

塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏 发现意义与前景

焦方正

(中国石油化工股份有限公司,北京 100029)

摘要:塔里木盆地顺北地区埋深7 000 m以下特深碳酸盐岩领域获得重大油气突破。通过对顺北特深油气田的构造演化、储层、油气藏特征与油气富集规律等的综合分析,认为该类油气藏为断溶体油气藏,具有沿断裂带整体含油、不均匀富集的特点。走滑断裂多期活动与流体溶蚀改造作用在中-下奥陶统碳酸盐岩层系形成良好的洞穴、裂缝及沿缝溶蚀孔洞型储集体;断裂带外围致密碳酸盐岩作为侧向封挡构成了物性圈闭。上覆巨厚却尔却克组泥岩作为区域封盖层,源自下寒武统的油气沿走滑断裂垂向运移聚集,以晚期成藏为主,断裂既是油气运移通道又是油气富集场所。该类型油气藏的发现展现了一种新的特深层油气富集成藏模式。目前,顺北油气田已发现落实了18条走滑断裂带,资源规模达 17×10^8 t油当量,展示了顺北地区良好的勘探开发前景。

关键词:特深层;碳酸盐岩;断溶体;油气藏;顺北地区;塔里木盆地

中图分类号:TE122.3

文献标识码:A

Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin

Jiao Fangzheng

(China Petroleum and Chemical Corporation, Beijing 100029, China)

Abstract: Oil and gas reservoirs discovered in the ultra-deep carbonates of a burial depth larger than 7 000 m in Shunbei area of Tarim Basin have gained attention from the industry. A comprehensive study was then carried out on the tectonic evolution, reservoir characteristics and oil and gas accumulation patterns in the area. The results show that the reservoirs are of fault-karst type, featuring pervasive distribution but uneven enrichment of oil in the whole fault zone. With caverns, fractures and along-fracture dissolved pores and vugs formed by multi-stage strike-slip faulting as well as dissolution and alteration, the Middle-Lower Ordovician carbonates were wonderful reservoirs with favorable properties. Tight carbonates at the periphery of the faulting zone served well as lateral barriers for the formation of lithologic traps. The overlaying massive mudstone in Queerqueke Formation was the regional seal, which capped the hydrocarbons being sourced from the Lower Cambrian and migrating up along the strike-slip faults. The accumulations were mostly formed at late stage. The faults acted both as hydrocarbon migration pathways and accumulation spots. The discovery of the reservoirs demonstrated a new hydrocarbon reservoiring pattern in the ultra-deep sequences. About 18 strike-slip faulting zones were identified in the area with a resource volume as high as 17×10^8 t oil equivalent, indicating a bright exploration and development future in the area.

Key words: ultra-deep layer, carbonate, fault-karst, oil/gas accumulation, Shunbei area, Tarim Basin

塔里木盆地面积大,油气资源丰富,其中以塔北的沙雅隆起和塔中的卡塔克隆起油气成果最为显著^[1-4]。随着勘探技术的进步,特别是沙漠地震勘探与钻井技术的发展,特深层、深层获取了较好的地震资

料^[5-8],7 000~8 000 m井深能够安全、快速地完钻,深层与特深层的油气逐步被发现。通过“十二五”期间的艰苦探索,油气勘探逐步向斜坡区、坳陷区进军,特别是近年来一批新的特深层含油气带被证实,发现

了新的油气田^[9-10]。本文试图通过新油气田的解剖,旨在为特深层、深层油气勘探提供借鉴。

塔里木盆地是典型的叠合盆地,古隆起、古斜坡是油气富集的有利部位,围绕古隆起、古斜坡的油气勘探取得了丰硕的成果^[11-14]。在此思想的指导下,在巴楚隆起、和田古隆起及卡塔克隆起高部位相继获得油气突破,但未取得实质性的规模发现。在加强盆地成藏关键问题研究的基础上,逐步认识到盆地北部、东部广泛发育下寒武统斜坡-盆地相烃源岩,盆地北部下古生界发育完整的生-储-盖组合,多期断裂活动为油气运移、聚集提供了有利条件,成藏条件优越。在此基础上,加强对断裂带的刻画和评价,部署实施了新三维地震勘探,优选实施了探井。SHB1井的钻探进一步证实,中-下奥陶统碳酸盐岩发育超深层缝洞型储集体,存在油气成藏。为进一步落实规模,针对1号断裂部署实施了7口钻井,均获得高产油气流。至此,一个新的油气田(顺北油气田)被发现。

1 区域地质概况

顺北油气田主体位于顺托果勒低隆起(图1),其东南延伸至古城墟隆起的顺南斜坡。顺托果勒低隆起北连沙雅隆起,南接卡塔克隆起,东邻满加尔坳陷,西接阿瓦提坳陷。顺托果勒低隆起经历多期复杂的沉积构造演化,为多期缝洞型储层发育和油气成藏富集提供了良好的地质条件。

寒武纪一中奥陶世,顺托果勒地区为海相泥质烃源岩与碳酸盐岩台地沉积期。早寒武世早期塔里木板块周缘快速拉张裂陷,顺托果勒地区发育了一套斜坡-陆棚相的玉尔吐斯组优质烃源岩^[15]。其后转变为弱伸展背景下的区域性稳定构造沉降,发育了一大套台地相的碳酸盐岩地层,与塔中和塔北地区连为一体。碳酸盐岩建造呈现多旋回性,发育多期与沉积间断相关的不整合和大气淡水岩溶作用,形成多层系、广

