

引用格式: 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.  
DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.001

## 关于塔里木盆地深层油气藏高效开发的实践与思考

胡文革<sup>1,2</sup>, 马龙杰<sup>1,2</sup>, 汪彦<sup>1,2</sup>, 鲍典<sup>1,2</sup>, 张云<sup>1,2</sup>

(1. 中国石化西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;  
2. 中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** 塔里木盆地走向深层领域, 油气藏的复杂性和高投资成本给经济开发带来了极大的挑战。从油气藏成藏、成储角度出发, 重点总结了深层油气成藏条件、储集空间类型、储集体内部结构和烃组分变化4个维度的复杂性和特殊性, 深入讨论了目前制约深层油气藏高效动用、提高采收率、开发经济性的3个核心问题及其对策, 由此提出解决这些核心问题的4个攻关方向: ①近源“生输储盖”组合下的油藏特征预测方法; ②深层缝洞保存的量化参数表征方法; ③分隔缝洞体边界及内部连通性表征方法; ④建立超深层领域全生命周期经济评价体系和差异化开发策略。上述的思考和对策为高效开发深层、超深层碳酸盐岩油气藏、保障国家能源安全提供了借鉴性的意见和建议。

**关键词:** 塔里木盆地; 顺北油气田; 深层; 高效开发; 碳酸盐岩

中图分类号: TE319

文献标识码: A

### Application and reflections on efficient development of deep oil and gas reservoirs in Tarim Basin

HU Wenge<sup>1,2</sup>, MA Longjie<sup>1,2</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, BAO Dian<sup>1,2</sup>, ZHANG Yun<sup>1,2</sup>

(1. Sinopec Northwest China Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China;  
2. Key Laboratory for EOR of Carbonate Fractured-Vuggy Reservoir of Sinopec, Urumqi, Xinjiang 830011, China)

**Abstract:** The economic development of oil and gas reservoirs in the Tarim Basin is challenged by their complex nature and substantial investment costs. This paper primarily summarizes the intricacies of deep oil and gas reservoirs across four dimensions: accumulation conditions, reservoir space types, internal structures, and changes in hydrocarbon composition. It also explores three core issues that hinder efficient utilization, enhanced recovery, and economic growth of these reservoirs, along with proposed countermeasures. To address these challenges effectively, the paper proposes four research directions: ① A prediction method for reservoir characteristics that integrates the processes of near-source generation, transportation, storage, and cap rock formation. ② A quantitative parameter characterization method for identifying deep fractures and preserving caverns. ③ A characterization method for differentiating fracture boundaries and assessing their internal connectivity. ④ The establishment of a comprehensive life cycle economic evaluation system for ultra-deep domains, alongside differentiated development strategies. These strategies offer valuable suggestions towards achieving efficient development of deep to ultra-deep carbonate reservoirs and ensuring national energy security.

**Keywords:** Tarim Basin; Shunbei oil and gas field; deep; efficient development; carbonate rock

随着油气的勘探开发不断向深层突破, 深层、超深层已成为全球油气发现的重点领域。据IHS(美国信息服务公司)数据<sup>[1-2]</sup>, 截至2023年4月, 全球已发现碳酸盐岩深层油气藏的地质储量约 $169.5 \times 10^8$  t油当量, 占世

界总碳酸盐岩储量的4.4%, 其中55个为超过埋深8 000 m的油气田<sup>[2-4]</sup>, 目前中国深层、超深层油气开发仍处于规模增储上产的阶段<sup>[5-7]</sup>。据第四次资源评价, 中国深层、超深层油气资源量达 $671 \times 10^8$  t油当量, 占中国油气

收稿日期: 2024-05-05。

第一作者简介: 胡文革(1966—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事油气田开发研究与管理工作。地址: 新疆乌鲁木齐市长春南路466号中国石化西北石油科研生产园区, 邮政编码: 830011。E-mail: huwg.xbsj@sinopec.com

通信作者简介: 马龙杰(1990—), 男, 博士, 助理研究员, 从事油气藏开发相关研究工作。地址: 新疆乌鲁木齐市长春南路466号中国石化西北石油科研生产园区, 邮政编码: 830011。E-mail: malj2673@126.com

基金项目: 中国石化科研项目“顺北断控缝洞型油气藏储集体结构表征方法研究”(P24135)。

资源总量的34%<sup>[8-10]</sup>,其中塔里木盆地油气资源总量达178×10<sup>8</sup> t油当量,超深层油气资源约占总量的85%<sup>[11-14]</sup>。但目前对该领域开发认识处在探索阶段,在储层有效性、高效动用、工程工艺、效益开发等方面还面临诸多挑战,值得深思和探索。

### 1 地质概况

塔里木盆地为油气资源丰富的大型叠合复合克拉通盆地,一级构造呈“三隆”“四坳”的构造格局。盆地构造演化从前震旦纪开始经历了7个构造期,形成了巨厚沉积体系。研究已证实存在多套烃源岩,包括下寒武统玉尔吐斯组、中一下奥陶统黑土凹组、中一上奥陶统萨尔干组、上奥陶统良里塔格组等。其中,下寒武统玉尔吐斯组烃源岩是塔里木盆地超深层已发现油气的主要来源。寒武系一下奥陶统广泛发育的白云岩已证实是塔里木盆地重要的储集岩类,储层类型包括孔洞型、孔隙型、裂缝型等,其成因受准同生期大气淡水溶蚀、白云岩化、埋藏期溶蚀等多期流体改造控制;中一上奥陶统碳酸盐岩台地中的颗粒滩及生物礁受准同生期大气淡水溶蚀、风化壳岩溶、埋藏溶蚀、构造破裂等影响,形成厚度大、性能优越的孔洞型、缝洞型、裂缝型等规模储层(图1)。由此形成了震旦纪一泥盆纪开合旋回、石炭纪一二叠纪开合旋回、中一新生代构造旋回三大油气系统<sup>[15-18]</sup>。

### 2 深层油气藏的复杂性

塔里木盆地巨厚的沉积体系,在多期构造运动的沉降与抬升作用下,烃源岩经历多期生烃和排烃,运移通道也在不同构造期次中发挥差异化的输导作用,由此造就了储集空间多样、烃类组分复杂混合的油气藏。尤其是埋深大于6 000 m的超深层领域,碳酸盐岩地层成储成藏条件更为苛刻,油气藏更为复杂,这也大大增加了深层油气开发的难度。

#### 2.1 成藏条件的复杂性

塔里木盆地超深油气具有近源成藏的特点,近源成藏的“生输储”机制非常特殊,导致油气成藏后的类型复杂多样。

##### 2.1.1 深层烃演化时空差异大

塔里木盆地受构造演化的控制,地层沉积埋藏史与地质热历史表现出多旋回叠合盆地的复杂特点。从烃源岩热演化史来看,台盆区有效烃源岩主要是下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,其发育和展布控制着油气的空间分布。在加里东晚期一海西早期,满加尔坳陷、阿瓦提坳陷及围斜部位处于大规模生油阶段,海西晚期为生成正常油、凝析油、天然气阶段,喜马拉雅期阿满过渡带仍以生成凝析

