

中国页岩油勘探开发面临的挑战与高效运营机制研究

刘惠民 王敏生 李中超 陈宗琦 艾昆 王运海 毛怡 闫娜

Challenges and Efficient Operation Mechanism of Shale Oil Exploration and Development in China

LIU Huimin, WANG Minsheng, LI Zhongchao, CHEN Zongqi, AI Kun, WANG Yunhai, MAO Yi, YAN Na

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024052>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究

Challenges and Technical Countermeasures for Effective Development of Shale Oil in China

石油钻探技术. 2020, 48(3): 63–69 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020058>

页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向

Key Drilling/Completion Technologies and Development Trends in the Efficient Development of Shale Oil

石油钻探技术. 2019, 47(5): 1–10 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019076>

中国石化页岩油水平井分段压裂技术现状与发展建议

The Current Status and Development Suggestions for Sinopec's Staged Fracturing Technologies of Horizontal Shale Oil Wells

石油钻探技术. 2021, 49(4): 14–21 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021071>

国内外页岩油储层改造技术现状及发展建议

The Current Status and Development Suggestions for Shale Oil Reservoir Stimulation at Home and Abroad

石油钻探技术. 2021, 49(4): 1–7 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021081>

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>

中国石化重点探区钻井完井技术新进展与发展建议

New Progress and Development Suggestions for Drilling and Completion Technologies in Sinopec Key Exploration Areas

石油钻探技术. 2020, 48(4): 11–20 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020069>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀专家视点▶

doi:10.11911/syztjs.2024052

引用格式: 刘惠民, 王敏生, 李中超, 等. 中国页岩油勘探开发面临的挑战与高效运营机制研究 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(3): 1-10.

LIU Huimin, WANG Minsheng, LI Zhongchao, et al. Challenges and efficient operation mechanism of shale oil exploration and development in China [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(3): 1-10.

中国页岩油勘探开发面临的挑战与高效运营机制研究

刘惠民¹, 王敏生², 李中超³, 陈宗琦⁴, 艾 昆⁵, 王运海⁶, 毛 怡⁷, 闫 娜²

(1. 中国石化胜利油田分公司, 山东东营 257017; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206; 3. 中国石化中原油田分公司, 河南濮阳 457001; 4. 中石化中原石油工程有限公司, 河南濮阳 457001; 5. 中石化华北石油工程有限公司, 河南郑州 450007; 6. 中国石化华东油气分公司, 江苏南京 210004; 7. 中国石化勘探分公司, 四川成都 610041)

摘 要: 中国页岩油资源丰富, 并在多个盆地取得重大勘探开发突破, 已成为石油战略接替新领域, 但页岩油勘探开发时间相对较短, 顶层的战略规划与政策导向尚未明确, 存在勘探突破难、开发成本高和组织运营不畅等问题。为此, 调研剖析了中美页岩油经营理念、宏观环境、资源配置、生产运行、科技水平和信息化程度等现状, 深入思考中国页岩油勘探开发的痛点、难点和阻点, 认为当前中国页岩油勘探开发主要面临理念思路、技术能力、运营管理和绿色发展等 4 大挑战。围绕国家能源战略, 提出了实现中国页岩油高效运营的对策建议: 谋划稳中求进的页岩油发展战略, 构建市场机制下多主体融合的战略合作共同体, 打造多兵种协作的生产运行新模式, 建立迭代式创新的科技发展新机制, 建立数智化赋能的信息支撑新范式, 开创绿色低碳化的产业发展新格局, 营造高契合友好的外部运营新环境。

关键词: 页岩油; 勘探开发; 技术挑战; 运营机制; 发展建议

中图分类号: TE349 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)03-0001-10

Challenges and Efficient Operation Mechanism of Shale Oil Exploration and Development in China

LIU Huimin¹, WANG Minsheng², LI Zhongchao³, CHEN Zongqi⁴, AI Kun⁵, WANG Yunhai⁶, MAO Yi⁷, YAN Na²

(1. Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying, Shandong, 257017, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China; 3. Sinopec Zhongyuan Oilfield Company, Puyang, Henan, 457001, China; 4. Sinopec Zhongyuan Oilfield Service Corporation, Puyang, Henan, 457001, China; 5. Sinopec Huabei Oilfield Service Corporation, Zhengzhou, Henan, 450007, China; 6. Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu, 210004, China; 7. Sinopec Exploration Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China)

Abstract: China has abundant shale oil resources and has made significant exploration and development breakthroughs in multiple basins, which unveils a new field for implementing China's petroleum strategy. However, the exploration and development of shale oil in China has a relatively short history, and the top-level strategic planning and policy guidance are not yet clear. There are a series of issues to be solved such as difficulties in exploration breakthroughs, high development costs, and inefficient organizational operation, etc. To this end, a comprehensive literature review was conducted to explore the current status of shale oil management concept, macro environment, resource allocation, production and operation, science and technology level, and informatization state in China and the U.S, and in-depth considerations were performed to fully understand the pain points, difficulties, and obstacles of shale oil exploration and development in China. It is believed that currently there are four major challenges in shale oil exploration and development in China, including conceptual thinking, technical capabilities, operation management,

收稿日期: 2024-02-19。

作者简介: 刘惠民 (1969—), 男, 山东寿光人, 1992 年毕业于成都地质学院石油地质与勘查专业, 2001 年获中国地质大学 (武汉) 大学矿产普查与勘探专业硕士学位, 2005 年获中国石油大学 (华东) 矿物学、岩石学、矿床学专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事油气勘探研究与管理工。E-mail: hmliu@vip.163.com。

通信作者: 王敏生, wangms.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技战略研究项目“面向 2035 年的油气开发工程前沿技术战略研究” (编号: P20031) 资助。

and green development etc. Based on the national energy strategy, countermeasures and suggestions were proposed to achieve efficient operation of shale oil in China, including implementing shale oil development strategy in a steady manner, building a strategic cooperative community with multi-subject integration under the market mechanism, creating a new mode of production and operation with multi-force collaboration, establishing a new mechanism of iterative technological development and innovation, developing a new information support paradigm empowered by digital intelligence, opening a new landscape of green and low-carbon industrial development, and fostering a new highly compatible and friendly external operation environment.

