

文章编号: 0253-2697(2024)09-1399-10 DOI:10.7623/syxb202409007

# 黄骅坳陷古近系细粒沉积区勘探开发认识技术迭代 与页岩油增储上产成效

蒲秀刚 柴公权 许 静 时战楠 韩文中 官全胜 刘学伟 李昊东 王 栋 董姜畅

(中国石油大港油田公司 天津 300280)

**摘要:**渤海湾盆地黄骅坳陷纹层型页岩油资源量为  $32.6 \times 10^8$  t, 是常规油资源量的 1.2 倍, 勘探开发潜力巨大, 但规模效益开发动用仍面临高产甜点层优选、复杂断块长水平段优快钻完井、均匀高效压裂改造、高效开采等多方面难题。为此, 持续深化陆相纹层型页岩油“中源-高储-优保”富集条件认识, 针对复杂断块陆相页岩油效益甜点评价和箱体优选、井网部署、优快钻完井、压裂改造和排采制度等方面进行了系统攻关, 提出了“中高匹配”的页岩油富集规律及模式, 总结形成可复制推广的多甜点“W”型立体开发布井、密切割高强度前置二氧化碳增能高效压裂、“焖井置换+高压钻塞+控压生产”高效排采等开发主体技术。迭代技术应用在沧东 5 号平台效益开发试验中取得了良好效果, 5 口试验井测试单井峰值日产量为 39.6~122.3 t, 截至 2024 年 6 月 28 日已连续自喷生产 545~574 d, 累积产油量为  $8.9 \times 10^4$  t, 建成中国首个 10 万吨级纹层型页岩油效益开发示范平台; 进一步推广主体开发技术, 歧口凹陷沙河街组三段首个先导试验平台(6 号)建成投产, 3 口井已连续自喷生产 222~225 d, 累积产油量为  $1.64 \times 10^4$  t。

**关键词:**黄骅坳陷; 古近系; 陆相细粒区; 纹层型页岩; 页岩油; 效益勘探开发

中图分类号: TE34

文献标识码: A

## Technological iteration and understandings of exploration and development as well as increase of shale oil reserves and production in Paleogene fine-grained sediments areas of Huanghua depression

Pu Xiugang Chai Gongquan Xu Jing Shi Zhannan Han Wenzhong Guan Quansheng  
Liu Xuewei Li Haodong Wang Dong Dong Jiangechang

(PetroChina Dagang Oilfield Company, Tianjin 300280, China)

**Abstract:** The laminated shale oil resources in Huanghua depression of Bohai Bay Basin amount to 3.26 billion tons, which is 1.2 times the conventional oil resources, showing great potential for exploration and development; however, the large-scale efficient development and production still face many problems such as optimization of high-yield sweet spot layers, optimal fast drilling and well completion of long horizontal sections of complex fault blocks, uniform and efficient fracturing, and efficient mining methods. For this reason, it is essential to continuously deepen the understanding of the enrichment conditions of “medium resources-high reserves-optimal preservation” for continental laminated shale oil, achieve a systematic breakthrough in benefit evaluation of the shale oil sweet spots and box selection, well pattern arrangement, optimal fast drilling and well completion, fracturing transformation, and production system of continental shale oil in complex fault blocks, and propose the shale oil enrichment law and model of “medium and high matching”, which are summarized to form the replicable and promotable major development technologies, such as multi-sweet spot W-shaped three-dimensional development and well arrangement, dense-cutting high-strength pre-carbon dioxide energized and efficient fracturing, and highly efficient drainage and production mode of “well killing for replacement + high-pressure drilling and plugging + pressure-controlling production”. The application of iterative technology has achieved good results in the beneficial development experiment of No. 5 platform in Cangdong sag. Among 5 test wells, the peak production of a single test well is 39.6-122.3 t/d, and up to June 28, 2024, the self-flowing wells have produced oil continuously for 545-574 d, with a cumulative oil production of  $8.9 \times 10^4$  t. The first 100,000 ton laminated shale oil beneficial development demonstration platform in China has been built; major development technologies have been promoted further, the first pilot test platform of No. 6 block of Member 3 of Shahejie Formation in Qikou depression was built and put into operation, and three self-flowing wells have produced oil continuously for 222-225 d, with a cumulative oil production of  $1.64 \times 10^4$  t.

**Key words:** Huanghua depression; Paleogene; continental fine-grained area; laminated shale; shale oil; beneficial exploration and development

**基金项目:** 中国石油天然气股份有限公司科技重大专项“陆相页岩油规模增储上产与勘探开发关键技术研究”(2023ZZ15YJ01)和国家重点研发计划项目“战略性资源开发区风险评估应用示范”(2022YFF0801204)资助。

**第一作者:** 蒲秀刚, 男, 1968 年 12 月生, 2004 年获中国矿业大学(北京)博士学位, 现为中国石油大港油田公司教授级高级工程师, 主要从事沉积学、储层地质学、油气地球化学及非常规油气勘探方面的研究与管理工。Email: puxgang@petrochina.com.cn

**通信作者:** 许 静, 女, 1986 年 2 月生, 2017 年获西南石油大学硕士学位, 现为中国石油大港油田公司高级工程师, 主要从事页岩油油藏地质、油藏工程参数优化及开发方案编制相关研究工作。Email: xujing18@petrochina.com.cn

引用:蒲秀刚,柴公权,许静,时战楠,韩文中,官全胜,刘学伟,李昊东,王栋,董姜畅.黄骅拗陷古近系细粒沉积区勘探开发认识技术迭代与页岩油增储上产成效[J].石油学报,2024,45(9):1399-1408.

Cite:PU Xiugang, CHAI Gongquan, XU Jing, SHI Zhannan, HAN Wenzhong, GUAN Quansheng, LIU Xuewei, LI Haodong, WANG Dong, DONG Jiangchang. Technological iteration and understandings of exploration and development as well as increase of shale oil reserves and production in Paleogene fine-grained sediments areas of Huanghua depression[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(9): 1399-1408.

黄骅拗陷页岩油资源丰富、勘探开发前景广阔,应用蒙特卡罗法与小面元法综合计算评价总资源量为 $32.6 \times 10^8$  t,并已建成中国首个10万吨级纹层型页岩油效益开发示范平台,从单井突破到效益开发,证实了资源的可靠性和规模开发的潜力<sup>[1]</sup>。近年来,国内外学者在纹层型、夹层型、混积型页岩的富集规律<sup>[2-8]</sup>、原油赋存状态和动用机制<sup>[9]</sup>、流体渗流机理<sup>[10-11]</sup>、立体部署开发技术<sup>[12-14]</sup>以及地质—工程一体化<sup>[15-17]</sup>等方面开展了大量研究工作并取得了重要进展,形成了基于地震、测井及地质信息预测的页岩油地质、工程甜点综合评价方法,考虑水平井水平段方位与最大主应力夹角的布井思路,“多簇射孔密布缝+可溶球座硬封隔+暂堵转向软分簇”体积压裂工艺,放喷产量与井口压力有效匹配的控压蓄能返排试油等评价方法与工程工艺技术等。

