

引用: 张宇, 赵培荣, 刘士林, 等. 中国石化“十四五”主要勘探进展与发展战略[J]. 中国石油勘探, 2024,29(1):14-31.

Zhang Yu, Zhao Peirong, Liu Shilin, et al. Main exploration progress and development strategy of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2024,29(1):14-31.

中国石化“十四五”主要勘探进展与发展战略

张宇¹ 赵培荣¹ 刘士林¹ 刘超英² 程喆² 陈前² 陈刚² 张飞燕²

(1 中国石化油田勘探开发事业部; 2 中国石化石油勘探开发研究院)

摘要: 在系统梳理中国石油化工股份有限公司(简称中国石化)“十四五”以来高质量勘探举措、理论技术进步及油气勘探成果的基础上, 提出了油气勘探发展战略。“十四五”以来, 中国石化坚定资源发展信心, 大力推动高质量勘探实践, 在塔里木、四川、渤海湾、准噶尔、鄂尔多斯等盆地的深层碳酸盐岩、陆相页岩油、深层页岩气、中西部碎屑岩、成熟探区隐蔽油气藏、深层煤层气等领域取得了主要勘探成果, 为石油稳增长、天然气快上产夯实了储量基础。同时, 发展完善了超深走滑断控缝洞型油气成藏理论、创新形成了页岩油成储成烃富集理论、深化了海相页岩气“二元富集”与致密碎屑岩油气差异富集机理认识等; 攻关形成了复杂地质结构与储层结构条件下的以地震勘探、深层一超深层钻完井、超深层测录试井、水平井压裂技术等为代表的关键技术与工程工艺技术。展望未来, 中国石化探区具备石油稳定发展、天然气快速发展的资源基础, 勘探工作聚焦保拓矿权、勘探突破、规模增储三大核心责任, 以深地工程、页岩油气示范工程、致密碎屑岩效益攻坚、常非统筹为统领, 加快推进战略突破发现, 落实规模增储阵地, 进一步夯实上游可持续发展资源基础。

关键词: 中国石化; “十四五”; 勘探成果; 理论认识; 勘探技术; 发展潜力; 发展思路; 发展战略

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-7703.2024.01.002

Main exploration progress and development strategy of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period

Zhang Yu¹, Zhao Peirong¹, Liu Shilin¹, Liu Chaoying², Cheng Zhe², Chen Qian², Chen Gang², Zhang Feiyan²

(1 Department of Oilfield Exploration & Development, Sinopec; 2 Sinopec Petroleum Exploration and Production Research Institute)

Abstract: A systematic review is conducted on the high-quality exploration activities, theoretical and technological progress, and exploration achievements of Sinopec during the 14th Five-Year Plan period, and a development strategy is proposed for the future petroleum exploration. Since the 14th Five-Year Plan period, Sinopec has strengthened its confidence in resource development and vigorously promoted high-quality exploration practices, which support to make significant exploration achievements in fields such as deep carbonate rocks, continental shale oil, deep shale gas, clastic rocks in western regions, subtle oil and gas reservoirs in mature exploration areas, and deep CBM in Tarim, Sichuan, Bohai Bay, Junggar, and Ordos basins, solidifying reserve basis for stable oil output growth and rapid gas output growth. In addition, significant progress has been made in the development and improvement of deep strike-slip fault-controlled fracture-cavity type hydrocarbon accumulation theory, the innovative shale oil reservoir formation, hydrocarbon accumulation and enrichment theory, and the deep understanding of “dual enrichment” of marine shale gas and differential enrichment mechanisms of oil and gas reservoirs in tight clastic rocks. Furthermore, the key exploration and engineering technologies for targets with complex geological and reservoir structural conditions, represented by seismic exploration, well drilling and completion in deep to ultra-deep formations, wireline logging, mud logging and well testing in ultra-deep formation, and horizontal well fracturing, have been researched and developed. Looking ahead, Sinopec has a solid resource foundation in its exploration areas for achieving steady oil output and rapid increase in gas production. The exploration work

基金项目: 中国石油化工股份有限公司科技攻关项目“油气战略选区评价与决策支持技术”(P21086-1)。

第一作者简介: 张宇(1971-), 男, 河北唐山人, 博士, 2009年毕业于中国科学院广州地球化学研究所, 正高级工程师, 现主要从事油气勘探研究与生产管理工作。地址: 北京市朝阳区朝阳门北大街22号, 邮政编码: 100728。E-mail: zhangyu688@sinopec.com

收稿日期: 2023-12-19; 修改日期: 2024-01-10

will focus on three core responsibilities of securing and expanding mining rights areas, achieving exploration breakthroughs, and increasing reserves and resources on a large scale. Guided by deep earth engineering, shale oil and gas demonstration projects, benefit development of tight clastic rock oil and gas reservoirs, and coordination of conventional and unconventional resources, efforts will be strengthened to accelerate the strategic breakthroughs, and establish large-scale reserve increase bases, so as to further consolidate resource foundation for the sustainable development of the upstream.