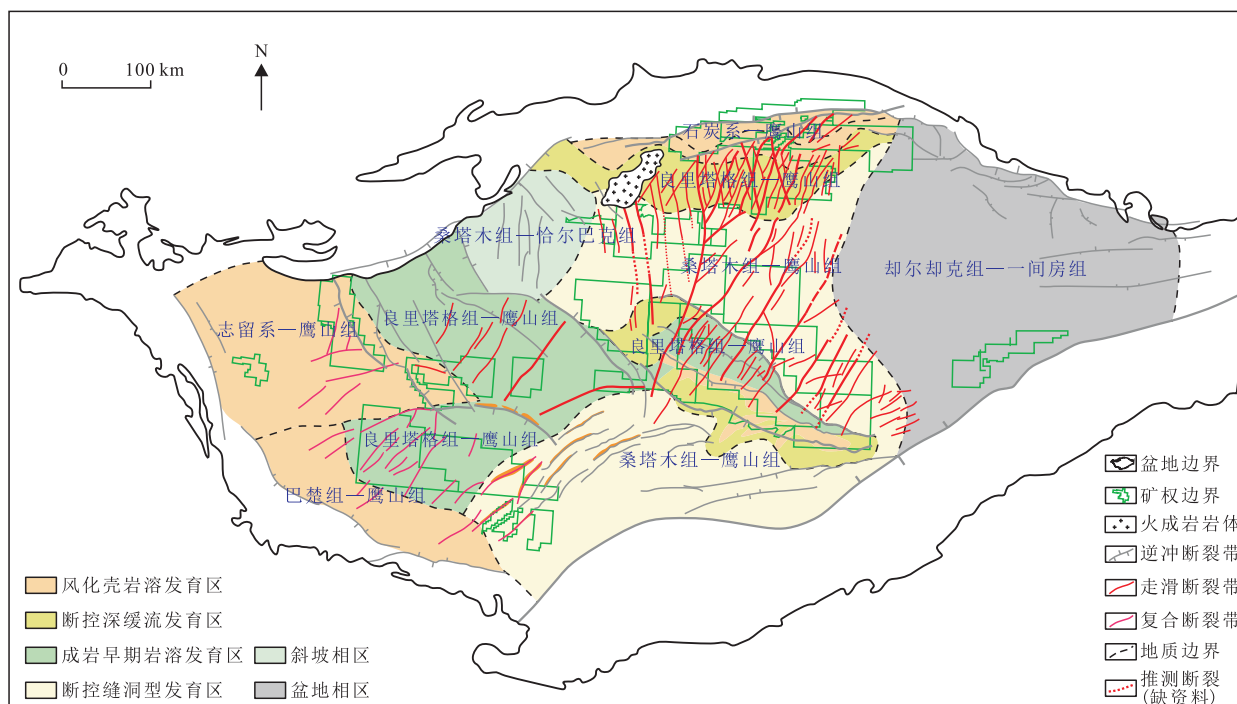


图1 塔里木盆地奥陶系走滑断裂体系与储层类型叠合图

Fig. 1 Overlay map of the strike-slip fault system and reservoir types of Ordovician in Tarim Basin

油、天然气为主。与此相对应,台盆区平面上的油气分布具有西油东气、北重南轻的特征,呈带状分布(图2)。在不断埋深演化过程中,塔北隆起、塔中隆起总体上都经历了3期油气充注、混合,二者之间的顺托果勒鞍部的顺北地区主要表现为晚期成藏的特点,以轻质油、挥发性油、凝析气为主。

### 2.1.2 储集空间的形成与改造

塔里木盆地碳酸盐岩储集空间的形成主要有3种成因:沉积期的溶蚀孔洞及裂缝,表生期的风化壳溶蚀洞、溶扩缝,还有埋藏期热液改造的孔、洞、缝等。与常规砂岩的孔、缝储集空间相比,一方面,塔北和塔中隆起暴露区在表生期遭受长期的风化壳岩溶作用,形成大量的溶洞、岩溶管道以及沿断裂溶扩的孔洞<sup>[19-20]</sup>。在埋深过程

中,除常规的压实、溶解等成岩作用外,还经历了多期断裂错断、垮塌改造、胶结充填等作用,使得地下缝洞结构更为复杂、更难预测。另一方面,顺托果勒鞍部超深层经历的多期构造作用导致直立走滑断裂的破碎程度更为显著,因断裂两侧基岩的支撑,使得断裂带内的储集空间得以较好地保存而形成优质储层。顺北地区实钻井多钻遇基岩(孔隙度不大于2%)+“断裂破碎体+角砾间空腔+裂缝”的储层结构,近80%的钻井出现泥浆漏失现象,约40%的井钻遇放空,由此证实了埋深大于7 000 m断裂带内的储集空间在巨大覆压作用下仍可以良好保存。