黄骅拗陷沧东凹陷孔店组二段(孔二段)作为纹层型页岩油的典型代表,自2013年开展系统攻关以来,在富集规律<sup>[18-22]</sup>、甜点评价<sup>[23-27]</sup>、立体开发<sup>[28-29]</sup>、压裂改造、排采提产等方面也开展了大量研究工作,初步形成水基钻井液长水平段钻探技术、纹层型页岩油全程滑溜水连续加砂工艺和“高黏+低黏+高黏”逆混合压裂技术,并率先在渤海湾盆地实现了陆相纹层型页岩油的勘探突破,证实了纹层型页岩油良好的勘探前景和开发潜力<sup>[30-31]</sup>。但大港油田纹层型页岩油有其特殊性,规模效益开发动用仍面临高产甜点层优选、复杂断块长水平段优快钻完井、均匀高效压裂改造、高效开采等多方面难题。

笔者在前期研究的基础上,通过持续深化陆相纹层型页岩油基本地质特征、成藏富集条件认识,在前期“优势组构相-滞留烃超越效应”页岩油富集规律的基础上,进一步完善总结并提出了“中高匹配”的页岩油富集规律及模式,总结形成可复制推广的多甜点“W”型立体开发布井、密切割高强度前置二氧化碳增能高效压裂、“焖井置换+高压钻塞+控压生产”高效排采等开发主体技术,在探索与研究中不断实现地质认识与勘探开发技术的迭代升级,不断丰富发展陆相页岩油成藏富集理论与勘探开发技术体系。富集规律认识及勘探开发关键技术,在沧东5号平台效益开发试验中取得了良好的应用效果,该平台先后投产9口井,累积

产油量为260~280 t/d,标志着大港油田页岩油迈向平台式效益开发新阶段,为中国陆相纹层型页岩油规模效益开发提供了有益的借鉴。

## 1 页岩油地质特征与资源潜力

黄骅拗陷位于渤海湾盆地中部,是在中生界基底上形成的新生代断陷盆地,古近系以发育三角洲—湖相沉积建造为主,岩性组合以厚层状深灰色泥页岩夹碳酸盐岩或粉砂—细砂岩为主,是黄骅拗陷的主力烃源岩层系,既为常规油气藏提供了丰富油气资源,也是页岩油气富集层段,展布面积为2100 km<sup>2</sup>,累计厚度为500~1200 m,资源量十分丰富。资源量测算综合采用蒙特卡罗法与小面元法,考虑到蒙特卡罗法为概率取值,小面元法为细分评价面元的累加,是固定值,因此设置小面元法权重系数为0.7,蒙特卡罗法综合权重系数为0.3。利用上述页岩油评价方法评价得到黄骅拗陷古近系页岩油资源量为 $32.6 \times 10^8$  t。这一资源规模是黄骅拗陷常规油气资源量的1.2倍,勘探开发前景广阔。

## 2 纹层型页岩油富集条件与模式

### 2.1 “中源-高储-优保”富集条件

通过对沧东凹陷孔二段纹层型页岩油开展前期综合研究,提出了“高丰度多类型有机质、高长英质含量、高纹层发育程度、中等热演化程度”是湖相页岩油形成的有利条件,但对页岩储集条件及保存条件的考虑相对较少。笔者在前期研究的基础上,以黄骅拗陷古近系孔二段和沙河街组三段(沙三段)上万块岩心样品分析联测为研究基础,结合40余口已钻水平井的试油、试采和地球化学资料,对陆相纹层型页岩油富集条件进行了进一步研究和分析,总结形成了断块型陆相纹层型页岩油“中源-高储-优保”的富集条件认识。

#### 2.1.1 适中的物源及烃源岩条件

古湖盆大小和物源供给强度的适中匹配是造成页岩层系有机质丰度与脆性矿物含量最佳耦合的内在因素,湖盆的大小与物源的输入距离之比为40%~60%时,生烃量和可压裂性在空间上配置良好;适中的有机质丰度(TOC为2%~4%)可使页岩层系的含油性脆性达到最佳匹配,随着TOC增加, $S_i$ (可动烃量)值

及  $S_1^*/\text{TOC}$ (即可动油指数,简称 OSI)值呈现先增大后降低的特征,但随着脆性逐渐降低,当 TOC 为 2%~4%时,含油性与脆性达到最佳匹配,页岩既富集油有利于压裂改造,可形成最优甜点,TOC 再增大时(大于 6%),脆性逐步降低,甜点工程品质反而变差(图 1);适中有机质类型(以 I 型为主、III 型为辅)既可为页岩油的规模生产与富集滞留奠定重要基础,同时一定比

例的以陆源高等植物为主的 III 型干酪根生气可有效提高流动性较差的“黑色”页岩油在井筒中的举升能力;适中的热成熟度( $R_o$  为 0.7%~1.2%,对应埋深为 3 200~4 300 m)是页岩热演化生烃与有机质吸附油最佳匹配区间,此时页岩中滞留可动烃量最高可达 60%,试油产量往往较高,是页岩油富集的热演化甜点区段。

