程度较第2回次稍弱,角砾大小约 $0.5 \sim 2.0 \text{ cm}$ 。基于对取心层段裂缝发育密度的统计,发现在第1回次(深度 $9\,050.66 \sim 9\,055.66 \text{ m}$),裂缝整体欠发育,裂缝线密度约10条/m,以低角度缝为主,而在第2、第3回次裂缝发育密度明显增大,可达到19条/m且以斜缝—立缝为主,综上可知,走滑断裂的构造破碎成储能力不

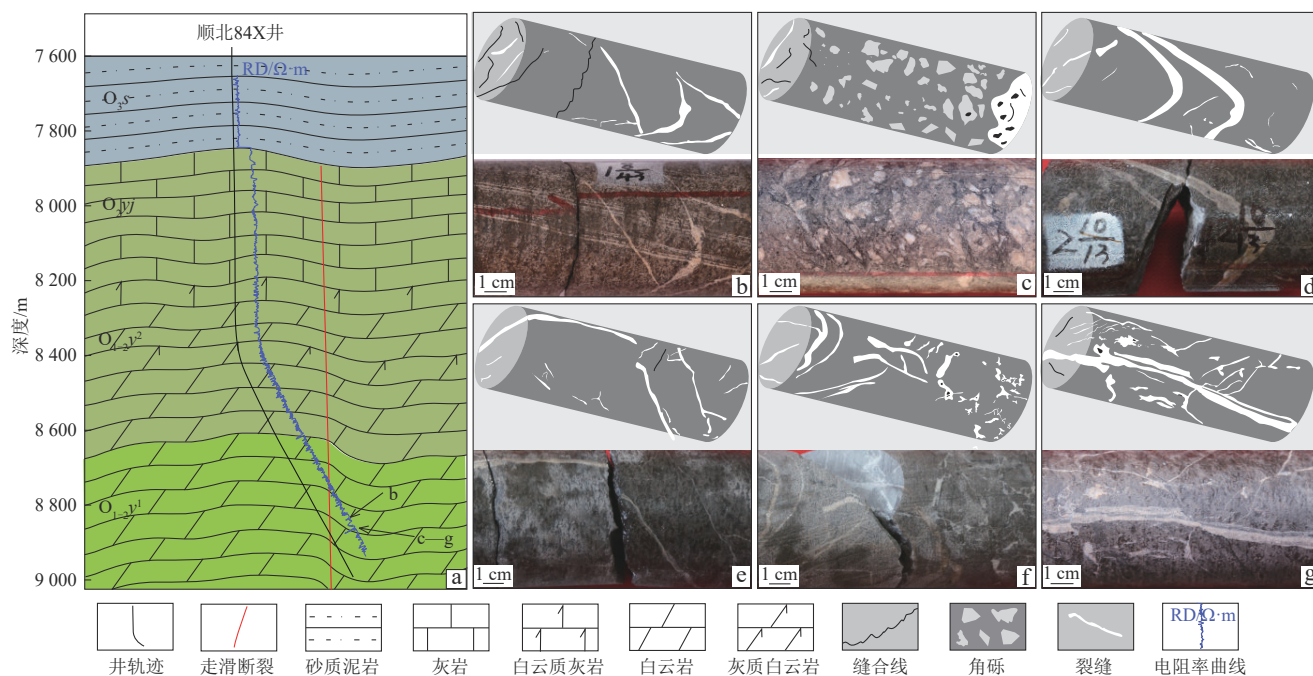


图7 顺北地区顺北84X井断裂带附近岩心结构特征

Fig. 7 Structural characteristics of cores collected near the fault zone in well Shunbei 84X in the Shunbei area

- a. 取心位置示意图; b. 斜深 $9\,051.34 \sim 9\,051.57 \text{ m}$,深灰色含白云质泥晶灰岩,部分裂缝被充填; c. 斜深 $9\,088.12 \sim 9\,088.36 \text{ m}$,灰色含硅质泥晶灰岩,完整,发育巨洞,贯穿整个岩心,被次生方解石、硅质和有机质全填充,充填物颜色杂、形状杂乱和少量角砾状,具破碎带特征; d. 斜深 $9\,089.35 \sim 9\,089.56 \text{ m}$,灰色含砂屑泥晶灰岩,见两条平行缝被方解石全填充,缝宽 $3 \sim 10 \text{ mm}$,贯穿整个岩心,缝充填物中偶见角砾状,岩心表面局部发育伴生微裂缝,方解石全填充; e. 斜深 $9\,089.56 \sim 9\,089.88 \text{ m}$,灰色含砂屑泥晶灰岩,缝宽 $2 \sim 5 \text{ mm}$,被方解石全填充,局部伴生微裂缝并与其他裂缝交错分布; f. 斜深 $9\,092.16 \sim 9\,092.28 \text{ m}$,灰色含灰质粉晶白云岩,岩性分界明显,裂缝发育,连通性较差,大部分被灰白色半透明次生方解石全—半填充,局部呈网状分布,偶见角砾; g. 斜深 $9\,095.09 \sim 9\,095.32 \text{ m}$,灰色含白云质砂屑泥晶灰岩,小洞均被灰白色半透明次生方解石全充填

