

引用: 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东 1 井奥陶系重大发现及意义 [J]. 中国石油勘探, 2023, 28(1): 47-58.  
Wang Qinghua, Yang Haijun, Zhang Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(1): 47-58.

# 塔里木盆地富满油田富东 1 井奥陶系重大发现及意义

王清华 杨海军 张银涛 李勇 杨宪彰 朱永峰 韩剑发 谢舟

(中国石油塔里木油田公司)

**摘 要:** 位于塔里木盆地阿瓦提凹陷—满加尔凹陷过渡带的富东 1 井在奥陶系鹰山组 2 段台缘高能滩获得重大突破, 对碳酸盐岩内幕区成藏具有重要意义。通过对富东 1 井成藏条件、储层特征、油气来源的深入研究, 明确了富满油田东部深层寒武系玉尔吐斯组供烃、台缘高能滩成储、上覆致密碳酸盐岩成盖的生储盖组合, 并建立了“寒武系供烃、次级网状断裂沟通油源、纵向输导、断控台缘高能滩复合油气成藏”新模式。富东 1 井的成功钻探, 证实了台缘高能滩叠合次级网状断裂改造具备成储成藏能力, 突破了早期认为的 8000m 以下超深层碳酸盐岩高能滩的勘探禁区, 拓展了断控碳酸盐岩油气藏模式。同时, 也是以台缘高能滩体 + 次级网状断裂油气藏为勘探思路的成功实践, 打开了轮南—富满台缘带勘探新局面, 有望引领塔里木盆地超深层复杂海相碳酸盐岩的勘探。

**关键词:** 塔里木盆地; 富满油田; 台缘高能滩; 次级网状断裂; 富东 1 井

**中图分类号:** TE112 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2023.01.005

## Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin

Wang Qinghua, Yang Haijun, Zhang Yintao, Li Yong, Yang Xianzhang, Zhu Yongfeng, Han Jianfa, Xie Zhou

(PetroChina Tarim Oilfield Company)

**Abstract:** A major breakthrough has been obtained in the high-energy platform marginal shoal in the second member of the Ordovician Yingshan Formation in Well Fudong 1 drilled in the transitional zone of Awati Sag-Manjiar Sag in Tarim Basin, which is of great significance to the understanding of hydrocarbon accumulation in the inner carbonate rocks. Based on the in-depth studies on hydrocarbon accumulation conditions, reservoir properties and hydrocarbon sources in Well Fudong 1, the hydrocarbon accumulation assemblage in the eastern Fuman Oilfield is identified, which is composed of source rock of the deep Cambrian Yuertus Formation, reservoir of the high-energy platform marginal shoal body, and cap rock of the overlying tight carbonate rocks, as well as a new complex hydrocarbon accumulation pattern is established, namely “hydrocarbon supply by the Cambrian, reservoir and oil source connection by secondary network faults, vertical hydrocarbon transport, and reservoir of fault-controlled high-energy shoal body”. The success of Well Fudong 1 confirms that the high-energy platform marginal shoal reconstructed by the secondary network faults has the capacities of reservoir development and hydrocarbon accumulation, breaking through the exploration forbidden zone in ultra-deep high-energy shoal carbonate rocks with a depth of greater than 8000 m, and expanding the understanding on hydrocarbon accumulation pattern in fault-controlled carbonate reservoir. In addition, it is a successful practice of exploration idea of “high-energy platform marginal shoal body + secondary network fault oil and gas reservoir”, which supports to open a new situation of exploration in Lunnan-Fuman platform marginal zone and lead the exploration deployment of ultra-deep complex marine carbonate rocks in Tarim Basin.

**Key words:** Tarim Basin, Fuman Oilfield, platform marginal high-energy shoal, secondary network fault, Well Fudong 1

基金项目: 国家科技重大专项“深层—超深层油气成藏过程与勘探新领域”(2017ZX05008-004); 中国石油天然气股份有限公司科技项目“多尺度缝洞型油藏储层静态刻画及动态描述技术研究”(2021DJ1501); 塔里木油田科技项目“富满油田勘探开发一体化关键技术攻关研究”(T202112)。

第一作者简介: 王清华 (1968-), 男, 湖北潜江人, 博士, 2007 年毕业于浙江大学, 教授级高级工程师, 现主要从事塔里木盆地油气勘探开发研究工作。地址: 新疆库尔勒市石化大道 26 号中国石油塔里木油田公司, 邮政编码: 841000。E-mail: wqh-tlm@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-01-04; 修改日期: 2023-01-14

## 0 引言

塔里木盆地寒武系—奥陶系碳酸盐岩分布面积逾  $20 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、厚度达 3000m, 发育多套生储盖组合, 油气成藏条件优越<sup>[1-2]</sup>。通过近 30 年的勘探, 已在奥陶系碳酸盐岩发现轮南—塔河油田和塔中凝析气田, 分别是我国最大的海相碳酸盐岩油田与凝析气田<sup>[3]</sup>。近期又在北部坳陷奥陶系碳酸盐岩针对主干走滑断裂发现了超深层走滑断控油气田<sup>[4-6]</sup>, 落实了 10 亿吨级储量区, 建成全球陆上首个超深层 (>7500m) 年产原油超  $200 \times 10^4 \text{ t}$  的走滑断控油气田, 该油田是我国海相碳酸盐岩油气勘探开发的重点领域<sup>[4]</sup>。

前期的勘探开发实践证实富满油田走滑断裂控油藏, 具有“大断裂大油藏, 小断裂小油藏”的特征, 经过近几年的集中勘探实践证实, 主干断裂活动强, 储层物质基础好, 断层相关岩溶发育, 成储规模大, 且目前均已规模建产。剩余未钻的次级断裂短而小, 资源规模不足  $5000 \times 10^4 \text{ t}$ 。次级断裂活动弱, 精细刻画难度大, 后期岩溶改造情况不明, 能否规模成储成藏, 成了制约富满油田勘探部署的难题, 急需开展主干断裂间微小断裂的详细解剖和成储成藏研究, 以便寻找新的战略接替领域。鉴于此, 跳出主干断裂带立式板状油气藏模式, 通过开展富满油田东部地区次级断裂及台缘滩体精细刻画研究发现, 该地区发育完整的寒武系进积型—奥陶系退积型台缘, 多期台缘高能滩体叠加迁移, 次级断裂呈网状分布, 对储层具有明显改造作用且能有效沟通寒武系油源, 并建立了“寒武系供烃、次级网状断裂沟通油源、纵向输导、断控台缘高能滩复合油气成藏”新模式, 部署的富东 1 井在奥陶系碳酸盐岩断控台缘高能滩获得重大突破。

本文以富东 1 井发现为契机, 总结了断控台缘高能滩成藏特征, 旨在为其他具备类似地质条件的地区提供勘探参考和借鉴。

## 1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国西北, 面积约为  $56 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。阿瓦提凹陷—满加尔凹陷过渡带 (简称阿满过渡带) 位于塔里木盆地中北部, 东临满加尔凹陷, 南接塔中隆起, 西靠阿瓦提凹陷, 北部为塔北隆起<sup>[7]</sup>。在前南华纪变质基底基础上, 塔里木盆地南华纪—震旦纪发育大陆裂谷沉积体系。寒武纪—早奥陶世, 塔里木盆地在弱伸展构造背景下形成“东盆西台”结构, 满加