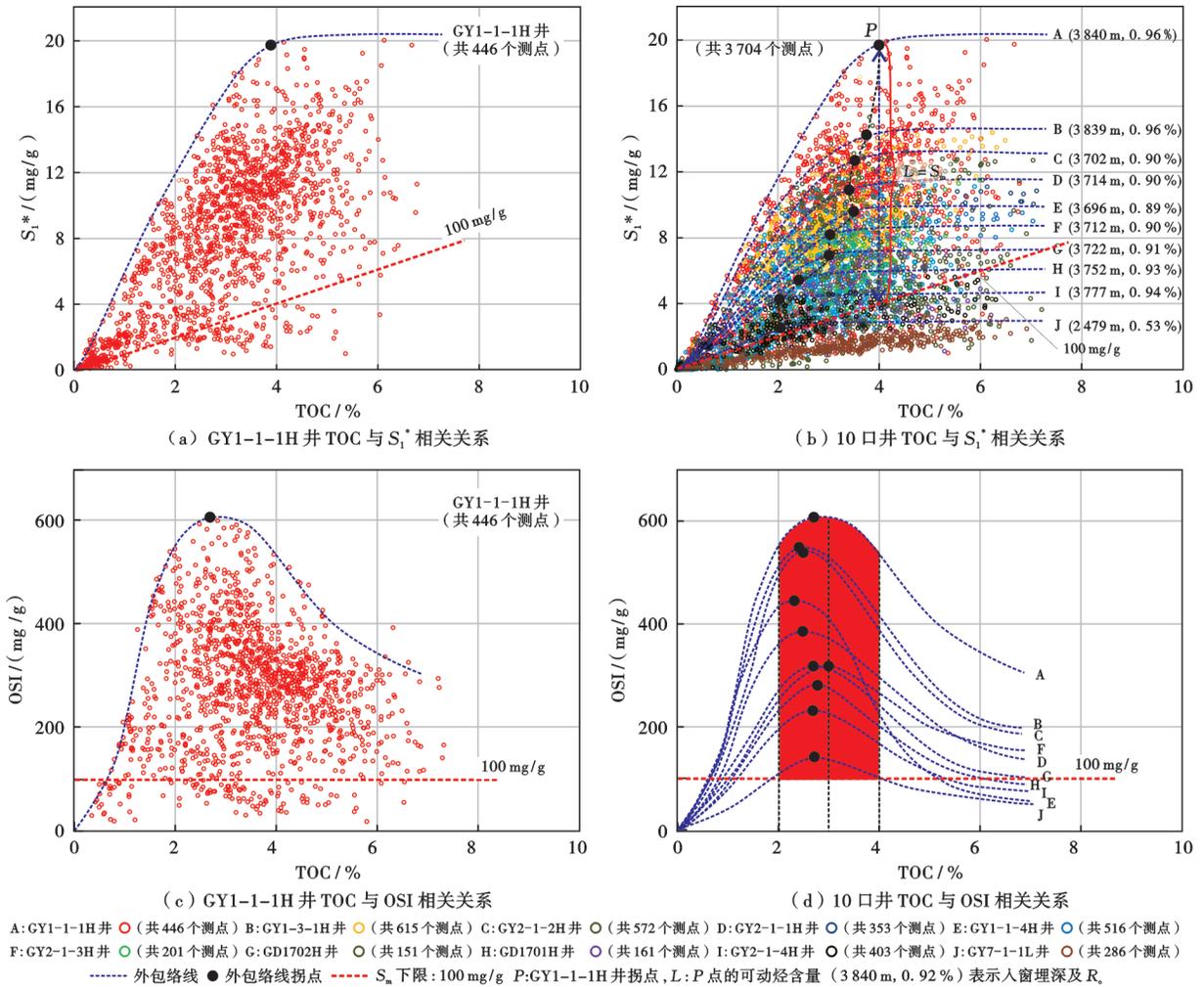


图 1 有机碳含量与滞留烃( $S_1^*$ )及可动油指数(OSI)关系(以 GY1-1-1H 井等 10 口井为例)

Fig. 1 Relationships between organic carbon content and retained hydrocarbon ( $S_1^*$ ) and movable oil index (OSI)

### 2.1.2 适高的储集条件

页岩纹层密度与长英质含量、TOC 的相关性证实,纹层密度越大,长英质含量和 TOC 均越大,镜下荧光亮度越大,同时纹层状页岩的滑溜水渗吸置换效率明显大于块状页岩,因此高密度微米—纳米纹层(密度可达 11 000 层/m)影响有机质丰度、烃类赋存及渗流,纹层密度越高越有利于烃类的渗吸置换与流动。黄骅坳陷古近系页岩微米—纳米级孔隙极其发育,呈群集式分布,“大孔”分布在极大量的“微孔”之中,高占比微米—纳米孔缝(孔隙度平均为 4.5%)可以为页岩油的富集提供大量的储集空间。纹层型页岩油的滞留

可动烃含量是反映页岩油富集程度高低的重要指标,主要用烃源岩热解游离烃  $S_1$  含量来表征,水平井压裂段的平均  $S_1$  含量与水平段折算为千米后的累积年产油量之间呈良好的正相关关系(图 2),高滞留可动烃含量(黄骅坳陷古近系页岩  $S_1$  含量平均为 4.2 mg/g)是页岩油水平井获得高产的关键条件。

### 2.1.3 优良的保存条件

顶底板可以是区域性盖层,也可以是与烃类富集层紧邻的局部致密岩层,其封堵能力对页岩油滞留和保存具有重要影响,特别是在断陷型盆地,其页岩油的富集对顶底板的封闭能力要求更高。黄骅坳陷古近系

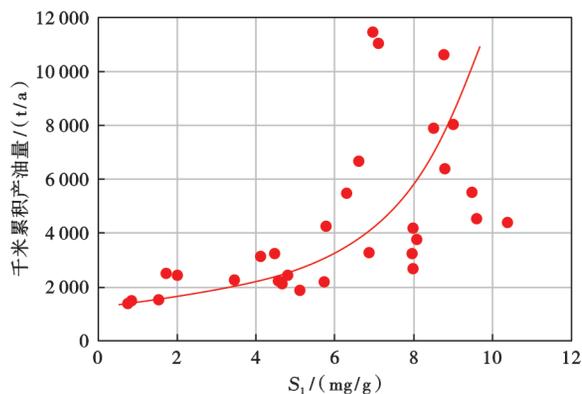


图2 黄骅拗陷页岩油水平井压裂段平均  $S_1$  与水平段折算千米累积年产量关系

Fig. 2 Relationship between the average  $S_1$  value of fractured sections and the cumulative annual oil production per kilometer of horizontal wells of shale oil in Huanghua depression

页岩顶底板封堵条件优越(盖层厚度为 50~100 m), 可有效地为页岩油起到滞留和保存作用; 断陷盆地断层的活动强度、活动期及其与成藏期的匹配关系对页岩油滞留具有重要影响, 早于生/排烃期活动的断层可产生大量微裂缝, 为页岩油提供良好的滞留空间, 排烃期及以后发育的活动断层可作为沟通页岩与外圈砂岩的通道, 使页岩油发生逸散。沧东凹陷水平井随着距井场旁四级断裂距离的增加, 累积产油量呈逐渐上升的趋势, 在距离为 450~550 m 处产量达到峰值, 距离大于 550 m 后, 由于天然裂缝发育较少, 页岩油滞留空间减少, 导致水平井首年折算千米累积产油量略有下降。

## 2.2 “中源-高储-优保”富集规律及模式

### 2.2.1 “中高匹配”富集规律内涵

综合黄骅拗陷纹层型页岩油适中的物源及烃源岩条件、适高的储集条件、优良的保存条件三方面的富集主控条件, 提出了以“2 优(优势组构、优势区间)、1 超(超越可动)、1 匹配(源储匹配)”为核心内涵的“中高匹配”页岩油富集规律。

“优势组构”是指陆相湖盆前(扇)三角洲一半深湖亚相发育的页岩具有高长英质或灰白云质等脆性矿物含量、高有机质丰度、低黏土矿物含量的优势组份及高频纹层的优势结构特征, 既有利于生油又有利于滞留油的赋存与可动。“优势区间”是指中等热演化阶段( $R_o$  为 0.7%~1.2%)的页岩内部滞留油含量最高的区间, 是滞留页岩油富集的最有利窗口。“超越可动”是指纹层型页岩油因页岩高含有机质且对油相具有吸附性, 只有当页岩满足自身吸附后, 多余的液态烃才可动, 即必须具有超越吸附烃量效应, 以黄骅拗陷古近系纹层状长英质页岩和纹层状含灰白云质页岩的超越吸

附烃量效应最为明显。“储源匹配”是指优势组构相中长英质或含灰白云质矿物纹层(充当储集层)与有机质纹层(充当烃源岩)呈高频互层, 页岩油由有机质纹层向长英质或含灰白云质矿物纹层微运移成藏, 形成由无数个细小的“源-储”互层匹配而成的巨型固、液、气集合体, 这是纹层型页岩油成藏且富集的主要机理。