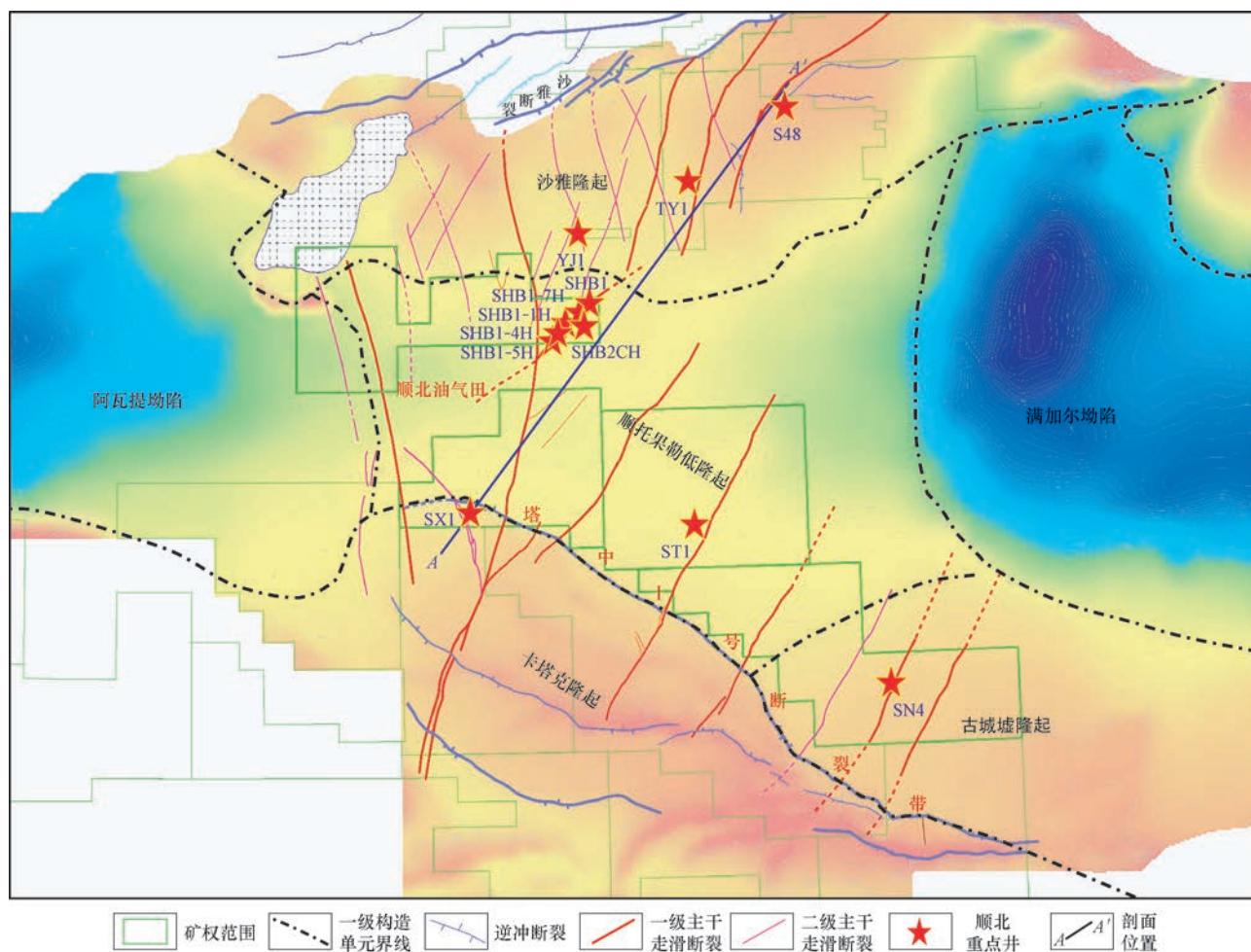


图1 塔里木盆地顺北油气田构造位置

Fig. 1 Location of Shunbei oil and gas field, Tarim Basin

泛分布的岩溶缝洞型储层。此时,顺托果勒东北部的满加尔坳陷区为盆地相沉积,发育一套寒武系—中奥陶统烃源岩。

中奥陶世末(加里东中期Ⅰ幕)作为构造—沉积性质转换的重要时期,对顺托果勒低隆起沉积演化具有重要控制作用。这一时期卡塔克隆起整体隆升,形成大型复式背斜构造——沙雅隆起雏形。顺托果勒低隆起处于两大隆起之间的相对复向斜区,形成近南北向的构造低隆带。

加里东中期,顺托果勒低隆起在南北向和北东向应力共同作用下形成了北东和北西向走滑断裂系统,此时基本奠定了该区的断裂体系格架。走滑断裂剖面上表现为陡直的直立断层或正花状构造,向下断穿寒武系或断至寒武系内部,向上多数断至中—下奥陶统顶面附近,消失在塑性的上奥陶统泥岩中;平面上多呈线状延伸或雁列式排列。复杂的走滑断裂体系为断溶体的形成奠定了基础。

晚奥陶世,受全球性海侵事件影响,顺托果勒低隆起结束了碳酸盐岩台地建造,转变为混积陆棚,沉积巨厚泥岩地层,形成广泛分布的优质区域盖层。优质的生—储—盖组合使顺托果勒低隆起具备形成古生界大型碳酸盐岩油气田的石油地质条件。

奥陶纪末(加里东中期Ⅲ幕),满加尔坳陷经历了强烈的构造运动,结束了库—满拗拉槽的发育历史^[16-17]。顺托果勒低隆起南北两侧受到挤压抬升,造成沙雅、卡塔克隆起全面形成,顺托果勒构造低隆形态进一步强化。

志留纪—泥盆纪(加里东晚期—海西早期),受中昆仑岛弧与中昆仑地体间的持续碰撞和阿尔金造山带强烈的挤压作用,塔中地区冲断与走滑构造变形进一步加强,顺托果勒低隆起一系列北东和北西向走滑断裂继承性发育,向下断穿寒武系,向上扩展至中—下泥盆统,断裂带延伸长且断裂破碎带宽、变形复杂,沿主断裂带附近发育一系列撕裂构造、羽状构造,沿断裂带碳酸盐岩断溶体储层规模进一步扩大。走滑断裂陡直,沟通寒武系底部优质烃源岩与碳酸盐岩断溶体,成为油气运聚、富集的有利构造区带。

石炭纪—二叠纪(海西中—晚期),塔里木板块北缘与伊犁—中天山陆块发生了强烈的斜式碰撞事件,造成顺托果勒低隆起进一步抬升,隆起高点向东发生了明显迁移。顺托果勒低隆起西部中二叠统广泛发育火成岩,前期断裂继承性活动与叠加改造,同时这期的热事件也造成深部富硅高温热流体沿碳酸盐岩裂缝带储层进行了溶蚀改造。这种埋藏热液溶蚀改造特征在

顺南至顺北地区较为明显,且分布广泛。

三叠纪—白垩纪(印支期—燕山期),顺托果勒地区一直处于陆内坳陷的沉积格局,持续深埋,后期多幕次的构造运动未造成大的构造变动,至喜马拉雅期形成现今构造格局。

顺托果勒低隆起经历海西晚期—喜马拉雅期多期成藏,喜马拉雅期为主要油气成藏期。加里东中期之后低隆起始终处于油气运移指向区,海西晚期及之前形成的各类缝洞型圈闭与主成藏期时—空匹配性好,走滑断裂多期活动,成为主成藏期优势运移通道,该低隆起具备形成大型油气田的地质条件。

2 储集层特征

2.1 储集空间类型

顺托果勒地区奥陶系碳酸盐岩主要储层发育段为一间房组(O_2y)—鹰山组上段。储层原生储集空间多已破坏殆尽,现今有效储集空间以次生储集空间为主,包括高陡断层相关洞穴(表现为钻井放空或泥浆漏失)、高角度构造缝(图2a,f)、扩溶或充填残余缝(图2k,l)、溶蚀孔洞(图2c,g,h)、晶间孔隙(图2d,e)及微裂缝(图2i)等多种储渗空间类型,形态多样,大小悬殊,分布不均。其中,与走滑断裂相关的洞穴、构造缝及沿缝溶蚀孔洞是主要的储集空间类型。

顺托果勒地区储层在主干断裂带上最为发育,次级断裂带储层发育程度变差。顺北1号断裂带部署的7口钻井均在一间房组顶面之下80~100 m附近发生放空或漏失,取心段储层质量一般,仅发育少量高角度裂缝(图2a),裂缝为沥青、方解石和黄铁矿等全充填—半充填(图2b),此外还发育微裂缝及少量溶蚀孔洞(图2c)。