尔西部为大型碳酸盐台地<sup>[8]</sup>。阿满过渡带构造古地理表现为南高北低、西高东低<sup>[9]</sup>。中奥陶世, 塔中地区受南北向挤压而逐渐抬升形成大型断隆<sup>[10-11]</sup>, 而塔北地区形成近东西向水下低隆, 构造整体较为平缓, 两者之间过渡部分阿满地区成为塔北延伸的一部分, 阿满过渡带雏形形成; 晚奥陶世, 塔北继续抬升, 塔北南缘斜坡特征进一步加强, 同时满加尔凹陷进一步发育, 阿满过渡带逐渐形成, 与此同时, 塔中隆起进一步抬升, 阿满地区在南北双向挤压作用下发育大规模走滑断裂<sup>[11]</sup>; 随后, 加里东晚期, 塔北隆起又经历隆升, 阿满过渡带广大地区向南倾没斜坡特征加强并定型; 海西—印支期, 阿满过渡带构造变动不大; 喜马拉雅期, 阿满过渡带中—新生界翘倾, 整体北倾, 下古生界仍表现为南倾, 至此阿满过渡带形成现今构造格局<sup>[12]</sup>。

受控于多期构造—沉积变革, 塔里木盆地发现下寒武统、上寒武统、下奥陶统蓬莱坝组与鹰山组、中奥陶统一间房组及上奥陶统良里塔格组等多套含油气层系<sup>[13]</sup>。已探明的油气资源主要分布于塔北隆起南斜坡与塔中隆起北斜坡地区的中—下奥陶统一间房组—鹰山组及上奥陶统良里塔格组, 组成面积逾  $10 \times 10^4 \text{ km}^2$  的富油气系统 (图 1a)。近年来, 北部坳陷中部阿满过渡带富满油田成为油气勘探的重点领域, 并主要围绕一系列大型走滑断裂带展开, 目前主干走滑断裂整体已获得发现。塔里木盆地中—上奥陶统碳酸盐岩主要为石灰岩, 寒武系—下奥陶统则以白云岩为主 (图 1b、c), 奥陶系埋深多为 5000~9000m<sup>[14]</sup>。富满地区位于塔里木盆地两大古隆起构造鞍部, 显生宙以来一直稳定沉降, 保存了最完整的叠合型盆地地层序列。自加里东中期 I 幕开始, 塔里木板块处于持续会聚背景, 碳酸盐岩克拉通消亡, 盆地沉积深水浊流沉积物和陆棚沉积物。加里东中期 III 幕隆升剥蚀程度低, 残留的巨厚泥岩形成了优质的区域盖层 (图 1c)。其中奥陶系碳酸盐岩油气藏主要发育礁滩岩溶储层、层间岩溶储层及断控岩溶储层等, 储层原生孔隙几乎消失殆尽, 次生溶蚀孔洞、裂缝组成了复杂的三重孔隙空间<sup>[15-18]</sup>。断控储层非均质性极强, 储层类型、物性纵横向变化极大, 不受局部构造位置高低的控制, 既不同于国内外典型的孔隙型碳酸盐岩储层, 也不同于常规的地层岩性油气藏储层, 而是由沉积相带—成岩作用—断裂改造三者耦合控制。



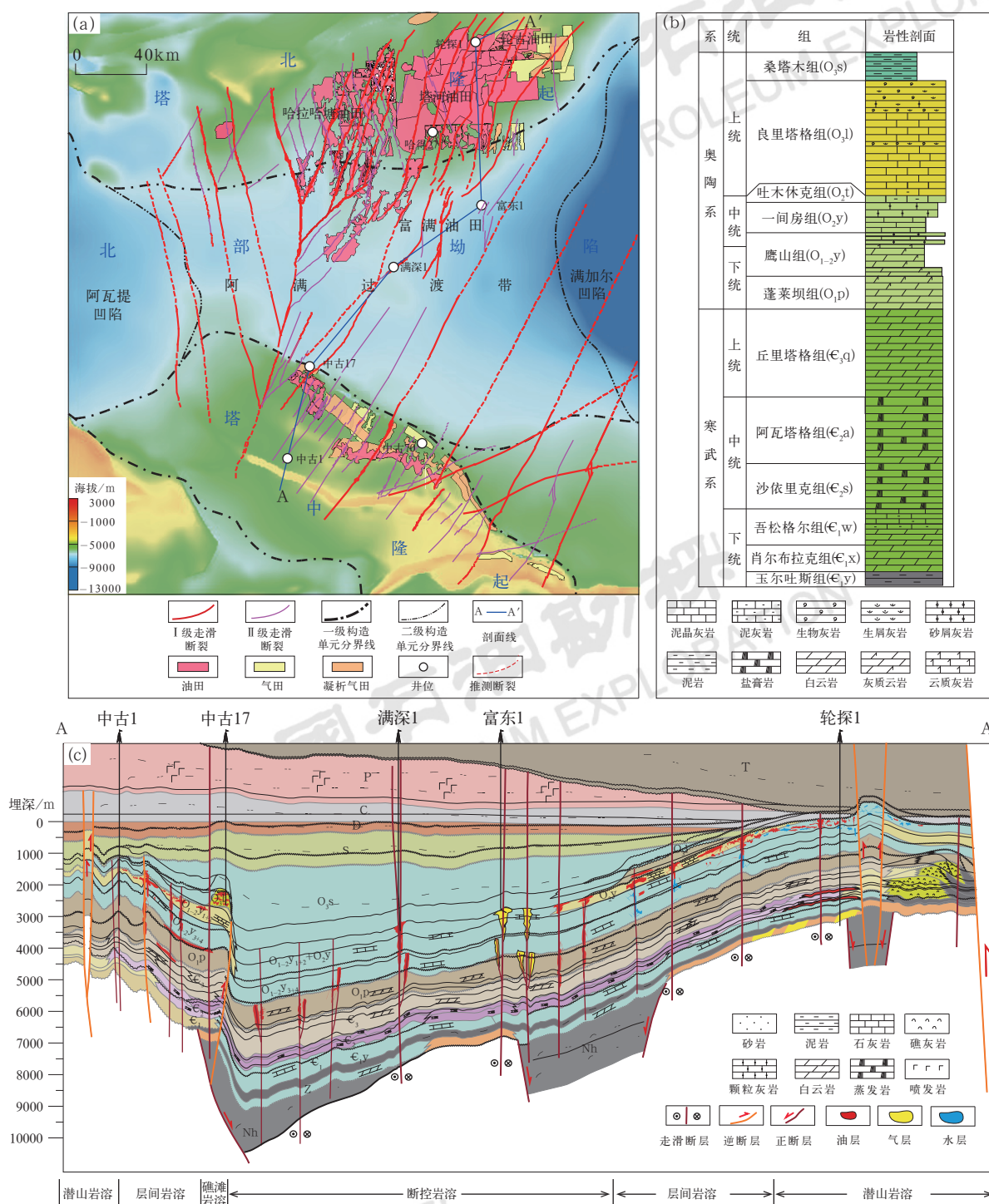


图1 塔里木盆地塔北—塔中地区油气分布图 (a)、综合柱状图 (b) 与南北向油藏模式图 (c)

Fig.1 Oil and gas distribution map (a), comprehensive stratigraphic column (b) and N-S direction oil accumulation pattern (c) in Tabei-Tazhong area in Tarim Basin

(a) 底图为奥陶系碳酸盐岩顶面构造图, 据文献[4]修改; (c) 拉平石炭系底界, 剖面位置见图(a)