### 2.1.3 运移通道的开启与时空耦合

塔里木盆地超深层油气近源成藏的输导体系包括走滑断裂带、不整合面以及奥陶系储层段,其中最主要的运

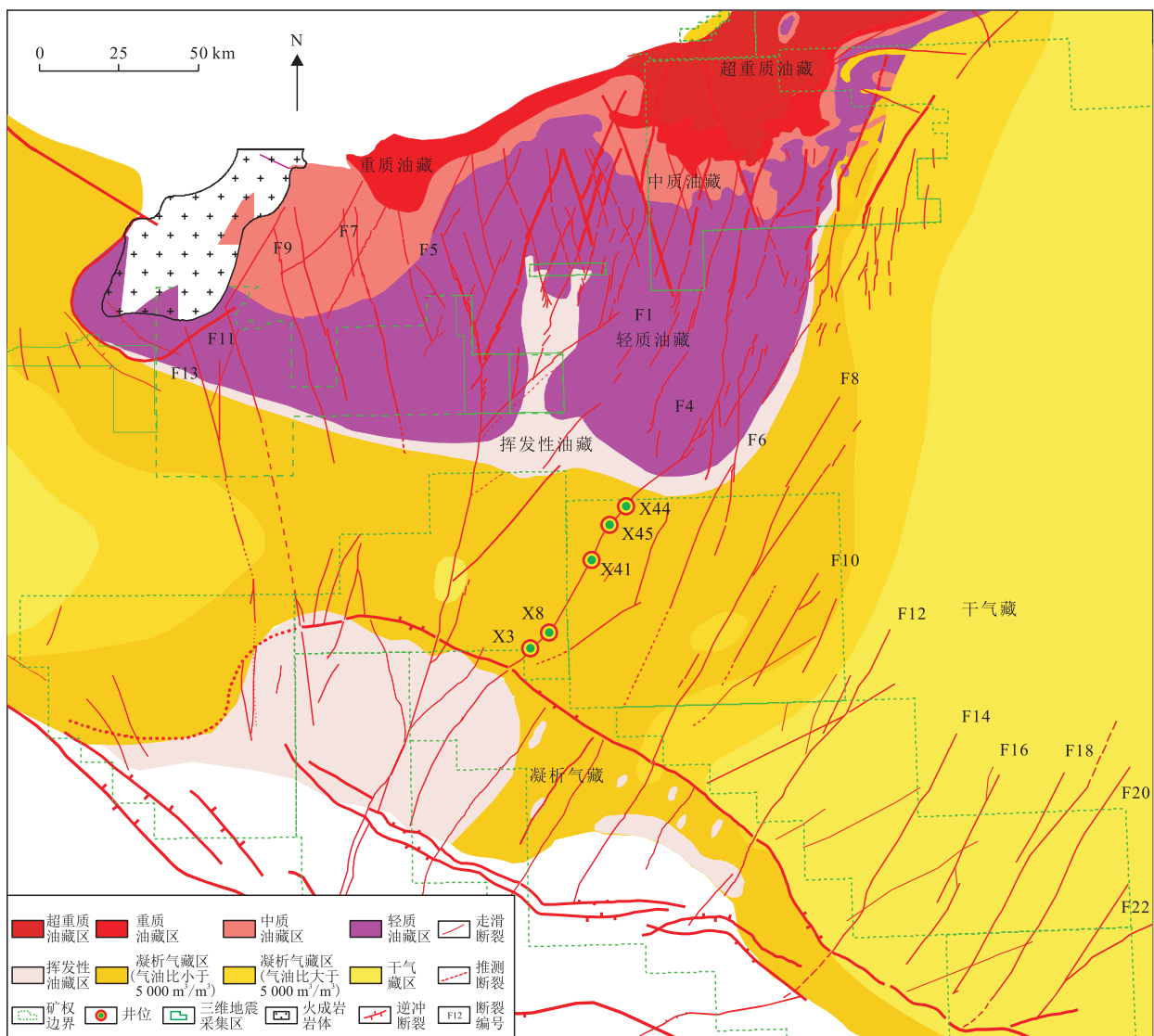


图2 塔北地区油气藏类型平面分布

Fig. 2 Planar distribution of hydrocarbon reservoir types in Northern Tarim Area

移通道是走滑断裂带。主干走滑断裂带不仅直接沟通了寒武系底部的玉尔吐斯组烃源岩,而且也是优质储集空间的发育区,对油气富集起着重要的控制作用。根据塔河和顺北地区的钻井证实,断裂规模越大、纵向连通性越好,奥陶系顶部的缝洞储集体越发育、油气充注越充足、单井累产越高,此现象在NE(东北)向主干走滑断裂带上更为明显<sup>[21-22]</sup>。在同一断裂带的形成和演化过程中,由于地应力(拉张、挤压、纯走滑等)的差异导致断裂带分段分布,油气产能亦具有较大的差异,其中位于叠接拉分段的单井产能明显高于压隆段。因此,运移通道的开启与生油门限的时空耦合是油气富集的关键因素之一。

## 2.2 储集空间的多样性

### 2.2.1 储集体类型

塔里木盆地超深层不同区域储集空间类型多样、尺度大小差异大、空间分布无序。塔河地区北部受风化壳岩溶作用的影响,残留的中—上奥陶统一间房组和鹰山组碳酸盐岩储层,主要发育大型溶洞、暗河管道、溶蚀孔洞和溶扩缝等,还有原生孔隙、构造缝等多种不同尺度的储集空间类型<sup>[23]</sup>。在塔河地区南部到顺北地区的断控背景下,储层主要为一间房组和鹰山组的碳酸盐岩断控岩溶型或者断控破碎型缝洞储集体,埋深普遍在6 000 m以深,现存的储集空间以断裂构造破碎及流体改造作用形成的次生储集空间类型为主,包括断面空腔、角砾间空隙、高角度构造裂缝、溶蚀孔洞、晶间孔隙等多种储集空间类型。

### 2.2.2 储集体展布形态

从成因角度来看,主要存在3种宏观的储集体展布形态。第一种是由风化壳岩溶作用形成的溶洞、暗河、表层缝网等储集空间组成的岩溶缝洞储集体,平面上连片面状分布、剖面是多套暗河叠置的似层状厚层储集体;第二种是断控缝洞储集体,属于一种被断裂带控制,由大量裂缝、角砾间空隙以及空腔洞穴耦合而成的立体板状、纵向巨厚的缝洞集合体,具有纵向数千米、横向“栅簇”结构、顺断裂差异分段的空间分布特征<sup>[6]</sup>;第三种就是礁滩体,主要是由碳酸盐岩台地中的颗粒滩及生物礁受准同生期大气淡水溶蚀作用形成的溶蚀孔洞,以及沉积成岩的原生孔缝组成的缝洞储集体,呈透镜体状展布。

## 2.3 储集体内部结构的复杂性

在断裂带形成的不同阶段呈现不同组合形态,初期发育雁列式断裂组合,中期部分断裂错位后出现连接式断裂组合,后期长距离滑动后形成整体贯通式断裂组合,

实钻证实这3种组合类型差异分布、同域共存。但不管任一阶段,各断裂带自身的内部结构差异非常明显。由于受不同性质地应力的作用,导致断裂不同段的破碎程度、裂缝方向及密度、横向组合结构差异显著<sup>[24]</sup>。同时在断裂带纵向上受不同构造期次的影响,不同层段的裂缝发育程度亦不同。在同一段内的不同部位因受滑移距、两盘应力状态的转换影响,使得断裂带内裂缝组合也不同(图3)。实钻揭示了3种典型的裂缝组合结构(按垂直断裂走向):断裂面附近仅有1组裂缝密集发育带的“一元结构”;发育2组及以上的“多元结构”;在断面一侧发育的“非对称核带结构”。因此,从地质成因上讲,断裂滑移、变形、破碎导致裂缝分布多为无序状态,再受流体作用以及深埋改造等多重地质作用的影响,使得储集体的内部结构更为复杂、缝洞体的分隔性更强。

## 2.4 深层油气藏油气组分的复杂性

塔里木盆地顺北地区的超深油气藏多期充注成藏特征显著,宏观上油气具有北油南气、西油东气的区带分布格局(图2)。同一大型断裂带可横跨多个油气藏类型区,沿断裂走向相对有规律分布,如顺北F4断裂自北向南由挥发性油藏向高含、中—低含凝析油的凝析气藏依次变化。但由于受多期充注、输导条件差异影响,同一段内不同井区气油比差异较大(图4),局部相邻2口井气油比相差可达1 000 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>以上。