顺北2井位于次级断裂带上,实钻储层质量较差,未钻遇放空或漏失,油气显示弱。常规测井、成像测井和取心段研究表明,该井主要储层发育段为一间房组中下部及鹰山组内幕。其中,一间房组中下部测井解释以Ⅱ—Ⅲ类储层为主,成像测井见少量高导缝,诱导特征明显(图2f);取心段第四回次储层物性相对较好,全直径物性分析平均孔隙度为2.22%,平均垂直渗透率为 $0.07 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,两个方向的平均水平渗透率为 $3.51 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $3.71 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,明显好于其余5个回次取心段的物性。鹰山组内幕储层发育段主要集中在井底附近,侧钻井段在鹰山组内幕油气显示与电阻率对应关系良好,在测井上表现出尖峰状低阻、GR异常及RD、RS双轨特征;岩心观察证实储层主要

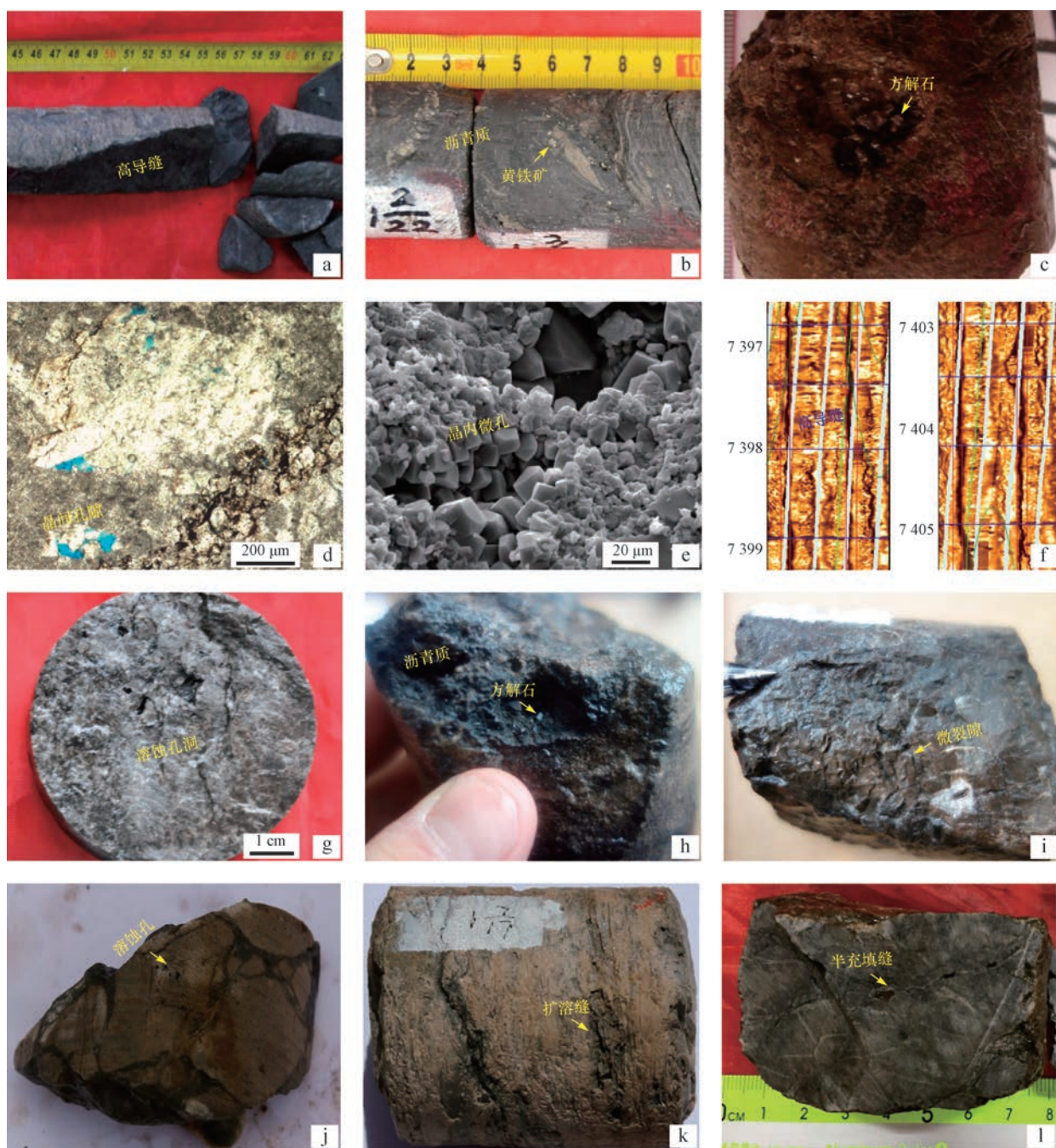


图2 塔里木盆地顺北地区奥陶系一间房组储层储集空间特征

Fig. 2 Characteristics of pore space in the Ordovician carbonates, Shunbei area, Tarim Basin

a. 高角度裂缝, 顺北1-3井, 埋深7 268.90~7 269.11 m; b. 裂缝中充填沥青质, 层状分布硅质及分散状黄铁矿, 顺北1-3井, 埋深7 265.10~7 265.15 m; c. 溶蚀孔洞, 结晶方解石半充填, 顺北1-3井, 埋深7 278.76~7 278.92 m; d. 泥晶藻屑灰岩孔洞中方解石重结晶及晶间孔隙, 顺北2井, 埋深7 443.57 m; e. 亮晶藻屑灰岩中藻屑颗粒内的粒内微孔, 发育晶间微孔隙, 顺北2井, 埋深7 446.62 m; f. 成像测井中的高导缝, 诱导特征明显, 顺北2井, 埋深7 397~7 405 m; g. 泥晶藻屑灰岩中的溶蚀孔洞, 方解石及白云石半充填, 顺北2井, 埋深7 737.52~7 737.60 m; h. 藻凝块灰岩中的溶蚀孔洞, 方解石与沥青质半充填, 顺托1井, 埋深7 707.39~7 707.47 m; i. 藻屑泥晶灰岩, 高角度裂缝面见层状微裂隙, 顺托1井, 埋深7 863.54~7 863.61 m; j. 垮塌角砾结构, 可见溶蚀孔, 泥质及沥青质充填裂缝, 见溶蚀孔, 顺北5井, 埋深7 332.17~7 332.27 m; k. 水平缝切割高角度缝, 裂缝具有扩溶特征, 顺北5井, 埋深7 331.31~7 331.36 m; l. 泥晶灰岩中剪切缝被方解石半充填, 顺北5井, 埋深7 425.04~7 425.08 m

储集空间为高角度裂缝及沿缝溶蚀孔洞(图2g)。

顺北5井位于北西向5号主干断裂带的压扭部位上。储层主要发育在一间房组和鹰山组, 测井解释以

Ⅱ-Ⅲ类储层为主。直井钻进过程中在深度7 514.30 m和7 554.63 m两处共漏失117.37 m³, 漏失段与测井解释的Ⅰ-Ⅱ类储层相吻合。侧钻井段截止完钻累计