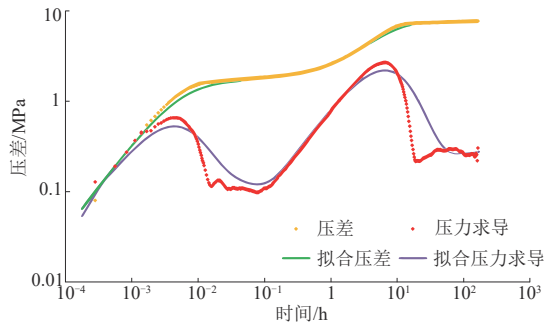


图8 顺北地区顺北84X井压力恢复双对数曲线拟合图

Fig. 8 Fitted log-log plot for pressure reconstruction of well Shunbei 84X in the Shunbei area

受深度控制,在深部仍存在强挤压破碎和较高的裂缝发育密度。

顺北84X井方解石脉体稀土配分曲线呈轻稀土相对富集,重稀土相对亏损的配分样式,其中Eu元素正异常指示成岩流体为深源热流体成因(图9f)^[30],轻稀土的相对富集指示深源富火成岩来源流体的混合作用,揭示在断裂深部热流体活动活跃,且在同样为深钻井的A14井同样可见断裂充填方解石具深源热还原型流体成因(图9c、e)。碳酸盐矿物存在随温度增高溶解度降低的矿物溶解度性质^[31-32],故在断裂带中存在碳酸盐岩热液流体则说明在深部存在欠饱和和矿物溶解区

带,即钻井揭示的储集层段与更深部的断控领域形成“下部溶蚀上部充填”的断裂-热流体叠加差异成储模式,这种模式主要受控于不同的区域地质背景提供不同深成流体、纵向岩性结构影响深成热流体运移和储集体的发育程度与规模受走滑断裂带的分段性和变形强度影响^[33]。

综合钻井放空漏失、测井、试井以及岩石学解释分析,顺北84X井深层钻遇的缝洞型储层是断裂和断控流体活动叠加改造的结果,也证实了前期预测断裂带在中-下统奥陶统仍发育优质储层的推断。

3.2.3 储层模式

在不同岩石力学性质的地层中,走滑断裂活动能够形成储集空间,但其构造变形特征存在显著差异。前人通过天然裂缝实验发现,天然裂缝发育密度与岩石样品脆性指数为正相关关系,而且在相同的脆性指数条件下,灰岩的裂缝发育能力比白云岩实际上更强。顺北地区在奥陶系一间房组-鹰山组碳酸盐岩建造中,灰岩地层的纵向厚度可达1 300 m;在奥陶系蓬莱坝组-寒武系下丘里塔格组中,白云岩地层的厚度约为1 500 m。基于构造破裂成储与纵向岩层物理性质,断控缝洞型储层的发育厚度等于脆性的灰岩和白云岩

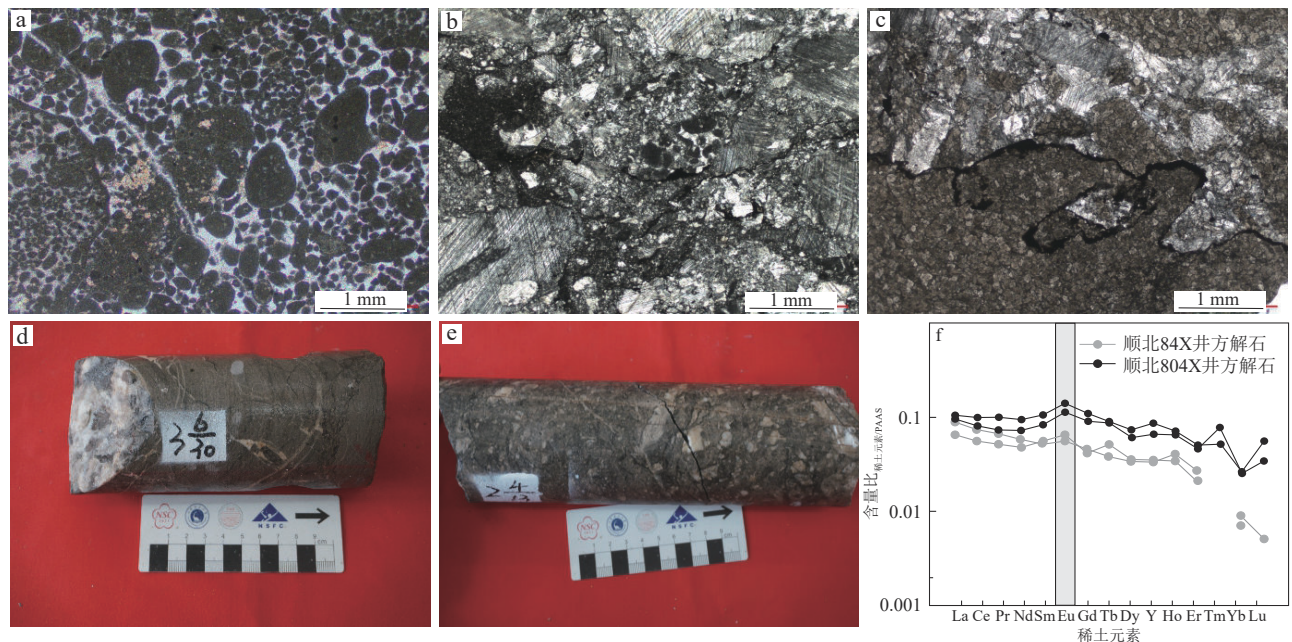


图9 顺北地区顺北84X井储集层段岩石学特征

Fig. 9 Petrological characteristics of the reservoir interval in well Shunbei 84X in the Shunbei area