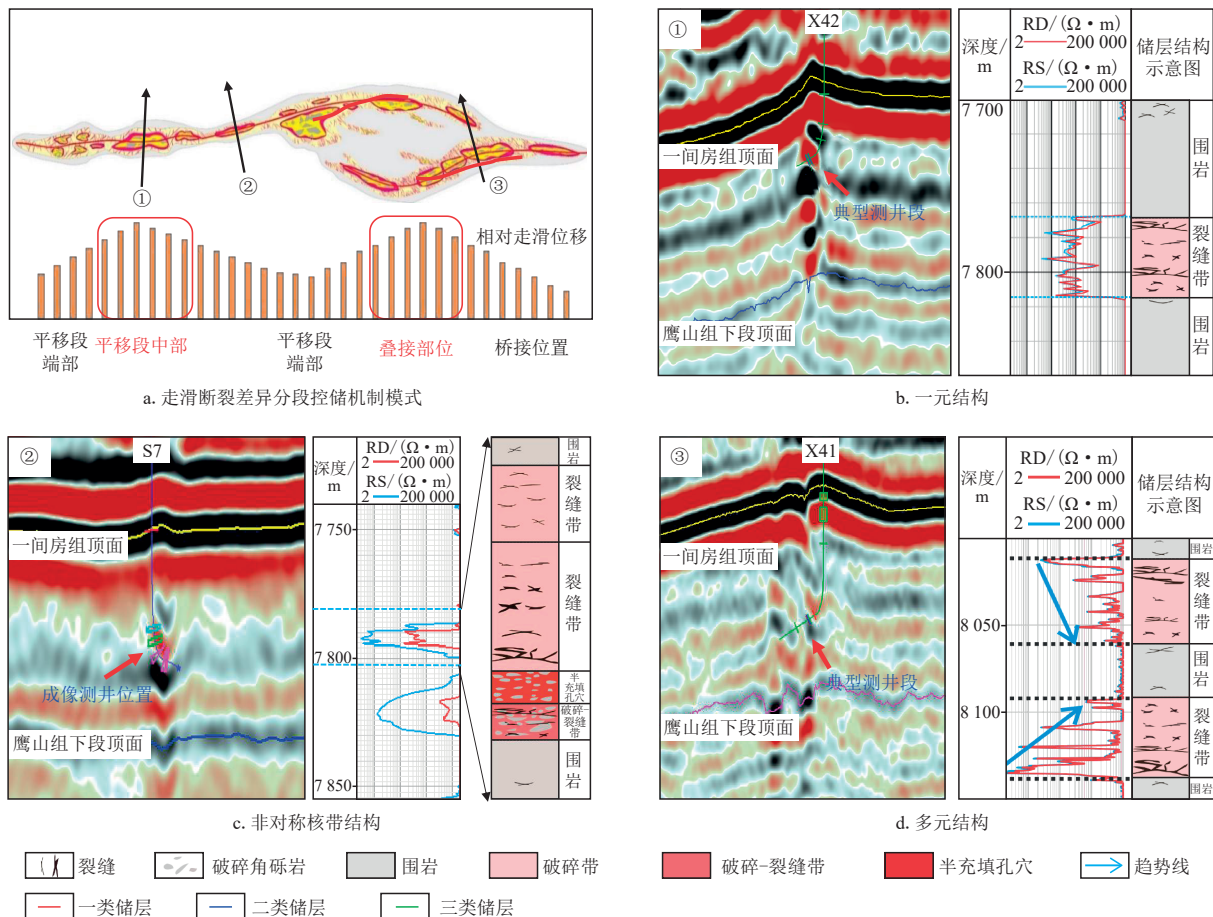
受多期充注影响,轻重组分共存且宽泛(C<sub>1</sub>—C<sub>36</sub>)(图5),相态变化特征复杂。如X44井重烃(C<sub>7+</sub>)质量比高达45%,其中C<sub>7</sub>—C<sub>19</sub>为40%,C<sub>20+</sub>为5%。相态实验结果显示:该井露点压力为39.15 MPa,最大反凝析压力28.02 MPa,反凝析液量曲线呈现出快速上升(图6),露点压力之下3.15 MPa反凝析液量占孔隙体积百分数为19.48%,占最大反凝析液量的82.5%。重烃优先析出后剩余烃组分发生变化,导致相态预测和凝析油损失定量评估的难度加剧。同一油气藏内不同期次的烃组分混合,加上油气藏纵向巨厚板状的特点,藏内组分重力分异现象明显。例如,顺北F4断裂带不同深度的气油比与组分梯度呈负相关,深度每增加100 m C<sub>7+</sub>的摩尔含量增幅均大于8%,增大比率介于2.781%~6.210%。超深油气藏烃组分的复杂性对储量精准评估、开发政策制定、提高采收率工艺带来挑战。

## 3 效益开发思路和技术方向

对于高温高压的深层油气藏而言,油气藏的复杂性增加了地质认识难度,上覆巨厚的岩体导致了建井成本高,超深提高采收率工艺加大了油气开发成本。以顺北

油气田为例,目前已经投产的井均超过7 300 m,地层温度高达160~209 °C,地层压力介于89~129 MPa。储集空间以断控缝洞结构为主,非均质性极强,关于此类储层的精细描述难度极大,加剧了井位部署和成井难度,已投产的单井平均建井成本近1亿元。关于提高采收率的工

艺要求和成本也比浅层油气藏高,如顺北4号带凝析气藏注气压力介于40~50 MPa,导致地面设备投资成本增加。由此对油气开发的经济性和可持续性提出了极高的要求,需要在高效动用、提高采收率、效益开发等方面深入思考,谨慎决策,以期实现深层油气的高效开发。



注: RD为深侧向电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ; RS为浅侧向电阻率,单位 $\Omega \cdot m$ ; ①、②、③分别为图a中断裂3个不同位置井位部署的地震剖面导航线。

图3 塔里木盆地顺北油气田断控裂缝组合结构

Fig. 3 Combined structure of fault-controlled fracture in Shunbei oil and gas field of Tarim Basin