漏失泥浆 1 313.43 m³, 在地震解释出的两个断面处先后放空 0.77 m 和 2.92 m。完井试油过程中, 压恢双对数曲线形态表现出近井筒有优质储集体发育、向远物性变差的特点。实钻取心显示基质孔渗较差, 可见多期裂缝发育, 一回次取心段顶部发育构造角砾和少量溶蚀孔隙, 另见泥质和沥青质充填裂缝(图 2j), 储集空间以未充填扩溶缝(图 2k)和半充填残余缝(图 2l)为主。

顺北油气田顺托地区奥陶系主要储层发育段为鹰山组上段, 以 ST1 井为代表。该井在一间房组钻遇良好油气显示, 取心储层质量较好, 主要储集空间有高角度裂缝、溶蚀孔洞(图 2h)及构造微裂缝(图 2i), 在鹰山组上段钻进过程中发生溢流后测试获高产油气流, 而鹰山组上段取心储层质量一般, 分析推测该段取心不能代表其真实储集能力, 其主要储集空间可能为与断裂带相关的缝洞体。

2.2 储层特征

顺北地区实钻揭示表明断裂带附近的钻井多钻遇放空和漏失。如顺北 1 号断裂带上的钻井在钻遇断裂带内异常反射集合体时均发生了放空或漏失, 其中顺北 1-2H 井放空 0.41 m, 顺北 1-3 井(侧钻)放空 0.84 m, 顺北 1-4H 井放空 0.41 m, 顺北 1-5H、顺北 1-1H、顺北 1-7H 和顺北 1-6H 井均有不同程度的漏失。此外, 部署在分支断裂带上的顺北 1-8H、顺北 1-9H 和顺北评 3H 井也钻遇漏失。上述单井测试均获得高产油气流, 表明沿断裂带储层质量较好, 明显受不同级别的断裂带控制。同时录井资料显示, 顺北地区位于断裂带上的单井在钻进过程中常出现钻时明显降低至 10 min/m 以下, 其分布与断裂及其伴生裂缝溶蚀扩大密切相关, 推测为大型断裂-洞穴型储集体。该类型储集体是顺北 1 井区目前所揭示的最重要的储集层类型和主要产层。特别是 1 号断裂带上的多口单井长期高产、稳产, 油压下降缓慢, 表明顺北地区储集体具有较大规模。

通过顺北 1 号断裂带立体雕刻分析, 能量强的大型洞穴型储层均沿断裂-裂缝体系发育, 从而证实顺北地区储层发育的特殊性, 即顺北地区奥陶系储层为发育在非暴露区、且受控于走滑断裂带的规模裂缝-洞穴型储层, 洞穴宽度相对较小(侧钻放空一般小于 3 m), 但具有横向延伸长、纵向深度大的优点。

2.3 储层成因

基于顺北地区奥陶系不同储集空间特征及其成因

的分析, 认为顺北地区中奥陶统碳酸盐岩储层发育主要受以下两方面因素控制。

2.3.1 构造破裂作用是储层发育的主控因素

顺托果勒地区主要储集空间为与走滑断裂相关的洞穴、构造高角度缝和沿缝溶蚀孔洞, 洞穴(钻井放空)主要发育在断裂带附近, 高角度缝以北东走向为主、与主断裂走向一致, 说明洞穴和高角度缝发育与走滑断裂多期活动有直接关系。

研究表明, 顺托果勒地区主要发育北东与北西向两组走滑断裂。加里东中期走滑断裂形成, 以压扭为主; 加里东晚期—海西早期走滑断裂持续活动, 以张扭为主; 海西中晚期—印支期继承性活动。走滑断裂带的多期持续活动及构造破裂作用是储层发育的主控因素, 断裂带多期活动形成了大型洞穴-裂缝系统, 也为后期大气水渗流及沿缝扩溶、埋藏溶蚀改造提供了有利通道, 有利于洞穴及溶蚀孔洞的形成^[18-21](图 3)。

2.3.2 溶蚀改造作用进一步促进储集体发育

1) 台内滩准同生溶蚀作用

顺北地区一间房组中下部—鹰山组顶部以发育台内滩相沉积为主, 岩性主要为亮晶藻屑灰岩(图 4a), 平均孔隙度 3.40%, 渗透率 $3.64 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 主要储集空间为藻屑内粒内微孔隙(图 2e), 分析认为可能与准同生暴露溶蚀作用有关(图 3)。

2) 断控岩溶作用

顺北地区岩心、薄片和包裹体测温显示, 藻屑灰岩溶蚀孔洞边部发育大气潜流带方解石(图 4c), 阴极薄片下呈不发光-弱发光特征(图 4b), 裂缝方解石胶结物中包裹体均一温度为 45~50℃(图 4d, e), 表明其形成于近地表环境, 可能与顺托果勒低隆起发育的断控大气水岩溶作用有关, 其发育时间可能为加里东中期。

3) 埋藏溶蚀作用

顺北 2 井鹰山组灰岩中常见硅质团块, 其形成晚于灰岩中早期自生白云石, 并伴有粒状黄铁矿, 说明存在埋藏流体改造, 储层发育可能与埋藏溶蚀作用有关^[22](图 3f)。