a. 斜深9 053.45 m,砂屑灰岩,粒间嵌晶方解石胶结,证实钻遇高能相带;b. 斜深9 088.10 m,见杂乱破碎灰岩基质,中粗晶方解石脉体和围岩基质经历再破碎过程;c. 斜深9 093.50 m,见破碎带中断裂角砾,边缘可见岩溶缝合线发育,围岩为晶粒白云岩;d. 斜深9 088.12~9 088.36 m,岩心具图b中杂乱破碎结构特征;e. 斜深9 092.43~9 092.58 m,岩心见裂缝破碎现象,可见断裂角砾发育,镜下微观特征如图c所示;f. 断缝充填方解石脉体稀土元素配分曲线特征,与A14井中方解石对比,皆可见Eu的正异常,显示热流体来源特征

的岩层厚度的叠加,其中白云岩孔隙度较灰岩更大,油气在白云岩储层中可能存在横向运移调整的可能,但在脆性更大、裂缝发育程度更高的灰岩断控缝洞型储层中,致密围岩侧封能力强,油气横向调整能力弱,从而在纵向上形成的储层厚度较大的特征(图10)。

断控储集体分布与断裂带在平面上的分段、垂向上的分层差异关系密切。顺北84X井位于8号断裂带北段的走滑平移段,是断裂带有利储层的指向区。该井巨厚油气层的揭示体现出了超深层碳酸盐岩走滑断裂带成储在纵向上的巨大潜力。碳酸盐岩超深层走滑断裂带成储不局限在上部花状构造部位成储成藏,在下部构造收敛的主干断裂直立式断层附近也可规模成储成藏。

3.2.4 圈闭特征

顺北地区走滑断裂具有明显的“分层变形,分段演化,多期活动”的构造变形特征^[34],深层线性走滑断裂在剖面上表现为贯穿基底的高陡或直立走滑断裂,终止于上奥陶统碳酸盐岩顶界面^[34];浅层雁列正断层主要发育在上奥陶统一中-下泥盆统构造层、石炭系-二叠系构造层及中-新生界构造层,其分别对应加里东晚期-海西早期、海西中-晚期及喜马拉雅期的继承性滑移活动^[4,18]。雁列正断层具有明显成对分布的特征,雁列正断层侧向排列方向和下伏走滑断裂走向一致,具有明显的空间叠置关系,但雁列正断层之间以及与深层基底走滑断裂一般不连接,走滑断裂无法断穿