Key words: Sinopec, 14th Five-Year Plan, exploration achievements, theory and understanding, exploration technology, development potential, development concept, development strategy

0 引言

进入“十四五”,中国石油化工股份有限公司(简称中国石化)上游勘探工作面临的主要挑战是资源基础相对薄弱^[1],有利勘查区块少;主力探区勘探程度高,规模增储场面难以拓展;新区新领域地质条件复杂,战略突破方向不明朗。勘探向深层—超深层、致密储层、页岩油、页岩气、深层煤层气领域延伸,勘探对象日趋复杂;勘探目的层加深和资源品位下降,勘探工作量与措施工作量大幅度增加,油气发现成本刚性增长。同时,重点勘探领域还存在油气地质理论认识与关键勘探技术的制约^[2-6]。

面对困难与挑战,中国石化坚定油气能源保障主业,持续加大油气勘探力度^[1,5],以物探准备、风险勘探、集中评价、科技创新、示范引领等五大工程为抓手,全力推进高质量勘探。创建地震勘探评价体系,全力推进物探支撑保障能力,加大地震工作量,创新形成单点高密度、可控震源等五大关键技术;聚焦海相碳酸盐岩、陆相页岩油、深层碎屑岩、新区新层系页岩气、深层煤层气等重大战略接替领域,持续加强风险勘探;勘探开发、地质工程一体化协同攻坚,加强塔里木盆地顺北油气田、济阳拗陷陆相页岩油、四川盆地川东南海相页岩气等集中评价;持续创新完善陆相断陷盆地、海相碳酸盐岩、页岩油气、致密碎屑

岩四大领域油气成藏理论技术攻关;以高质量部署、高产高效井、高质量物探为抓手,加强顺北4号带、川西致密气、川东常压页岩气等一批具备引领意义的示范工程建设。

通过上述卓有成效的创新实践,2021—2023年中国石化在海相碳酸盐岩、致密碎屑岩、深层页岩气、陆相页岩油、深层煤层气和成熟探区等领域取得了重要勘探成果,新增石油探明地质储量重回 2×10^8 t、天然气探明地质储量高位增长。本文全面总结了中国石化在“十四五”前期取得的油气勘探新认识、新技术、新成果,分析了未来油气勘探潜力,提出了油气勘探发展思路与战略。

1 主要勘探进展

“十四五”以来,中国石化勘探工作立足大盆地大目标,解放思想,全力向深地领域进军、向多类型页岩油探索、向新层系页岩气跨越、向致密碎屑岩攻坚、向老区新领域拓展、向深层煤层气迈进,在海相碳酸盐岩、致密碎屑岩、深层页岩气、陆相页岩油、深层煤层气、成熟探区等领域取得了多项战略性突破发现和理论技术创新。2021—2023年,中国石化新增石油探明地质储量 5.74×10^8 t、天然气探明地质储量 8284×10^8 m³,为原油产量逐步回升、天然气产量快速上升提供了坚实的储量基础(图1)。