### 2.2.2 “中高匹配”富集模式

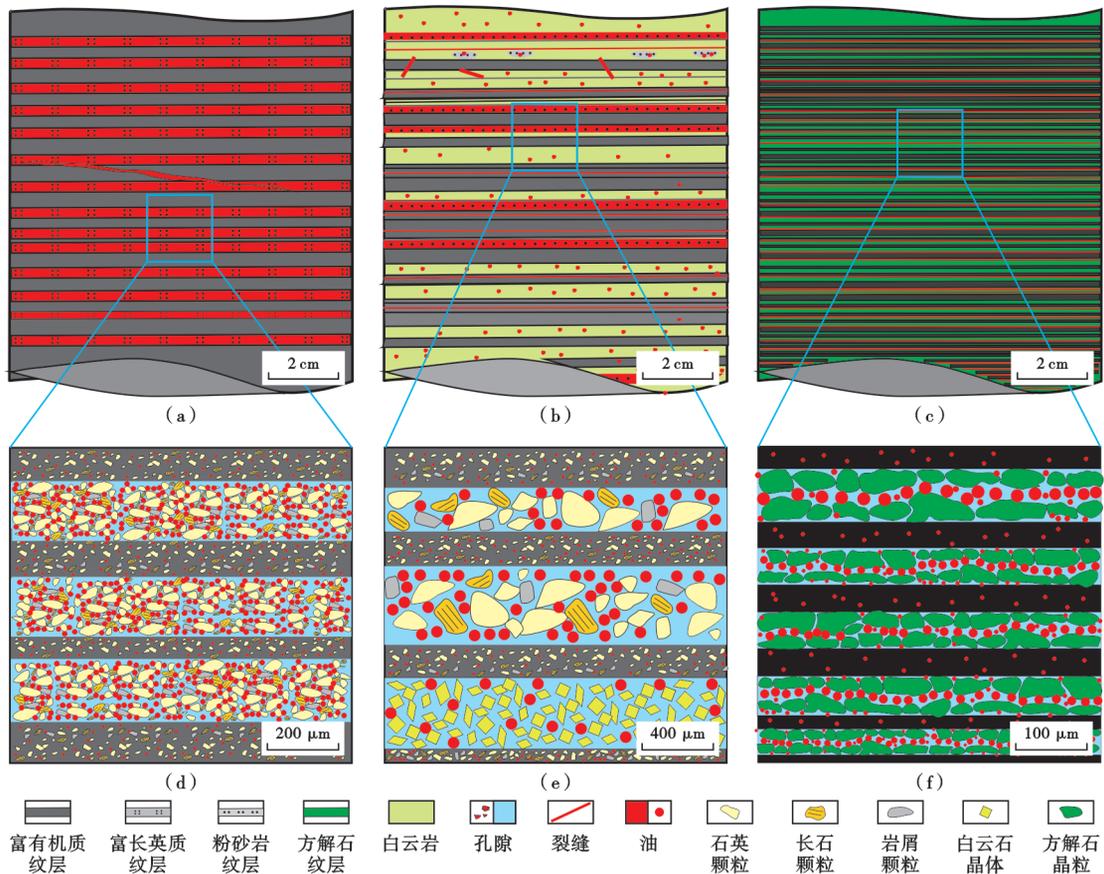
在黄骅拗陷古近系陆相纹层型页岩油富集条件及“中高匹配”富集规律的指导下, 构建了纹层型页岩油富集模式(图 3)。沧东凹陷孔二段主要发育微米级长英质纹层富集模式[图 3(a)、图 3(d)], 富有机质纹层与富长英质纹层高频互层, 单纹层厚度多分布于 100~800  $\mu\text{m}$ , 烃类主要留滞于长英质纹层中的微米—纳米级孔隙系统中, 富有机质纹层主要起生烃作用, 其含油性差于长英质纹层。歧口凹陷沙三段主要发育厘米级粉砂纹层富集模式[图 3(b)、图 3(e)], 粉砂纹层厚度多为 2~10 mm, 粒间孔较为发育, 紧邻的富有机质纹层生成的烃类就近运移至粉砂纹层中富集, 局部层段沉积的毫米—厘米级富碳酸盐薄层也是烃类富集的重要位置。歧口凹陷沙河街组一段(沙一段)下亚段主要发育微米级含灰白云质纹层富集模式[图 3(c)、图 3(f)], 含灰白云质纹层主要由亮晶方解石构成, 与富有机质纹层呈高频互层, 是烃类赋存的主要位置(图 3), 储集空间主要为层理缝及晶间孔。歧口凹陷沙一段的单纹层厚度多集中于 80~500  $\mu\text{m}$ , 纹层相较于沧东凹陷孔二段更为密集、平直, 反映其形成于更安静低能的水体环境, 而局部纹层中可见夹持的块状泥晶或微晶白云岩、亮晶生屑白云岩等则反映了沙一段沉积期在局部发育相对高能沉积环境, 高能沉积中发育的晶间孔、生物体腔孔等储集空间为就近运移来的烃类提供了赋存空间。

## 3 勘探开发主体技术迭代

黄骅拗陷作为陆相断陷盆地的典型代表, 具有烃源岩厚度大、非均质性强、储层埋藏深、断层及裂缝发育、演化程度中等、地层高温高压、地应力复杂等特点, 基于 60 口页岩油水平井勘探开发效果的综合分析与经验总结, 大港页岩油已建立页岩油甜点区和甜点层的优选评价标准, 形成多甜点“W”型立体开发布井、密切割高强度前置二氧化碳增能高效压裂、“焖井置换+高压钻塞+控压生产”高效排采等效益开发主体技术<sup>[32]</sup>, 并在实践中不断迭代升级页岩油关键技术方法与开发模式。

### 3.1 页岩油甜点区和甜点层地质评价技术

基于黄骅拗陷纹层型页岩油勘探开发实践, 前期



(a) 沧东凹陷孔二段微米—毫米级长英质纹层岩心富集模式; (b) 歧口凹陷沙三段微米级粉砂纹层岩心富集模式; (c) 歧口凹陷沙一段下亚段微米级碳酸盐纹层岩心富集模式; (d) 图(a)放大区域, 长英质纹层粒间孔富集烃类, 普通薄片观察富集模式; (e) 图(b)放大区域, 粉砂纹层粒间孔富集烃类, 普通薄片观察富集模式; (f) 图(c)放大区域, 亮晶方解石纹层晶间孔及层理缝富集烃类, 普通薄片观察富集模式。

图3 黄骅坳陷古近系纹层型页岩油富集模式

Fig. 3 Enrichment model of Paleogene laminar shale oil in Huanghua depression

主要依据 G108-8 井取心分析, 按照可动烃含量  $S_1 > 3 \text{ mg/g}$ 、 $\text{TOC} > 2\%$ 、 $R_o > 0.7\%$  作为 I 类甜点层划分标准, 识别出 7 个 I 类甜点层, 总厚度为 156 m。针对该标准优选的甜点共投产 9 口水平井, 投产后产量差异大, 60% 的已投产水平井单井评估最终采收率 (EUR) 小于  $1.5 \times 10^4 \text{ t}$ 。为进一步明确产能与甜点之间的耦合关系, 综合分析沧东凹陷孔二段 50 口已投产井测井、录井、压裂参数和生产数据资料, 通过单井产量与关键地质工程参数相关性分析, 逐步完善评价参数和标准, 建立以含油性、可压性、渗流性为核心的甜点区与甜点层的评价标准。

甜点区评价通过统计分析水平井产量与 TOC、 $R_o$ 、黏土矿物含量的关系。结果表明, 千米水平段首年累积产油量达到 10000 t 以上井的页岩层的 TOC 主要分布在 2%~4%,  $R_o$  为 0.8%~1.1%、黏土矿物含量小于 15%。甜点层评价主要根据示踪剂分段标定的日产油量, 划分百米日产油量大于 3.0 t 为 I 类层、1.5~3.0 t 为 II 类层、0.5~1.5 t 为 III 类层。利用首年