3 特深断溶体油气藏特征

顺北油气田是由一系列沿断裂带分布、埋深大于 7 000 m 的碳酸盐岩断溶体海相油气藏组成, 具有沿断裂带整体含油、不均匀富集的特点。断溶体圈闭由上

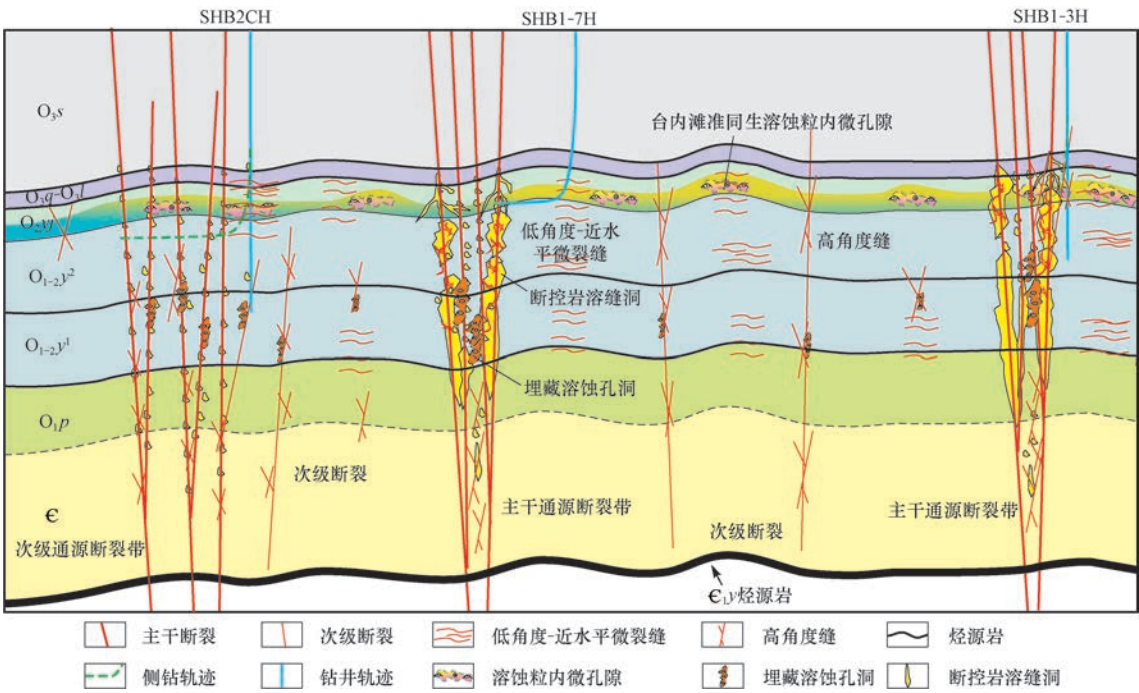


图 3 塔里木盆地顺北地区奥陶系储层发育模式

Fig. 3 Development model of the Ordovician reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin

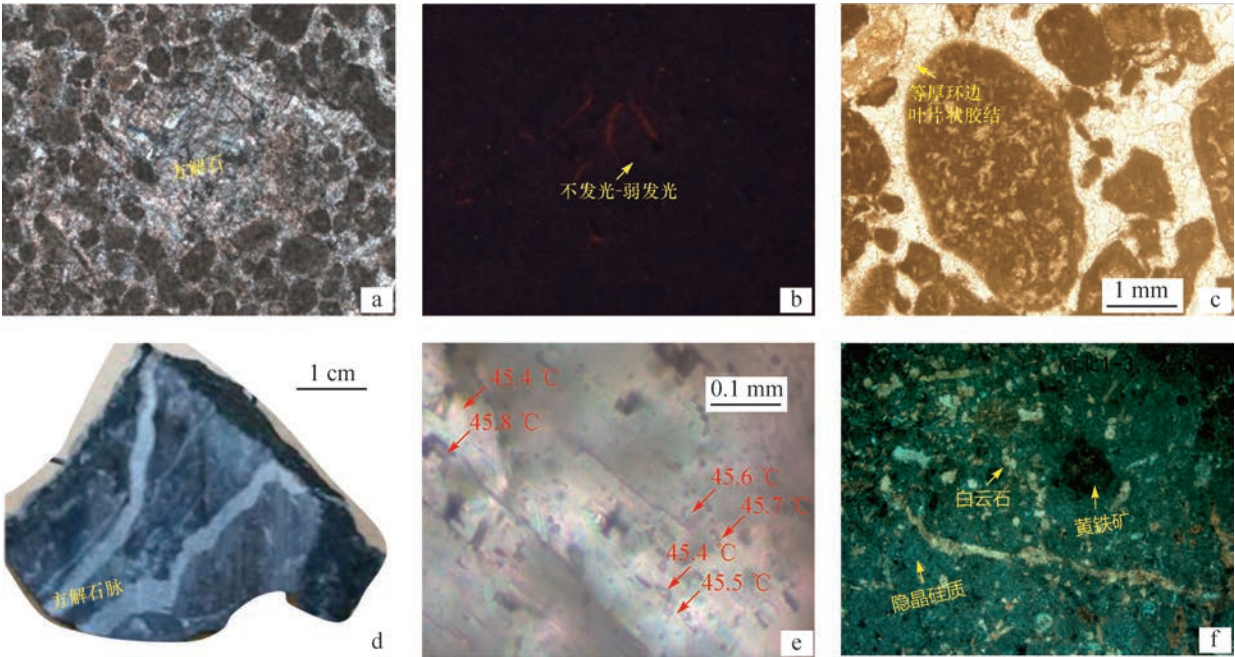


图 4 塔里木盆地顺北地区奥陶系一间房组储层成因特征

Fig. 4 Genetic characteristics of reservoirs in the Ordovician Yijianfang Formation, Shunbei area, Tarim Basin

a. 亮晶藻屑灰岩溶孔中充填方解石, 顺北 2 井, 埋深 7 357.28 m; b. a 的阴极发光照片, 方解石不发光-弱发光; c. 亮晶藻屑灰岩, 近等厚环边叶片状胶结, 顺北 2 井, 埋深 7 446.37 m; d. 含沥青质灰岩中方解石脉, 顺北 1-7H 井, 埋深 7 355.42 m; e. d 中方解石脉裂缝方解石发育近地表低温、低盐度、不混溶包裹体(45 ~ 50 °C); f. 硅质团块, 见隐晶硅质、白云石与黄铁矿, 顺北 2 井, 埋深 7 525.84 m

覆巨厚却尔却克组泥岩作为区域封盖层; 下古生界脆性碳酸盐岩在走滑断裂多期活动过程中形成的破碎带, 经后期流体溶蚀改造作用形成洞穴、裂缝及沿缝溶蚀孔洞形成有利储集层; 断裂带外围致密碳酸盐岩作为侧向封

挡构成了物性圈闭。油气主要来源于原地下寒武统玉尔吐斯组烃源岩, 沿通源断裂垂向运移, 晚期成藏为主, 无统一油(气)-水界面, 是以特深(>7 000 m)、高温(>150 °C)、常压(压力系数<1.2)为主要特征的碳

酸盐岩断溶体油气藏。

3.1 油气藏特征

顺北油气田多口井获得油气流,为低密度、低粘度、低含硫、中-高含蜡的轻质油-凝析油。地面原油密度为 $0.7916 \sim 0.8434 \text{ g/cm}^3$,平均值为 0.8075 g/cm^3 ;粘度为 $1.15 \sim 8.85 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,平均值为 $4.44 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;含硫量为 $0.03\% \sim 0.19\%$,平均值为 0.12% ;含蜡量为 $2.62\% \sim 7.04\%$,平均值为 4.73% 。

原油饱和烃含量高($62.34\% \sim 92.00\%$),饱/芳比较高($2.58 \sim 46.80$),饱和烃色谱呈前峰单峰态分布,主峰碳 $n\text{C}_{13} \sim n\text{C}_{15}$;Pr/Ph值均较低,三环萜烷呈现 $\text{C}_{21}\text{TT} < \text{C}_{23}\text{TT}$ 分布, C_{24} 四环萜烷含量低-中等,伽马蜡烷丰度较低, C_{28} 规则甾烷丰度较低($19.58\% \sim 24.64\%$), C_{27} 、 C_{28} 、 C_{29} 规则甾烷呈“V”或“反L”字形分布;原油全油碳同位素比值为 $-33.22\% \sim -30.90\%$,推测原油主要来自下寒武统烃源岩^[15,23-24]。

顺北油气田天然气以烃类气体为主,甲烷含量为 $75.60\% \sim 94.71\%$,平均值为 83.06% ;乙烷含量为 $0.82\% \sim 9.17\%$,平均值为 5.99% ;干燥系数为 $80.5\% \sim 98.6\%$,以高熟原油伴生气-凝析气为主,油、气同源。

