

济阳拗陷陆相断陷盆地页岩油开发的几点思考

李阳 曹小鹏 赵清民 刘祖鹏 薛兆杰 蒋龙

Thoughts on Shale Oil Development in Continental Fault Basin in Jiyang Depression

LI Yang, CAO Xiaopeng, ZHAO Qingmin, LIU Zupeng, XUE Zhaojie, JIANG Long

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024056>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术

Key Engineering Technologies for Three-Dimensional Development of Multiple Formations of Shale Oil in Jiyang Depression

石油钻探技术. 2023, 51(1): 1-8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023001>

鄂尔多斯盆地页岩油体积压裂技术实践与发展建议

Practice and Development Suggestions for Volumetric Fracturing Technology for Shale Oil in the Ordos Basin

石油钻探技术. 2021, 49(4): 85-91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021075>

济阳拗陷页岩油水平井钻井完井关键技术

Key Technologies for Drilling and Completion of Horizontal Shale Oil Wells in the Jiyang Depression

石油钻探技术. 2021, 49(4): 22-28 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021073>

基于灰色关联分析的页岩油甜点综合评价方法

Comprehensive Evaluation Method of Shale Oil Sweet Spot Based on Grey Correlation Analysis: A Case Study of Bonan Sag in Bohai Bay Basin

石油钻探技术. 2023, 51(5): 130-138 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023085>

陆相页岩油气水平井穿层体积压裂技术

Vertical Penetration of Network Fracturing Technology for Horizontal Wells in Continental Shale Oil and Gas

石油钻探技术. 2023, 51(5): 8-14 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023078>

中国石化页岩油工程技术现状与发展展望

Present Status and Development Prospects of Sinopec Shale Oil Engineering Technologies

石油钻探技术. 2021, 49(4): 8-13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021072>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2024056

引用格式: 李阳, 曹小朋, 赵清民, 等. 济阳拗陷陆相断陷盆地页岩油开发的几点思考 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(4): 1-7.

LI Yang, CAO Xiaopeng, ZHAO Qingmin, et al. Thoughts on shale oil development in continental fault basin in Jiyang Depression [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(4): 1-7.

济阳拗陷陆相断陷盆地页岩油开发的几点思考

李 阳¹, 曹小朋², 赵清民³, 刘祖鹏², 薛兆杰¹, 蒋 龙²

(1. 中国石油化工股份有限公司, 北京 100728; 2. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257015; 3. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘 要: 济阳拗陷是典型陆相断陷盆地, 其效益开发对中国页岩油可持续发展具有重要作用。陆相断陷盆地页岩油储层构造复杂、岩相类型多样, 流体性质复杂, 效益开发难度大。济阳拗陷经过研究评价、试验开发和规模建产 3 个阶段的探索, 取得了重要进展。为此, 系统性总结了页岩油优质甜点评价、立体开发优化、高效储层改造、储层补能提高采收率等页岩油开发技术所面临的挑战, 提出了工程地质双甜点评价、井网层系组合优化、CO₂ 前置极限射流密切割压裂、注气补能和化学提高采收率等技术措施和效益开发管理模式, 初步形成了陆相断陷盆地页岩油开发技术和管理模式体系, 对其后续发展方向提出了建议, 为陆相断陷盆地页岩油效益开发提供了参考借鉴。

关键词: 页岩油; 陆相断陷盆地; 效益开发; 甜点评价; 体积压裂

中图分类号: TE341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2024)04-0001-07

Thoughts on Shale Oil Development in Continental Fault Basin in Jiyang Depression

LI Yang¹, CAO Xiaopeng², ZHAO Qingmin³, LIU Zupeng², XUE Zhaojie¹, JIANG Long²

(1. China Petroleum & Chemical Corporation, Beijing, 100728, China; 2. Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257015, China; 3. Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing, 102206, China)

Abstract: Jiyang Depression is a typical continental fault basin, and its beneficial development is of great significance for the sustainable development of shale oil in China. Shale oil reservoirs in continental fault basins have complex tectonics, diverse lithofacies types, and complicated fluid properties, making it difficult to achieve beneficial development. Significant progress was made in Jiyang Depression after three stages of exploration, including research and evaluation, experimental development, and large-scale production construction. To this end, the challenges faced by shale oil developing technologies, such as high-quality sweet spot evaluation, three-dimensional development and optimization, efficient reservoir stimulation, reservoir energy energy replenishment to enhance oil recovery, etc. were systematically summarized. Technical measures and beneficial development management models such as double sweet spot evaluation of engineering and geology, optimization of the combination of well pattern and layer system, CO₂ prepad fracturing using extreme jet and dense perforation, gas injection for energy replenishment, and chemical enhanced oil recovery. The shale oil developing technologies and management model system for the continental fault basins were initially formed, suggestions on the future development direction were put forward, providing a reference for the efficient development of shale oil in continental fault basins.