## 2 富东 1 井奥陶系油气地质特征

鉴于富满油田目前勘探现状,为加快落实接替领域,实现富满油田持续上产,分别从构造古地理环境、烃源岩条件、油气运聚通道等方面开展了寒武系—奥陶系碳酸盐岩勘探潜力与方向的重新认识。

## 2.1 钻探情况

富东 1 并于 2022 年 3 月 10 日开钻，2022 年 9 月 6 日完钻，完钻井深 8359.05m（斜深）/8318.39m（垂深），完钻层位为奥陶系鹰山组 2 段。钻进过程中累计发生 3 次溢流：用密度  $1.45\text{g}/\text{cm}^3$  钻井液钻进

至井深 8123.57m 液面上涨 0.5m<sup>3</sup>, 密度 1.47g/cm<sup>3</sup> 钻井液钻进至井深 8190.02m 液面上涨 0.5m<sup>3</sup>, 用密度 1.87g/cm<sup>3</sup> 钻井液钻进至井深 8359.05m 液面上涨 1.1m<sup>3</sup>。钻井过程中累计漏失 1.20~2.35g/cm<sup>3</sup> 钻井液 6713.9m<sup>3</sup>, 表明钻至优质储层。

富东 1 井在钻井过程中, 在一间房组—鹰山组 2 段共见气测显示 41.95m/13 层, 最好气测显示井段为 8122~8123.57m, 全烃由 6.29% 上升至 99.9%, C<sub>1</sub> 含量由 2.94% 上升至 84.56%, 组分全, 良好气测显示主要分布于鹰山组 2 段。对富东 1 井一间房组—鹰山组 7925~8359.05m 常规测试, 7mm 油嘴, 油压 90.7MPa, 折日产气 40.5×10<sup>4</sup>m<sup>3</sup>、折日产油 21.4m<sup>3</sup> (图 2)。根据放喷前、放喷后, 关井套压与井筒钻井液组合计算地层压力系数为 2.1, 中深压力为 175.21MPa, 为超高压凝析气藏。

## 2.2 烃源岩厚度大、面积广, 生烃潜力巨大

塔里木盆地寒武系底部玉尔吐斯组发育优质页岩烃源岩<sup>[19-23]</sup>。通过对富东 1 井原油分析及与轮探 1 井玉尔吐斯组烃源岩对比认为, 原油具有低  $\gamma$ -蜡烷、C<sub>27</sub>、C<sub>28</sub>、C<sub>29</sub> 甾烷呈不对称“V”形, 低 C<sub>28</sub> 规则甾烷和高重排甾烷的特征, 与寒武系玉尔吐斯组烃源岩生标特征有明显的亲缘关系, 表明该原油来自寒武系玉尔吐斯组 (图 3)。

结合构造背景差异性分析与区域地震剖面追踪, 对玉尔吐斯组进行精细刻画, 发育两个烃源岩中心

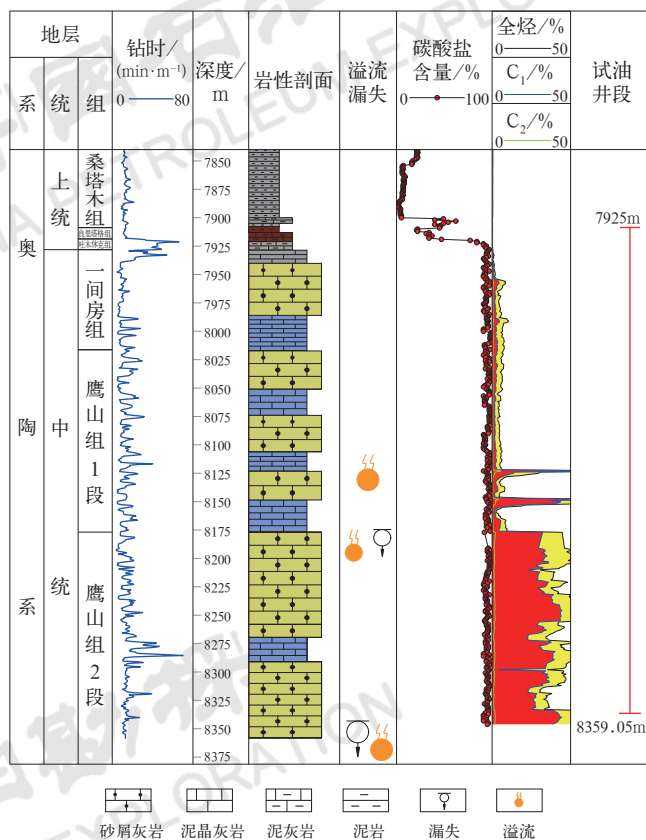


图 2 富东 1 井综合柱状图

Fig.2 Comprehensive stratigraphic column of Well Fudong 1

(图 4), 分别位于阿满过渡带与满加尔凹陷的西部, 寒武系玉尔吐斯组烃源岩平均厚度逾 80m, 分别向周边古隆起区减薄尖灭, 其中东边盆地相区烃源岩 R。

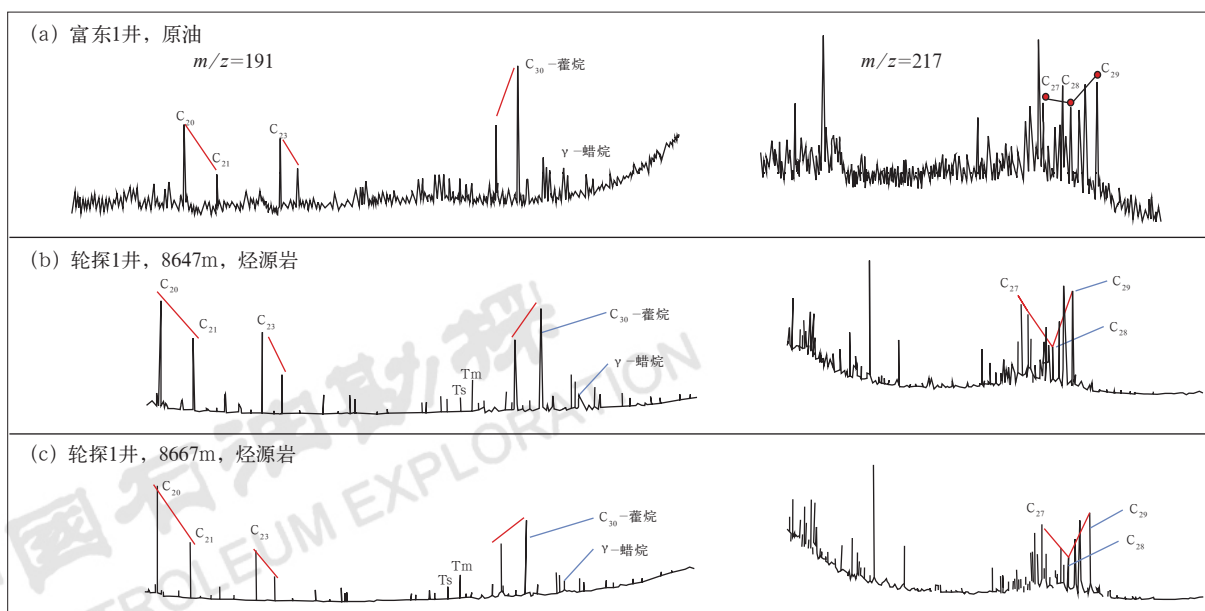


图 3 富东 1 井原油及轮探 1 井烃源岩生物标志化合物特征

Fig.3 Characteristics of biomarkers of crude oil in Well Fudong 1 and source rock in Well Luntan 1