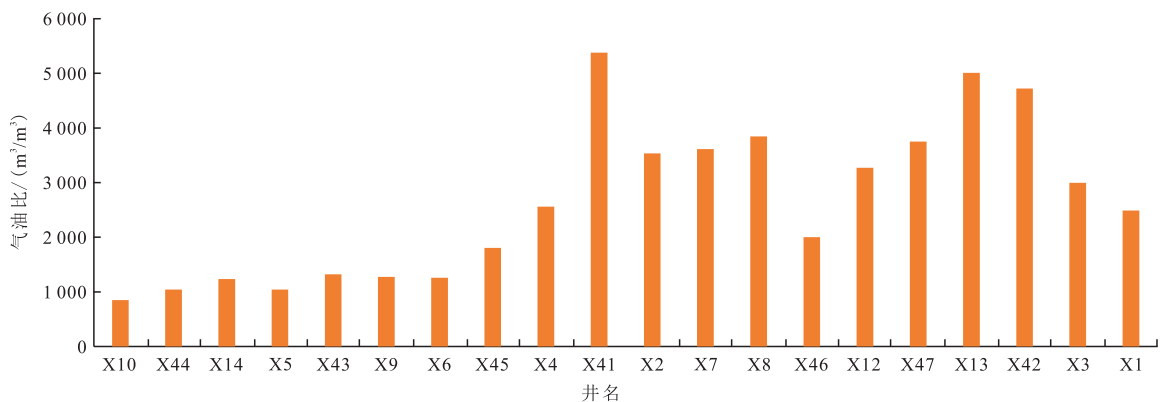


图4 塔里木盆地顺北F4断裂带投产井初期气油比

Fig. 4 Initial gas-oil ratio of producing wells in Shunbei F4 Fault Zone of Tarim Basin

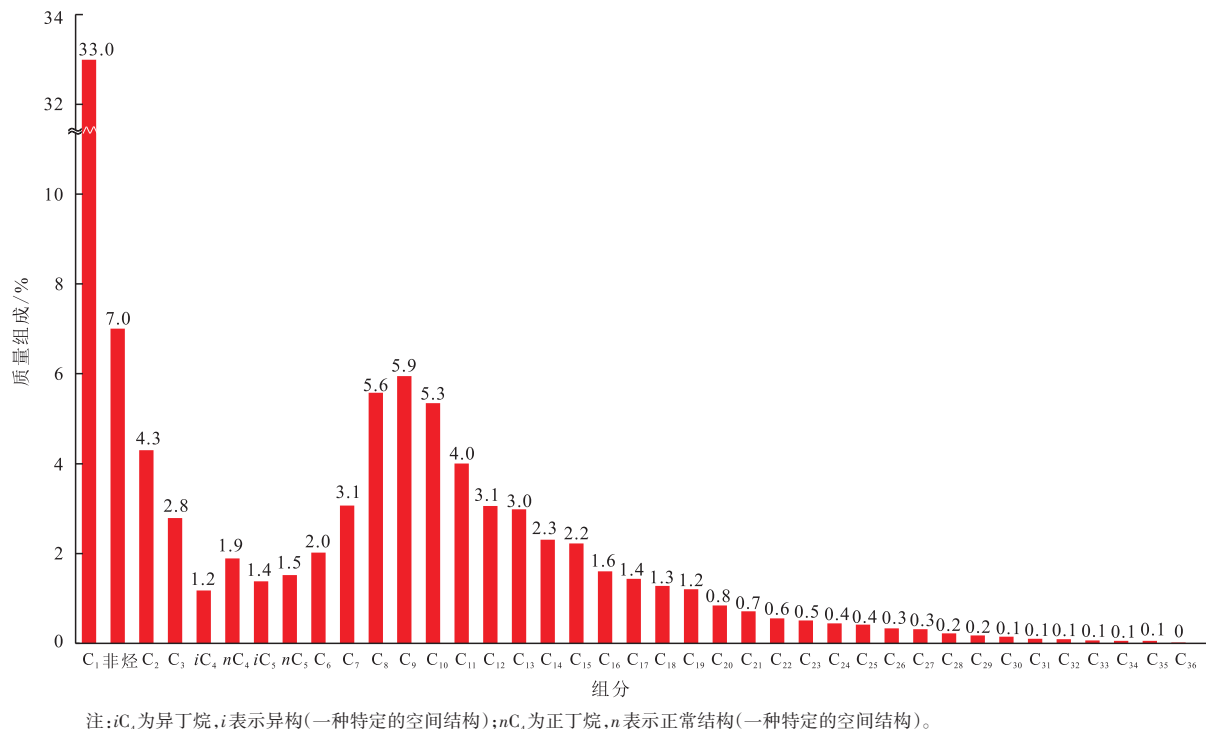


图5 塔里木盆地顺北油气田X44井凝析油组分分析

Fig. 5 Analysis of condensate composition in Well-X44 in Shunbei oil and gas field of Tarim Basin

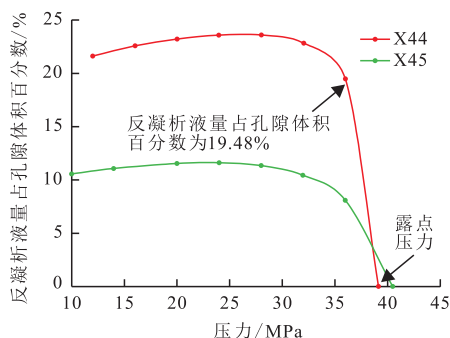


图6 塔里木盆地顺北油气田X44井和X45井降压过程中反凝析液量变化曲线

Fig. 6 Variation of retrograde condensate volume during depressurization of Wells-X44 and Well-X45 in Shunbei oil and gas field of Tarim Basin

### 3.1 对深层油气藏高效动用的思考

#### 3.1.1 如何解决单井“多控长稳”的问题

深层领域高昂的建井成本,“多控多动”储量动用方式可以提高经济可采储量,因此要求匹配好“动用策略与开发方式”的一致性。一是采用长水平段,一次控制多个相对分隔的缝洞体<sup>[25-26]</sup>;二是针对一个井区的资源,逐次动用多个分隔缝洞体。如针对中—低含凝析油的凝析气

藏或干气藏,采用衰竭式开发,“多次动用”“一次多控”均可实现多控多动,经济有效性取决于工程实施成本的高低。而考虑注水、注气驱替提采的单元,则采用长水平段的“一次多控”更为可行。目前比较前沿的分支井开发技术,主要取决于缝洞体规模大小,开发过程中的压力差异和后期开发方式的选择。

#### 3.1.2 如何解决局部“甜点”与整体动用的问题

深层油气藏储集空间结构与油气组分复杂性,决定了对油气藏的认识和工程工艺的技术进步具有时间周期性。因此,开发中要协调好3个关系:单井高效与整体有效、先期高效与迭代提效、先动有效与储备待效。例如,顺北油气田的开发,利用现有技术评价储量的规模大小,先动用局部“甜点”,逐期迭代提升油气藏地质认识,改进优化关键开发技术,保持在当期40美元/桶下有效开发。在深化地质认识的基础上,应用提升后的工程工艺技术扩大次级储量的动用,形成各类储量的动用策略和技术组合,以指导后期的开发动用策略。截至目前,还有近半数的储量需要待技术改进后再进行有效动用。