Key words: shale oil; exploration and development; technical challenge; operation mechanism; development suggestions

页岩油是中国能源体系的重要战略接替资源, 目前正处于由关键技术突破向商业开发转变的重要窗口期, 虽然已在多个盆地取得了页岩油勘探开发突破, 但仍存在勘探突破难、开发成本高和组织运营不畅等问题^[1-2]。美国是世界上最早实现页岩油商业开发的国家, 技术的进步、理念的更新和管理运营模式的变革, 是其实现页岩油产业跨越式发展的关键。为此, 笔者在总结分析国内外页岩油勘探开发进展及运营模式的基础上, 剖析了中国页岩油勘探开发面临的挑战, 提出了实现中国页岩油高效运营的对策建议, 探讨构建与页岩油勘探开发生产规律相适应的高效运营机制, 以期为推动中国页岩油大突破大发展、实现经济高效开发提供机制保障。

1 中美页岩油勘探开发进展及运营模式

根据美国能源信息署(EIA)的评价, 全球页岩油剩余技术可采资源量约为 618×10^8 t, 其中北美约占 25%, 俄罗斯约占 17%, 中国约占 7%(技术可采资源量约为 43×10^8 t)^[3]。随着认识和实践的不断深化, 资源量评价规模将呈快速增长趋势。

1.1 美国页岩油勘探开发进展及运营模式

1.1.1 勘探开发主要进展

页岩油的成功开发奠定了美国能源独立的基

础, 深刻改变了全球石油供应和地缘政治格局。2022 年, 美国原油产量 5.92×10^8 t, 其中页岩油产量达到 4.80×10^8 t, 占比达到了 81%^[4]。自 2008 年美国“页岩革命”以来, 其产量从最初的 7.95×10^4 m³/d 提高到现在的超过 143.00×10^4 m³/d, 已经接近传统产油大国沙特阿拉伯的水平 (159.00×10^4 m³/d), 累计总产量已超过 39.75×10^8 m³。EIA 预计, 基准情景下, 2025 年美国页岩油产量将达 $(4.69 \sim 5.11) \times 10^8$ t, 随后保持基本稳定态势。

美国页岩油勘探开发大体经历了 3 个阶段(见图 1)^[5-14]: 2000 年以前为探索发现阶段, 主要采用常规油气勘探开发的思路和工程技术体系; 2000—2008 年为技术突破阶段, 勘探理论、甜点识别技术取得突破, 勘探开发理念开始转变, 水平井和水力压裂得到应用; 2009 年开始进入快速发展阶段, 长水平段水平井和多级分段水力压裂规模化应用, “井工厂”作业和多层立体开发技术日趋成熟。为应对 2014 年国际油价断崖式下跌造成的冲击, 油公司与油服公司通过地质-工程-管理一体化实现了页岩油“二次革命”, 水力压裂技术也不断迭代升级(见表 1)^[15-18], 初期以少段少簇为主, 井间距大, 段间距长, 目前以定向定面等孔径射孔、双暂堵压裂等技术为代表, 井间距、簇间距大幅缩短。

在压裂监测方面, 光纤监测技术通过测量因裂

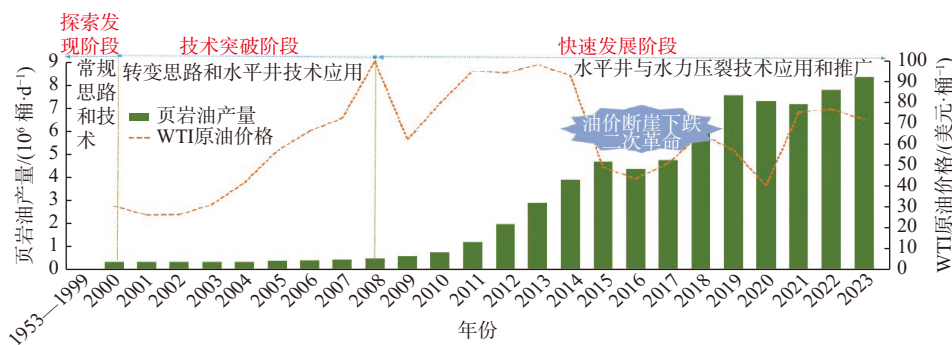


图 1 美国页岩油开发阶段

Fig.1 Stages of shale oil development in the U.S.

表 1 美国水力压裂工艺迭代升级情况

Table 1 Iterative upgrading of fracturing technology in the U.S.

时间	井间距/m	水平段长度/m	段间距/m	簇间距/m	加砂强度/(t·m ⁻¹)
2008—2014	400	1500	100~150	15~25	1.5
2015—2017	200	1500~3000	50~80	9~15	4.5
2018	100~150	1500~3000	<30	6~15	>7.5
2019至今	50~100	1500~3000	30~50	6~10	4.5~6.0

缝间距超过裂缝长度而造成的变形来表征所产生的裂缝网络,实现压裂作业效果的有效评价和页岩油藏管理的最优化。技术的进步、理念的更新和管理运营模式的变革综合推动了页岩油的商业开发,促进了页岩油产业跨越式发展^[13]。

1.1.2 运营模式

美国“页岩革命”成功的关键是优质的页岩油气资源禀赋和关键技术体系的快速研发集成与迭代更新,但完善的市场机制、灵活的运营模式和有效的政策支持也发挥了重要作用。

政府在扶持政策、市场机制等方面发挥了重要作用。1) 出台可操作性强的税收和补贴政策。为支持页岩油气产业发展,美国政府和七大页岩油气区所在地的州政府出台了一系列针对页岩油气的精准税收补贴及科技政策。另外,美国能源部专门设立了非常规油气资源研究基金,支持页岩油气勘探开发研究^[19-21]。2) 建立高效稳定透明的监管机制。突出行业特殊性,用法律法规明确划分各利益相关方的责权利,建立明晰的矿权交易与管理机制,规范页岩油气开发运营。3) 形成开放的油气资本市场体系。美国资本市场成熟,中小企业很容易在资本市场融资,通过参与竞争增强技术创新活力、推动成本降低。4) 构建多元投资主体与专业化分工服务相结合的体制。政府及各类产业角色合理分工,充分调动风险投资、技术研发、上游开采、基础设施、市场开发和终端应用等各方面积极性,保证页岩油开发快而有序。页岩油勘探初期一般由中小公司完成,大型油公司以并购或合资合作等方式跟进整合,实现规模化生产。专业技术服务公司以先进技术提供商业化服务,与油公司协同合作^[22-24]。

油公司在运营管理上采取了更加灵活务实的策略^[5-21]。1) 合理配置资源规避风险。大型油公司将常规油气和页岩油气分开运营、相互支持,将常规油气开发的利润作为现金流支撑页岩油前期勘探。页岩油公司设立资产部门和业务部门,资产部门负