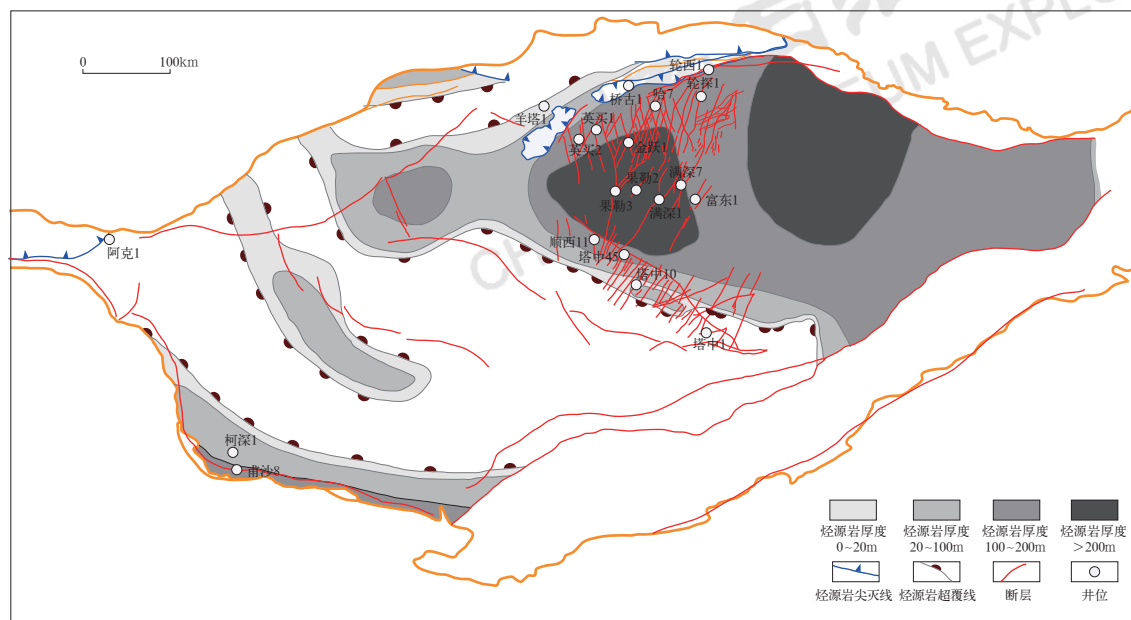


图 4 塔里木盆地地下寒武统玉尔吐斯组烃源岩分布图

Fig.4 Plane distribution of source rock in the Lower Cambrian Yuertus Formation in Tarim Basin

高达 2.0% 以上, 生烃高峰期为奥陶纪末, 西部阿满过渡带烃源岩在加里东晚期—海西期持续生烃。单井实钻证实, 轮探 1 井黑色泥岩段厚度为 18m, TOC 为 3.2%~18.4%, 平均为 12.4%。轮探 1 井  $R_o$  为 1.3%~1.8%, 表明隆起部位烃源岩仍处于高成熟阶段生烃期, 是有效生烃灶<sup>[24]</sup>。阿满过渡带在地温梯度降低的后期浅埋过程中, 具有持续生烃的地质条件。

此外, 在阿满过渡带新三维地震资料精细解释基础上, 发现富满油田之下发育大型的南华系—震旦系裂陷, 可能对富满油田的油气富集具有重要的贡献。

### 2.3 构造古地理环境有利于台缘高能滩体发育

近年来的研究表明, 早奥陶世继承了晚寒武世的构造沉积格局, 早奥陶世晚期塔里木板块内部从伸展应力转变为挤压应力背景, 塔里木板块的构造古地理格局发生巨变, 伴随着台缘带挠曲下沉与台内地貌起伏, 形成近南北向呈“S”形展布的轮南—古城台缘带, 台缘整体南北窄中间宽, 富满地区台缘宽度最大, 通过地震资料解释, 可识别台缘面积达  $6.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。板块内部中一下奥陶统鹰山组沉积期继承早期的构造古地理格局, 保持“两台一盆”的构造分区<sup>[9]</sup> (图 5a、b)。随着中奥陶世原特提斯洋的闭合, 板块南缘从被动大陆边缘转化为活动大陆边缘<sup>[9]</sup>。鹰山组沉积晚期, 在区域挤压过程中, 塔中—巴楚地区开始隆升, 造成台地内部隆升与地貌起伏, 碳酸盐台地

开始出现分异。整体而言, 奥陶系蓬莱坝组至一间房组沉积期, 为退积型台地 (图 5c)。

### 2.4 次级网状断裂改造储层并提供有利输导条件

塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩经历多旋回构造演化, 发育多期多种类型的岩溶作用<sup>[7]</sup>, 已在塔中鹰山组风化壳发现我国最大的碳酸盐岩凝析气田<sup>[15]</sup>, 哈拉哈塘地区发现层间岩溶储层控制的碳酸盐岩大油田<sup>[16]</sup>, 表明岩溶作用对鹰山组礁滩体储层发育具有重要的控制作用。通过铸体薄片分析, 发现富满油田奥陶系鹰山组发育同生期—埋藏期的多种岩溶作用 (图 6)。鹰山组滩体存在广泛的暴露, 形成溶蚀孔隙 (图 6)。部分颗粒灰岩仍保留少量的粒内容孔, 岩心物性统计分析也表明粒屑滩孔隙较为发育。

受主干断裂差异活动影响, 主干断裂间形成大量次级网状断裂, 通过以分方位相干能量梯度扫描为核心的技术体系, 可实现次级断裂有效刻画 (图 7)。受次级断裂改造, 台缘高能滩、台内滩与断裂叠合部位储层最为发育, 地震上多表现为“串珠”状反射特征 (图 7)。通过对主干断裂及断裂间取心井岩心的物性统计分析表明, 裂缝可以提高渗透率最高达 1 个数量级, 沿裂缝的溶蚀孔可提高孔隙度最高达 2~5 倍 (表 1)。此外沿断层破碎带可能发育大型缝洞体储层, 是最为有利的“甜点”储层。对于断裂间, 岩心孔隙度大多小于 2%, 即使是粒屑滩孔隙度也多





小于 3% (图 8a), 渗透率一般小于 1mD, 测井解释储层段孔隙度一般在 1.2%~4%, 为极低的低孔低渗基质储层。而局部钻遇大型缝洞体层段孔隙度在 5%以上、渗透率多大于 5mD。如哈得 27 井岩心孔隙度统计基质孔隙度多低于 6% (图 8b), 但台缘高能滩基质孔隙度高达 5.4%, 而台缘高能滩叠加断裂改造的高孔隙段的孔隙度高达 9.2%, 表明高能相带对储层的发育具有重要控制作用, 断裂及其相关溶蚀作用控制了优质储层的发育与分布, 这与地震储层预测结果

通过断裂方解石测年,获得方解石胶结 U—Pb 测年年龄分布在两个范围,分别为 470Ma—450Ma、约 270Ma<sup>[25-26]</sup>。证实富满油田主干走滑断裂主要形成于加里东中期及海西晚期<sup>[26]</sup>。结合主干断裂形成时期及次级断裂发育层位综合分析,次级断裂形成于鹰山组 1 段沉积期前。次级断裂改造鹰山组 2 段台缘高能滩体,形成规模优质储层,同时为油气运移提供有利输导条件。