Key words: shale oil; continental fault basin; beneficial development; sweets spot evaluation; volumetric fracturing

21 世纪以来, 页岩油等非常规油气已成为全球油气资源的重要组成部分^[1-6]。二叠、巴肯、鹰滩等盆地海相页岩油气的高效开发, 使美国实现了能源独立, 对世界石油格局产生了深远影响^[7-10]。近年来,

中国在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地的页岩油气勘探开发取得了重要突破^[11-22]。与美国海相页岩油相比, 中国陆相断陷盆地页岩油在沉积环境、构造特征、地化参数、储集特征、流体

收稿日期: 2024-01-04; 改回日期: 2024-06-12。

作者简介: 李阳 (1958—), 男, 山东东平人, 1982 年毕业于华东石油学院石油地质专业, 2000 年获中国科学院地质学专业博士学位, 正高级工程师, 中国工程院院士, 主要从事油气藏开发基础理论和关键技术研究工作。系本刊编委。Email: liyang@sinopec.com.cn。

基金项目: 中国石化重点科技攻关项目“深注带及复杂断块页岩油开发优化设计技术研究”(P22037)部分研究内容。

物性及产能方面存在巨大差异,整体呈横向分布变化大、相变频繁、非均质性较强、热演化程度低、孔隙结构和类型复杂,原油的密度、黏度和含蜡量高,单井日产油量与累计采出量低等特点。

经过多年的基础理论研究、工艺技术升级和生产实践迭代,济阳拗陷陆相页岩油开发取得了重大突破^[23-26],实现了从单井到井组、从3层楼到5层楼的突破,初步形成了甜点综合评价、立体开发优化设计、水平井优快钻井和水平井密切割强化组合缝网体积压裂等页岩油开发关键技术。济阳页岩油产量虽已实现跨越式增长,但仍面临高效动用难、动用机理复杂、合理调控方式及开发后期补能提产技术待优化等诸多挑战。为此,笔者结合济阳页岩油开发实践认识,对陆相断陷盆地页岩油开发的难点及攻关方向提出了几点思考,以期为中国陆相页岩油开发提供参考和借鉴。

1 陆相断陷盆地页岩油概况

我国陆上页岩油资源量 4.61×10^{10} t,主要分布在鄂尔多斯、松辽、渤海湾、准噶尔等盆地^[27-29],大力发展页岩油是我国实现 2×10^8 t原油稳产的重要资源支撑。截至2022年底,我国页岩油累计三级储量超 50×10^8 t,其中探明地质储量 13.06×10^8 t,年产量 3.315×10^6 t,占全国原油年产量的1.46%。中石化陆相页岩油资源量丰富,90%集中在东部的渤海湾、江汉、南襄和苏北等4个断陷盆地。

济阳拗陷位于渤海湾盆地中部,是中国东部新生代典型陆相断陷盆地,发育沙三下亚段和沙四上纯上亚段2套主力页岩油层系,初步估算资源量 1.0×10^{10} t,分布在牛庄、民丰、渤南等11个次洼。济阳拗陷页岩油热演化程度低,热演化成熟度主要分布在0.5%~1.2%,其中热演化成熟度小于0.9%的中低演化页岩油资源量占比达90%;埋藏深度在3 000~5 500 m,储层厚度在300~500 m,洼陷中心局部厚度可达1 500 m;地层温度130~200 ℃,压力系数1.2~2.0,整体呈“演化程度低、埋藏深、厚度大、高温高压,构造、岩相、流体性质复杂”等特征。

2 陆相断陷盆地页岩油开发挑战

我国陆相页岩油开发仍处于起步阶段,在基础理论、压裂工艺和开发技术等方面仍待深入攻关。依托济阳页岩油开发实践认识,总结了影响陆相断陷盆地页岩油开发效果的主要问题。

2.1 开发甜点影响因素多,三维甜点准确认识难

页岩油甜点评价是实现勘探突破和规模效益开发的关键。页岩油甜点综合评价是在地质评价的基础上,运用测井和地震数据,建立构造、岩相、属性、裂缝、地应力等全要素三维地质模型,分析页岩油富集区/段三维空间。陆相断陷盆地页岩油断裂系统复杂,多尺度裂缝发育,岩相类型多样,非均质性强。不同页岩岩相矿物类型、孔隙结构类似,电性特征与岩石物理参数差异小,单一岩相厚度薄且相互叠置,造成岩相的测井、地震响应差异弱,现有的有利岩相评价、测井关键参数解释、多属性融合地震预测等系列技术尚不能准确揭示有利岩相组合体的分布规律。需要进一步完善岩相预测、裂缝预测及地应力预测技术、开发甜点评价方法和划分标准,为效益开发提供可靠地质基础。