责资产选定和交易,业务部门负责钻完井、地面等工程业务,共同规避风险、保证效益稳产。2) 采取灵活的生产经营策略。为应对油价波动,油公司采用“初期高产快速收回投资、后期长时间低产稳产、产能不足区块接替”的方式组织生产,根据国际油价变化及时开关井,灵活掌握开发节奏。利用期货、期权、掉期等金融工具,在原油交易中构建价格对冲机制。油公司与油服公司建立地质-工程-管理一体化协同工作体制,实施多专业协作和信息共享,促进降本增效。3) 推行全生命周期经营管理理念。勘探、评价、优选、定案、实施和执行 6 个阶段高效融合一体化运作,把勘探、评价、优选和定案作为风险控制重要节点做细做实,方案实施后一般不做大的调整,保证开发质量、速度和效果。4) 实施承包商精准考核激励。在实行钻井“日费制”精细化管理的基础上,强化单项激励。例如,设置提高钻遇率奖,以精准奖励技术服务人员,用历史数据平均值作为基本奖励考核点,对缩短钻井周期的承包商给予奖金奖励或工作量激励。

1.2 中国页岩油勘探开发进展及运营模式

1.2.1 勘探开发主要进展

中国页岩油储量丰富,具有较大的潜在产量空间。近年来,中国持续加强陆相页岩油基础理论研究、工程技术攻关和勘探开发力度,先后在准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系、鄂尔多斯盆地三叠系、渤海湾盆地古近系、松辽盆地白垩系、四川盆地侏罗系和苏北盆地古近系等取得重大突破和积极进展,新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳 3 个国家级示范区建设持续推进,新区新领域不断获得重要发现,2023 年页岩油产量再创新高,突破 $400 \times 10^4 \text{ t}$ ^[25],展现了广阔的发展前景,有望成为“十四五” $2 \times 10^8 \text{ t}$ 原油稳产的重要接替阵地。

新疆吉木萨尔陆相页岩油示范区“黄金靶体”钻遇率从 43.4% 提升至 83.6%,资源动用程度由 50% 提高至 89%,单井综合投资降至 4 500 万元,

2023年页岩油产量 63.5×10^4 t, 实现了效益建产。胜利油田济阳陆相页岩油示范区实现“五个洼陷、三种岩相、两套层系、多种类型”的全面突破, 新增页岩油三级储量超 9×10^8 t, 年产量突破 30×10^4 t^[26]。大庆油田古龙页岩油示范区单井初始产量提高46%, 单井最终可采储量(EUR)提高了17%, 落实探明地质储量超 2×10^8 t。庆城油田5口页岩油水平井试油均获成功, 储量动用程度由50%提升至85%^[27]。

1.2.2 运营模式

中国石油坚持“全生命周期管理”理念, 探索形成了“一全六化”页岩油勘探开发模式, 推进“五提产、五降本”系统工程, 建立多个市场主体共同参与、平等竞争的市场机制, 推动内部市场承包商联动创效, 搭建油气生产物联网系统, 促进了页岩油规模增储、效益开发。大庆油田按照“会战传统+项目管理+市场化模式”, 成立古龙页岩油勘探开发会战前线指挥部, 构建“六化”全生命周期管理体系, 形成了以“精确甜点预测与靶层优选、立体开发井网设计与排采制度优化、水平井优快钻完井、缝控体积改造2.0”为核心的地质工程一体化技术体系, 建立“百万吨百人”高效模式^[27]。新疆吉木萨尔构建“新型油田作业区+项目经理部”综合管理体制, 做实责任主体^[28]。长庆油田建立油气田勘探开发一体化事业部, 成立页岩油开发分公司, 创新大项目组产建开发模式, 构建“中石油队伍、社会化资源、内部模拟市场主体”三位一体的市场化体系, 推行物资采购“工厂到现场”直达, 实施智能化配套工程, 促进了页岩油效益开发^[29-30]。

中国石化探索形成了页岩油气“一体化”管理模式, 组建多专业协同作战综合团队, 初步实现了页岩油气勘探开发一体化、地质工程一体化、研究部署一体化、方案设计一体化、设计预算一体化和信息共享一体化。江汉油田与地方政府合资成立涪陵页岩气公司, 打造“管理型+技术型”油公司, 国内首创页岩气立体开发模式, 推行“井工厂”高效钻井、“五化”地面建设, 打造“人在干、数在转、云在算”的数智化气田, 以市场化方式推动天然气推价和产能释放, 成功实现商业开发^[31-32]。西南油气分公司构建“管理部门+科研单位+运行单元”组织架构, 形成了优选装备、集成提速工艺推广等钻井提速关键技术, 构建“复用设计+工厂预制+现场拼装”全模块集约化建造作业方式, 推行平台大包、合作开发的甲乙双方一体化协作模式, 建立“风险共担、利益共享、增量分成”合作激励机制, 有力推动了深层页岩气效益开发^[33]。

1.3 认识和启示

1) 政府政策支持是页岩油高速发展的重要保障。页岩油资源禀赋差、常规技术的普遍适用性差, 需要长期的技术探索和持续的资金投入, 其有效开发离不开国家政策的引导和支持。

2) 理论与技术迭代升级是页岩油高速发展的关键驱动。突破常规油气理论禁锢、系统集成先进技术和全生命周期一体化是页岩油从无效资源转化为商业资源的重要途径, 技术组合的先进性、适用性是降本增效的关键。

3) 开放的市场体系是页岩油高速发展的核心要素。美国页岩油气商业化的成功, 很大程度上得益于完善的油气市场体系, 产业初期设立合适的准入门槛, 创造分工相对合理、高度竞争的市场环境, 调动了各方面积极性、主动性, 有效推动了页岩油气产业高速、规模发展。

4) 现代油公司运营模式是页岩油高速发展的有效途径。科学的组织体系、合理的资源配置、灵活的油藏经营策略和先进的生产运行模式, 能更好地提升页岩油开发质量、效率和变革。

2 中国页岩油勘探开发面临的挑战

实现页岩油经济开发, 培育产业成长韧性及抗风险能力, 需要配套政策的支持, 更需要理念认识的转变和技术突破、体制优化与市场机制的协同。目前, 中国页岩油高效运营主要面临四大挑战。

2.1 理念认识转变的挑战

1) 页岩油资源利用需要谋划积极稳妥的开发战略。常规油藏“接力式”的勘探开发阶段划分、整体开发方案编制理念及审批制度、勘探开发评价思路和技术手段, 已严重不适应页岩油藏认识快速迭代、措施及时调整的需求, 需要加强顶层设计, 针对不同演化程度、不同岩相类型的页岩油藏有序开展风险勘探, 按照“单井突破、井组评价、规模探明和效益建产”的策略实现页岩油开发商业突破。

2) 实现页岩油效益开发不能机械复制“他山之石”。页岩油要实现规模效益开发, 需要在理论创新、技术创新和机制创新等3个方面“量体裁衣”。简单复制美国的“页岩革命”或国内其他区块勘探开发经验的“速成”方式不现实, 无法实现页岩油效益开发。