顺北油气田目前有YJ1X、YJ2X和SHB1-1H三口井在一间房组进行了地层条件下 pVT 测定,跃进-顺托果勒低隆起主要为弱挥发性的轻质原油油藏的相态特征(图5);ST1井气/油比大于 $10000 \text{ m}^3/\text{m}^3$,推测其为低含液烃的凝析气藏。

3.2 油气成藏模式

顺北油气田油气主要来源于满加尔坳陷寒武系一中奥陶统盆地-斜坡相烃源岩与顺托果勒隆起下寒武统玉尔吐斯组上-中缓坡相烃源岩^[15]。结合顺北地区构造演化与埋藏史,通过钻井岩心中与油、气包裹体伴生的盐水包裹体的均一温度统计,发现顺北油气藏有效成藏期为海西晚期和喜马拉雅期。在早期形成的孔洞、裂缝中见到大量沥青充填,认为海西早期及以前形成的油藏在海西早期强烈的构造作用下调整破坏。海西晚期,满加尔坳陷寒武系一中下奥陶统烃源岩进入生油和湿气阶段,顺托果勒隆起下寒武统玉尔吐斯组烃源岩进入生油阶段,由于中-下寒武统膏盐岩的封盖作用,形成的油气则主要沿着深大断裂带垂向运移,在上奥陶统区域性泥岩盖层之下的碳酸盐岩断溶体圈闭中形成轻质油藏。喜马拉雅期,顺托果勒低隆起处于快速沉降期,玉尔吐斯组烃源岩虽然埋藏深度

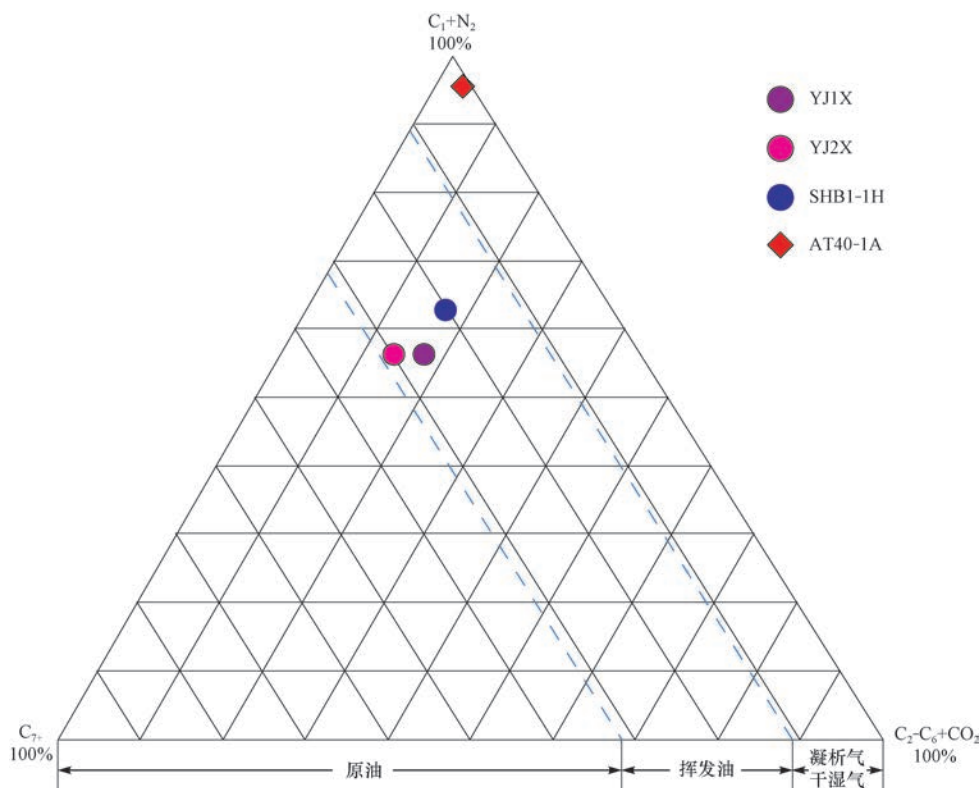


图5 塔里木盆地顺北油气田典型井油气藏烃类流体类型

Fig.5 Diagram showing the hydrocarbon fluid types from a typical well in Shunbei oil-and gas-field, Tarim Basin

较大,但地温梯度低,短期高温、高压延缓烃源岩热演化速率,埋深超过 10 000 m 的玉尔吐斯组烃源岩在喜马拉雅期仍处于生凝析油气阶段;满加尔坳陷寒武系—中下奥陶统烃源岩进入生过成熟干气阶段;由于喜马拉雅期断裂整体活动弱、上奥陶统区域性泥岩盖层厚度大,该时期生成的油气主要沿着走滑断裂垂向运移至碳酸盐岩断溶体中聚集成藏。顺托果勒低隆起西部受满加尔坳陷过成熟干气影响小,晚期凝析油气与早期轻质油气混合形成挥发性油藏;而东部受满加尔坳陷影响大,形成气/油比高的凝析气藏(图6)。

3.3 油气富集规律

油气藏勘探表明,顺北油气田奥陶系油气富集主要受顺托果勒低隆起区域构造背景、烃源岩、断裂带及储集体发育程度控制。

3.3.1 烃源岩条件与构造背景

顺托果勒低隆起为一个长期发展的低隆起,是油气运聚成藏的有利区。早寒武世,海侵背景优质烃源岩广泛分布,在满加尔坳陷、顺托果勒低隆起区发育优质烃源岩。寒武纪—中奥陶世,顺托果勒隆起与阿克库勒凸起、卡塔克隆起为统一的碳酸盐岩台地,向东过渡到满加尔坳陷,已形成东盆西台的构造格局。经历加里东中期、海西早期与海西晚期等多次构造运动,虽隆起的轴部有变化,但低隆起的背景一直保持。阿瓦提坳陷、满加尔坳陷与顺托果勒隆起烃源岩生成的油气沿断裂—裂缝及不整合面持续垂向、侧向往顺托果勒隆起运移聚集。因此,长期稳定发育的低隆起

和广泛发育的烃源岩为大、中型油气田的形成奠定了基础。

3.3.2 生、排烃特征

加里东晚期,满加尔坳陷持续埋藏,烃源岩已经处于生、排烃期,生成油气向高部位运移聚集,顺托果勒低隆起捕获了第一期油气充注,在海西早期强烈的构造作用下,油气遭受了调整破坏。海西晚期,满加尔坳陷和顺托果勒低隆起烃源岩仍处于生、排烃期,顺托果勒低隆起油气大面积聚集成藏。印支—燕山期—喜马拉雅期,地层持续埋深,烃源岩在满加尔坳陷中心部位处于死亡期,周围处于生干气期,顺托果勒低隆起东南部总体处于高—过成熟阶段,以生天然气为主,而西北部由于地温梯度较低仍处于生凝析油气阶段,因而造成顺北油气田呈现“东气西油”的格局。