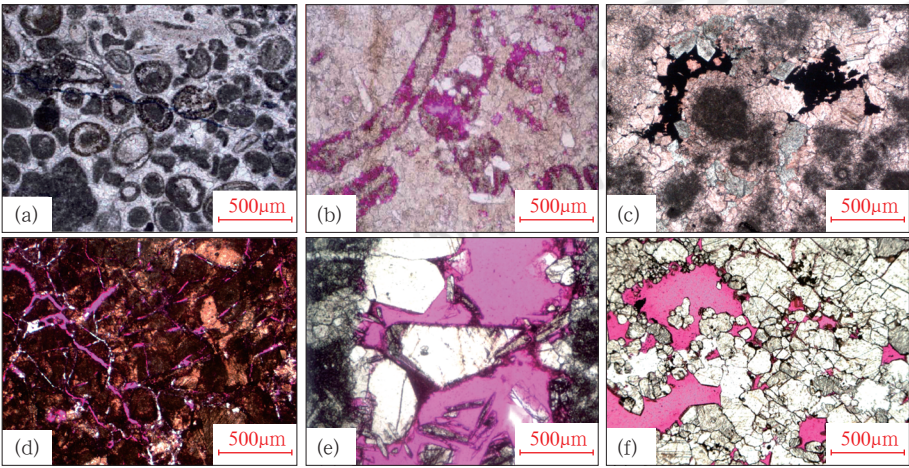


图 6 塔里木盆地富满油田奥陶系鹰山组铸体薄片

Fig.6 Thin section of the Ordovician Yingshan Formation in Fuman Oilfield, Tarim Basin

(a) 哈得 301 井，鲕粒灰岩，粒间孔为方解石胶结；(b) 塔中 241 井，粒内溶孔；(c) 满深 8 井，粒间溶孔；(d) 哈得 27 井，微裂缝及溶蚀孔；(e) 塔中 243 井，构造缝内方解石溶蚀孔；(f) 哈得 23 井，断裂带碎裂岩溶蚀孔洞

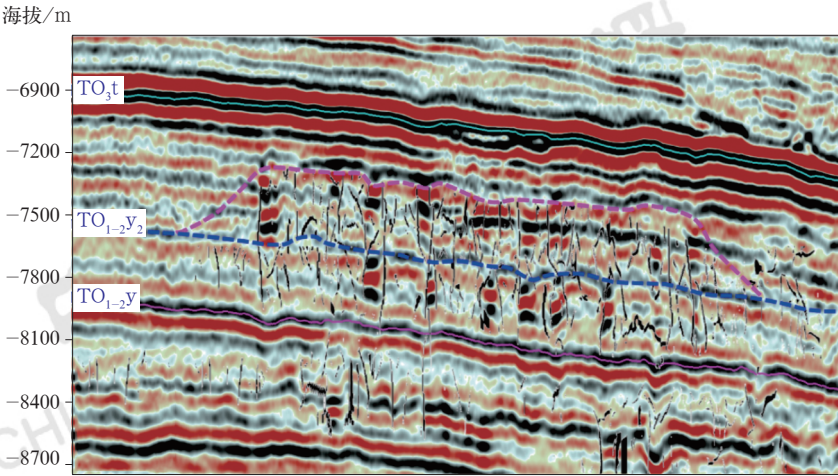


图 7 富满油田东部奥陶系鹰山组 2 段次级断裂预测剖面图

Fig.7 Predicted section of the secondary faults in the second member of the Ordovician Yingshan Formation in the eastern Fuman Oilfield

表 1 富满油田储层物性统计表

Table 1 Statistics of reservoir physical properties in Fuman Oilfield

| 井号     | 层位   | 平均横向渗透率 /mD | 孔隙度 /% | 部位   |
|--------|------|-------------|--------|------|
| 果勒 3   | 鹰山组  | 1.26        | 1.41   | 主干断裂 |
| 果勒 2   | 一间房组 | 0.91        | 0.86   | 次级断裂 |
| 果勒 1   | 一间房组 | 0.15        | 0.46   | 断裂间  |
| 富源 1   | 鹰山组  | 1.56        | 0.68   | 断裂间  |
| 富源 102 | 一间房组 | 0.43        | —      | 断裂间  |
| 富源 205 | 一间房组 | 0.28        | 1.13   | 断裂间  |
| 哈得 23  | 一间房组 | 0.3         | 0.93   | 断裂间  |
| 哈得 25  | 一间房组 | 0.05        | 0.62   | 断裂间  |
| 玉科 101 | 一间房组 | 1.57        | 0.52   | 次级断裂 |



续表

| 井号      | 层位   | 平均横向渗透率 /mD | 孔隙度 /% | 部位   |
|---------|------|-------------|--------|------|
| 跃满 1    | 一间房组 | 0.24        | 0.71   | 主干断裂 |
| 跃满 2    | 一间房组 | 0.27        | 0.44   | 断裂间  |
| 富源 216H | 一间房组 | 0.38        | 1.96   | 次级断裂 |
| 跃满 5    | 一间房组 | 3.85        | 0.98   | 主干断裂 |

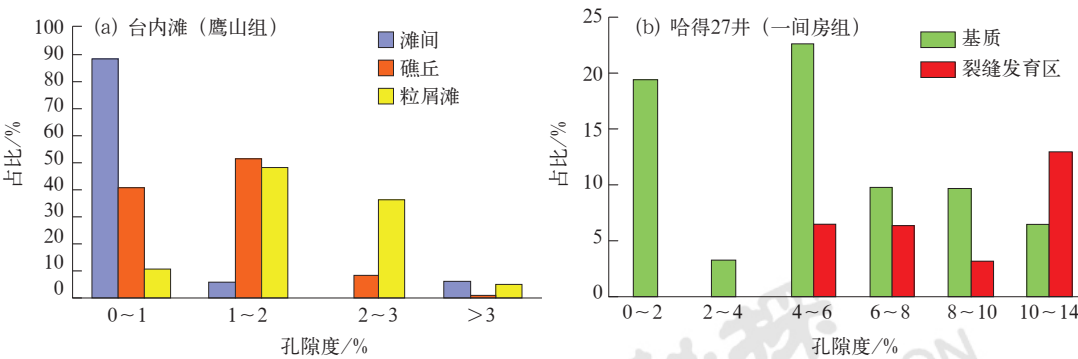


图 8 富满东部岩心孔隙度分布直方图  
Fig.8 Core porosity histogram in the eastern Fuman Oilfield

2.5 具有盖层和保存的优越条件

塔中地区中古 70 井奥陶统鹰山组底部获得工业气流，证实致密碳酸盐岩也能成为较好的盖层。走滑断裂在不同构造时期的会聚（或拉伸）应力场中，多个构造层发育雁列构造，雁列构造以浅层被动撕裂形成为主，呈“V”形收敛，并隐没于构造层内<sup>[24]</sup>。因

此，走滑断裂无法断穿上覆泥质岩盖层，垂向上能够形成封盖而聚集油气（图 9）。

鹰山组 1 段在地震剖面上表现为连续强反射特征，为低能致密碳酸盐岩且次级断裂未断穿，具有一定油气保存条件，易形成高能滩体的直接盖层。鹰山组 2 段广泛发育的高能滩体与上覆的鹰山组 1 段形成良好的储盖组合（图 9）。