3) 各参与方战略协同不够。没有建立大系统、大战略理念, 油公司、油服公司、工程承包商与产品

供货商缺乏协同整合,距离“最少的投入、最短的时间谋求整体最优”的运营理念有较大差距。

2.2 技术差异需求的挑战

1)地质理论认识不够系统深入。中国页岩油资源主要赋存于陆相层系,形成于多旋回构造与频繁的沉积环境演变过程中,岩石组分复杂、非均质性强,相对较高的黏土矿物含量造成了微纳米孔喉系统的复杂性,决定了页岩油产量的显著差异。基于稳定构造背景、较高成熟度资源的北美页岩油勘探开发理论,无法有效指导中国陆相页岩油勘探开发,亟须形成基于中国页岩油资源禀赋特征的页岩“特色”理论与技术体系^[34-41]。

2)工程技术难以满足降本提速需求。目前页岩油井存在“压不开、撑不住、返排低、稳产难”的技术瓶颈,钻完井及压裂时效、水平井一趟钻比例、水平段井眼轨迹控制能力等难以满足提速降本的要求。旋转地质导向、多级分段压裂等工程技术与国外先进水平有较大差距。以水平段钻井周期为例,美国页岩油井 3 000 m 水平段平均钻井周期 7~10 d,基本实现一趟钻;我国古龙页岩油井 2 500 m 水平段平均钻井周期超过 23 d,一趟钻比例 45%;复兴地区页岩油勘探评价阶段水平段长度平均 1 589 m,平均钻井周期超过 36 d,需要多次起下钻^[42-45]。

3)现有工程技术体系可复制、可推广性不强。陆相页岩油埋深跨度大、地温区间大、岩性类型多样、物性特征差异大,地质评价技术、水平井优快钻井及分段压裂技术不具备通用性,需要一技一策、一井一策、一地一策。例如,针对济阳页岩油断裂发育、温度高等特点,探索形成的过断层优快钻井及精细控压近平衡钻井技术^[46-47],无法复制到多压力系统、防漏与压稳矛盾突出的四川侏罗系页岩油开发中。

2.3 高效组织运营的挑战

1)现行运行体制机制不顺畅。中国页岩油勘探开发利益主体多元,价值化、产业化发展体制尚未形成,多专业、大兵团联合作战模式尚未定型,市场化机制不到位,资源统筹配置能力不足,需要打破部门(单位)本位、条块分割、自成体系的碎片化运行格局,调动各方的积极性。

2)产业政策不配套。美国“页岩革命”成功得益于雄厚的资本投入、配套的税收优惠政策和灵活的投融资环境,经过 5~6 年发展,逐渐将成本降至常规油气水平。目前,我国对页岩油没有配套特别的税收和补贴政策,还需按常规石油标准缴纳特别收益金,企业负担重,不利于产业的长远发展。

页岩油主产区勘探开发征地多,施工周期长,油地关系更加复杂。

3)企业投入高、成本压力大。页岩油开发投资大、回收周期长,在大规模工业化量产前,勘探开发成本是常规油气的数倍甚至数十倍,需要通过技术创新和市场机制驱动持续降本,及早实现规模效益开发。以济阳页岩油为例,页岩埋深大、温度高,导致施工作业设备费、动力费、材料费高,每米钻井费高出美国 1.37 倍,每段压裂费高出美国 1.56 倍^[48-51]。

2.4 安全绿色发展的挑战

1)安全绿色标准更高、要求更严。我国已将绿色发展纳入“五位一体”战略布局,提出碳达峰、碳中和目标,政府监管日趋严格,公众和公益组织对企业 ESG(环境、社会和治理)责任更加关注^[52]。页岩油勘探开发需要大规模钻井、压裂等高能耗、高碳排放、高废弃物作业,在努力增储上产的同时,需要坚持绿色生态、安全发展,让绿色成为产业高质量发展的鲜明底色。

2)安全绿色生产存在风险隐患。作业过程面临高温、高压、高含硫等不确定性安全风险隐患,建设过程中面临高能耗、地下水污染、地表恢复利用和采空区地质灾害等风险隐患,还没有形成识别评价和最佳缓解时机的科学应对体系。

3)安全环保制度标准体系不完善。页岩油勘探开发涉及领域广、专业门类多、作业场面大、协同性强,各环节新技术、新工艺成熟度不一,需要加快配套与之相适应的安全环保质量制度标准体系。

3 中国页岩油高效运营机制探讨

中国页岩油勘探开发总体上处于起步阶段,需要通过理念重塑、流程再造和激励协同,重构与页岩油禀赋特点相适应、发展阶段相协调的高效运营机制。

3.1 谋划稳中求进的页岩油发展战略

中国页岩油资源潜力大、地质条件复杂,现有技术条件下钻完井成本高、效益开发难度大。建议坚持稳中求进的总基调,在持续深化认识和技术突破的基础上,分步推进页岩油勘探突破、规模上产与效益开发。“十四五”时期,积极稳妥实现页岩油商业突破,助力老区原油稳产接替,通过技术组合创新和管理机制探索,将平衡油价降低到较合理的水平(如 40~50 美元/桶);至 2035 年前后,在实现第一阶段技术进步、成本控制、规模增储和效益建产的基础上,通过持续技术迭代创新和管理机制

优化,实现规模发展,推动快速上产。

3.2 构建市场机制下多主体融合的战略合作共同体

围绕规模效益建产需求,按照“市场配置、效率优先、提升质量、降本增效”的原则,配套市场运行体系,构建科研院所技术赋能、外部企业有效支撑、油服公司高效建产、页岩油公司价值实现战略合作新机制。

1) 创新高效能组织架构。依据页岩油区域分布特点,以盆地为单位,整合业务板块资源,组建区域页岩油公司(项目部),构建自主经营、责权利统一的全生命周期闭环管理机制,有序推进独立经营、独立核算和独立考核,做实高效运营责任主体。以市场化统筹配置资源,发挥各方资源、技术和管理优势,开展选区、优化、配产和流转,确保优质资源优先开发,汇聚推动高效运营新动能。

2) 构建多元战略共同体。页岩油公司(项目部)作为建设方,走轻资产、重技术道路,采用市场化方式组织生产资料和生产力,以最大公约数统筹各方目标,共同做大产业、共享发展成果。按照“价值共创、风险共担、增效共赢”理念,页岩油公司(项目部)与油服公司(钻井承包商)采取大包合同或“大包合同+效益分成”模式,油服公司(钻井承包商)作为服务方,可将常规油气视为业务存量保基础营收,将页岩油视为业务增量保增效空间,增量以社会服务价格为基础核算,倒逼降本。油服公司(钻井承包商)整合内部专业化队伍和社会化协作企业优质资源,以社会服务价格为基础,以市场配置资源、摊薄成本、引进技术,负责页岩油工程技术扩容升级,整合集成技术服务、物资材料等周边高成本产业,推进现场作业环节技术进步、提速提质和降本增效。