累积产油量大于  $1 \times 10^4 \text{ t}$  的 GY5-1-9H 井、GY5-3-1L 井两口井的录井可动烃量  $S_1$ 、脆性矿物含量、全烃峰基比以及测井深电阻率比值对数、自然伽马 5 项含油性、可压裂性的表征参数, 进行甜点层的评价优选, 明确  $S_1 > 6 \text{ mg/g}$ 、脆性矿物含量大于或等于 78%、全烃峰基比大于 5、深电阻率比值对数大于 1.9、自然伽马小于或等于 105 API 为 I 类甜点层评价标准<sup>[33-35]</sup>。以官东地区为例, 应用该评价标准优选 C1③、C3⑧和 C5⑫ 共 3 个甜点层 (图 4), 其中 C1③、C3⑧ 已被证实具备效益开发能力。2022 年实施先导试验井组, 5 口井平均首年累积产油量为  $1.35 \times 10^4 \text{ t}$ , 实现井组效益开发。

### 3.2 页岩油勘探开发工程技术

#### 3.2.1 页岩油多甜点“W”型立体布井技术

黄骅坳陷陆相断陷盆地断裂系统复杂, 前期探索 130 m 小井距开发, 水平井压裂过程 5 口井出现明显井间窜扰; 同时由于断层发育、断块宽度小, 垂直最大水平主应力方向布井水平段长度难以达到 1500 m 以上, 对产量影响较大。

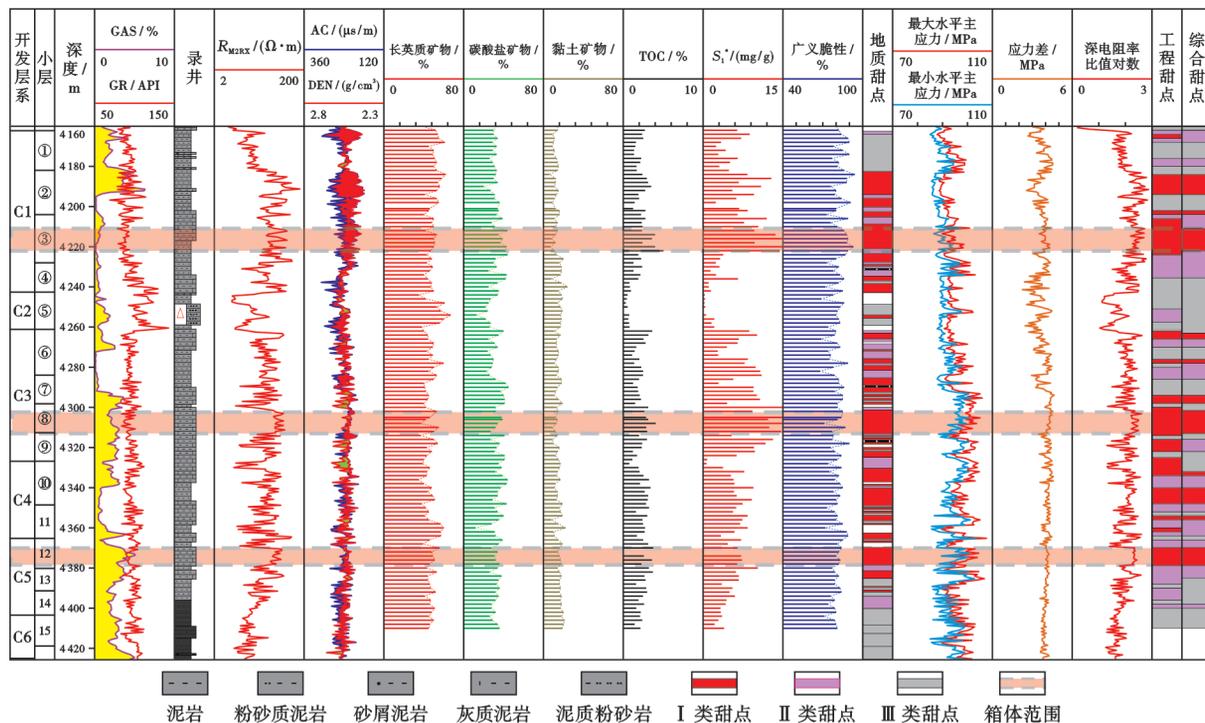


图4 黄骅拗陷官东地区GD15井孔二段页岩油综合评价

Fig. 4 Comprehensive evaluation of shale oil in Member 2 of Kongdian Formation in Well GD15 of Guandong area of Huanghua depression

总结前期开发经验,受复杂断块条件和应力场条件限制,水平段长度和最优水平段方位需要进行一定程度取舍,结合现场试验和数值模拟,明确复杂断块纵向甜点层立体开发动用方案部署关键参数。水平井方位与最大水平主应力夹角大于 $60^\circ$ ,尽可能打长水平段,水平段长度应大于1500 m;纵向上不同甜点层的垂向距离约为60 m,采用“W”型立体交错布井方式(图5)。根据纵向开发层系组合和平面井网一缝网匹配关系,纵向上结合压裂缝优化开发层系组合,平面上结合缝网展布规律、裂缝监测资料和井间压力变化动态等资料优化井距。基础井间距为300 m,新老井适当加大井距至400 m,平台式整压整投,单平台6~15口井,避免井间干扰,建立适合陆相断陷盆地页岩油“甜点体—井网—缝网匹配”的多套开发层系的立体开发模式,优化水平井的立体空间配置,从而在陆相页岩油开发过程中提高单井产量和缝控储量。该技术在 大港油田页岩油井网部署中共应用支撑方案编制4个、立体部署水平井累计226口,以沧东凹陷5号平台为例,实施的5口井单位压降采油量由220~250 t提升至400~680 t,首年累积产油量平均为 $1.3 \times 10^4$  t以上,投产效果较好。

3.2.2 页岩油水平井优快钻完井技术

以水平井钻井提速提效为重点,创新形成了以地震—地质—工程一体化钻井轨迹设计、高性能水基钻

井液、高效提速工具为核心的优快钻完井配套技术,提高了甜点钻遇率和长水平段钻探速度,6500 m进尺钻井周期降至50 d以内,实现了沧东凹陷在水基钻井液条件下水平段长突破2000 m。同时,针对沧东凹陷层速度横向变化快,靶点埋深预测难度大的问题,通过地震速度定量预测靶点深度,对已完钻直井层速度或水平井平均速度参考点进行时深分析,建立深度模型,进行精准轨迹设计;并运用“地层真垂厚”对比法细化邻区直井与水平井甜点评价,卡准区域标志层和入窗标志,确保准确入窗,入窗后通过测井和录井含油性、全岩X射线衍射资料等实时精细对比,修正深度域地质模型,将10 m级靶层的钻遇率由75%提升至90%以上。

针对歧口凹陷沙河街组页岩油储层黏土矿物含量高、易坍塌,影响打长水平段的问题,通过岩心理化实验与数值模拟结合厘清了歧口页岩油储层井壁失稳机理,构建了力—化—温—层理四场耦合坍塌压力预测方法,提出了理化封堵—物理支撑—降温固壁—快速钻进的防塌“四项对策”;室内实验优化体系配方,优选油基钻井液体系并建立了关键性能管控指标,有效抑制沙河街组储层泥页岩坍塌,实现歧口凹陷在油基钻井液条件下水平段长突破2500 m。