2.2 立体开发布井模式复杂,储层动用率提高难

断陷盆地页岩油断裂系统发育,地层倾角变化大,纵向有利岩相差异大,长水平段布井受限,复杂地质条件下布井方式优化设计难度大。针对区域同层落差大、流体性质复杂等特点,需寻求流体相态分布和布井方式的最佳匹配点。针对页岩层多、层厚、非均质性强等问题,攻关超大平台立体布井模式。立体井组的井距、层距过大,易导致井间区域动用不充分,井网控制程度低;井距、层距过小,易导致井间干扰,影响生产井开发效果,需优化井网井距及水平井参数。

2.3 地质因素复杂多变,高效压裂提高产能难

陆相页岩油高效压裂面临以下难题:1)储层埋藏深,地层压力系数大,岩石破裂压力高,压裂时起裂困难;2)水平主应力差较大时,裂缝转向延伸的可能性变小,天然裂缝稳定性降低,水力裂缝扩展不均匀,难以实现复杂缝网压裂;最大水平主应力方向与天然弱面夹角较小时,水力裂缝易沿着天然裂缝弱面穿过,改造效果差;3)储层断层和天然裂缝发育,易引起近井地带压裂液滤失,消耗诱导缝扩展能量并抑制其延伸,改造区域小;4)水力压裂排量高、规模大,压裂施工时对地层和套管的作用力大,易造成局部应力集中,发生套变套损等问题。

2.4 初期产能递减快,后期储层补能开发难

陆相页岩油藏普遍采用衰竭方式开采,初期产量高,但产量递减快,平均采油速度低、采收率低,经济有效开采难,需要补充地层能量和提高采收率。陆相断陷盆地非均质性强,断裂系统发育,容易造成气窜和注气效果不均衡,需要结合室内和现

场试验,系统分析吞吐、驱替和压裂等主要开发方式的可行性、适用性和应用前景,探索页岩油注气补能提高采收率的合理开发方式。

2.5 多部门协同开发,团队高效统筹运行难

我国页岩油开发技术与管理模式仍在探索完善中,尚未形成全产业链的系统管理模式,一体化团队融合效果和协同效应不能有效发挥。亟需建立页岩油开发全生命周期管理模式,涵盖资源勘探、有利区选址、井网布控、钻完井、压裂及开采等多个环节。

3 陆相断陷盆地页岩油开发关键技术

3.1 页岩油甜点评价技术

页岩油甜点评价主要是寻找“高丰度资源区/段”和易于形成“人造高渗区/段”的位置。“高丰度资源区/段”应具备“两大三高一保”的特点,“两大”指页岩油分布面积大和纵向厚度大,“三高”表示有机质丰度高、热演化程度相对较高及滞留烃含量较高,“一保”指页岩油甜点的顶底板保存条件良好。“人造高渗区/段”需要具备“三高两低一发育”的特征,“三高”指脆性矿物含量、微观孔隙度和纯页岩段压力系数较高,“两低”指地区黏土矿物含量及地应力场的两向应力差较低,“一发育”指天然裂缝发育,包括生烃增压缝、成岩缝和构造缝等,有利于通过人工改造形成高效渗流通道。

在地质甜点评价方面,以有利岩相分布为基础,优选有机质含量、滞留烃含量、成熟度、压力系数等产能影响关键参数。选择热演化程度大于 0.65% 的层段作为靶体,以确保有机质进入生烃门限大量生烃。利用测井数据评估不同构造部位甜点段的垂向分布和分级,并结合压裂试油、储层品质和工程品质测井评价结果,综合选择关键参数。在单井分析基础上,利用地震数据预测页岩油甜点平面分布,实现甜点三维空间分布评价,为确定钻探井位提供依据。

在工程甜点评价方面,考虑页岩可压性、地应力各向异性、天然裂缝发育及分布特征等因素,根据地质、工程因素在甜点评价中的重要程度,采用灰色聚类分析等统计学方法,将产能主控因素按照影响程度排序,在不同地区开展差异化甜点评价,明确最佳工程甜点区域和层段。

3.2 立体开发关键技术

3.2.1 立体开发优化

1) 布井模式优化。兼顾断层发育、有利岩相空间分布及地应力方向等因素,考虑有利岩相发育厚

度与断层两盘对接关系,寻求复杂断块区各因素的最佳匹配点,优化布井模式,济阳页岩油采用了“平面上平行、纵向上多层交错分布”的模式。考虑实际开发因素,采取一个钻井平台部署多口水平井或定向井,发挥平井作业优势,有利于集约化管理。