3) 创新高效经营新机制。聚焦控投资、降成本、增效益,深化全产业链全要素降本创效。以竞争性价格为起点,通过生产全过程分解制定目标成本,建立服务方倒逼机制。探索甲方大额物资采购“工厂到现场”的直供模式,提升直接降本能力。强化资源价值挖掘,加强页岩油物性分析,关注伴生矿产,细分销售策略,提升产品附加值。

4) 配套激励约束机制。基于页岩油回报周期长等特点,构建不同发展阶段与各方利益诉求相契合的战略目标协同、超常规降本创效和全产业链降本增效机制,引导各方树立长远眼光、着眼产业发展、打造行业标杆。配套承包商质量、技术、效率和安全考核规则,设立排行榜、突出贡献、指标纪录等

奖项,实行优质优价、高端特价结算,淘汰落后队伍,推动质量进步、标准提升、技术创新和管理升级。

3.3 打造多兵种协作的生产运行新模式

页岩油开发通常采用批量钻井、工厂化作业、拉链式或同步式压裂等作业模式,同一井台或区域内钻井、测井、录井、压裂等工种交叉作业,需要遵循勘探开发、地质工程、技术经济、探明建产一体化的思路,基于新生产场景构建运行架构,精准过程监管,规范现场操作,实现无缝衔接。

1) 优化生产组织架构。页岩油公司(项目部)为统筹管理主体,统一协调配置资源,负责监管把控整体投资、进度和质量,确保工程项目整体安全、高效和优质。油气开发单位为运行保障主体,负责项目安环评、征地、油气水电道五路先行及投产工作,确保钻井、压裂、采油等全过程无缝衔接。按照不同作业阶段的特点,构建以钻井、压裂、采油队伍为核心的现场指挥调度中心,协调指挥专业化队伍,做好一体化施工作业,实现无缝衔接。所有进场施工单位为交叉作业主体(包括钻井、作业、测井等施工单位和注汽、运输等专业化队伍,研究单位及监督中心等支撑部门),在现场指挥调度中心的调度下有序开展施工作业。

2) 建立多工种交叉作业标准规范体系。针对工厂化多工种交叉作业场景,制定交叉作业调度、现场操作、工序交接、协调配合、风险防控和过程监控等工作规范与管理制度,形成组织运行工作手册,编制现场运行图,建立应急响应机制,确保所有工作有序落地、事事受控、不出纰漏。针对安全风险较高的压裂环节,实施物料准备、开工验收、交叉工序确认、井口开关、安全监督、邻井监控和应急处置等流程表单元化管理。

3) 推行现场标准化运行模式。突出标准化设计、工厂化预制、模块化施工和流程化再造,提升工程施工质量和效率。根据区块作业要求统一钻机标准,规范井场配置,实现井场统一标准、统一配备、统一安装,提升现场生产组织、安全环保等管理水平。以项目为单元统筹人员配置,强化关键节点现场把控,细分页岩油工区搬迁安、下套管、钻井液服务和设备维修等专业化队伍,提升核心岗位人员技术熟练度,增强服务保障能力。

4) 组建多专业协同决策支持体系。构建“前线+后方”双作战室,井场建设一体化数据汇总和指令执行中心,后方建立物探、地质、钻井、测井和信息等多专业一体化决策支持中心,通过多专业联

合、前后方协同,快速决策和高效执行,全面实现地质工程一体化、设计实施一体化、前线后方一体化、施工保障一体化和信息决策一体化等五个“一体化”提升,有效提高决策效率。

3.4 建立迭代式创新的科技发展新机制

页岩油勘探开发要摆脱对传统油气理论和工程技术路径的依赖,针对地质认识不透彻、工程技术不适应和作业成本高等瓶颈问题,加强关键理论创新和技术升级,以技术创新引领页岩产业革命。

1) 加强顶层设计。站在国家能源战略接替的高度,围绕制约页岩油勘探开发的基础理论和“卡脖子”技术,统筹科技攻关、转化和集成应用,构建支撑页岩油勘探开发的科技研发和产业化应用框架体系。开展页岩油可动用资源量测算与分类分级评价、陆相页岩多样性成因与页岩油赋存及富集机理、立体开发井网部署等基础理论研究,研发适用于高温(150℃以上)、高压(140 MPa)条件的旋转导向系统、高效破岩工具与低伤害低成本高时效作业流体,攻关长水平段井眼轨迹精准控制、窄密度窗口安全快速钻进、多级逆向暂堵压裂等关键技术,打造原创理论和技术策源地,构建中国特色页岩油理论和技术体系。

2) 建立迭代创新机制。把握页岩油勘探开发“认识—实践—再认识—再实践”的螺旋式提升规律,瞄准关键领域和重点环节,通过构建财政资金引导、科技金融联动和企业投资为主的多源资本投入机制,风险投资、技术引进和合资合作相结合的资源跨界引进机制,技术应用、技术集成和技术评价一体联动的科技优化提升机制,需求方源头参与、应用方及时反馈和研发方调整优化的快速响应交互机制,推进形成“攻关一批、推广一批、储备一批”技术序列。构建产学研用创新模式,成立页岩油专家组和一体化技术攻关团队,推进跨学科合作、大兵团作战、协同式攻关,推行项目长负责制、揭榜挂帅制,搭建开放共享联合攻关平台,强化实验室技术底层支撑作用,贯通基础研究、工业转化和产业应用,加速科技迭代升级^[53]。

3.5 建立数智化赋能的信息支撑新范式

针对目前数据库多、系统平台多、孤立应用多、综合支撑不够的问题,建立贯通业务流、管理流和监督流,涵盖科研攻关、工程施工和开发生产全链条的新场景信息支撑体系。

1) 加强数据源头治理。以油公司底层数据共享为基础,依托现有的数据库、专业软件和展示平台,建设一体化项目研究数据和研究成果资源库,

搭建支撑一体化研究与成果集成应用平台。

2) 强化数据分析综合应用。通过梳理页岩油勘探开发业务流程和分析业务相关数据,实现参数交互优化调整、专业相互协同推进,运行中即时记录过程、逐步积累经验、实现学习曲线的优化升级。支撑全生命周期精细化管理与考评,支持数据产生、提交、审核及应用,实现各种数据的图形化展示与深入对比分析,助力管理优化和效率提升。