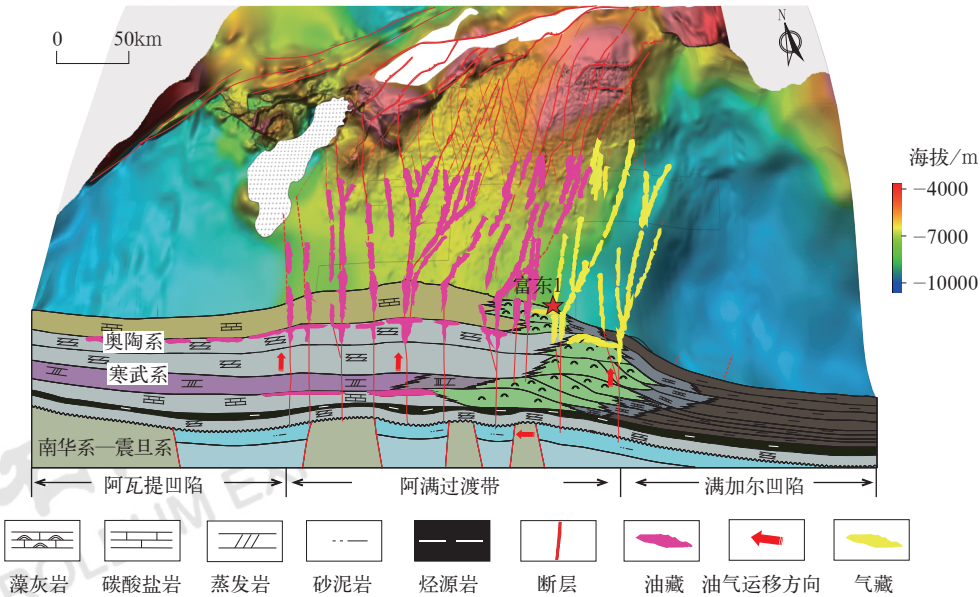


图 9 塔里木盆地阿满过渡带油气成藏模式图

Fig.9 Hydrocarbon accumulation pattern in the transitional zone of Awati Sag-Manjiar Sag in Tarim Basin



### 3 奥陶系断控台缘高能滩成藏条件与勘探启示

#### 3.1 奥陶系断控台缘高能滩的成藏新模式

通过对奥陶系碳酸盐岩成藏地质条件重新认识，跳出主干断裂带立式板状油气藏模式，针对富满油田奥陶系台缘高能滩，建立“寒武系供烃、次级网状断裂沟通油源、纵向输导、断控台缘高能滩复合油气成藏”模式（图 10）。通过成藏地质条件的综合评价，提出主攻阿满过渡带、“富满深层找富满”的部署方案，首选阿满过渡带北部平缓区作为勘探突破

的重点方向。

勘探部署上，明确构造稳定的坳陷区碳酸盐岩致密盖层发育，保存条件是控藏关键，建立不同于主干断裂控储控藏的油气藏模式，从近主干断裂带转向远离主干断裂带，确立逼近烃源岩、寻找台缘高能滩 + 次级网状断裂的油气藏部署思路。在新的高精度三维地震资料基础上，开展地震属性与波阻抗反演，进行断控台缘高能滩碳酸盐岩储层的预测。通过地震储层预测，发现阿满过渡带富满油田奥陶系台缘高能滩储层发育（图 11）。通过区带与目标评价，优选富满油田东部鹰山组断控台缘高能滩部署了富东 1 井（图 12）。

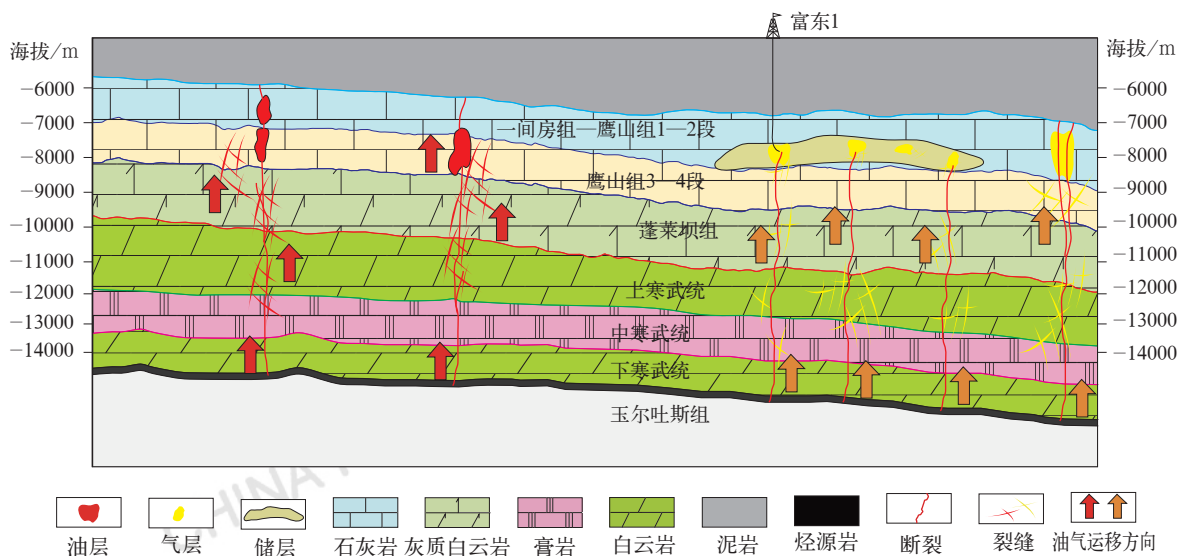


图 10 富东 1 井断控高能滩气藏模式

Fig.10 Gas accumulation pattern in fault-controlled high-energy beach in Well Fudong 1

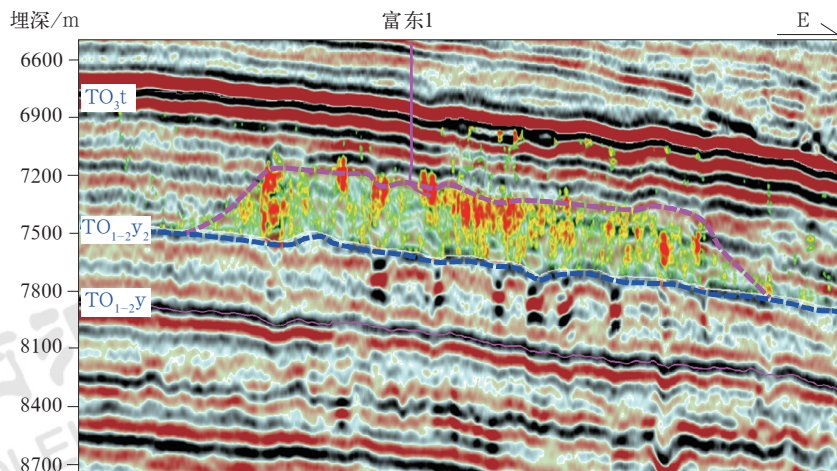


图 11 富东 1 井区鹰山组高能滩缝洞体储层分布图

Fig.11 Distribution of high-energy beach fractured-cavity reservoir in Yingshan Formation in Fudong 1 well block  
红色斑点为串珠状缝洞体地震响应