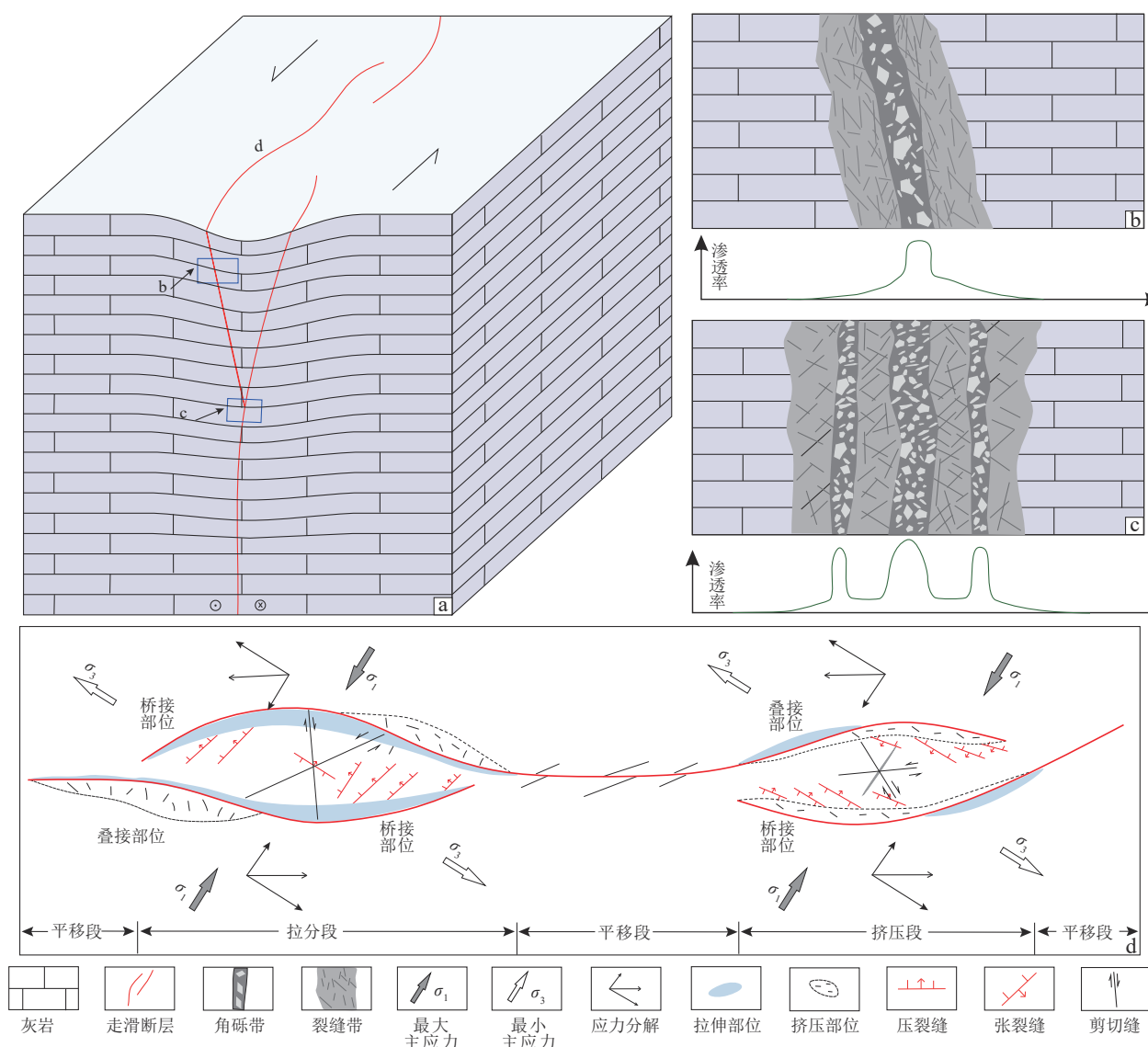


图10 顺北地区构造破裂成储机制(图b,c,d修改自文献[43])

Fig. 10 Mechanism of reservoir formation under tectonic disruption in the Shunbei area (Fig. 10b, c, and d modified from reference [43])

a. 走滑断裂空间结构示意图;b,c. 走滑断裂储集体纵向剖面结构示意图;d. 走滑断裂平面应力机制及裂缝发育模式

上覆泥岩盖层,垂向上能够形成封盖而聚集油气^[35-37]。

顺北断控缝洞型圈闭主体发育在致密的碳酸盐岩地层中,上覆巨厚泥岩具有超低孔隙度和渗透率,不利于油气运移,可有效防止油气向上逸散,具有良好的顶封条件。致密碳酸盐岩在构造破碎调整作用下形成断裂破碎结构体,能有效地降低围岩孔隙度与渗透率,形成良好的油气运聚空间,而未破碎致密碳酸盐岩可为油气保存提供良好的侧封条件。深层线性走滑断裂“多期活动、分段拼贴”构造变形在巨厚致密碳酸盐岩中形成一个空间非均质性极强的断控缝洞型储集体结构,从而形成的断控型圈闭具有纵向跨越深度大、横向非均质性强、不受局部构造形态控制和无统一油水界面的特点^[38]。

顺北84X井圈闭具备顺北断控缝洞型圈闭的全部特征,其独特性在于其超千米的含油气柱充注高度。研究发现,鹰山组厚度从顺北1号带向东到顺北18号带范围内,具有先减薄再增厚的特征。实钻井揭示的鹰下段白云质含量具有自西向东逐渐减少的特征,表明顺北中部地区的鹰山组下段白云化程度弱,主体以灰岩为主。顺北84X井钻后发现奥陶系鹰山组下段以碳酸盐岩为主,为砂屑灰岩,云质含量与鹰山组上段含量相当,与中段的A11井具有相似的岩性结构,指示研究区的鹰山组整体以致密灰岩为主,具有极强的侧封能力,油气没有发生明显的侧向运移调整,从而形成了纵向油气高度超千米的断控缝洞型油气藏。顺北84X井的勘探成果,揭示了顺北走滑断裂带具有原地烃源岩生烃强度大,垂向输导好、源储配置好、储集条件优越的特征,具备形成超千米含油气的断控缝洞型成藏优越条件。

3.3 油气藏特征与模式

顺北地区下寒武统玉尔吐斯组烃源岩以黑色页岩和硅质页岩为主,有机碳含量为1.0%~33.1%,平均为11.8%,在海西晚期处于生高成熟油-凝析油气阶段,印支期-喜马拉雅期处于生凝析油气-干气阶段,生烃潜力大,为顺北油气田大型油气藏的形成提供了丰富的物质基础^[4,7,17,37]。前文顺北84X井原油地化指标分析结果也表明该井中部分气态烃为晚期充注,进一步证明了玉尔吐斯组主力烃源岩燕山期以后仍处于规模生烃阶段,多期持续供烃。

顺北勘探实践及前期研究成果表明,顺北地区奥陶系高产和稳产井均沿走滑断裂带展布,断裂构造活动对奥陶系碳酸盐岩储层发育及油气富集具有重要的控制作用^[3-4,9,17-18,39]。顺北北东向走滑断裂带多期继