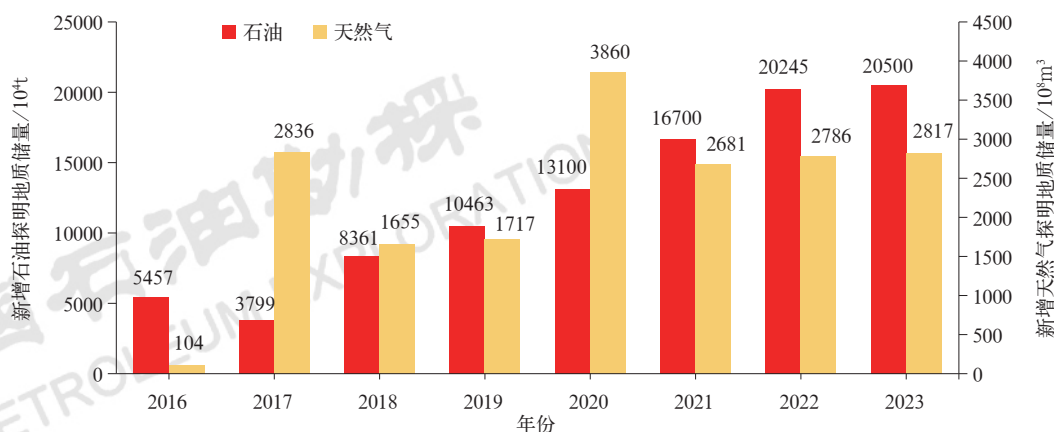


图1 2016—2023年新增油气探明地质储量增长图

Fig.1 Histogram of new addition proven oil and gas geological reserves during 2016—2023

1.1 进军深地领域，塔里木盆地顺北中部快速形成超深层大凝析油气区

继2016年发现顺北超深层油气田之后，持续加强理论技术创新，加大勘探评价力度，顺北超深层油气田不断拓展，进一步明确了顺北油气区资源格局和规模。

1.1.1 发展完善超深走滑断控缝洞型油气成藏理论

2016年，在塔里木盆地顺托果勒低隆起部署实施的顺托1-1井，发现了顺北超深层油气田，突破了构造低部位岩溶储层欠发育的限制^[7]；进而提出了走滑断裂带构造破裂作用为主、后期埋藏流体改造形成规模储层的新认识，建立了顺北地区“寒武纪多期供烃、深埋断溶成储、原地垂向输导、晚期成藏为主、

走滑断裂控富”的超深断溶体油气藏成藏模式，初步确定了顺北地区断溶体油气藏富集的主控因素^[8-11]。

“十四五”以来，随着油气勘探持续向走滑体系不同区域与深部拓展，断控缝洞型油气成藏理论认识得到进一步深化完善。

建立海相“碳—硅—泥—磷”组合的优质烃源岩发育模式（图2）。早寒武世玉尔吐斯组沉积期，大陆边缘受上升洋流控制形成“碳—硅—泥—磷”的优质烃源岩组合，明确了顺托果勒低隆起深水陆棚相是优质烃源岩发育的有利相带，扩大勘探面积近 $17 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。突破“热演化程度高”传统认识，指出在“低地温、大埋深、高压”条件下，顺托果勒低隆起玉尔吐斯组烃源岩在燕山期以后仍处于生液态烃—天然气阶段^[12]，拓展含油底界至9000m以深。