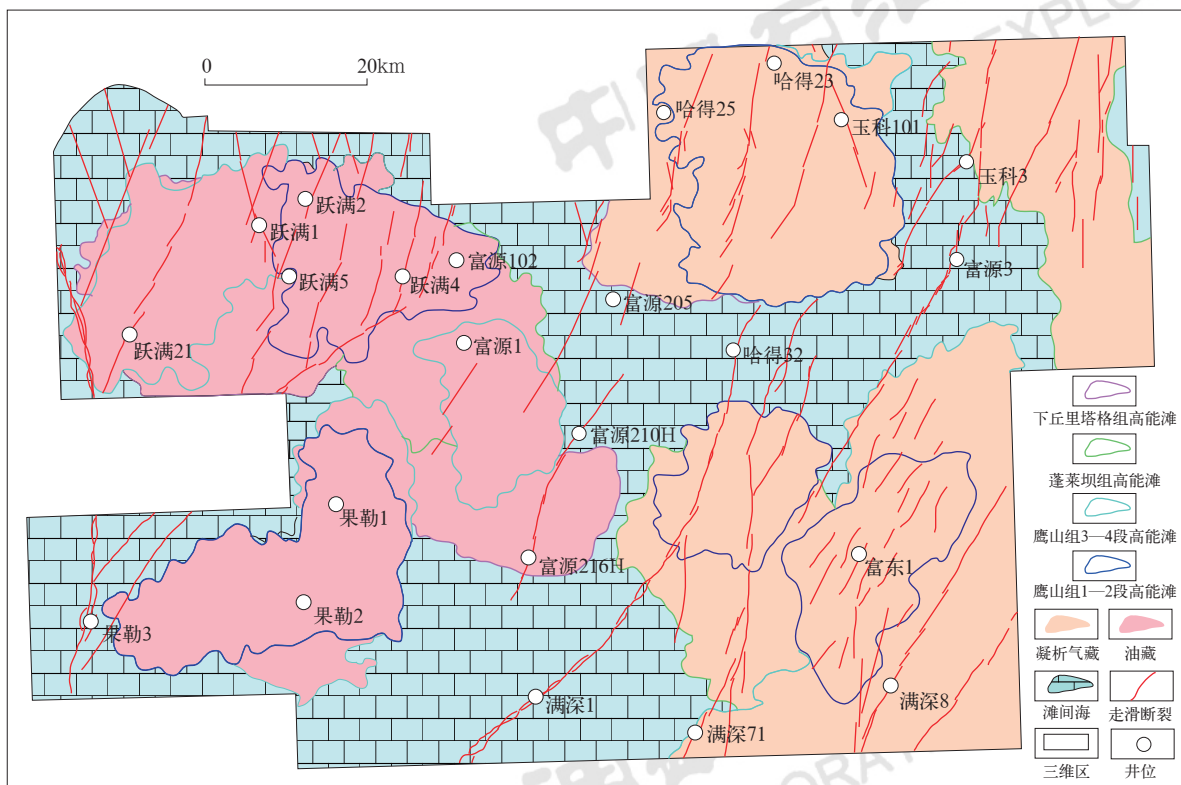


图 12 富满地区高能滩体分布图

Fig.12 Distribution of high-energy beach body in Fuman area

### 3.2 深化地质认识，是获得重大发现的前提

塔里木盆地超深层古老碳酸盐岩油气藏的勘探经历艰辛探索历程，富东1井的发现对类似复杂油气藏的勘探具有启示意义。富东1井的成功勘探突破了早期的两大勘探禁区：一是8000m以深碳酸盐岩高能滩勘探禁区；二是富满油田非断控油气储层的勘探禁区。

塔里木盆地古生界碳酸盐岩油气勘探经历4次勘探思维革命。第一次思维革命从古潜山勘探到古隆起勘探，以构造—储层控藏认识为指导，发现了轮古与塔河油田、塔中I号断裂带礁滩体气田。第二次思维革命从古隆起勘探到古斜坡勘探，以层间岩溶认识为指导，发现了塔中鹰山组风化壳气田、哈拉哈塘油田。第三次思维革命从古斜坡勘探到古坳陷勘探，以断控岩溶认识为指导，发现了富满油田、顺北油田等走滑断控油气田。第四次思维革命则从古坳陷断控型碳酸盐岩油气勘探到古坳陷多层系多类型立体勘探，实现富东1井碳酸盐岩台缘高能滩勘探的突破。

近年来，勘探开发实践证明走滑断裂具有控储控藏作用，超深层坳陷区可以形成断控规模储层与油气

聚集<sup>[27-28]</sup>。通过深化认识，优选了奥陶系碳酸盐岩台缘高能滩发育，并叠加次级网状断裂的富满油田东部作为勘探的突破口。富东1井的钻探证实8000m以深碳酸盐岩高能滩仍有优质储层发育。

### 3.3 持续技术攻关，是获得重大发现的关键

由于塔里木盆地超深层面临其他地区前所未有的极为复杂的油气成藏地质条件，古老海相碳酸盐岩储层非均质性极强，油气水分布异常复杂，面临储层预测难、井点优选难、油气稳产难的世界级难题。现有的勘探开发技术难以准确地指导与预测超深层油气分布，不足以支撑碳酸盐岩台缘高能滩的勘探。通过不断的技术攻关，形成了超深层复杂碳酸盐岩油气藏勘探的配套技术，包括超深层走滑断裂带碳酸盐岩高密度三维地震采集处理技术、板内弱走滑断裂及其相关储层雕刻与评价的方法技术、超深层碳酸盐岩差异布井技术、深层碳酸盐岩钻井技术与酸压改造配套技术。

实践证明，以“地震、钻井、试油”三大技术为核心的勘探配套技术进步，逐步突破了超深层复杂碳酸盐岩井点优选难等技术难关，支撑了超深层复杂碳酸盐岩油气藏的不断发现。

### 3.4 坚持不懈探索,是获得重大发现的保证

前期主要围绕隆起部位的礁滩体与风化壳开展油气勘探,形成了“古隆起控油、斜坡富集”的基本地质认识,并建立了大型“准层状”的相控/溶控的规模储层与油气藏模式,在勘探实践中也取得良好的效果。

通过重新认识发现,富满油田走滑断裂系统对奥陶系碳酸盐岩储层与油气分布具有重要的控制作用,呈现明显“断控”特征,不同于风化壳与礁滩体控制的大型“准层状”油气藏及国内外常规“断控”油气藏。在此基础上,研究发现台缘高能滩叠加次级网状断裂也能形成规模储层,逐步建立碳酸盐岩断控台缘高能滩的油气藏模型,突破了“古隆起控油”与“准层状”的相控规模储层理论模型,进而形成了寻找台缘高能滩叠加次级网状断裂的勘探思路,引领了深层—超深层复杂海相碳酸盐岩的勘探。

## 4 结论

(1) 富东1井目的层为鹰山组,虽距主干断裂远,但台缘高能滩+次级网状断裂溶蚀改造可形成优质储层且能有效沟通油源,上覆致密灰岩可形成直接盖层,以及寒武系烃源岩供烃,是该井获高产重要原因。

(2) 针对富满油田奥陶系台缘高能滩,建立的“寒武系供烃、次级网状断裂沟通油源、纵向输导、断控台缘高能滩复合油气成藏”新模式,丰富了断控碳酸盐岩成藏模式。

(3) 阿满过渡带富满油田上寒武统下丘里塔格组—鹰山组断控台缘高能滩体有利勘探面积可达6200km<sup>2</sup>。富东1井区台缘高能滩面积约为400km<sup>2</sup>,预测天然气资源量超1000×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>。勘探潜力巨大,有望推动富满油田下一步天然气规模增储。