3.2.3 页岩油密切割高效压裂技术

桥射分段多簇压裂是目前页岩油水平井体积压裂的主要工艺技术。2019—2020年主要采用体积压裂

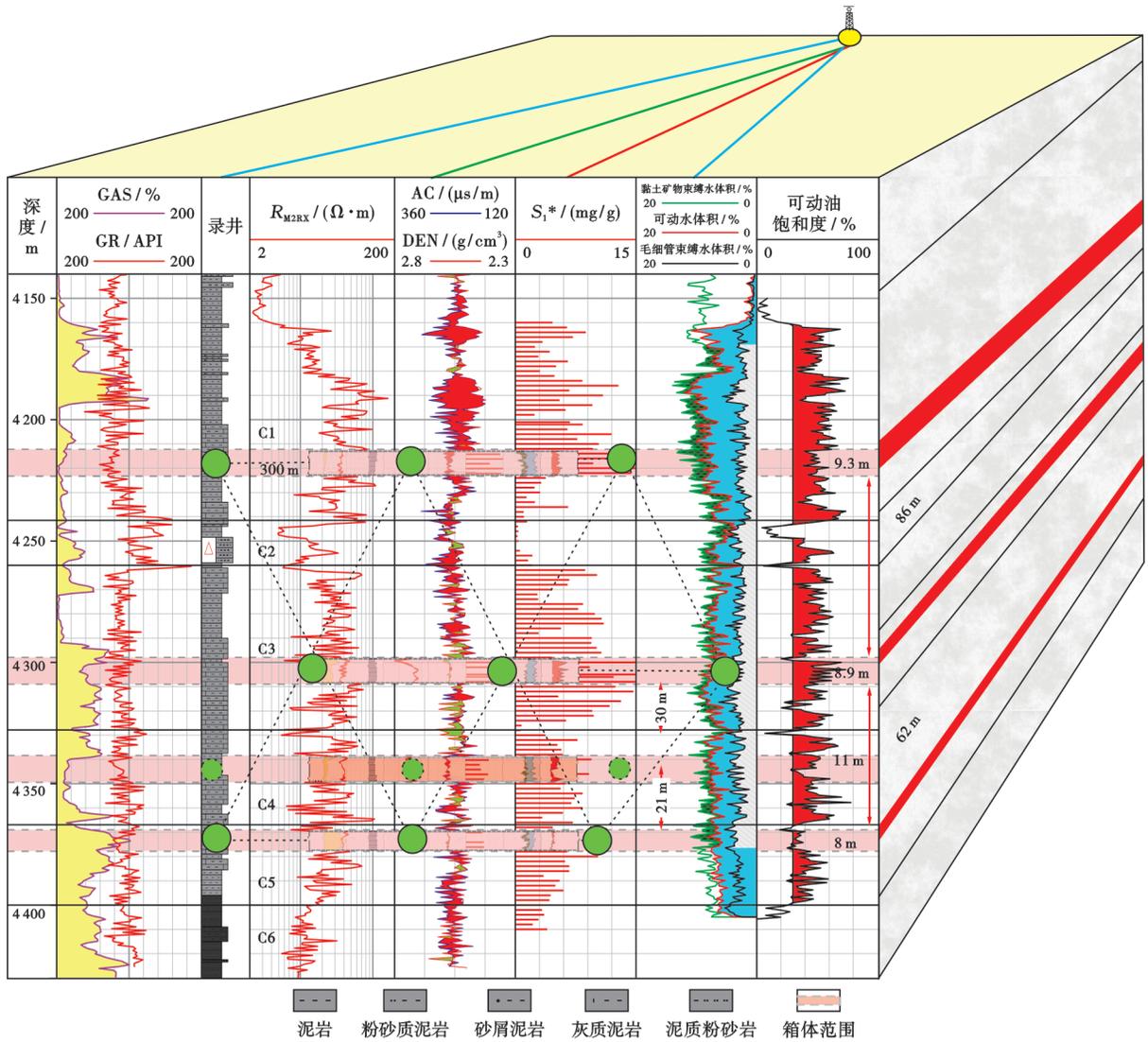


图5 黄骅坳陷官东地区5号平台多甜点“W”型立体井网部署

Fig. 5 Schematic diagram of three-dimensional W-shaped well pattern arrangement for multiple sweet spots on Platform 5 in Guandong area of Huanghua depression

1.0 技术,短段多簇密切割、多液多砂、全程滑溜水连续加砂。因页岩油地层的强非均质性和构造(断裂)强复杂性,压裂裂缝开启差异大、裂缝突进、窜扰乃至产生套管变形时有发生,进而导致页岩油水平井的压裂效果不可控。2021 年至今持续优化技术迭代,采用体积压裂 2.0 技术,长段多簇密切割、适液多砂、全程滑溜水高起步连续加砂、前置二氧化碳增能<sup>[36]</sup>。通过前置注入 CO<sub>2</sub> 提升孔隙压力、降低原油黏度、增加地层弹性能量,沧东凹陷 5 口试验井较早期未使用前置二氧化碳增能的井在放喷初期呈现见油快、含水下降快的特征;通过物理模拟及现场监测数据,固化效益改造最优参数:段长为 50 m、簇间距为 8~10 m、液量为 30~35 m<sup>3</sup>/m、砂量为 2.5~3.0 m<sup>3</sup>/m、滑溜水比例为 80%、石英砂比例为 80%、排量为 12~16 m<sup>3</sup>/min,单段压裂储层改造体积(SRV)由 3.1×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 提升到 5.8×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>。

2020 年 11 月,对 GY5-1-9H 井采用无限级滑套单点密切割均衡压裂技术,压裂 79 级,施工压力由桥射压裂 70~80 MPa 降低至 45~70 MPa,水平井 1 年期产油量提高 60% 以上。与相邻区块同甜点层同方位水平井对比,生产效果大幅提高,大幅提高压裂改造的裂缝均匀度。

### 3.2.4 页岩油控压排采技术

页岩油体积压裂后渗吸置换及排采流态复杂,投产井的压降速度、含水变化、生产效果差异较大,原油高凝高含蜡,前期生产过程中存在放喷见油速度慢、出砂结蜡堵塞井筒、压降快自喷期短等问题。为实现非达西渗流的页岩油油藏提产提效,创新形成“优化焖井时间、充分渗吸置换”、“优化钻塞时机、早期快速见产”、“优化放喷制度、保压高效控排”的页岩油排采核心技术,实现高效自喷、长期稳产。焖井时间由 15~62 d 优化

为 28~48 d,井口压力连续 3 d 压降小于 0.1 MPa 开井生产,既实现油水充分渗吸置换快速见油,又提高有效生产时率。钻塞时机由生产中期低压钻塞优化为放喷早期高压钻塞,投产 20 d 内实施钻塞有效降低地层与井筒间压力内耗,排除井筒卡堵风险。系统试井 2~3 mm 油嘴差异化控压稳定生产,控制产液量不高于临界返砂流速 90 m<sup>3</sup>/d,压降速度保持在 0.05~0.08 MPa/d。放喷见油后适当放大油嘴,产液量不低于 35 m<sup>3</sup>/d,保持井筒温度高于原油凝固点 38 ℃,预防井筒堵塞。由套管自喷优化为油管助排工艺,提高生产流速,井口温度提高 5~10 ℃,延长自喷期 50~140 d。

为满足页岩油流度较低,宜控采液速度生产的需要,由大泵强采优化为 Φ38 mm 和 Φ44 mm 的小泵深抽配套技术。工区内页岩油 2 号南井场 3 口井甜点相同、压裂规模相近,采用不同泵型+泵挂深度工艺适应性试验证实,小泵深抽技术在后期提高了生产压差 2~4 MPa,泵效提高 18%,提高累积产油量 300~1 500 t。