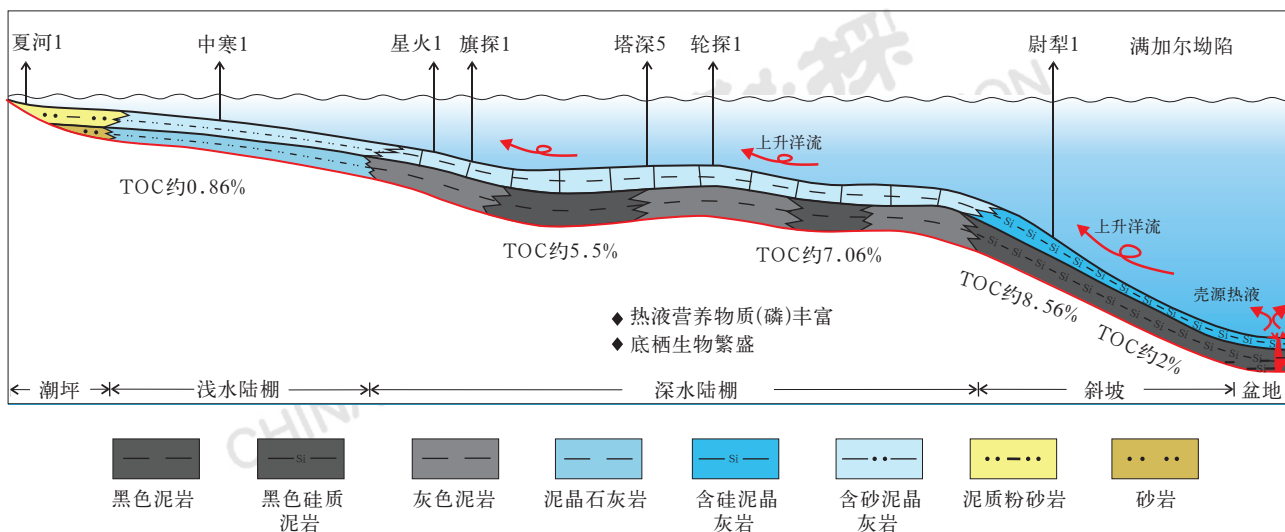


图2 下寒武统玉尔吐斯组烃源岩发育模式图

Fig.2 Development pattern of source rock in the Lower Cambrian Yuertus Formation

建立断控缝洞型储层模型。顺托果勒低隆起发育典型的板内中一小尺度走滑断裂，具有“纵向分层变形、主滑移带平面分段，垂向多期叠加”的空间结构特征。通过对18条主干走滑断裂带展布特征、活动期次、活动强度的重新厘定，明确了受不同时期区域盆缘挤压的差异影响，断裂变形由“单剪体系”向“单剪+压脊复合体系”转变（图3）。顺托果勒低隆起具有“剪切破裂增容、分段多期改造、烃类侵位保持”成储机制，在走滑断裂多期继承性活动下，构成洞穴（断层空腔）、裂缝带和基岩有序排列的多组缝洞集合体，建立“栅状结构”规模储层结构特征模型（图3）。

完善超深层断控缝洞型油气藏成藏模式。顺北地

区奥陶系油气藏属于超深、高温、常压的轻质油藏—挥发性油藏—凝析气藏，具有“整体成藏、东气西油、沿断裂带富集”的特点。走滑断裂具有“控储、控运、控藏、控富”五位一体特征，走滑断裂带是规模油气富集带，具有“多源供烃、多期充注、断坡输导、断栅控富”的特点^[13]。

1.1.2 攻关形成高产井部署方法及勘探开发关键技术体系

针对顺北油气田超深（>8000m）、超高温（209℃）、超高压（176MPa）“三超”地质条件及地质结构复杂、储层结构复杂“双复杂”特点，高密度、宽方位三维地震采集^[14]，宽频带、高保真地震处理与成像，缝洞体表征与量化描述等地震勘探技术

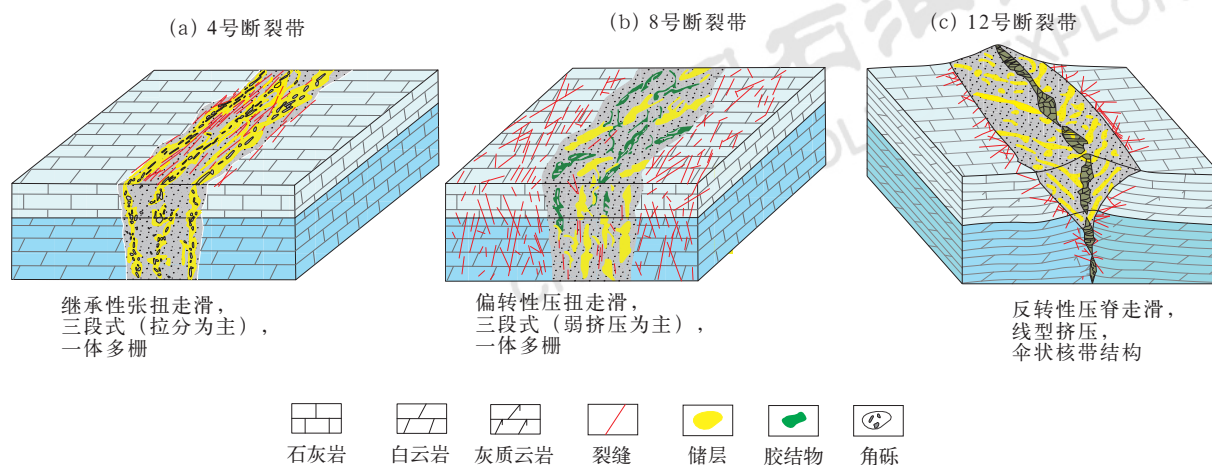


图3 塔里木盆地顺北地区不同断裂带储层模型图

Fig.3 Reservoir models in various fault zones in Shunbei area in Tarim Basin

是目标区井位优选、目的层段井轨迹设计的关键。在实践中，建立了“定模式、定响应、定期次、定级别、定类型、定规模”断裂解析技术流程^[13]，完善了超深断控缝洞体角度域特征波场成像与立体描述、“通源主断面+串珠强波谷+应力场方向”三参数靶点空间定位、协同井型—轨迹优化与“一体多栅”高效储层改造技术^[14-15]，形成了高产井“断裂解析建模型、