2) 合理划分层组。需要最大化控制储量,同时避免人工裂缝引起纵向干扰。充分考虑纵向非均质性和工程改造可行性,以及经济极限动用厚度,建立立体开发分层标准体系和开发技术界限。

3) 合理井距确定。基于“裂缝搭接,通而不窜”的理念,既要保障储量有效控制,又要避免井间干扰造成产量损失。针对陆相页岩油的非均质性,通过层、井距与人工缝网协同优化,确定最优立体开发空间配置,形成了“纵向立体交错,平面规模覆盖”的布井方式,最大程度降低井间、层间负向干扰,实现储量动用最大化。基于微地震监测、压裂模拟等手段,综合考虑天然裂缝发育程度、与人工裂缝的耦合效应,确定合理的井距。

3.2.2 立体开发实施效果

以储量动用、产能和经济效益最大化为目标,形成立体开发优化设计技术,实现从单井到井组、3 层楼到 5 层楼的突破,正在进行 7 层楼评价试验。樊页平 1 井区部署 3 层楼的立体开发井组(见图 1),投产后 5 口井峰值日产油量过百吨,6 口井单井累计产油量过万吨,建成了中国石化第一个 10 万吨级页岩油开发井组,实现了单井到井组的重大突破,目前井组稳定日产油量 220 t,累计产油量 1.14×10^5 t。

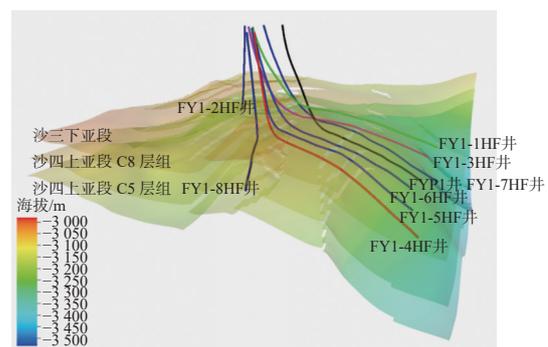


图 1 樊页平 1 井组 3 层楼先导试验井组
Fig.1 3-storey pilot test well group FYP 1

3.3 高效立体压裂技术

断陷湖盆高效压裂面临断裂系统层理缝发育、层间差异大、破裂压力高、水平主应力差异大、纵向穿层难和立体开发均衡压裂难等多个挑战。基于矿物含量、岩石力学参数、储层地应力和天然裂缝发育程度等参数,建立了页岩油水平井可压性评价方

法,明确高效压裂层段。探索前置CO₂+组合缝网体积压裂技术,提出了穿层扩缝高的方法。

室内试验表明,CO₂与岩石作用可改变岩石的力学性质,注入前置超临界CO₂后提高了岩石的孔隙压力,促进了层理弱面的开启和滑移,使其强度降低了32%(见图2)。CO₂还具有降黏、增能、萃取作用,可有效提高原油流动性。矿场实践表明,前置超临界CO₂能使破裂压力降低9MPa。岩心声发射试验表明,CO₂可增强人工裂缝穿层扩展造缝,裂缝破裂事件点明显增多,裂缝带宽由93mm增加至190mm,裂缝复杂程度提高1.17倍(见图3)。