承性活动,断裂向下断穿寒武系底界,向下沟通玉尔吐斯组烃源岩,向上穿过膏盐岩封挡层在致密碳酸盐岩中构造破碎形成储集层。断裂在构造活动开启期时可为深部烃类等多流体提供油气运聚的输导通道和储集空间^[17,37,40],烃源岩排烃期与断裂活动期的时空耦合关系控制了断控缝洞型油气藏的立体成藏过程。顺北8号断裂带位于顺托果勒中东部的中心位置,经历了加里东中期I幕主滑移带形成期、III幕主滑移带分段结构形成期,加里东晚期-海西早期和海西中-晚期继承性雁列断层活动期,垂向贯穿整个古生界,整体与顺北1号带、顺北4号带等空间结构样式一致,均具有典型的平面三段式结构与纵向分层变形特征。多期构造活动改造形成了超深断控缝洞型储层。

顺北8号走滑断裂持续多期活动,断裂通源性好,而原地烃源岩晚期持续生烃,有利于油气垂向运聚成藏。流体包裹体等资料分析表明,顺北8号带存在多期油气充注,多期成藏的特征,揭示了整个条带的油气充注强度大。从北至南轻烃参数显示C₁₀-C₂₅损失量增加,指示着油气藏的蒸发馏分增强,推测顺北8号带可能受到天然气侧向运移局部调整的影响。

顺北84X井原油、天然气性质和井流体分类组成特征显示其流体性质属凝析气藏的范围。同时地层流体相态特征和定容衰竭过程中反凝析特征表明,该井为高含液烃的凝析气藏(图4)。通过与条带上较浅的钻井原油性质参数对比发现,顺北84X井原油密度浅层低于深层,干燥系数浅层高于深层,说明顺北8号带的油气均为垂向充注,但油气成藏期次和充注强度存在明显差异,油气成藏过程复杂,推测其存在晚期天然气充注导致浅层油气变轻。顺北8号带原油密度、含硫量、含蜡量和天然气密度、CH₄含量与西侧顺北4号带、东侧顺北12号带规律一致,说明顺北中东部自西向东油气成熟度逐渐变高,同时油气藏性质也从凝析气藏变成干气藏。顺北8号带原油性质沿断裂带具有南低北高特征,证明顺北8号带南段油气的成熟度及演化程度要高于北段。

顺北84X井地化指标指示,顺北东部地区深层主力烃源岩来自本地寒武系。根据金刚烷参数,该井原油等效镜质体反射率为1.3%~1.6%,属于高成熟范围;以(3-+4-)甲基双金刚烷20 μg/g的浓度作为顺北地区海相奥陶系原油的基线浓度,对原油中金刚烷绝对定量折算,原油裂解率C₂% (乙烷含量)为62.70%;通过气/油比折算,原油裂解率C₁% (甲烷含量)为77.01%,天然气成分以甲烷和乙烷为主,成熟度较高,表明顺北84X井中部分气态烃为晚期充注,晚期充

注占比为8.15%,进一步证实了顺北东部多期成藏的观点。从而建立了顺北东部深层“寒武系原地供烃、断裂控储控藏、多期油气充注”的成藏模式,为未来向特深层勘探奠定了理论基础。

4 顺北84X井重大发现启示

4.1 9 000 m以深仍发育断控缝洞型规模储集体

顺北断控缝洞型储层是指发育在巨厚致密碳酸盐岩地层内部,依靠走滑断裂带的构造破裂、岩体错动、破碎增容作用为主,同时叠加多类型流体改造形成的受断裂带控制的、具有勘探开发经济价值的裂缝-洞穴型储集体。顺北断控缝洞型储集体的储集空间主要为断层空腔和构造裂缝^[41],其主要受控于走滑断裂带内部的“剪切构造破裂、岩体错动增容”成储机制,赋存于小尺度的走滑断裂带的核带空间结构中,表现形式为断层空腔、未被充填的构造破碎带和连通裂缝破碎带^[42]。前人通过断裂的构造样式、侧接方式和应力分布等特征分析,提出了走滑活动位移量大的平移段中部和叠接段是规模储集体优势发育位置^[43],其研究主要集中在断裂带平面,顺北84X井在近千米的储层中获得油气突破,为断控储集体垂向构造破碎成储能力评价提供了研究基础。

顺北地区奥陶系碳酸盐岩顶界面埋深普遍大于7 200 m,不同断裂带埋深存在一定差异:北边的1号带埋深介于7 256~7 637 m,进山深度89~655 m,最大揭示碳酸盐岩深度8 100 m;4号带埋深介于7 382~7 762 m,进山深度237~783 m;8号带埋深介于7 473~8 018 m,进山深度195~1 088 m,最大揭示深度近9 000 m;12号带埋深介于7 137~7 518 m,进山深度291~519 m,最大揭示深度约8 000 m,自西向东整体表现为先加厚再减薄的特征,在顺北8号带附近埋深最大。顺北84X井在近9 000 m埋深的碳酸盐岩中钻遇规模储集体,指示板内小尺度走滑断裂在刚性地层中的垂向构造破碎成储能力不受深度加深的控制,主要存在4个可能的控制因素(图10):①板内小尺度走滑断裂为深层动力驱动机制,其破裂成储的过程均受到深部应力控制,走滑断裂生长过程就是由深层直立走滑向浅层逐渐延伸并不断撕裂上覆地层的过程,深层断裂活动强度大,深切基底的走滑断裂带主位移带及相应破碎带成储不受深度限制,碳酸盐岩地层走滑断裂带在横向和纵向上的非均质性决定了研究区不同于碎屑岩地层的空间成储机制。②走滑断裂具有多期