缝洞描述选靶区、空间雕刻定规模、结构表征识连通、轨迹优选增动用、优快成井精中靶、分类改造提产能”7项关键核心技术方法（图4），实现了断层识别分辨率、规模储层钻遇率、风险预警准确率大幅提升，钻井周期持续下降，支撑完钻超深井（>8000m）106口，其中26口井试获初产千吨油当量，建成“少井高产”示范区。

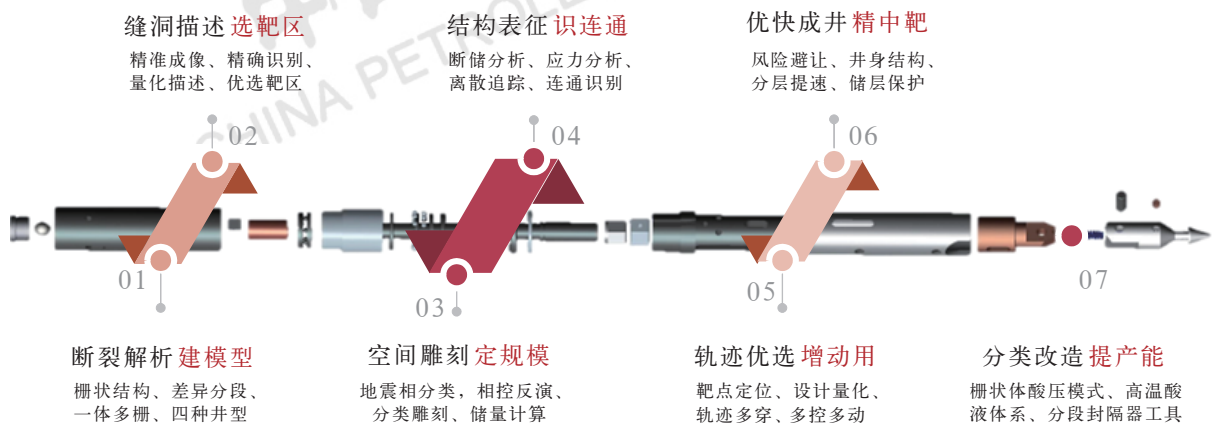


图4 顺北地区深地工程高产井“七要素”关键技术图

Fig.4 “Seven elements” key technologies for high-yield wells in Shunbei deep earth engineering project

1.1.3 顺北断控多类型油气藏勘探取得突破，整体控制了中部凝析油气富集区

“十四五”以来，按照“加快控制断裂带，拓展新类型”的思路，相继突破了顺北地区4号、8号、2号、6号、10号、12号主干断裂，4-1号、6-1号次级断裂及断裂间内幕领域（图5）。顺北油气田已落实4个亿吨级油气带，2021—2023年新增石油探明地质储量 1.47×10^8 t、天然气 2094×10^8 m³，建成 300×10^4 t油当量产能阵地。2022年8月中国石化挂

牌“深地工程顺北油气田基地”，成为我国第一个以“深地工程”命名的油气项目。

新的成果推动形成顺北中部“整体富集、含油气连片”的大场面，突破了顺北东部干气区，进一步落实了“西油东气”的资源格局，刷新顺北地区最深油气藏纪录。发现断裂间的新领域，取得了顺北断控缝洞油气藏在“广度、深度、宽度”的勘探突破，勘探空间得到全面拓展，将成为中国石化超深层凝析油气的增储上产主阵地。