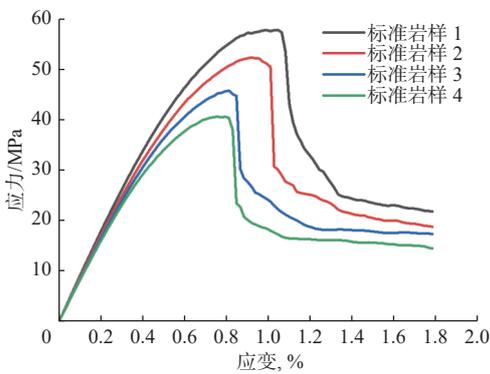


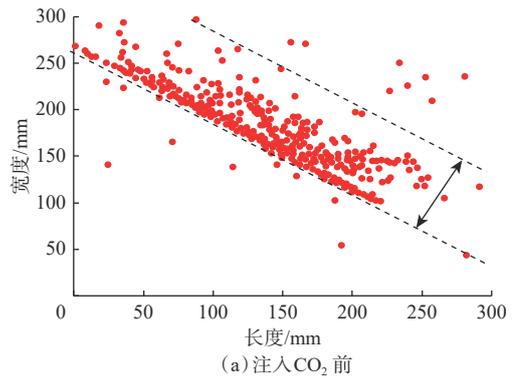
图2 CO₂对岩石力学性质的影响

Fig.2 Effect of CO₂ on rock mechanical properties

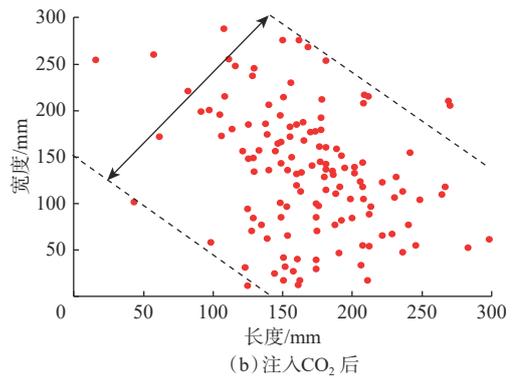
陆相断陷湖盆构造活动强烈,断裂系统复杂,断裂带及构造曲率较大部位构造裂缝发育。同时,灰质纹层与泥质纹层互层,沿纹层间或层内薄弱面形成顺层微缝,横向连通性好、水平应力差异大,有效改造体积小。针对陆相页岩多尺度多类型裂缝发育的地质特征,研究了变黏压裂液交替注入扩缝技术,促使纹层灰质页岩多期次扩缝高;采用大排量、大液量和大砂量强化缝网改造,提高有效改造体积。

陆相断陷盆地发育不同级别断层和天然裂缝,存在多种非均质岩相界面,多层楼部署立体压裂过程中,空间上压力场、应力场动态不平衡,易造成低序级断层、岩相界面、层理缝等位置出现局部应力集中现象。为此,充分考虑立体井组岩相、应力、裂缝及构造等空间非均质性,设计相匹配的差异化立体缝网,实时调整施工参数,匹配应力场、压力场动态变化,最大程度消除局部应力集中,实现充分改造储层的同时,避免负向干扰和套损(见图4)。

以缝控储量最大化为核心,按照“一井一案、一段一策”压裂设计理念,段簇、单井与井组压裂一体统筹优化,人造缝网与井网、立体空间非均质相协调,通过压裂模拟迭代优化,设计立体井组压裂参数和压裂顺序。压裂过程中,控制段簇施工与



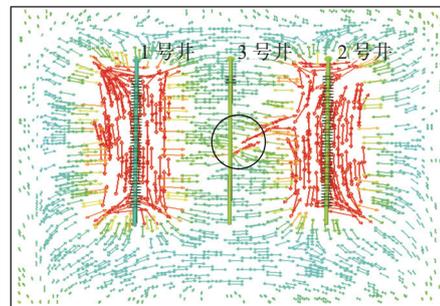
(a)注入CO₂前



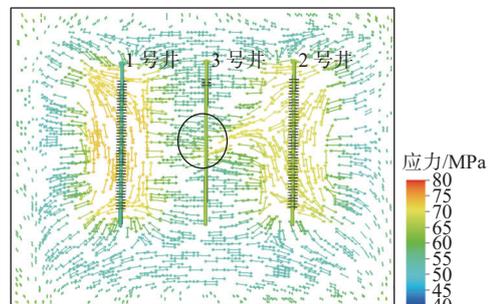
(b)注入CO₂后

图3 CO₂压裂改造对缝网的影响

Fig.3 Effect of CO₂ fracturing stimulation on fracture network



(a)中心井应力集中显著



(b)中心井应力集中减弱

图4 立体开发井组均衡压裂示意

Fig.4 Balanced fracturing of three-dimensional development well group

沿井段动态应力集中相匹配、邻井施工与井间非均衡应力场相匹配、井组施工与空间非均衡应力场相

匹配。通过超前预测预判预警、实时优化调控压裂参数和压裂顺序,降低压窜风险和套损套变情况,最终实现立体开发井组的均衡压裂。

3.4 全周期 EUR 提升关键技术

3.4.1 注气提高采收率

目前的先导性试验主要为注气吞吐,注入气包括 CO₂、天然气、N₂、烟道气和空气等。由于 CO₂ 兼具提高采收率和埋存作用,以其为主要注入介质。CO₂ 提高采收率的机理主要包括增压、溶解、抽提、膨胀、吸附置换、降低毛细管力和扩散。室内研究和数值模拟表明,CO₂ 吞吐提高采收率效果明显,但现场并未取得预期成效。主要原因在于注入的 CO₂ 多存在于裂缝中,相比于常规油藏,需要更长的时间才能进入页岩基质孔隙;注入 CO₂ 后,沥青质沉积导致基质渗透率大幅降低,存在严重气窜现象。