3.3.3 断溶体储层油气富集规律

顺托果勒低隆起区主要发育北东向、北东东、北西向和近南北向 4 组断裂,主要形成于加里东中期;不同组断裂的活动时期存在差异,北西向断裂持续活动至喜马拉雅期,其余 3 组断裂持续活动至海西晚期。已发现的油气藏在纵向上均聚集在奥陶系碳酸盐岩顶部,在平面上几乎均沿断裂带成串展布,断裂带控储、控藏、控富集的特征明显,为油气富集的最有利区。

1) 断溶体储层

断裂对储层的积极改造有利于形成相互连通的大型缝洞系统。刚性碳酸盐岩受断裂作用,岩石破碎程度高、溶蚀强度大,岩溶顺着断裂、裂缝溶蚀扩大作用

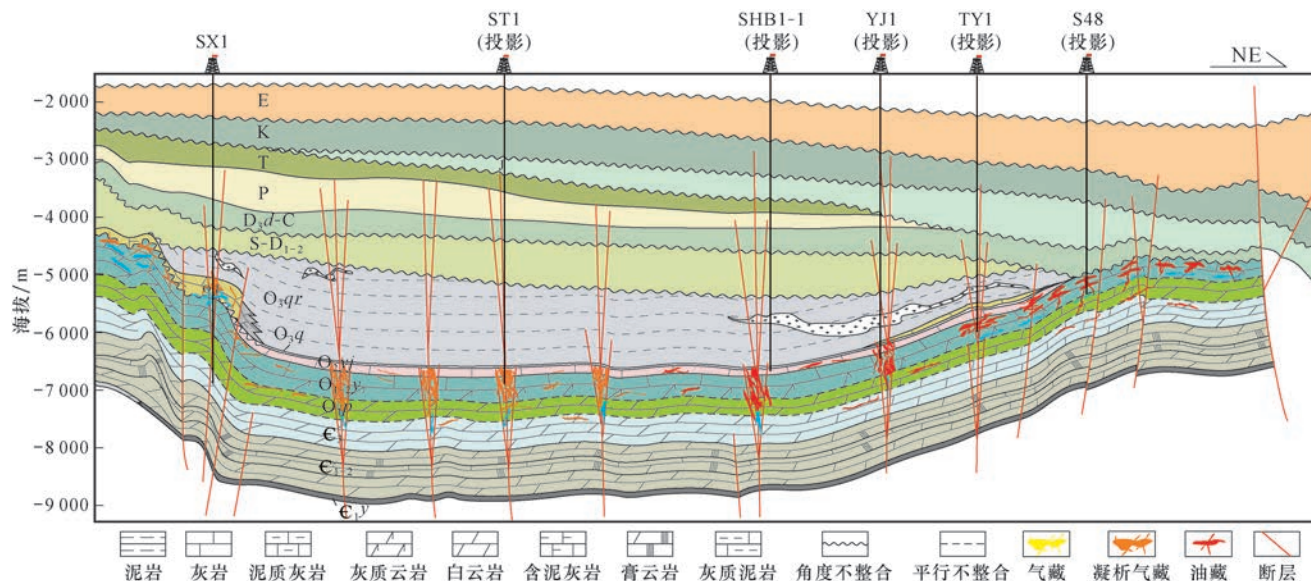


图6 塔里木盆地顺北地区过顺托果勒低隆起南北向油气藏剖面(剖面位置见图1)

Fig. 6 N-S profile crossing the low Shuntuguole uplift, Shunbei area, Tarim Basin (the location of cross section AA' was shown in Fig. 1)

强,因此沿断裂带岩溶储层发育。另外,断裂多期活动产生的裂缝不但本身可以作为重要的储集空间,而且可以沟通相邻的缝洞单元形成相互连通的大型缝洞系统。从工程异常的分布就可以得到证据,I号断裂带上完钻的8口井均出现不同程度的放空或泥浆漏失。

2) 油气运移

顺北油气田发育多条走滑断裂带,主干断裂向下切至震旦系,沟通烃源层,形成纵向和横向油气运移网络系统。钻井资料揭示,主干断裂带油气多期充注特征明显,充注强度大,油气富集程度高;次级断裂带油气富集程度弱,具有油、气、水同层的特征;断裂带之间的钻井油气晚期充注特征不明显。在一定条件下,分段性亦可对缝洞型油气藏形成良好的侧向封堵,如顺北I号断裂带7口油气井的干扰试井资料结果显示,SHB1-4H与SHB1-5H井、SHB1-1H与SHB1-7H井是连通的,而其余油气井不连通,说明同一条断裂带上油气藏具有分段的特征。

3) 油气富集成藏

钻井资料揭示,离主干断裂带越近,碳酸盐岩缝洞型储层越发育,缝洞型储层与通源断裂的连通性越好,油气充注越充足,钻井测试产能越高,稳产出油气时间越长;反之,离主干断裂带越远或主干断裂活动强度越小,缝洞型储层发育程度越弱,储集空间多以孤立洞穴或溶蚀孔洞为主,储层与通源断裂的连通性越差,油气充注程度越弱,钻井测试产能下降快、见水快。如I号主干断裂带上的SHB1-1H井,钻进过程中漏失泥浆 $1\,810\text{ m}^3$,测试初期产能高,稳产时间长,累产油 $6.38 \times 10^4\text{ t}$,累产气 $2\,868 \times 10^4\text{ m}^3$;而位于I号主干断裂带旁的SHB1井,钻进过程中漏失泥浆 $1\,314\text{ m}^3$,地震振幅变化率显示缝洞体与主干断裂带连通性较差,测试产少量油气,地层出水,酸压返排能力差。

3.3.4 盖层与圈闭

顺北油气田断裂多期活动,向上多断至二叠系,甚至断至白垩系,但油气富集层位并不像塔河油田主体区一样断裂断达的层位均有油气聚集,而是主要富集在奥陶系碳酸盐岩顶部,仅少量运移至志留系,主要是因为上奥陶统区域性泥岩盖层厚度大,断裂虽多期活动,但断距小,并未使泥岩发生明显错断,对泥岩的封盖能力影响较小,下部碳酸盐岩油气藏并未发生大规模的调整破坏。因此,上奥陶统巨厚区域性泥岩盖层为顺北油气田奥陶系碳酸盐岩层段油气藏的富集提供了重要保障^[4,15]。

4 勘探潜力与前景展望

顺北地区特深断溶体油气藏的发现是近年来塔里木盆地油气勘探的重大突破。顺托果勒地区呈现出近 $2.8 \times 10^4\text{ km}^2$ 油气勘探前景,极大地拓展了塔里木盆地的资源潜力。据测算,顺托果勒地区18条北东向走滑断裂带控制的含油气面积为 $3\,400\text{ km}^2$,油气资源量达 $17 \times 10^8\text{ t}$ 油当量(石油 $12 \times 10^8\text{ t}$,天然气 $5\,000 \times 10^8\text{ m}^3$),将成为塔里木探区“十三五”期间的勘探主战场;按每条断裂带 $6\,000 \times 10^4\text{ t}$ 油气储量、 $20 \times 10^4\text{ t}$ 产能计算,至2025年可实现 $5 \times 10^8\text{ t}$ 石油地质储量,建成 $200 \times 10^4\text{ t}$ 原油、 $10 \times 10^8\text{ m}^3$ 天然气的产能阵地。