活动的特征,深层断层在多期活动过程中对早期的构造破碎带具有明显的改造调整作用,有利于储集体形成与保存。③走滑断裂具有独特的空间结构与应力分布特征,相比于浅层花状构造存在局部的垂向应力作用,深层线性走滑主体以水平剪切走滑活动为主,垂向上深层断裂比花状构造活动强,演化程度高,成储能力相对也更强。④数模、物模和野外露头^[44]均指示走滑断裂在不同岩石力学性质的地层中具有差异构造变形特征,顺北8号带奥陶系碳酸盐岩整体为刚性地层,特别是致密的灰岩地层在走滑剪切应力作用下,主要表现为块体的破碎与块体间滑动调整,利于储集体空间的形成,从而形成了纵向高度超千米的断控储集体。

4.2 断控缝洞型油气藏的油气柱高度大

走滑断裂对致密碳酸盐岩储层发育起着关键的作用^[45],尤其是由一系列断层组成的规模较大的断裂带,对储层的改造作用更加明显,形成超深层规模性断控储集体,深部构造本身可形成规模优质储集层,且伴生流体活动可以改善或破坏先期储集层质量^[46]。顺北油田从顺北1号断裂带开始,到4号、8号和16号等断裂带中勘探开发井均获得工业油气流,各断裂带最大进入碳酸盐岩目的层的最大深度从1号断裂带的512 m(A2井)到4号断裂带的685 m(A4井),包括走滑断裂带之外的大于800 m A6和A7等井,以及顺北84X井揭示的进山垂深1 088 m,无一不说明构造破碎成储在纵向上不受深度控制。

随着顺北1号带油藏的规模生产动用,发现早期具有明显分隔性的油气藏在后期的开采过程中出现了连通,指示着油气藏的分布可能受控于走滑断裂带的垂向空间结构,具有“浅层分隔深部连通”的特点(图11)。顺北1号带由南向北部署的钻井多以浅层花状构造断裂面为目标,早期的生产测试和干扰试井揭示浅层的油藏存在明显的分隔性,后期随着生产压差的减小和浅层油藏的充分动用,深层油气藏逐渐沿着走滑断裂带这一“高速通道”参与供给,整个油气藏具有全连通的趋势,揭示油气藏可能在深层具有一个连通的通道,推测可能为走滑断裂向深层汇聚的统一主滑移面。浅层多个油气藏地化特征均指示油源为原地寒武系玉尔吐斯组烃源岩,证明油气沿着走滑断裂带自下向上成网状系统向上充注,深层油气勘探潜力巨大。顺北8号带的顺北84X井证实了断控缝洞型油气藏具有1 088 m的含油气高度,这一认识为其他条带深层的油气勘探提供了新的方向,坚定了向深层持续勘探的信心。

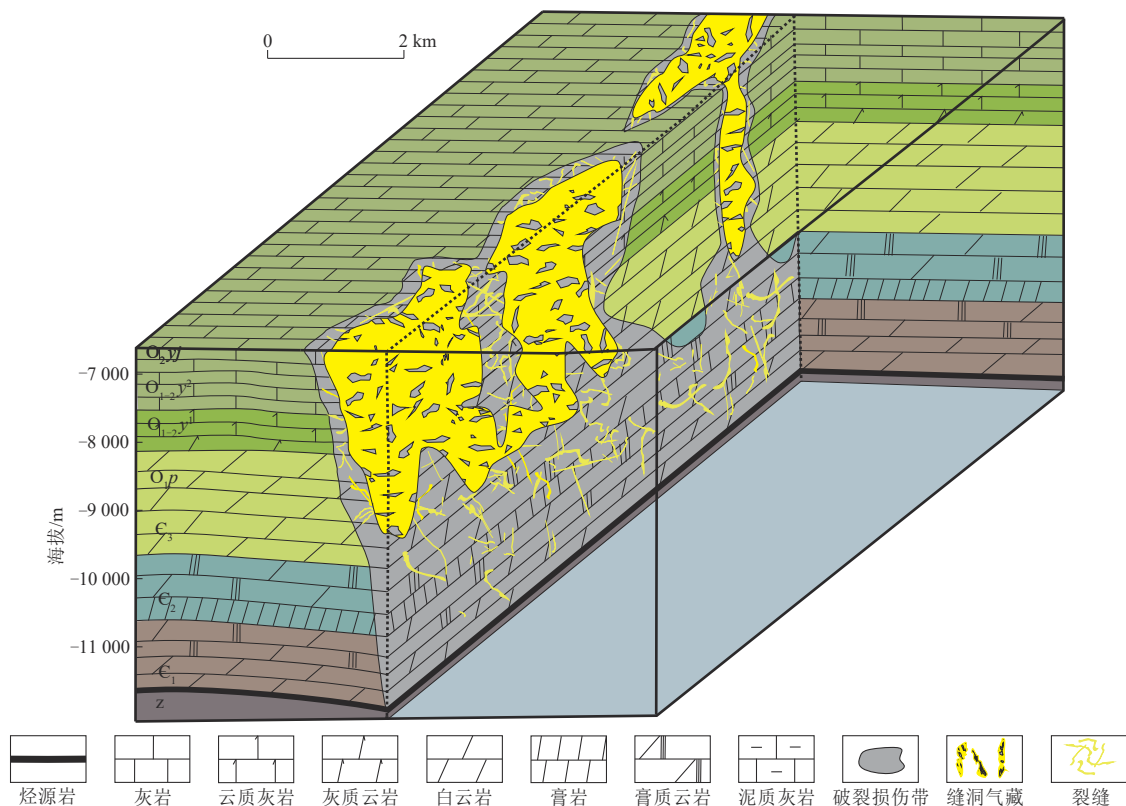


图11 顺北地区断控缝洞型油气藏垂向特征

Fig. 11 Vertical characteristics of fault-controlled, fractured-vuggy hydrocarbon reservoirs in the Shunbei area