3) 建设智能决策平台。综合利用物联网、5G、大数据、数字孪生及人工智能等先进信息技术,打造地质模型透明化、指挥决策数智化、指令发布高效化、现场操作自动化和信息反馈即时化的系统平台,实现决策依靠人机交互、操作依靠机械自动,以数智化释放新动力、塑造新优势,推进数智化页岩油田建设。

3.6 开创绿色低碳化的产业发展新格局

贯彻落实国家“双碳”战略,走生态优先、绿色低碳之路,使页岩油勘探开发与脱碳固碳双向发力,为页岩油产业高质量发展注入绿色动能。

1) 减污降污。推进“无废”页岩油开发建设,构建源头减量、重复利用和无害化处理为核心的绿色环保技术体系,推动污染防治由单一末端治理向全过程综合防治转变。抓好页岩油勘探开发过程的污染物控制和处理,开展低污染水基钻井液替代油基钻井液技术攻关和现场应用,加强环保友好型压裂返排液重复利用和无害化处理,强化固废处理、臭氧防治的水土资源化利用。

2) 减碳固碳。推动生产过程低碳化,优化能耗结构,加快钻完井装备电驱替代油驱步伐,提高清洁能源使用率;统筹整合注采输体系,加强地面简化优化、流程再造,促进全方位降能耗、减损耗、控物耗和减排放。推动页岩油气与CCUS协同发展,加快CCUS规模化应用,实现增能提产和降碳固碳相统一,提升全产业链价值创造能力^[54-55]。

3) 绿色用能。以清洁、高效、低碳和循环为目标,以页岩油勘探开发基地为载体,立足生产区域和大平台建设生态化,进行页岩油开发设计。依据页岩油产区地貌特点,因地制宜推动风能、光能和余热等自产绿能布局利用,支撑页岩油自喷期用电运行。推进“源-网-荷-储”多能互补协同利用,打造“自产自消、清洁低碳、多能互补”的能源供给体系,形成页岩油绿色生态产业化发展格局。

3.7 营造高契合友好的外部运营新环境

围绕页岩油产业化发展进行专题调研,摸清家底潜力,刻画产业前景,反映现实问题,谋划发展路

径,创造良好产业发展环境。

1)争取国家配套政策支持。建议国家能源局牵头制定页岩油中长期发展专项战略规划,明确配套支持政策,引领产业发展。设立国家页岩油风险勘探基金,出台减免特别收益金、降低所得税、阶段性免征资源税、比照页岩气给予补贴等政策,减小企业投入压力。

2)联合地方政府布局产业。探索与地方政府建立战略合作机制,推动页岩油自身发展的同时,积极融入区域经济社会发展布局。及时跟进国家安全环保新政,统筹生态敏感区和页岩油潜力区,加快基础设施区域性整体布局建设。推动地方政府“放管服”,简化页岩油勘探开发建设各环节审批程序,实施区域环评,缩短建产周期。

3)国有油公司配套政策赋能。区分页岩油勘探开发不同阶段的战略和开发目标,配套差异化投资、考核等政策。勘探初期对页岩油勘探开发实行风险投入兜底保障,突出建产规模、技术进步和运行效率考核,淡化经济指标评价;规模开发阶段,回归常规管理考核模式。支持重点区域采取混合所有制方式实施油地合作开发,更好地融入区域经济社会发展,促进共建共享共赢。

4 结束语

目前,页岩油已成为重要的油气接替资源,中国页岩油勘探开发时间相对较短,顶层战略规划与政策导向尚未明确,面临着思路、技术能力、运营管理和绿色发展等挑战,需要解决页岩油效益开发中存在的勘探突破难、开发成本高、组织运营不畅等难题。借鉴全球页岩油效益开发经验,以高质量发展为目标,以效益开发为中心,以高效运营为抓手,以完善现代油公司治理为载体,通过市场机制下多主体战略合作、地质工程管理一体化协作、技术组合迭代创新和数智化支撑,强化绿色低碳化产业协同和政策赋能,通过理念重塑、流程再造和激励协同,构建与页岩油禀赋特点相适应的高效运营机制,将有效助力页岩油产业的高质量发展。

参 考 文 献

References

- [1] 王敏生,光新军,耿黎东.页岩油高效开发钻井完井关键技术及发展方向[J].石油钻探技术,2019,47(5):1-10.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun, GENG Lidong. Key

drilling/completion technologies and development trends in the efficient development of shale oil[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 1-10.

- [2] 闫林,陈福利,王志平,等.我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究[J].石油钻探技术,2020,48(3):63-69.
YAN Lin, CHEN Fuli, WANG Zhiping, et al. Challenges and technical countermeasures for effective development of shale oil in China[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(3): 63-69.
- [3] U. S. Energy Information Administration. U. S. crude oil and natural gas proved reserves, year-end 2017[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy, 2018.
- [4] U. S. Energy Information Administration. Annual energy outlook 2022[R]. Washington, D. C.: U. S. Department of Energy, 2022: 13-25.
- [5] 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.
- [6] 吕建中,刘嘉,张焕芝,等.技术组合是油气上游增产降本提效的关键:美国页岩油气开发的成功实践与启示[J].国际石油经济,2019,27(7):34-38.
LYU Jianzhong, LIU Jia, ZHANG Huanzhi, et al. Technology combination: the key to achieve “increase production, decrease cost and improve efficiency” in upstream: successful practice and enlightenments of the US shale oil and gas development[J]. International Petroleum Economics, 2019, 27(7): 34-38.
- [7] 张焕芝,杨金华,张嘉铭,等.北美页岩油气生产经验对中国页岩油气降低桶油成本的启示[N].石油商报,2018-03-07(08).
ZHANG Huanzhi, YANG Jinhua, ZHANG Jiaming, et al. Inspiration of North American shale oil and gas production experience on reducing barrel oil costs for shale oil and gas in China[N]. petroleum Business News, 2018-03-07(08).
- [8] 杨金华,张焕芝,刘知鑫.美国二叠盆地页岩油气开发10大举措[J].世界石油工业,2022,29(4):80-81.
YANG Jinhua, ZHANG Huanzhi, LIU Zhixin. Top 10 measures for shale oil and gas development in the Permian Basin of the United States[J]. World Petroleum Industry, 2022, 29(4): 80-81.
- [9] 齐黎明,荆克尧,田雨露,等.美国页岩油气公司应对油价暴跌经营策略[J].国际石油经济,2021,29(7):92-99.
QI Liming, JING Keyao, TIAN Yulu, et al. Analysis on operation strategies of U. S. shale oil & gas companies under oil prices plunging[J]. International Petroleum Economics, 2021, 29(7): 92-99.
- [10] 周庆凡,杨国丰.美国页岩油气勘探发现现状与发展前景[J].国际石油经济,2018,26(9):39-46.
ZHOU Qingfan, YANG Guofeng. Status and prospects of shale oil & gas exploration in the United States[J]. International Petroleum Economics, 2018, 26(9): 39-46.
- [11] XIONG Hongjie. The effective cluster spacing plays the vital role in unconventional reservoir development: Permian Basin case studies[R]. SPE 199721, 2020.
- [12] 郭旭升,黎茂稳,赵梦云.页岩油开发利用及在能源中的作用[J].中国科学院院刊,2023,38(1):38-47.
GUO Xusheng, LI Maowen, ZHAO Mengyun. Shale oil development and utilization and its role in energy industry[J]. Bulletin of

- Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38–47.
- [13] 汪天凯, 何文渊, 袁余洋, 等. 美国页岩油低油价下效益开发新进展及启示 [J]. 石油科技论坛, 2017, 36(2): 60–68.
WANG Tiankai, HE Wenyuan, YUAN Yuyang, et al. Latest development in US cost-effective development of shale oil under background of low oil prices[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2017, 36(2): 60–68.
- [14] 李亚茜, 姜杉钰, 牛琮凯. 从国内外经验谈重庆页岩油气产业集聚发展 [J]. 世界石油工业, 2023, 30(5): 19–25.
LI Yaxi, JIANG Shanyu, NIU Congkai. Thought on the development of Chongqing shale oil and gas industry agglomeration[J]. World Petroleum Industry, 2023, 30(5): 19–25.
- [15] XU Tao, ZHENG Wei, BAIHLY J, et al. Permian Basin production performance comparison over time and the parent-child well study[R]. SPE 194310, 2019.
- [16] BARBA R, VILLARREAL M. The economics of refracturing in the Haynesville[R]. SPE 212371, 2023.
- [17] JARIPATKE O A, BARMAN I, NDUNGU J G, et al. Review of Permian completion designs and results[R]. SPE 191560, 2018.
- [18] TABATABAIE S H, BURROUGH T, CADENA C R. A machine learning approach to benchmarking operators performance: a new perspective utilizing factor contribution analysis[R]. SPE Journal, 2022, 27(6): 3314–3327.
- [19] Rystad Energy. US shale oil producers generated the highest FCF in industry history[EB/OL]. (2020-11-19) [2024-01-20].<https://www.rystadenergy.com/clients/articles/shalewell/2020/shale-financial-update/>.
- [20] 金之钧, 白振瑞, 高波, 等. 中国迎来页岩油气革命了吗?[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 451–458.
JIN Zhijun, BAI Zhenrui, GAO Bo, et al. Has China ushered in the shale oil and gas revolution?[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 451–458.
- [21] 赵群, 赵萌, 赵素平, 等. 美国页岩油气发展现状、成本效益危机及解决方案 [J]. 非常规油气, 2023, 10(5): 1–7.
ZHAO Qun, ZHAO Meng, ZHAO Suping, et al. The development status, cost-effectiveness crisis and solution of shale oil and gas in the United States[J]. Unconventional Oil & Gas, 2023, 10(5): 1–7.
- [22] 周庆凡, 金之钧, 杨国丰, 等. 美国页岩油勘探开发现状与前景展望 [J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 469–477.
ZHOU Qingfan, JIN Zhijun, YANG Guofeng, et al. Shale oil exploration and production in the U. S. : status and outlook[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 469–477.
- [23] 邓正红. 页岩战略: 美联储在行动 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2017.
DENG Zhenghong. Shale strategy: the federal reserve in action[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [24] 周雪. 美国页岩油勘探开发现状及其对中国的启示 [J]. 现代化工, 2022, 42(7): 5–9.
ZHOU Xue. Current situation of U. S. A. shale oil exploration and development, and enlightenment to China[J]. Modern Chemical Industry, 2022, 42(7): 5–9.
- [25] 国家能源局. 2023 年全国油气勘探开发十大标志性成果 [EB/OL]. (2024-01-09) [2024-01-20].https://www.nea.gov.cn/2024-01/09/c_1310759352.htm.
National Energy Administration. Ten landmark achievements in national oil and gas exploration and development in 2023[EB/OL]. (2024-01-09) [2024-01-20].https://www.nea.gov.cn/2024-01/09/c_1310759352.htm.
- [26] 袁建强. 济阳拗陷页岩油多层立体开发关键工程技术 [J]. 石油勘探技术, 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.
- [27] 李民峰, 刘楠. 独家 | 10 问 10 答! 权威详解大庆油田古龙页岩油 [EB/OL]. 黑龙江日报, 2021-08-25 [2024-01-20].<https://new.qq.com/rain/a/20210825A04DFJ00>.
LI Minfeng, LIU Nan. Exclusive | 10 questions and answers! Authoritative detailed explanation of Gulong shale oil in Daqing Oilfield[EB/OL]. Heilongjiang Daily, 2021-08-25 [2024-01-20].<https://new.qq.com/rain/a/20210825A04DFJ00>.
- [28] 克拉玛依融媒. 吉木萨尔: 石头缝里 “榨” 油 [EB/OL]. (2023-08-30) [2024-01-20].https://roll.sohu.com/a/716280276_121119059.
Karamay Financing Media. Jimsar: Squeezing oil from a crack in the stone[EB/OL]. (2023-08-30) [2024-01-20].https://roll.sohu.com/a/716280276_121119059.
- [29] 余果林, 肖丹. 又见春风过陇原: 长庆陇东页岩油规模效益开发纪略 [N]. 中国石油报, 2023-06-27(01).
YU Guolin, XIAO Dan. Spring breeze over Longyuan again: a brief account of the scale benefit development of Longdong shale oil in Changqing[N]. China Petroleum Daily, 2023-06-27(01).
- [30] 徐佳, 高鹏. “改” 出新活力 “革” 出新路径: 长庆油田创新生产组织模式助推高质量发展纪实 [N]. 中国石油报, 2022-12-13(04).
XU Jia, GAO Peng. “Transforming” into new vitality and “innovating” into new paths: Changqing Oilfield innovative production organization model to promote high-quality development documentary[N]. China Petroleum Daily, 2022-12-13(04).
- [31] 张东清, 万云强, 张文平, 等. 涪陵页岩气田立体开发优快钻井技术 [J]. 石油勘探技术, 2023, 51(2): 16–21.
ZHANG Dongqing, WAN Yunqiang, ZHANG Wenping, et al. Optimal and fast drilling technologies for stereoscopic development of the Fuling Shale Gas Field[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(2): 16–21.
- [32] 孙焕泉. 济阳拗陷页岩油勘探实践与认识 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4): 1–14.
SUN Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1–14.
- [33] 赵福豪, 黄维安, 雍锐, 等. 地质工程一体化研究与应用现状 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 131–138.
ZHAO Fuhao, HUANG Weian, YONG Rui, et al. Research and application status of geology-engineering integration[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 131–138.
- [34] 何骁, 周鹏, 杨洪志, 等. 页岩气地质工程一体化管理实践与展望 [J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 1–10.
HE Xiao, ZHOU Peng, YANG Hongzhi, et al. Management practice and prospect of shale gas geology-engineering integration[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 1–10.
- [35] 林腊梅, 程付启, 刘骏锐, 等. 济阳拗陷渤南洼陷沙一段页岩油资源潜力评价 [J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 85–96.
LIN Lamei, CHENG Fuqi, LIU Junrui, et al. Evaluation of shale oil resource potential in the Es1 Member in Bonan Sag, Jiyang Depres-