## 4 开发实践

在明确页岩油高产富集规律基础上,不断升级迭代开发主体技术,沧东凹陷孔二段 5 号平台 5 口井放喷 1~2 d 见油,使用 4 mm 油嘴测试单井产油量为 39.6~122.3 t/d,呈现见油早、返排率低、压力稳等特点。截至 2024 年 6 月 28 日,采用 2.5~3.0 mm 油嘴连续自喷生产 545~574 d,目前单井产油量为 18~32 t/d,累积产油量为 8.9×10<sup>4</sup>t,首年累积产油量为 6.51×10<sup>4</sup>t,建成中国首个 10 万吨级纹层型页岩油效益开发示范平台。为进一步推广主体开发技术,歧口凹陷沙三段首个先导试验平台(6 号)建成投产,3 口井采用 3 mm 油嘴连续自喷生产 222~225 d,单井产油量为 18~38 t/d,产气量 3 990~6 326 m<sup>3</sup>/d,累积产油量为 1.64×10<sup>4</sup>t。

大港油田页岩油走过 10 年艰辛探索历程,形成一套可复制的效益勘探开发技术序列。截至 2024 年 5 月 2 日,大港油田页岩油产能稳定在 350~400 t/d 以上,累积产油量为 44.8×10<sup>4</sup>t,预计 2024 年页岩油产量将达到 15×10<sup>4</sup>t。

大港油田 3 套烃源岩层系资源量达 32.6×10<sup>8</sup>t。通过总结前期勘探评价和开发试验经验,按照“成熟区拓展效益建产规模、接替区加强效益建产试验、潜力区加大勘探评价力度”的整体规划部署思路,2024—2035 年大港油田页岩油共规划部署水平井 330 口,预计动用储量为 1.65×10<sup>8</sup>t,新建产能为 283.7×10<sup>4</sup>t,力争实现 2025 年产能 15×10<sup>4</sup>t、2030 年产能 50×10<sup>4</sup>t、2035 年产能 120×10<sup>4</sup>t 的页岩油上产目标。

## 5 结 论

(1) 纹层型页岩油富集的主控条件主要包括“适中的物源及烃源岩条件、适高的储集条件、优良的保存条件”三大方面,基于此提出了以“2 优(优势结构、优势区间)、1 超(超越可动)、1 匹配(源储匹配)”为核心内涵的“中高匹配”页岩油富集规律,有效指导了钻探箱体及水平井位的部署。

(2) 地质—工程一体化、科研—生产一体化创新形成的“W”型立体开发布井、复杂断块长水平段优快钻完井、密切割高强度前置二氧化碳增能高效压裂、“焖井置换+高压钻塞+控压生产”高效排采等主体技术,已具备规模推广的前景,是实现规模效益开发的重要保障。

(3) 纹层型页岩储层空间非均质性强,桥射分段多簇孔压裂靠竞争起裂导致的部分簇孔因竞争不过而压不开的问题,探索采用单簇点压裂较分段多簇点压裂可大幅提高改造效果、提升单井 EUR,但在适用性上仍需进一步攻关试验。

**符号注释:** TOC—残余总有机碳含量; OSI—可动油指数, mg/g;  $R_0$ —镜质组反射率;  $S_1$ —热解游离烃含量, mg/g;  $S_1^*$ —热解滞留烃值, mg/g;  $S_f$ —滞留可动烃量, mg/g; EUR—最终采出量, t; GAS—气测; GR—自然伽马, API;  $R_{M2RX}$ —径向探测深度阵列感应测井曲线, Ω·m; AC—声波时差, μs/m; DEN—补偿密度, g/cm<sup>3</sup>。

## 参 考 文 献

- [1] 邹才能,潘松圻,荆振华,等. 页岩油气革命及影响[J]. 石油学报, 2020, 41(1): 1-12.  
ZOU Caineng, PAN Songqi, JING Zhenhua, et al. Shale oil and gas revolution and its impact[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(1): 1-12.
- [2] 金之钧,朱如凯,梁新平等. 当前陆相页岩油勘探开发值得关注的几个问题[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(6): 1276-1287.  
JIN Zhijun, ZHU Rukai, LIANG Xinping, et al. Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(6): 1276-1287.
- [3] 胡素云,赵文智,侯连华,等. 中国陆相页岩油发展潜力与技术对策[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(4): 819-828.  
HU Suyun, ZHAO Wenzhi, HOU Lianhua, et al. Development potential and technical strategy of continental shale oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(4): 819-828.
- [4] 付金华,李士祥,牛小兵,等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.  
FU Jinhua, LI Shixiang, NIU Xiaobing, et al. Geological characteristics and exploration of shale oil in Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. Petroleum