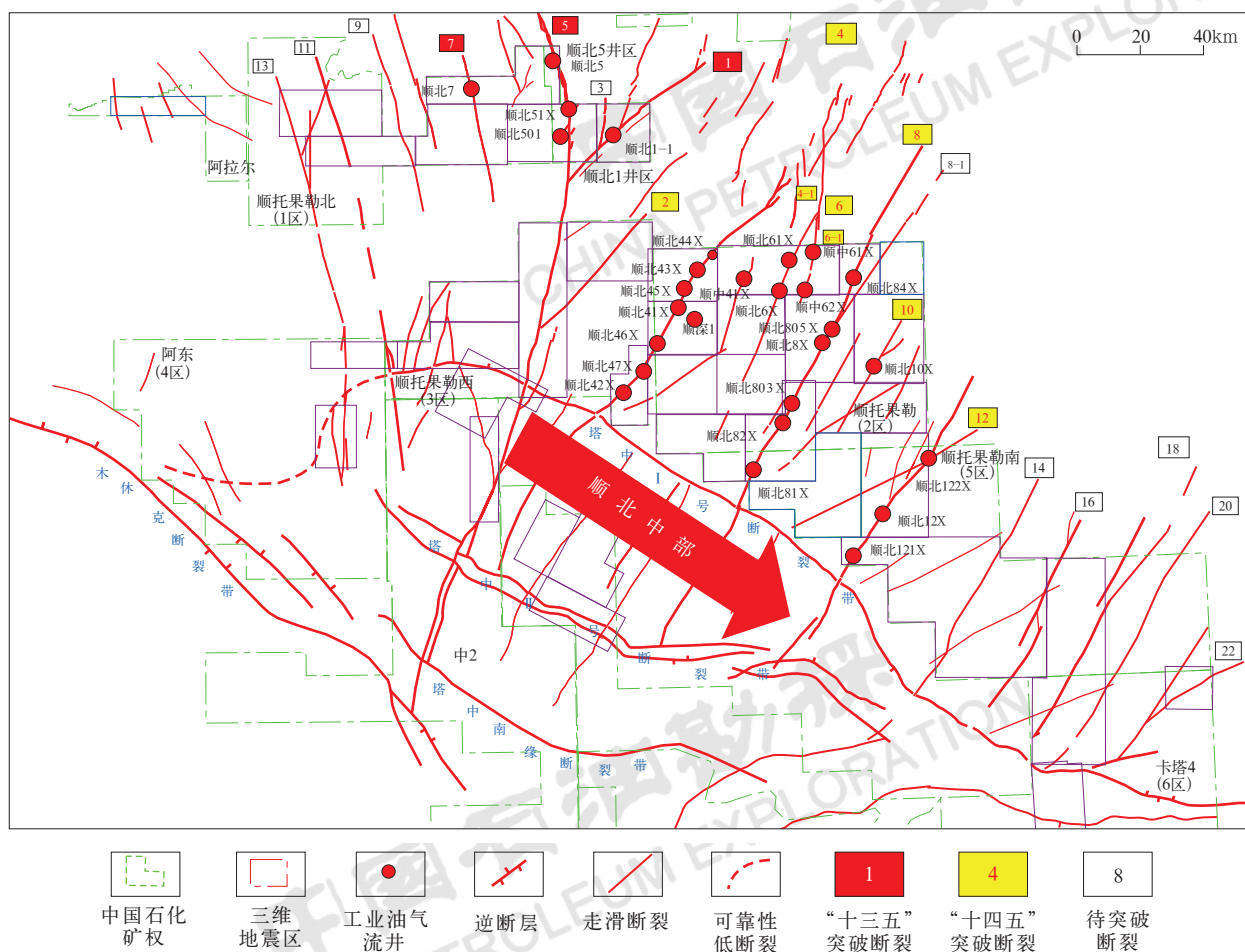


图5 塔里木盆地顺北地区奥陶系顶面断裂分布及勘探成果图

Fig.5 Distribution of faults on the top surface of the Ordovician and exploration achievements in Shunbei area in Tarim Basin

1.2 探索多类型页岩油，胜利济阳页岩油国家级示范区建设快速发展

中石化页岩油勘探起始于2010年，经历了战略选区及先导试验、重点地区攻关与突破两个阶段^[16-18]。

战略选区及先导试验阶段（2010—2017年）。2010年，在积极跟踪北美页岩油气勘探开发进展的同时，针对常规探井页岩层段开展页岩油的老井复查复试工作。先后在泌阳凹陷安深1井、济阳拗陷义182井、四川盆地元坝地区元页HF-1井获得工业油流，在济阳拗陷部署实施了渤页平1、渤页平2、渤页平1-2、梁页1HF等4口页岩油先导试验井均获得低产页岩油流。由于页岩热演化程度较低，页岩油密度大、可流动性差，工程工艺技术的适应性较差，未取得预期效果。2014年以来，启动“973”项目和国家重大专项等专题研究^[19]，重点围绕陆相页岩油甜点预测、可流动性和可压裂性进行技术攻关，初步