### 3.2 对深层油气藏提高采收率的思考

深层油气藏提高采收率以经济有效为准则,建立“取

舍得当、时机精准、方式最优”为核心的决策模式。取舍得当就是在不同提高采收率方式的经评基础上,选取核心指标,确定合理的油气藏开发界限,根据该界限指导早期井网的构建与部署。例如,顺北凝析气区选取气油比为核心指标,以气油比 $2\ 000\sim 2\ 500\text{ m}^3/\text{m}^3$ 为界限。当高于此界限时,采用衰竭式开发,钻井靶点部署在储集体中上部,起到避水、减小靶点上部油气储量损失的目的;当低于此界限时,采用“衰竭+补能”的开发方式,钻井靶点选在储集体底部,井组构建高注底采的对应关系,为后期上部注气底部采油提供基础条件。对于补能提高采收率的工作而言,时机的选择至关重要。以顺北凝析气藏循环注气为例,仅仅参考压敏效应和露点压力确定的补能时机过早(地层压力介于 $40\sim 45\text{ MPa}$ ,露点压力介于 $35\sim 40\text{ MPa}$ )、补能压力偏高,导致地面投资加大。因此,以经济最大化为原则,综合考虑应力敏感、凝析油损失量以及增油量等要素精准确定合理的补能时机。最后,注入介质(注气、注水等)的选择应与空间结构对应,遵循注入介质波及最大化、窜流风险最小化的原则,并结合实际缝洞结构选择最优的注入介质。

### 3.3 对深层油气藏开发经济性的思考

深层领域开发效益尽管根本上取决于油气藏类型,但井筒和地面的投入也占有重要地位。一般来讲,深层、超深层油气藏的超高温、高压和超强地应力条件给管材、井下工具、下井仪器和井筒稳定性带来极大的挑战。在沙漠区的地面配套建设以及油气输送等方面存在高投入的挑战。因此,均衡好油气藏开发认识周期、储量分类评价周期、工程技术迭代提升周期之间的关系,厘定好储量分类动用期次与产能建设部署时间,确定油气藏生产能力的相对峰值和均值,努力实现井筒资源长寿命利用、地面装置长周期使用、储量资源分期高效动用,以提升超深油气田开发的经济性。

### 3.4 高效开发的攻关方向

考虑深层油气藏的特殊性和复杂性,针对储量高效动用、提高采收率和经济高效开发建设配套等问题,需要从以下4个方面推进关键技术攻关。

#### 3.4.1 近源“生输储盖”组合体系与表征

对于深层、超深层油气藏而言,油气藏烃源岩与储集空间距离近、油气输导通道明显,油气输导体系相对简单。前期研究已经明确了研究区生烃、垂向运聚特征<sup>[27]</sup>,建立了通源断裂带“Ⅰ字型”、次级断裂区“Y字型”和风化壳缝

洞“T字型”3种油气输导模式。下步重点深化生烃演化、构造演化与缝洞体分隔性等耦合关系的研究,明确差异化充注关系,建立充注差异化控因及评价指标。在此基础上,构建油气组分组合,油气藏充注强度的定量或半定量预测方法,以提高未并控区油气藏特征的预测能力。

#### 3.4.2 储集空间类型与保存条件

塔里木盆地油气藏开发实践证明,超深层油气的储集空间类型有孔隙、裂缝、洞穴,且保存程度高,存在3种有效保存机制,分别为“门框效应”“穹隆效应”和“异常高压”。“门框效应”是指直立断裂带两侧的基岩(即门框),能为断裂带内储集体提供支撑力,减弱破碎带内储层的压实作用,对于该地质现象,下步需重点攻关作用机理,确定上覆地层对储集空间的影响深度和影响区内孔隙度,为储集体的精细表征提供依据;“穹隆效应”指顶篷构造可减轻上覆地层负荷现象<sup>[28]</sup>,下步重点深化穹隆构造变形机制,攻关中和面预测方法、有效空间区间和参数赋值方法;“异常高压”是流体局部封闭产生流动屏障的现象<sup>[29-30]</sup>。关于异常高压区封闭条件、不同等效压力与孔隙度赋值、该区内开发井采收率预测方法是下步攻关重点。

#### 3.4.3 独立分隔缝洞体边界及内部连通性表征

深层断裂带内发育了一系列的分隔缝洞体。目前依据地震反射特征,初步建立了“梯度结构张量+最大相似倾角”缝洞体边界刻画技术。为了更好地支撑超深油气藏的高效开发,重点对不同构造演化阶段断裂边界、分段边界、纵向缝洞分隔性进行深化研究,确定独立分隔缝洞体的空间边界,建立缝洞体流动单元划分标准,为储量动用、剩余油挖潜、提高采收等提供地质基础。现场开发实践表明:缝洞体内部连通程度及其降压过程保持状况是制约储量高效动用的关键因素,对断控缝洞集合体内部结构的描述,目前还处于探索阶段。下步攻关方向:①提升超深层地震对裂缝描述精度;②加大物模实验构建不同应力状态下分段裂缝网格模型;③攻关盆地物理模拟、数值模拟,构建应力场,推进局部应力场及缝洞体连通程度的量化工作。

#### 3.4.4 开发策略及经济评价

“一井多靶点、一眼多动用”是实现高效开发的重要方式。因此,结合研究区油气藏特征,要综合考虑油气资源的分布特征和现有工程技术水平,同时兼顾开发决策的要求,从资源分布特征角度出发实现一井多动。需要重点明确以下几方面的条件:①有效储集体具有明显

分隔性;②多套储集体近距离相邻,但该距离可随工程工艺技术迭代提升而增加;③多套储集体储量规模可满足经济效益开发。对于不同开发政策而言,衰竭式开发需要重点攻克靶点的优选条件,补能开发需要重点攻关井型设计和井网构建。例如,利用通源主断面分析确定钻井平面靶点位置,利用串珠强波谷确定栅状结构储层的纵向靶点位置,与现今应力场方向较大夹角确定轨迹方位,尽可能多穿开启性断裂带。目前,关于“分支井”和“侧钻分次”的理论已经成熟,但对于超深层领域的工程工艺配套技术还有待于进一步攻关和论证。

通过制定科学合理的开发策略,指导生产制度调整和生产管理,达到提高油气采收率的目的,是深层油气藏经济高效开发亟须攻关的方向。

从全生命周期开发策略来讲,针对低含凝析油凝析气藏,在不考虑水体影响的基础上,根据应力敏感上下限压力、露点压力和最大反凝析压力,初步建立了全生命周期“三段式”衰竭开发模型(图7)。第一阶段为高速开发阶段,该阶段无相变和压敏现象,高采速开发可实现资金的快速回流。第二阶段为降速开发阶段,此阶段出现应力敏感和相态变化,细分为“应力敏感阶段”“应力敏感+反凝析阶段”和“反凝析阶段”。通过降低采速实现能量均衡释放(图8),达到减少凝析油损失的目的。第三阶段为提速开发阶段,该阶段储层结构已趋于稳定、流体相态变化由反凝析转向反蒸发,适当提高采速可加速油气资源的采出。针对中高含凝析油凝析气藏,超深层凝析气藏保压开发压力窗口的选择至关重要,秉承经济有效