- Exploration and Development, 2020, 47(5): 870-883.
- [5] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 等. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 560-568.  
DU Jinhu, HU Suyun, PANG Zhenglian, et al. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5): 560-568.
- [6] 吴宝成, 吴承美, 谭强, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷昌吉页岩油成藏条件及勘探开发关键技术[J]. 石油学报, 2024, 45(2): 437-460.  
WU Baocheng, WU Chengmei, TAN Qiang, et al. Accumulation conditions and key technologies for exploration and development of Changji shale oil in Jimusar sag of Junggar Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(2): 437-460.
- [7] 蒋龙, 杜玉山, 张云蛟, 等. 牛庄洼陷沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段细粒沉积岩纹层状亮晶方解石脉的发育机理与模式[J]. 石油学报, 2023, 44(10): 1637-1649.  
JIANG Long, DU Yushan, ZHANG Yunjiao, et al. Development mechanism and model of lamellar calcite veins of fine-grained sedimentary rocks from the upper submember of Member 4 to the lower submember of Member 3 of Shahejie Formation in Niuzhuang subsag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(10): 1637-1649.
- [8] 郭旭升, 魏志红, 魏祥峰, 等. 四川盆地侏罗系陆相页岩油气富集条件及勘探方向[J]. 石油学报, 2023, 44(1): 14-27.  
GUO Xusheng, WEI Zhihong, WEI Xiangfeng, et al. Enrichment conditions and exploration direction of Jurassic continental shale oil and gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(1): 14-27.
- [9] 郭旭光, 何文军, 杨森, 等. 准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8): 1168-1179.  
GUO Xuguang, HE Wenjun, YANG Sen, et al. Evaluation and application of key technologies of “sweet area” of shale oil in Junggar Basin: case study of Permian Lucaogou Formation in Jimusar depression [J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8): 1168-1179.
- [10] 王艳, 李伟峰, 贾自力, 等. 水平井水平段方位与最大主应力夹角对产能影响分析——以吴定地区水平井为例[J]. 非常规油气, 2016, 3(5): 88-91.  
WANG Yan, LI Weifeng, JIA Zili, et al. Influence of included angle between horizontal section of horizontal well and main stress on productivity: take horizontal wells in Wuding area for example [J]. Unconventional Oil & Gas, 2016, 3(5): 88-91.
- [11] 刘刚, 杨东, 梅显旺, 等. 松辽盆地古龙页岩油大规模压裂后闷井控排方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(3): 147-154.  
LIU Gang, YANG Dong, MEI Xianwang, et al. Method of well-soaking and controlled flowback after large-scale fracturing of Gulong shale oil reservoirs in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(3): 147-154.
- [12] 杜金虎, 刘合, 马德胜, 等. 试论中国陆相致密油有效开发技术[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(2): 198-205.  
DU Jinhu, LIU He, MA Desheng, et al. Discussion on effective development techniques for continental tight oil in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2014, 41(2): 198-205.
- [13] 王大为, 吴婷婷, 高振南, 等. 压裂水平井水平段长度及裂缝参数优化[J]. 新疆石油天然气, 2021, 17(2): 59-63.  
WANG Dawei, WU Tingting, GAO Zhennan, et al. Optimization of horizontal section length and fracture parameters in fractured horizontal wells[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2021, 17(2): 59-63.
- [14] 王永卓, 王瑞, 代旭, 等. 松辽盆地古龙页岩油水平井箱体开发设计方法[J]. 大庆石油地质与开发, 2021, 40(5): 157-169.  
WANG Yongzhuo, WANG Rui, DAI Xu, et al. Compartment development design method of horizontal well for Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2021, 40(5): 157-169.
- [15] 孙龙德, 刘合, 朱如凯, 等. 中国页岩油革命值得关注的十个问题[J]. 石油学报, 2023, 44(12): 2007-2019.  
SUN Longde, LIU He, ZHU Rukai, et al. Ten noteworthy issues on shale oil revolution in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12): 2007-2019.
- [16] 叶成林. 地应力在苏里格气田水平井方位设计中的应用——以苏53区块为例[J]. 天然气勘探与开发, 2013, 36(3): 42-45.  
YE Chenglin. Application of ground stress to designing horizontal-well orientation an example from Su 53 block, Sulige gasfield[J]. Natural Gas Exploration & Development, 2013, 36(3): 42-45.
- [17] 齐晴. 地应力预测技术在页岩气水平井开发中的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(3): 1117-1122.  
QI Qing. Application of in-suit stress prediction technology in shale gas horizontal wells development[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(3): 1117-1122.
- [18] 蒲秀刚, 周立宏, 韩文中, 等. 细粒相沉积地质特征与致密油勘探——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 24-33.  
PU Xiugang, ZHOU Lihong, HAN Wenzhong, et al. Geologic features of fine-grained facies sedimentation and tight oil exploration: a case from the second Member of Paleogene Kongdian Formation of Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 24-33.
- [19] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆斜坡区油气富集理论与勘探实践——以黄骅坳陷古近系为例[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(2): 13-24.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Hydrocarbon enrichment theory and exploration practice in the slope of fault lake basin: a case study of Paleogene in Huanghua depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(2): 13-24.
- [20] 周立宏, 蒲秀刚, 肖敦清, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段页岩油形成条件及富集主控因素[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(9): 1323-1332.  
ZHOU Lihong, PU Xiugang, XIAO Dunqing, et al. Geological conditions for shale oil formation and the main controlling factors for the enrichment of the 2nd Member of Kongdian Formation in the Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2018, 29(9): 1323-1332.
- [21] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷盆地洼槽聚油理论的发展与勘探实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(6): 1092-1102.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Development and exploration practice of the concept of hydrocarbon accumulation in rifted-basin troughs: a case study of Paleogene

- Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(6): 1092-1102.
- [22] 赵贤正, 周立宏, 赵敏, 等. 陆相页岩油工业化开发突破与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷孔二段为例[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 589-600.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, ZHAO Min, et al. Breakthrough and practice of industrial development on continental shale oil: a case study on Kong-2 Member in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 589-600.
- [23] 蒲秀刚, 金凤鸣, 韩文中, 等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术——以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(8): 997-1012.  
PU Xiugang, JIN Fengming, HAN Wenzhong, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: a case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(8): 997-1012.
- [24] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. *石油学报*, 2019, 40(9): 1013-1029.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: a case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(9): 1013-1029.
- [25] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相页岩滞留烃形成条件与富集模式——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 856-869.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Formation conditions and enrichment model of retained petroleum in lacustrine shale: a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 856-869.
- [26] 赵贤正, 蒲秀刚, 周立宏, 等. 深盆湖相区页岩油富集理论、勘探技术及前景——以渤海湾盆地黄骅坳陷古近系为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 143-162.  
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, ZHOU Lihong, et al. Enrichment theory, exploration technology and prospects of shale oil in lacustrine facies zone of deep basin: a case study of the Paleogene in Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 143-162.
- [27] 周立宏, 陈长伟, 韩国猛, 等. 陆相致密油与页岩油藏特征差异性及其勘探实践意义: 以渤海湾盆地黄骅坳陷为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(2): 555-571.  
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, HAN Guomeng, et al. Difference characteristics between continental shale oil and tight oil and exploration practice: a case from Huanghua depression, Bohai Bay Basin[J]. *Earth Science*, 2021, 46(2): 555-571.
- [28] PU Xiugang. Major oil discovery made in China's Bohai Bay Basin[EB/OL]. (2019-04) [2022-08-23]. <https://explorer.aapg.org/story/articleid/52149>.
- [29] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 等. 湖相纹层型页岩油勘探开发理论与实践——以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(3): 616-626.  
ZHAO Xianzheng, ZHOU Lihong, PU Xiugang, et al. Theories, technologies and practices of lacustrine shale oil exploration and development: a case study of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong sag, Bohai Bay Basin, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(3): 616-626.
- [30] 解德录, 赵贤正, 金凤鸣, 等. 沧东凹陷深湖亚相纹层状页岩成因及页岩油可动性影响因素[J]. *石油学报*, 2024, 45(5): 804-816.  
XIE Delu, ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, et al. Genesis of deep lacustrine subfacies laminated shale and influence factors on shale oil mobility in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(5): 804-816.
- [31] 赵贤正, 蒲秀刚, 金凤鸣, 等. 黄骅坳陷纹层型页岩油富集规律及勘探有利区[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 158-175.  
ZHAO Xianzheng, PU Xiugang, JIN Fengming, et al. Enrichment law and favorable exploration area of shale-type shale oil in Huanghua depression[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(1): 158-175.
- [32] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向[J]. *石油学报*, 2003, 24(3): 82-85.  
ZHANG Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 82-85.
- [33] 金凤鸣, 韩文中, 时战楠, 等. 黄骅坳陷纹层型页岩油富集与提产提效关键技术[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(3): 100-120.  
JIN Fengming, HAN Wenzhong, SHI Zhannan, et al. Enrichment characteristics and key technologies for production and efficiency enhancement of laminated shale oil in Huanghua depression in Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(3): 100-120.
- [34] ZHANG Fengshou, WANG Xiaohua, TANG Meirong, et al. Numerical investigation on hydraulic fracturing of extreme limited entry perforating in plug-and-perforation completion of shale oil reservoir in Changqing oilfield, China[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2021, 54(6): 2925-2941.
- [35] WIJAYA N, SHENG J J. Effect of choke management in optimizing shale-oil production with models of different recovery driving mechanisms[R]. SPE 201490, 2020.
- [36] 周立宏, 陈长伟, 杨飞, 等. 渤海湾盆地沧东凹陷页岩油效益开发探索与突破[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(4): 24-33.  
ZHOU Lihong, CHEN Changwei, YANG Fei, et al. Research and breakthrough of benefit shale oil development in Cangdong sag, Bohai Bay Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(4): 24-33.

(收稿日期 2024-04-01 改回日期 2024-07-11 编辑 王培玺)