### 参考文献

- [1] 赵文智,汪泽成,胡素云,等.中国陆上三大克拉通盆地海相碳酸盐岩油气藏大型化成藏条件与特征[J].石油学报,2012,33(增刊2):1-10.  
Zhao Wenzhi, Wang Zecheng, Hu Suyun, et al. Large-scale hydrocarbon accumulation factors and characteristics of marine carbonate reservoirs in three large onshore cratonic basins in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(S2):1-10.
- [2] 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 exploration of deep marine petroleum accumulations in

- China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4):655-672.
- [3] 田军,王清华,杨海军,等.塔里木盆地油气勘探历程与启示[J].新疆石油地质,2021,42(3):272-282.  
Tian Jun, Wang Qinghua, Yang Haijun, et al. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021, 42(3):272-282.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 王清华,杨海军,汪如军,等.塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J].中国石油勘探,2021,26(4):58-71.  
Wang Qinghua, Yang Haijun, Wang Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(4):58-71.
- [7] 何治亮,云露,尤东华,等.塔里木盆地阿满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测[J].地学前缘,2019,26(1):13-21.  
He Zhiliang, Yun Lu, You Donghua, et al. Genesis and distribution prediction of the ultra-deep carbonate reservoirs in the transitional zone between the Awati and Manjiaer depressions, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1):13-21.
- [8] 杜金虎.塔里木盆地寒武—奥陶系碳酸盐岩油气勘探[M].北京:石油工业出版社,2010.  
Du Jinhu. Oil and gas exploration of Cambrian-Ordovician carbonate in Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [9] 郭光辉,李启明,肖中尧,等.塔里木盆地古隆起演化特征及油气勘探[J].大地构造与成矿学,2009,33(1):124-130.  
Wu Guanghui, Li Qiming, Xiao Zhongyao, et al. The evolution characteristics of palaeo-uplifts in Tarim Basin and its exploration directions for oil and gas[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2009, 33(1):124-130.
- [10] 任建业,张俊霞,阳怀忠,等.塔里木盆地中央隆起带断裂系统分析[J].岩石学报,2011,27(1):219-230.  
Ren Jianye, Zhang Junxia, Yang Huaizhong, et al. Analysis of fault systems in the central uplift, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(1):219-230.
- [11] 李国会,李世银,李会元,等.塔里木盆地中部走滑断裂系统分布格局及其成因[J].天然气工业,2021,41(3):30-37.  
Li Guohui, Li Shiyin, Li Huiyuan, et al. Distribution pattern and formation mechanism of the strike-slip fault system in the central Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(3):30-37.
- [12] 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.  
Jia Chengzao. Tectonic characteristics and petroleum, Tarim



- Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997.
- [13] 郭光辉, 庞雄奇, 李启明, 等. 克拉通碳酸盐岩构造与油气: 以塔里木盆地为例[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Wu Guanghui, Pang Xiongqi, Li Qiming, *et al.* The structural characteristics of carbonate rocks and their effects on hydrocarbon exploration in Craton Basin: a case study of the Tarim Basin[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [14] 王成林, 郭光辉, 崔文娟, 等. 塔里木盆地奥陶系鹰山组台内滩的特征与分布[J]. 沉积学报, 2011,29(6):1048–1057.
- Wang Chenglin, Wu Guanghui, Cui Wenjuan, *et al.* Characteristics and distribution of intra-platform beach of the lower-middle Ordovician Yingshan Formation Carbonate in Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011,29(6):1048–1057.
- [15] 韩剑发, 张海祖, 于红枫, 等. 塔中隆起海相碳酸盐岩大型凝析气田成藏特征与勘探[J]. 岩石学报, 2012,28(3):769–782.
- Han Jianfa, Zhang Haizu, Yu Hongfeng, *et al.* Hydrocarbon accumulation characteristic and exploration on large marine carbonate condensate field in Tazhong Uplift[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012,28(3):769–782.
- [16] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究[J]. 岩石学报, 2011,27(3):827–844.
- Zhu Guangyou, Yang Haijun, Zhu Yongfeng, *et al.* Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilcatam area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2011,27(3):827–844.
- [17] 杨海军, 郭光辉, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通内盆地走滑断层构造解析[J]. 地质科学, 2020,55(1):1–16.
- Yang Haijun, Wu Guanghui, Han Jianfa, *et al.* Structural analysis of strike-slip faults in the Tarim intracratonic basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020,55(1):1–16.
- [18] 郭光辉, 马兵山, 韩剑发, 等. 塔里木克拉通盆地中部走滑断裂形成与发育机制[J]. 石油勘探与开发, 2021,48(3):510–520.
- Wu Guanghui, Ma Bingshan, Han Jianfa, *et al.* Origin and growth mechanisms of strike-slip faults in the central Tarim cratonic basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021,48(3):510–520.
- [19] 张水昌, 高志勇, 李建军, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系海相烃源岩识别与分布预测[J]. 石油勘探与开发, 2012,39(3):305–314.
- Zhang Shuichang, Gao Zhiyong, Li Jianjun, *et al.* Identification and distribution of marine hydrocarbon source rocks in the Ordovician and Cambrian of the Tarim Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012,39(3):305–314.
- [20] 韩剑发, 郭光辉, 肖中尧, 等. 塔里木盆地寒武系烃源岩分布的重新认识及其意义[J]. 地质科学, 2020,55(1):17–29.
- Han Jianfa, Wu Guanghui, Xiao Zhongyao, *et al.* Recognition of the distribution of Cambrian source rocks and its significance for exploration in Tarim Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2020,55(1):17–29.
- [21] Zhu G Y, Chen F R, Wang M, *et al.* Discovery of the lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China[J]. AAPG Bulletin, 2018,102(10):2123–2151.
- [22] 赵文智, 沈安江, 乔占峰, 等. 中国碳酸盐岩沉积储层理论进展与海相大油气田发现[J]. 中国石油勘探, 2022,27(4):1–15.
- Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Qiao Zhanfeng, *et al.* Theoretical progress in carbonate reservoir and discovery of large marine oil and gas fields in China[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(4):1–15.
- [23] 冯子辉, 邵红梅, 刘云苗, 等. 塔里木盆地古城地区奥陶系成岩流体与碳酸盐岩储层形成关系研究[J]. 中国石油勘探, 2022,27(4):47–60.
- Feng Zihui, Shao Hongmei, Liu Yunmiao, *et al.* Study on the relationship between the Ordovician diagenetic fluid and carbonate reservoir development in Gucheng area, Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2022,27(4):47–60.
- [24] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. 中国石油勘探, 2020,25(5):62–72.
- Yang Haijun, Chen Yongquan, Tian Jun, *et al.* Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in well Luntan-1 of the Tarim Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(5):62–72.
- [25] Zhu Guangyou, Liu Wei, Wu Guanghui, *et al.* Geochemistry and U–Pb–Hf detrital zircon geochronology of metamorphic rocks in terranes of the West Kunlun Orogen: protracted subduction in the northernmost Proto-Tethys Ocean[J]. Precambrian Research, 2021,363(6):106344.
- [26] Peng Yang, Wu Guanghui, Nuriel Perach, *et al.* In situ LA–ICPMS U–Pb dating and geochemical characterization of fault-zone calcite in the central Tarim Basin, northwest China: implications for fluid circulation and fault reactivation[J]. Chemical Geology, 2021,568:1–12.
- [27] 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.
- [28] Deng Shang, Li Huili, Zhang Peizhong, *et al.* Structural characterization of intracratonic strike-slip faults in the central Tarim Basin[J]. AAPG Bulletin, 2019,103(1):109–137.