4.3 成藏条件优越,超深层-特深层拓展潜力大

顺托果勒低隆起北东向走滑断裂体系位于环满加尔坳陷油气系统西南缘指向区,与塔北油气系统和塔中油气系统共同构成一个超大整装连片的油气富集区,深层奥陶系与寒武系海相碳酸盐岩盐上、盐间和盐下组合成藏条件优越,其中断控缝洞型领域是目前超深层勘探开发的重点领域,其油气成藏富集优势体现在以下几个方面:①处于下寒武统玉尔吐斯组烃源岩发育的优势相带,原地烃源岩具有分布面积广、生烃强度大和排烃能力强的特点^[47];②寒武系-奥陶系碳酸盐台地建造继承性发育,沉积了近3 000 m厚的碳酸盐岩和1 500 m厚的泥岩地层,形成了独特的白云岩-膏盐岩-白云岩-灰岩-泥岩的纵向岩性组合地层结构,其中膏盐岩与泥岩可以提供横向顶封的盖层,与巨厚的云岩与灰岩组成多个纵向结构完整的储-盖组合;③走滑断裂构造破碎成储能力强,其能改变碳酸盐岩储层物性条件形成规模储集体,尤其是在致密灰岩地层中形成侧封能力极强仅分布在断裂带内部的断控储集体,同时断裂还能为油气运聚提供通道,不仅在纵向上能沟通深层优质烃源岩,还能突破深层膏盐岩的封堵,向上汇聚在断裂内部的断控储集体中;④顺托果勒

低隆起中奥陶统一间房组顶面构造平缓,东西向坡度为 0.13° ,南北向坡度为 0.10° ,油气沿断裂带侧向输导的动力极小,有利于油气原地沿断裂带富集,形成纵向近千米的板状油气藏;⑤源-储-盖的时-空配置关系良好,顺北地区断裂构造主要存在加里东中期、加里东晚期-海西早期和海西中-晚期3期活动,基于U-Pb定年和包裹体数据揭示烃源岩生、排烃期与油气成藏期为加里东晚期、海西晚期-印支期和燕山期-喜马拉雅期,整体时空配置关系好,为顺北油田规模成藏提供了充足的物质基础,有利于油气沿通源走滑断裂持续充注,形成了油气充足、油气柱高度大的断控缝洞型油气藏。

近年来,部署在塔里木盆地和四川盆地的一批超深井获得了重大油气突破,其中塔里木盆地台盆区顺北-富满断控缝洞型油气田储层埋深大于7 500 m^[3-4,6],同时部署在顺北外围区深度超过8 000 m的探井,如塔深1井、塔深5井和轮探1井也在奥陶系-寒武系中发现了孔隙型白云岩储层,证实了超深层仍发育多种优质储集体^[45,48],说明深层-超深层碳酸盐岩油气藏勘探潜力巨大。顺北84X井超千米含油气的勘探发现与高产,进一步完善了走滑断裂构造破碎成储机制,为超深层油气勘探提供了一定的理论支撑。顺北中、东部地

区发育多条主干走滑断裂带,向东断裂带上的鹰下段和蓬莱坝组地震能量异常明显优于一间房组和鹰上段,同时在断裂带间和次级断裂带附近能见大量的地震能量异常发育于鹰山组下段及蓬莱坝组中,揭示了深层断控缝洞型油气藏勘探的巨大潜力。顺北84X井超千米的油气层和近两千米的含油气高度揭示了顺北及邻区生烃能力强、油气充注强度大;在断裂活动较弱的膏盐岩发育区,油气纵向难于突破膏盐岩封堵,可能在白云岩储层中发生侧向调整运移聚集,因此,盐间和盐下寒武系储-盖组合勘探潜力同样巨大。顺北84X井的重大突破,坚定了向超深层油气勘探的信心,同时形成的地质认识与工程技术对万米领域的油气勘探具有重要的理论与技术支撑。

5 结论

1) 顺北84X井的重大突破,进一步拓宽了顺北断控缝洞型油气藏的含油气底界深度,查明了顺北地区下奥陶统断控型储集体的内部结构特征,证实了断裂破碎成储机制下,走滑断裂带断裂破碎作用在厚层灰岩中形成了有效的断控缝洞型储集体,储集体发育一定程度上不受深度限制。

2) 顺北84X井钻揭指示断控缝洞型油气藏充注高度大,基于甾烷类生物标志化合物明确其主力烃源岩与玉尔吐斯组烃源岩具有良好的亲缘性,进一步深化了断控缝洞型储集体“原地烃源、垂向输导、多期充注”的成藏模式。

3) 顺北断控缝洞型油气藏的储层主要受控于断裂构造破碎作用,其“垂向沟通油、源,多期活动的高陡断裂”为原地烃源岩多期充注提供了保障,巨厚致密的碳酸盐岩地层具备良好的侧向封堵条件,结合上覆的区域盖层,形成储-盖条件极其优越的圈闭条件,表明深层具备良好的油气成藏条件,为超深层万米领域勘探提供了理论与技术支撑。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[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.