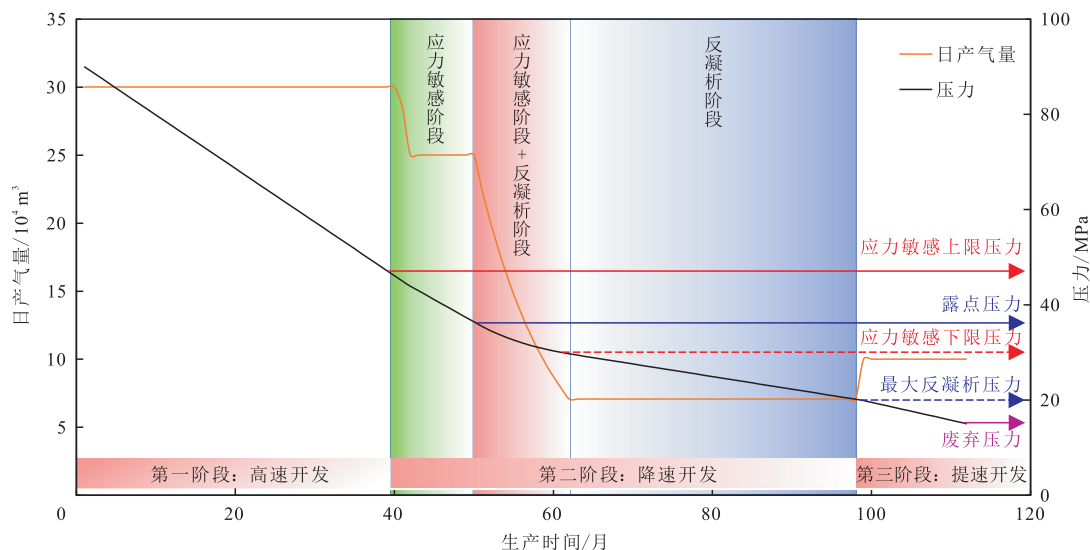
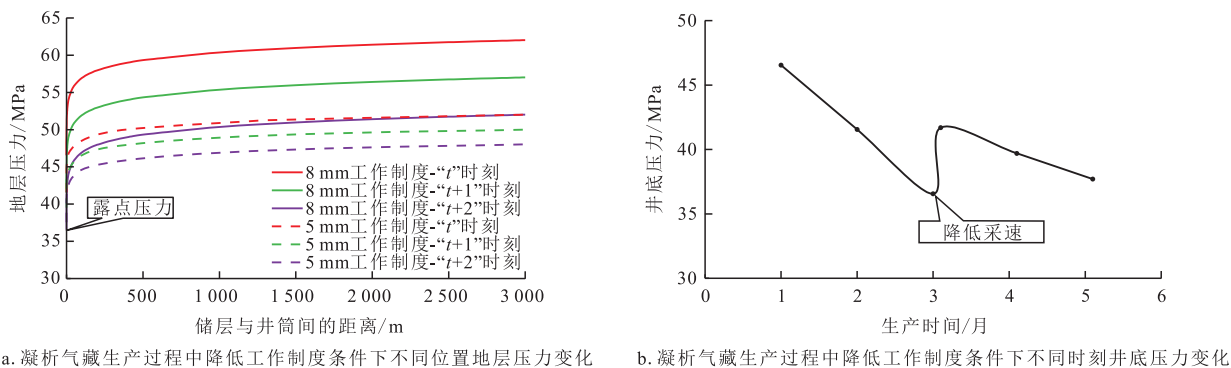


图7 凝析气藏全生命周期三段式衰竭开发策略

Fig. 7 Three-phase differentiated development strategy for full life cycle of a condensate gas reservoir



a. 凝析气藏生产过程中降低工作制度条件下不同位置地层压力变化 b. 凝析气藏生产过程中降低工作制度条件下不同时刻井底压力变化

图8 凝析气藏生产过程中降低工作制度条件下不同位置地层压力、不同时刻井底压力变化

Fig. 8 Variation of formation pressure at different positions and bottom hole pressure at different times during production of a condensate gas reservoir under reduced operating conditions

的原则,需要在露点压力至最大反凝析压力之间优选效益最大化的注入压力值。其他工艺、参数选取与常规凝析气藏开发一致,可借助于数值模拟方法获取。

深层油气开发的难点更多,在遵循效益最大化原则的前提下,厘清采收率与效益的关系,寻找“现金流-采收率-时间”三者间的平衡关系,明确深层油气藏经济开发的界限,制定深层油气藏长期稳产的开发策略显得尤为重要。

## 4 结论与认识

通过对塔里木盆地碳酸盐岩深层油气藏的复杂性进行研究,深入剖析了制约此类油气藏高效开发的核心问题,探讨了支撑高效开发亟须攻关方向和配套关键技术,形成了以下几点结论和认识:

1) 塔里木盆地深层油气藏的复杂性主要体现在以下4个方面:①成藏条件的复杂性,具有近源成藏的特点,多次充注,油气组分多样;②储集空间类型及组合多样、不同区域及控因下尺度差异大、空间分布不均;③在多次差异化构造作用下,导致缝洞体内部结构具有极强的非均质性;④多期充注成藏特征显著,油气组分宽泛且复杂,有明显重力分异现象。

2) 针对深层油气高效开发面临的3个核心问题:①从地质、工程和整体规划角度出发,探讨了如何保障单井“多控长稳”和整体高效动用;②从取舍得当、时机精准、方式最优3个层面探讨了如何提高油气采收率;③通过对油气藏认识、储量评价、技术迭代3个周期的平衡关系,探讨深层油气的开发策略。

3) 指出了支撑高效开发4个攻关方向:①近源“生输储盖”组合下的油藏特征预测方法;②深层缝洞保存的量化参数表征方法;③分隔缝洞体边界及内部连通性表征方法;④建立超深领域全生命周期经济评价体系和差异化开发策略。

### 参考文献

[1] 中国国家标准化管理委员会.石油天然气钻进工程术语:GB/T 28911—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.  
Standardization Administration of the People's Republic of China. Vocabulary of drilling engineering for the petroleum and natural gas: GB/T 28911—2012[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2012.