注天然气也可通过抽提、溶解膨胀、降黏、增压和混相机理提高开采效果,且无沥青质沉积,现场应用已取得效果,但气窜问题尚未得到解决。此外,N₂、烟道气和空气作为注入介质也被科研人员关注。注空气提高采收率的机理相对复杂,空气中的 O₂ 与页岩中有机质的氧化反应可促进干酪根转化,兼具原油改质和提高基质渗透率的效果,同时储层温度的变化可改变应力场诱导裂缝扩张,扩大波及范围。室内和现场试验表明,注气是页岩油提高采收率的有效手段,但气体在纳米孔隙中的运移机制和基质与气体的相互作用机理还需进一步研究。

3.4.2 化学提高采收率

页岩油化学提高采收率技术还处于探索阶段,表面活性剂是常用的处理剂之一。页岩储层多为油湿储层,表面活性剂可以去除孔隙表面的吸附成分,转变其润湿性。相比于常规储层,页岩纳米孔隙中油水两相间的毛细管力高,水相润湿的孔隙表面能够增强压裂液的渗吸置换效果。增加储层与表面活性剂的相互作用时间对页岩油的增产效果有较大影响,裂缝发育程度显著影响渗吸过程,表面活性剂与岩石表面的化学反应可诱导微裂缝延展,从而提高裂缝的控制范围。但应用表面活性剂存在地层吸附及生产破乳问题,需要进一步完善其性能。

3.5 一体化管理模式

勘探开发过程中,以提高单井产量为核心,形成了一体化管理和合作运行机制(见图 5),创建了前后方联动的管理模式,制定了成本管控措施。

充分利用信息化手段,实现多学科互动、多专业融合。建立联合作战室,各领域、不同层级专家共同参与,不断健全一体化战略规划部署机制、一

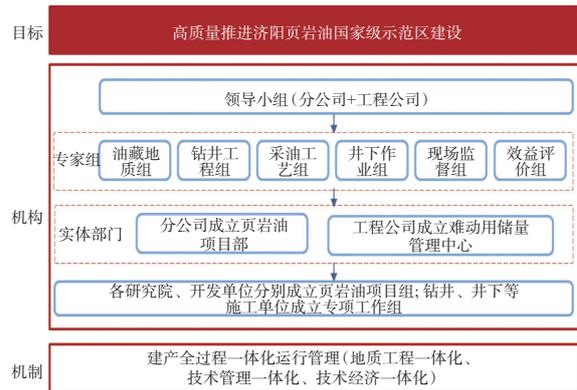


图 5 一体化管理机制示意

Fig.5 Integrated management mechanism

体化井位设计跟踪决策机制、一体化异常问题处置机制,及时协调解决各类问题,保障各项工作落实落地。通过一体化战略规划部署机制,实现一体化谋划制定中长期规划、攻关目标方向和装备调配运行方案;一体化井位设计跟踪决策机制,包括一体化的井眼轨道设计优化、跨层追层轨迹跟踪和提速提效的优化方案;通过一体化异常问题处置机制,实现一体化异常问题剖析、专项问题处置和回顾分析评价。依托作战室机制,充分发挥“前、后方作战室”的实时决策作用,综合利用物探反演、大数据、钻测录等信息实施联动,大大缩短异常情况处理时间。健全完善信息沟通、措施配合、经验总结、安全事项等内容,确保目标同向,实现常规工作日常监控,风险隐患随时管控。应用物联网、大数据、云计算、移动技术,开展数字油藏、数字井筒、数字地面 3 个层次数字油田建设,对油气井、场站、管道集中监控,生产与安全故障自动预警报警。实现资源共享、远程操控、趋势预测、动态分析,优化劳动组织方式,提升管理水平。

4 启示与思考

以济阳页岩油开发实践为例,初步形成了陆相断陷盆地页岩油甜点评价技术、立体开发关键技术和一体化管理模式,有助于提高单井优质甜点钻遇率和井组储量控制程度,改善储层压裂改造效果,实现开发后期地层补能及提高采收率的目标。今后研究中应当继续深化和完善以下几方面的关键技术,以助力陆相断陷盆地页岩油的效益开发。

1)页岩储层精细地质评价技术。为指导立体井组部署,需系统评价不同类型页岩油井生产动

态,进一步明确页岩油富集高产主控因素,优选地质、工程关键参数,应用大量试验、生产数据合理确定参数取值下限与分级划分标准,建立甜点分级评价体系。采用“井点-平面-立体”为内核的地质工程双甜点立体评价方法,通过精确三维地质模型,明确不同级别甜点空间分布规律。