- sion[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2022, 34(4): 85–96.
- [36] 舒逸, 郑有恒, 包汉勇, 等. 四川盆地复兴地区下侏罗统页岩油气富集高产主控因素[J]. *世界石油工业*, 2023, 30(5): 26–38.
SHU Yi, ZHENG Youheng, BAO Hanyong, et al. Main controlling factors for high yield and enrichment of shale oil and gas in the Lower Jurassic in the Fuxing area of Sichuan Basin[J]. *World Petroleum Industry*, 2023, 30(5): 26–38.
- [37] 康玉柱. 中国非常规油气勘探重大进展和资源潜力[J]. *石油科技论坛*, 2018, 37(4): 1–7.
KANG Yuzhu. Significant exploration progress and resource potential of unconventional oil and gas in China[J]. *Petroleum Science and Technology Forum*, 2018, 37(4): 1–7.
- [38] 敬民. 如何赢得页岩油革命[J]. *中国石油石化*, 2023(24): 34–37.
JING Min. How to win the shale oil revolution[J]. *China Petrochem*, 2023(24): 34–37.
- [39] 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.
- [40] 邹才能, 马锋, 潘松圻, 等. 全球页岩油形成分布潜力及中国陆相页岩油理论技术进展[J]. *地学前缘*, 2023, 30(1): 128–142.
ZOU Caineng, MA Feng, PAN Songqi. Formation and distribution potential of global shale oil and the developments of continental shale oil theory and technology in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(1): 128–142.
- [41] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(1): 1–10.
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, HOU Lianhua, et al. Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(1): 1–10.
- [42] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣, 等. 中国陆相页岩油地质特征与勘探实践[J]. *地质学报*, 2022, 96(1): 155–171.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Geological characteristics and exploration practices of continental shale oil in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(1): 155–171.
- [43] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 中国页岩气勘探开发理论认识与实践[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 561–574.
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. China's shale gas exploration and development: Understanding and practice[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 561–574.
- [44] 付茜, 刘启东, 刘世丽, 等. 中国“夹层型”页岩油勘探发现状及前景[J]. *石油钻采工艺*, 2019, 41(1): 63–70.
FU Qian, LIU Qidong, LIU Shili, et al. Exploration & development status and prospect of sandwich-type shale oil reservoirs in China[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2019, 41(1): 63–70.
- [45] 慕立俊, 拜杰, 齐银, 等. 庆城夹层型页岩油地质工程一体化压裂技术[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(5): 33–41.
MU Lijun, BAI Jie, QI Yin, et al. Geological engineering integrated fracturing technology for Qingcheng interlayer shale oil[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(5): 33–41.
- [46] 田启忠, 戴荣东, 王继强, 等. 胜利油田页岩油丛式井提速提效钻井技术[J]. *石油钻采工艺*, 2023, 45(4): 404–409.
TIAN Qizhong, DAI Rongdong, WANG Jiqiang, et al. An efficient and fast shale oil cluster well drilling technology for Shengli Oilfield[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2023, 45(4): 404–409.
- [47] 朱海燕, 焦子曦, 刘惠民, 等. 济阳坳陷陆相页岩油气藏组合缝网高导流压裂关键技术[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 120–130.
ZHU Haiyan, JIAO Zixi, LIU Huimin, et al. A new high-conductivity combined network fracturing technology for continental shale oil and gas reservoirs in the Jiyang Depression[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 120–130.
- [48] 杨国丰, 周庆凡, 卢雪梅. 页岩油勘探开发成本研究[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 576–588.
YANG Guofeng, ZHOU Qingfan, LU Xuemei. Study on the cost of shale oil exploration and development[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 576–588.
- [49] U. S. Energy Information Administration. Trends in U. S. oil and natural gas upstream costs[R]. Washington, D. C. : U. S. Department of Energy, 2016.
- [50] 袁士义, 雷征东, 李军诗, 等. 陆相页岩油开发技术进展及规模效益开发对策思考[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 13–24.
YUAN Shiyi, LEI Zhengdong, LI Junshi, et al. Progress in technology for the development of continental shale oil and thoughts on the development of scale benefits and strategies[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 13–24.
- [51] 郭焦锋, 王婕, 孟凡达. 对标国际一流, 切实推进中国页岩油上游产业高质量发展[J]. *中国石油勘探*, 2019, 24(5): 547–552.
GUO Jiaofeng, WANG Jie, MENG Fanda. Promoting the high-quality development of China's shale oil upstream industry by following international first-class standard[J]. *China Petroleum Exploration*, 2019, 24(5): 547–552.
- [52] 王敏生, 闫娜, 光新军. 国际油田服务公司低碳发展策略与启示[J]. *油气与新能源*, 2023, 35(2): 13–20.
WANG Minsheng, YAN Na, GUANG Xinjun. Strategy and revelation on low carbon development in international oilfield service companies[J]. *Petroleum and New Energy*, 2023, 35(2): 13–20.
- [53] 孙德强, 许金华, 潘教峰, 等. 基于智库研究双螺旋法的中国页岩油科技创新治理体系构建[J]. *智库理论与实践*, 2022, 7(5): 29–35.
SUN Deqiang, XU Jinhua, PAN Jiaofeng, et al. Construction of Chinese shale oil technology innovation governance system based on the double helix structure of think tank research[J]. *Think Tank: Theory & Practice*, 2022, 7(5): 29–35.
- [54] 王敏生. 油气井钻完井作业碳减排发展方向与建议[J]. *石油钻探技术*, 2022, 50(6): 1–6.
WANG Minsheng. Development direction and suggestions for carbon emission reduction during drilling and completion[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(6): 1–6.
- [55] 李阳, 王敏生, 薛兆杰, 等. 绿色低碳油气开发工程技术的发展思考[J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(4): 11–19.
LI Yang, WANG Minsheng, XUE Zhaojie, et al. Thoughts on green and low-carbon oil and gas development engineering technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 11–19.