[2] 张运东,方辉,刘帅奇,等.深地油气勘探开发技术发展现状与趋势[J].世界石油工业,2023,30(6):12-20.  
ZHANG Yundong, FANG Hui, LIU Shuaiqi, et al. Process and development direction of deep oil and gas exploration and development[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(6): 12-20.

[3] 白国平,曹斌凤.全球深层油气藏及其分布规律[J].石油与天然气地质,2014,35(1):19-25.  
BAI Guoping, CAO Bin Feng. Characteristics and distribution patterns of deep petroleum accumulations in the world[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(1): 19-25.

[4] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等.中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J].石油与天然气地质,2020,41(4):655-672.  
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.

[5] 杨宪彰,能源,徐振平,等.塔里木盆地三大构造旋回油气成藏特征[J].现代地质,2024,38(2):287-299.  
YANG Xianzhang, NENG Yuan, XU Zhenping, et al. Characteristics of hydrocarbon accumulation by processes of the three structural cyclones in Tarim Basin[J]. Geoscience, 2024, 38(2): 287-299.

[6] 赵文智,汪泽成,黄福喜,等.中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位[J].石油学报,2023,44(12):2020-2032.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HUANG Fuxi, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2020-2032.

[7] 朱光有,姜华,黄土鹏,等.中国海相油气成藏理论新进展与超大型油气区预测[J/OL].石油学报,2023,1-25[2024-03-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2128.TE.20230625.1736.002.html>.  
ZHU Guangyou, JIANG Hua, HUANG Shipeng, et al. New progress of marine hydrocarbon accumulation theory and prediction of super large oil and gas areas in China[J/OL]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 1-25 [2024-03-15].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2128.TE.20230625.1736.002.html>.

[8] 马安来,金之钧,刘金钟.塔里木盆地寒武系深层油气赋存相态研究[J].石油实验地质,2015,37(6):681-688.  
MA Anlai, JIN Zhijun, LIU Jinzhong. Hydrocarbon phase in the deep Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(6): 681-688.

[9] 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.

[10] 李阳,薛兆杰,程喆,等.中国深层油气勘探开发进展与发展方向[J].中国石油勘探,2020,25(1):45-57.  
LI Yang, XUE Zhaojie, CHENG Zhe, et al. Progress and development directions of deep oil and gas exploration and development in China[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(1): 45-57.

[11] 郭旭升,马玲.中国石化向深地进军[N].中国石化报,2022-11-14.  
GUO Xusheng, MA Ling. Sinopec entered the deep land[N]. China Petrochemical News, 2022-11-14.

[12] 何治亮,陆建林,林娟华,等.中国海相盆地原型-改造分析与油气有序聚集模式[J].地学前缘,2022,29(6):60-72.  
HE Zhiliang, LU Jianlin, LIN Juanhua, et al. Marine basins in China: A prototype-reconstruction analyses and ordered hydrocarbon

- accumulation patterns[J]. *Earth Science Frontiers*, 2022, 29(6): 60–72.
- [13] 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.
- [14] 张宁宇,何登发,孙衍鹏,等.全球碳酸盐岩大油气田分布特征及其控制因素[J]. *中国石油勘探*, 2014, 19(6): 54–65.
- ZHANG Ningning, HE Dengfa, SUN Yanpeng, et al. Distribution patterns and controlling factors of giant carbonate rock oil and gas fields worldwide[J]. *China Petroleum Exploration*, 2014, 19(6): 54–65.
- [15] 闫磊,朱光有,王珊,等.塔里木盆地震旦系—寒武系万米超深层天然气成藏条件与有利区带优选[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1446–1457.
- YAN Lei, ZHU Guangyou, WANG Shan, et al. Accumulation conditions and favorable areas for natural gas accumulation in the 10000 meters ultra-deep Sinian–Cambrian in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(11): 1446–1457.
- [16] 李慧莉,刘士林,杨圣彬,等.塔中—巴麦地区构造沉积演化及其对奥陶系储层的控制[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 883–892.
- LI Huili, LIU Shilin, YANG Shengbin, et al. Tectonic–sedimentary evolution of Tazhong–Bachu–Maigaiti area and its control on the Ordovician reservoir[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(6): 883–892.
- [17] 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.
- [18] 陈思禹,王颖晋,郭俊阳,等.塔中东部碳酸盐岩储集层特征对比及勘探开发有利区预测[J]. *东北石油大学学报*, 2021, 45(2): 10–19.
- CHEN Siyu, WANG Yingjin, GUO Junyang, et al. Comparison of carbonate reservoir characteristics in Eastern Tazhong Block of Tarim Basin and prediction of favorable development zone[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2021, 45(2): 10–19.
- [19] 胡文革.塔河碳酸盐岩缝洞型油藏开发技术及攻关方向[J]. *油气藏评价与开发*, 2020, 10(2): 1–10.
- HU Wenge. Development technology and research direction of fractured–vuggy carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2020, 10(2): 1–10.
- [20] 胡文革.顺北油气田断溶体油藏油井产能评价新方法[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(2): 168–172.
- HU Wenge. A new method for evaluating the productivity of oil wells in fault–karst reservoirs in Shunbei oil & gas field[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2021, 42(2): 168–172.
- [21] 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): 347–355.
- 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): 347–355.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 付晓飞,冯军,王海学,等.走滑断裂“分期–异向”变形过程砂箱物理模拟:以塔里木盆地顺北5号断层北段为例[J]. *地球科学*, 2023, 48(6): 2104–2116.
- FU Xiaofei, FENG Jun, WANG Haixue, et al. Sandbox physical simulation on “different period–different direction” deformation process of strike–slip faults: A case study of northern segment of Shunbei No. 5 fault in Tarim Basin[J]. *Earth Science*, 2023, 48(6): 2104–2116.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 漆立新,云露.塔里木台盆区碳酸盐岩成藏模式与勘探实践[J]. *石油实验地质*, 2020, 42(5): 867–876.
- QI Lixin, YUN Lu. Carbonate reservoir forming model and exploration in Tarim Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2020, 42(5): 867–876.
- [28] 杨学文.塔里木盆地超深油气勘探实践与创新[M].北京:石油工业出版社, 2019.
- YANG Xuewen. Practice and innovation of ultra-deep oil and gas exploration in Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [29] 王石,万琼华,陈玉琨,等.基于辫状河储层构型的流动单元划分及其分布规律[J]. *油气地质与采收率*, 2015, 22(5): 47–51.
- WANG Shi, WAN Qionghua, CHEN Yukun, et al. Flow units division and their distribution law based on braided river reservoir architecture[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2015, 22(5): 47–51.
- [30] 万琼华,罗伟,梁杰,等.基于储层构型的流动单元渗流屏障级次研究[J]. *西南石油大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(1): 77–84.
- WAN Qionghua, LUO Wei, LIANG Jie, et al. Reservoir architecture–based classification of seepage barriers of flow unit[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2019, 41(1): 77–84.