2)页岩油立体开发均衡动用技术。立体开发过程中压力场-应力场-饱和度场-渗透率场的时空变化大,需建立立体井组“四场”表征方法,精细描述三维“四场”时空演化规律,明确立体压裂缝网空间和渗流通道时变规律,形成立体井网-缝网适配方法,支撑压裂优化设计和多层系均衡动用,实现多层系整体控制储量最大化。

3)多介质补能提高EUR技术。页岩油弹性开发后期,水平井体积压裂缝网逐渐闭合,渗流通道大幅减少。开展早期气、水、剂等多介质补充地层能量攻关试验,发展注气(CO₂、烟道气等)吞吐、增能注水吞吐、注化学剂渗吸等多种补能方式,进一步提高EUR。

4)页岩油效益建产模式。页岩油立体开发建产节点长、涉及专业多、数据类型多样,考虑全生命周期的开发投资和收益,建立耦合效益建产模式与开发技术对策的全生命周期优化决策模型。需以效益开发为目标,以压裂参数和工作制度为优化变量,研究页岩油立体开发效益建产模式。

5 结束语

中国陆相断陷盆地页岩油资源丰富,渤海湾、江汉、南襄和苏北等4个断陷盆地获得陆相页岩油重大发现,在陆相富有机质页岩成因规律、富集机理、“甜点区/段”富集主控因素、开发甜点评价、立体开发技术等方面取得重要进展。目前,陆相断陷盆地页岩油勘探开发已实现产能突破,进入立体开发先导试验评价阶段。但我国陆相断陷盆地页岩油在资源品质、开发技术、配套设施等方面仍存在诸多挑战,在页岩油甜点分级分类精细评价技术、立体开发均衡动用技术、全周期立体开发效益建产模式等方面都有待进一步深入研究,只有理念创新、技术创新等多个方面共同发力,才能取得显著的降本增效效果,实现页岩油规模效益开发。

参 考 文 献

References

- [1] 邹才能,赵群,王红岩,等.非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J].石油科技论坛,2021,40(3):72-79.
- ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps China increase oil and gas reserves and production[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2021, 40(3): 72-79.
- [2] 邹才能,潘松圻,赵群.论中国“能源独立”战略的内涵、挑战及意义[J].石油勘探与开发,2020,47(2):416-426.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, ZHAO Qun. On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(2): 416-426.
- [3] 邹才能,潘松圻,党刘栓.论能源革命与科技使命[J].西南石油大学学报(自然科学版),2019,41(3):1-12.
- ZOU Caineng, PAN Songqi, DANG Liushuan. On the energy revolution and the mission of science and technology[J]. *Journal of Southwest Petroleum University(Science & Technology Edition)*, 2019, 41(3): 1-12.
- [4] 李国欣,朱如凯.中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题[J].中国石油勘探,2020,25(2):1-13.
- LI Guoxin, ZHU Rukai. Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 1-13.
- [5] 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.
- [6] 杨雷,金之钧.全球页岩油发展及展望[J].中国石油勘探,2019,24(5):553-559.
- YANG Lei, JIN Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 553-559.
- [7] 唐玮,梁坤,冯金德,等.低油价下美国页岩油困境对我国油田勘探开发的启示[J].石油科技论坛,2020,39(4):26-30.
- TANG Wei, LIANG Kun, FENG Jinde, et al. Enlightenment from dilemma of US shale oil development under low oil prices[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2020, 39(4): 26-30.
- [8] 鲜成钢,李国欣,李曹雄,等.陆相页岩油效益开发的若干问题[J].地球科学,2023,48(1):14-29.
- XIAN Chenggang, LI Guoxin, LI Caoxiong, et al. Key evaluation aspects for economic development of continental shale oil[J]. *Earth Science*, 2023, 48(1): 14-29.
- [9] 杨智,邹才能.“进源找油”:源岩油气内涵与前景[J].石油勘探与开发,2019,46(1):173-184.
- YANG Zhi, ZOU Caineng. "Exploring petroleum inside source kitchen": connotation and prospects of source rock oil and gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, 46(1): 173-184.
- [10] 童晓光,张光亚,王兆明,等.全球油气资源潜力与分布[J].石油勘探与开发,2018,45(4):727-736.
- TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 727-736.
- [11] 刘鸿渊,蒲萧亦,张烈辉,等.中国页岩气效益开发:理论逻辑、实践逻辑与展望[J].天然气工业,2023,43(4):177-183.
- LIU Hongyuan, PU Xiaoyi, ZHANG Liehui, et al. Beneficial development of shale gas in China: theoretical logic, practical logic and prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(4): 177-183.