[3] 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.

[4] 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 & Experiment, 2023, 45(1): 20-28.

[5] 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.

[6] 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.

[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] 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, 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(5): 990-998, 1073.
DENG Shang, LI Huili, HAN Jun, et al. Characteristics of the central segment of Shunbei 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin and its geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(5): 990-998, 1073.

[10] 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.

[11] 李凤磊, 林承焰, 崔仕提, 等. 塔北地区奥陶系古地貌及走滑断裂差异性控储规律[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022, 46(6): 48-58.
LI Fenglei, LIN Chengyan, CUI Shiti, et al. Analysis on difference

- of ordovician fracture-cavity reservoirs controlled by ancient landform and slip fault in Tabei area, Tarim Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022, 46(6): 48-58.
- [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] 吕海涛, 韩俊, 张继标, 等. 塔里木盆地顺北地区超深碳酸盐岩断溶体发育特征与形成机制[J]. 石油实验地质, 2021, 43(1): 14-22.
LYU Haitao, HAN Jun, ZHANG Jibiao, et al. Development characteristics and formation mechanism of ultra-deep carbonate fault-dissolution body in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(1): 14-22.
- [14] 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.
- [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] 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.
- [17] 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.
- [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. Tectonic evolution and structural style of tarim basin[J]. Earth Science, 1994, 19(6): 742-754.
- [20] 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.
- [21] 樊太亮, 高志前, 吴俊. 塔里木盆地深层碳酸盐岩建造—改造作用与多类型储层有序性分布[J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 1-18.
FAN Tailiang, GAO Zhiqian, WU Jun. Formation and modification of deep-burial carbonate rocks and orderly distribution of multi-type reservoirs in the Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 1-18.
- [22] 吕海涛, 张峭楠, 马庆佑. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨[J]. 石油实验地质, 2017, 39(4): 444-452.
LYU Haitao, ZHANG Shaonan, MA Qingyou. Classification and formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2017, 39(4): 444-452.
- [23] 伍藏原, 陈文龙. 利用试井数据确定凝析气藏气水界面位置[J]. 油气井测试, 2004, 13(3): 16-17.
WU Cangyuan, CHEN Wenlong. Determining depth of gas and water interface in condensate gas reservoir using test data[J]. Well Testing, 2004, 13(3): 16-17.
- [24] 翟晓先, 顾忆, 钱一雄, 等. 塔里木盆地塔深1井寒武系油气地球化学特征[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 329-333.
ZHAI Xiaoxian, GU Yi, QIAN Yixiong, et al. Geochemical characteristics of the Cambrian oil and gas in Well Tashen 1, the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2007, 29(4): 329-333.
- [25] 王招明, 谢会文, 陈永权, 等. 塔里木盆地中深1井寒武系盐下白云岩原生油气藏的发现与勘探意义[J]. 中国石油勘探, 2014, 19(2): 1-13.
WANG Zhaoming, XIE Huiwen, CHEN Yongquan, et al. Discovery and exploration of Cambrian subsalt dolomite original hydrocarbon reservoir at Zhongshen-1 Well in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2014, 19(2): 1-13.
- [26] 侯杰杰, 肖中尧, 唐友军, 等. 柯克亚油气田混合来源天然气的地球化学特征[J]. 天然气地球科学, 2003, 14(6): 474-479.
HOU Dujie, XIAO Zhongyao, TANG Youjun, et al. Geochemical characterization of mixing natural gas in Kekeya field, Tarim Basin, China[J]. Natural Gas Geoscience, 2003, 14(6): 474-479.
- [27] 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.
- [28] PETERS K E, MOLDOWAN J M. The biomarker guide: Interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments[M]. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice Hall, 1993: 1-363.
- [29] 王清华. 塔里木盆地富满油田凝析气藏成因[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1128-1139.
WANG Qinghua. Origin of gas condensate reservoir in Fuman Oilfield, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1128-1139.
- [30] 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.
- [31] MACHEL H G. Effects of groundwater flow on mineral diagenesis, with emphasis on carbonate aquifers [J]. Hydrogeology Journal, 1999, 7(1): 94-107.
- [32] WARREN J. Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations [J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1/3): 1-81.
- [33] 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.
- [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 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.
- [35] 段太忠, 张文彪, 何治亮, 等. 塔里木盆地顺北油田超深断溶体深度学习地质建模方法 [J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(1): 203-212.
- DUAN Taizhong, ZHANG Wenbiao, HE Zhiliang, et al. Deep learning-based geological modeling of ultra-deep fault-karst reservoirs in Shunbei oilfield, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(1): 203-212.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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, 2023, 25(6): 1257-1276.
- [47] 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.
- [48] 马永生, 黎茂稳, 蔡勋育, 等. 海相深层油气富集机理与关键技术基础研究进展 [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.