顺北地区特深断溶体油气藏属碳酸盐岩孔隙型与岩溶缝洞型油气藏之外的一种新的油气藏类型。此类型油气藏在我国尚属首次发现,且埋深超过 $7\,000\text{ m}$ 仍为油藏也实属罕见,彻底改变了以往特深高温、高压条件下烃源岩热演化模式的常规认识,对推动我国特深领域的油气勘探具有开创性意义,同时也将带动塔里木盆地玉北、阿东等地区的油气勘探进程。

参 考 文 献

- [1] 康玉柱. 中国古生代海相油气田发现的回顾与启示[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(5): 570-575.
Kang Yuzhu. Review and revelation of oil/gas discoveries in the Paleozoic marine strata of China[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(5): 570-575.
- [2] 云露, 蒋华山. 塔里木盆地北部沙雅隆起含油气系统及勘探靶区选择[J]. 石油实验地质, 2002, 24(6): 506-512.
Yun Lu, Jiang Huashan. Petroleum system and exploration strategy in Shaya uplift of the northern Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2002, 24(6): 506-512.
- [3] 云露, 闫文新, 赵江. 阿克库勒凸起成藏地质条件及控油规律[J]. 新疆地质, 2001, 19(4): 305-310.
Yun Lu, Yan Wenxin, Zhao Jiang. Geological condition and ore-controlling regularity of oil-pool formation in Akekule Uplift[J]. Xinjiang Geology, 2001, 19(4): 305-310.
- [4] 金之钧. 从源-盖控烃看塔里木台盆地油气分布规律[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 763-770.
Jin Zhijun. A study on the distribution of oil and reservoirs controlled by source-cap rock assemblage in unmodified foreland region of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 763-770.
- [5] 李宗杰, 王勤聪. 塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 35-34.
Li Zongjie, Wang Qincong. Method and technique for prediction of super-deep carbonate reservoirs in north Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(1): 35-34.
- [6] 刘群, 李海英, 邓光校. 地震断裂检测技术在塔河油田南部碳酸

- 盐岩储层及油藏预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(2): 202–206.
- Liu Qun, Li Haiying, Deng Guangxiao. Application of seismic fault detection to carbonate reservoir prediction in southern Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(2): 202–206.
- [7] 陈明政, 李宗杰, 王保才. 塔中顺南沙漠区碳酸盐岩天然气藏三维地震勘探技术[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 935–943.
- Chen Mingzheng, Li Zongjie, Wang Baocai. 3D seismic exploration technology of carbonate gas reservoir in Shunnan desert area of central Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 935–943.
- [8] 马学军, 费建博, 王建斌, 等. 塔中奥陶系缝洞系统成像的配套处理技术研究[J]. 石油物探, 2011, 60(6): 583–588.
- Ma Xuejun, Fei Jianbo, Wang Jianbin, et al. Study on the supporting processing techniques for the imaging of Ordovician fracture-cavity system in Tazhong area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 60(6): 583–588.
- [9] 漆立新. 塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩大油气田勘探实践与展望[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(6): 771–780.
- Qi Lixin. Exploration practice and prospects of giant carbonate field in the Lower Paleozoic of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(6): 771–780.
- [10] 何治亮, 金晓辉, 沃玉进, 等. 中国海相超深层碳酸盐岩油气成藏特点及勘探领域[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(1): 3–14.
- He Zhiliang, Jin Xiaohui, Wo Yujin, et al. Hydrocarbon accumulation characteristics and exploration domains of ultra-deep marine carbonates in China[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(1): 3–14.
- [11] 焦方正, 翟晓先. 海相碳酸盐岩非常规大油气田——塔河油田勘探研究与实践[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008: 1–135.
- Jiao Fangzheng, Zhai Xiaoxian. A unconventional large oil and gas field of marine carbonate rock: Exploration research and practice of Tahe oil-field[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 1–135.
- [12] 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展——以塔里木盆地为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004, 34(增刊1): 1–12.
- Jin Zhijun, Wang Qingchen. New advancement in research of China's typical superimposed basins and reservoiring of hydrocarbons: Taking Tarim Basin as an example[J]. Science in China (Series D: Earth Science), 2004, 34(S1): 1–12.
- [13] 庞雄奇, 周新源, 鄢盛华, 等. 中国叠合盆地油气成藏研究进展与发展方向——以塔里木盆地为例[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(6): 649–656.
- Pang Xiongqi, Zhou Xinyuan, Yan Shenghua, et al. Research advances and direction of hydrocarbon accumulation in the superimposed basins, China: Take the Tarim Basin as an example[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(6): 649–656.
- [14] 何发歧, 俞仁连, 杨惠明, 等. 塔里木盆地北部碳酸盐岩油气田[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 2002: 132–155.
- He Faqi, Yu Renlian, Yang Huiming, et al. Carbonate oil and gas field in the north of Tarim Basin, China[M]. Beijing: China University of Geosciences Press, 2002: 132–155.
- [15] 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): 39–51.
- Qi Lixin. Oil and gas breakthrough in ultra-deep Ordovician carbonate formations in Shuntuoguole uplift, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3): 39–51.
- [16] 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 Chengzhao. Structural characteristics and oil/gas accumulative regularity in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1999, 20(3): 177–183.
- [17] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1997: 156–165.
- Jia Chengzhao. Structural features and hydrocarbon in Tarim Basin, China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997: 156–165.
- [18] 翟晓先. 塔河大油田新领域的勘探实践[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 751–761.
- Zhai Xiaoxian. Exploration practices in frontiers of Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27(6): 751–761.
- [19] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识[J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323–332.
- Zhai Xiaoxian. Exploration practice of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2011, 33(4): 323–332.
- [20] 鲁新便, 胡文革, 汪彦, 等. 塔河地区碳酸盐岩断溶体油藏特征与开发实践[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(3): 347–356.
- Lu Xinbian, Hu Wenge, Wang Yan, et al. Characteristics and development practice of fault-karst carbonate reservoirs in Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(3): 347–356.
- [21] 周文, 李秀华, 金文辉, 等. 塔河奥陶系油藏断裂对古岩溶的控制作用[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2339–2348.
- Zhou Wen, Li Xiuhua, Jin Wenhui, et al. The control action of fault to paleokarst in view of Ordovician reservoir in Tahe area[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2339–2348.
- [22] 李映涛, 叶宁, 袁晓宇. 塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 934–944.
- Li Yingtao, Ye Ning, Yuan Xiaoyu. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 934–944.
- [23] 顾忆, 邵志兵, 陈强路, 等. 塔河油田油气运移与聚集规律[J]. 石油实验地质, 2007, 29(3): 224–237.
- Gu Yi, Shao Zhibing, Chen Qianglu, et al. Oil migration and accumulation pattern in the Tahe oil field[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(3): 224–237.
- [24] 云露, 蒋华山. 塔河油田成藏条件与富集规律[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 768–775.
- Yun Lu, Jiang Huashan. Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment rules in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 768–775.