揭示陆相页岩油赋存、流动和富集机制，形成页岩油储层表征、含油性评价、甜点预测和资源评价等技术。

重点地区攻关与突破阶段（2018至今）。2018年，聚焦陆相页岩油可流动性、可压裂性关键难题，加强基础研究与关键技术攻关，提出向中—高成熟度生烃凹陷转移的勘探思路。优选四川盆地侏罗系和济阳拗陷、潜江凹陷、苏北盆地古近系，开展不同演化程度、不同岩相类型页岩油攻关，先后在济阳拗陷沙河街组沙三段和沙四段、苏北盆地溱潼凹陷阜宁组二段、四川盆地万县复向斜侏罗系凉高山组、南襄盆地泌阳凹陷核桃园组三段等取得战略突破，落实一个10亿吨级、两个亿吨级规模增储区。2022年8月25日，胜利济阳页岩油国家级示范区正式挂牌^[20-21]，累计新增页岩油三级储量超 10×10^8 t，提前超额完成国家级示范区任务。同时，攻关形成了陆相断陷盆地页岩油勘探开发理论与技术体系，有效指导页岩油的勘探实践。

1.2.1 创新形成页岩油成储成烃富集理论

1.2.1.1 明确储集空间类型及成储机制,揭示有利储集岩相分布规律

陆相中—低成熟度页岩以结晶矿物晶间孔、溶蚀孔、粒间孔、黏土矿物片间孔为主要储集空间,无机质孔缝占比达95%以上。无机质孔主要受自生石英和方解石重结晶、溶蚀成储两种机制控制,面孔增加率可达10%~20%。碳酸盐纹层、泥质纹层发育多尺度基质孔隙、韵律互层,与多级次裂缝、裂隙共同构成复杂的无机质孔(主要)—有机质孔(次要)—缝网络系统,具有良好储集性能及渗流能力。

碳酸盐纹层、泥质纹层均发育大量无机质孔隙,纹层结构、混合类岩相物性好,层状结构、富碳酸盐岩相物性变差。受岩相组合“环带状”分布、有机质含量、成熟度等影响,深陷带混合类岩相储集性能最好,向缓坡带富碳酸盐岩相、陡坡带长英质岩相物性变差。

1.2.1.2 建立运聚及富集模式,揭示页岩油藏分布规律

建立了“咸化早生、缝网运聚、纹层富集、多因素控富”页岩油运聚模式及富集机理模式。咸化湖盆

页岩 R_o 在0.65%左右,富有机质泥质纹层大量生烃,无机质孔缝网络形成,首先饱和泥质纹层微孔隙,再通过微裂隙运移到近邻碳酸盐纹层大孔隙,直至整个页岩体系富含油气。实验表明,泥质纹层游离油含量大于碳酸盐纹层,原油色谱为后峰型、油质重,碳酸盐纹层原油色谱为前峰型,油质轻;实际产出的原油成分均衡,说明两种纹层均可富集并产出油气。实践证实,富碳酸盐岩相、混合类岩相均可富集高产。页岩油高产稳产与TOC、孔隙度、压力系数等含油性、储集性、可动性参数均具有正相关关系,将单井水平段长度归一化后,统计分析试采前三个月每千米水平段长度累计产量与中—低成熟度(R_o)具有正态分布的特点。

以岩相组合为基础,叠合TOC、 R_o 、 S_1 、孔隙度、脆性矿物、压力系数等四性参数,划分甜点平面单元(图6)。济阳坳陷页岩油具有“巨厚超压封闭、源储一体富集、空间有序分布”的富集特征,其中陡坡深陷区发育混合类岩相,主要为I类最优页岩油甜点区,缓坡区发育的富碳酸盐岩相I、II类页岩油甜点区。