- [12] 付金华, 李士祥, 郭芪恒, 等. 鄂尔多斯盆地陆相页岩油富集条件及有利区优选 [J]. *石油学报*, 2022, 43(12): 1702–1716.
FU Jinhua, LI Shixiang, GUO Qiheng, et al. Enrichment conditions and favorable area optimization of continental shale oil in Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(12): 1702–1716.
- [13] 何文渊, 蒙启安, 冯子辉, 等. 松辽盆地古龙页岩油原位成藏理论认识及勘探开发实践 [J]. *石油学报*, 2022, 43(1): 1–14.
HE Wenyuan, MENG Qian, FENG Zihui, et al. In-situ accumulation theory and exploration & development practice of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 1–14.
- [14] 周立宏, 赵贤正, 柴公权, 等. 陆相页岩油效益勘探开发关键技术与工程实践: 以渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔二段为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 1059–1066.
ZHOU Lihong, ZHAO Xianzheng, CHAI Gongquan, et al. Key exploration & development technologies and engineering practice of continental shale oil: a case study of Member 2 of Paleogene Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1059–1066.
- [15] 谢建勇, 崔新疆, 李文波, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油效益开发探索与实践 [J]. *中国石油勘探*, 2022, 27(1): 99–110.
XIE Jianyong, CUI Xinjiang, LI Wenbo, et al. Exploration and practice of benefit development of shale oil in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2022, 27(1): 99–110.
- [16] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状 [J]. *油气地质与采收率*, 2019, 26(1): 1–12.
SONG Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2019, 26(1): 1–12.
- [17] 朱相羽, 段宏亮, 孙雅雄. 苏北盆地高邮凹陷古近系陆相页岩油勘探突破及意义 [J]. *石油学报*, 2023, 44(8): 1206–1221.
ZHU Xiangyu, DUAN Hongliang, SUN Yaxiong. Breakthrough and significance of Paleogene continental shale oil exploration in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2023, 44(8): 1206–1221.
- [18] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(6): 657–667.
KUANG Lichun, TANG Yong, LEI Dewen, et al. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomitic rock, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(6): 657–667.
- [19] 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 Jinhua, 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.
- [20] 蒋廷学, 肖博, 沈子齐, 等. 陆相页岩油气水平井穿层体积压裂技术 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5): 8–14.
JIANG Tingxue, XIAO Bo, SHEN Ziqi, et al. Vertical penetration of network fracturing technology for horizontal wells in continental shale oil and gas[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(5): 8–14.
- [21] 马春晓, 邢云, 罗攀, 等. 陆相页岩气储层裂缝支撑剂铺置规律研究 [J]. *钻井液与完井液*, 2022, 39(3): 373–382.
MA Chunxiao, XING Yun, LUO Pan, et al. Research on proppant migration law of fractures in continental shale gas reservoir[J]. *Drilling Fluid & Completion Fluid*, 2022, 39(3): 373–382.
- [22] 李凤霞, 王海波, 周彤, 等. 页岩油储层裂缝对 CO₂ 吞吐效果的影响及孔隙动用特征 [J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(2): 38–44.
LI Fengxia, WANG Haibo, ZHOU Tong, et al. The influence of fractures in shale oil reservoirs on CO₂ huff and puff and its pore production characteristics[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 38–44.
- [23] 钱钦, 鲁明晶, 钟安海. 东营凹陷陆相页岩油 CO₂ 增能压裂裂缝形态研究 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5): 42–48.
QIAN Qin, LU Mingjing, ZHONG Anhai. Study on fracture morphology of CO₂ energized fracturing of continental shale oil in Dongying Sag[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(5): 42–48.
- [24] 袁建强. 济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(1): 1–8.
YUAN Jianqiang. Key engineering technologies for three-dimensional development of multiple formations of shale oil in Jiyang Depression[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 1–8.
- [25] 彭艳霞, 杜玉山, 蒋龙, 等. 济阳拗陷缓坡带页岩油储层微孔孔隙结构及分形特征 [J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 535–544.
PENG Yanxia, DU Yushan, JIANG Long, et al. Micropore structure and fractal characteristics of shale oil reservoir in gentle slope zone of Jiyang Depression[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 535–544.
- [26] 刘巍, 曹小朋, 徐耀东, 等. 页岩油井生产数据分析与产能评价方法 [J]. *断块油气田*, 2023, 30(4): 572–578.
LIU Wei, CAO Xiaopeng, XU Yaodong, et al. Production data analysis and productivity evaluation method for shale oil wells[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023, 30(4): 572–578.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 杨华, 牛小兵, 徐黎明, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长 7 段页岩油勘探潜力 [J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(4): 511–520.
YANG Hua, NIU Xiaobing, XU Liming, et al. Exploration potential of shale oil in Chang7 Member, Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(4): 511–520.