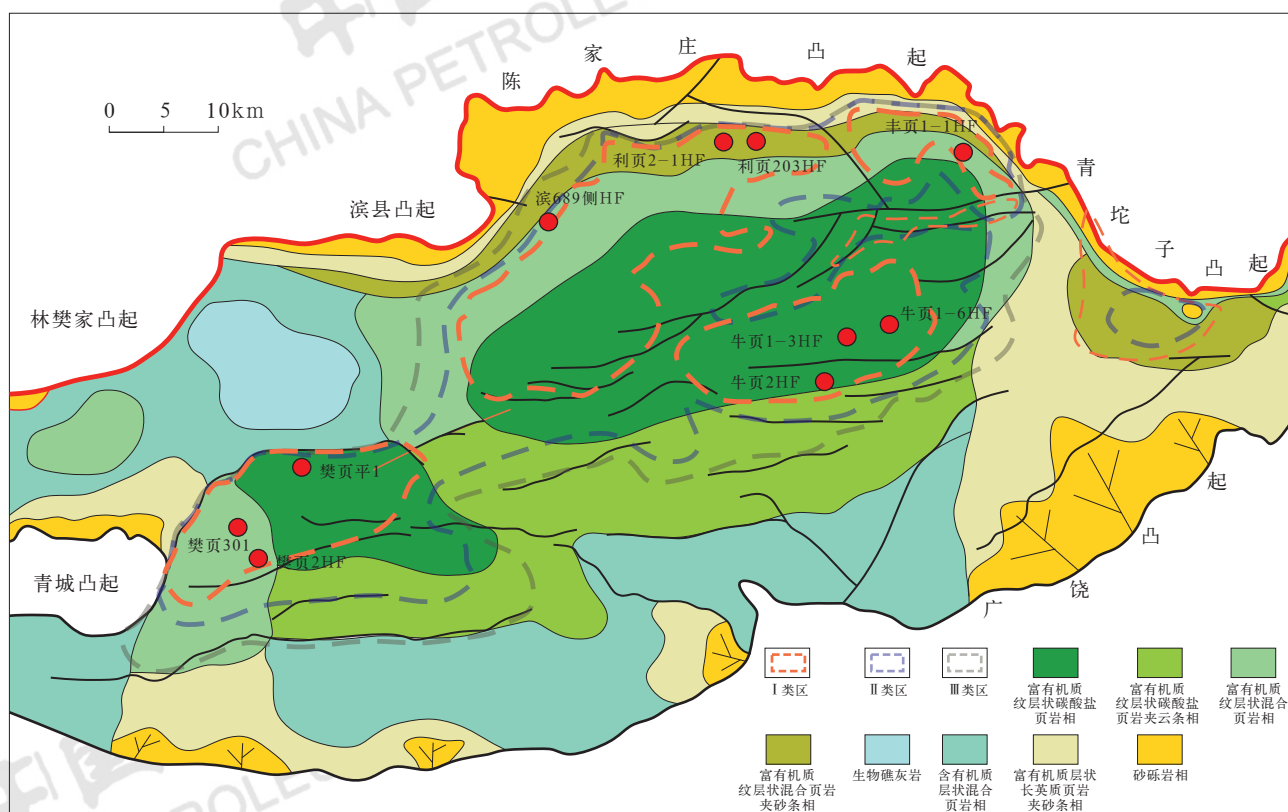


图6 东营凹陷沙四上亚段纯上三层组页岩油甜点分类评价图

Fig.6 Sweet spot classification and evaluation of shale oil in $Es_4^{SCS_3}$ in Dongying Sag

1.2.2 攻关形成页岩油配套勘探开发技术体系

基于中等热演化程度页岩油地质认识，结合济阳坳陷页岩发育层段富集高产及工艺改造难度的受控因

素分析，建立页岩油综合评价“四性”参数体系^[21]，形成济阳坳陷页岩油地质、工程双甜点“四性”评价体系（表 1）。

表 1 济阳坳陷页岩油综合评价“四性”参数体系表
Table 1 “Four—property” parameters for comprehensive evaluation of shale oil in Jiyang Depression

四性	评价参数	评价目的	甜点分类
含油性	热演化程度 (R_o)	有没有页岩油	地质甜点
	游离烃 (S_1)		
	有机碳含量 (TOC)		
	S_1 /TOC		
储集性	页岩岩相	有多少页岩油	
	基质孔隙度		
	夹层孔隙度		
	厚度 / 面积		
可流动性	原油密度	有多少可流动页岩油	工程甜点
	气油比		
	压力系数		
	夹层发育程度		
	裂缝发育程度		
	渗透率		
可压裂性	脆性指数	有多少技术可动用页岩油	
	脆性矿物含量		
	地应力		
	可压裂指数		
	埋藏深度		
	构造背景		

攻关形成优快钻完井技术，实现探井提速、提质、提效。建立“地质甜点最优定层、压裂甜点最大定窗、钻井甜点最快定靶”的“三甜点”定靶层模式，攻关形成“井轨迹优化控制 + 精细控压 + 差异化堵漏 + 个性化模式 + 高效固井技术”为一体的优快成井技术。

通过实验验证，建立了“中液量 + 强加砂 + 多级次复杂缝网”压裂技术路线，强化裂缝起裂、扩展、支撑和渗吸增能，配套形成集“CO₂混相压裂、缓速酸压、通道压裂、体积压裂”为一体的“组合缝网”压裂工艺。

1.2.3 页岩油勘探实现“点—线—面”突破

济阳坳陷页岩油勘探突破后迅速展开，按照“直

斜井试油战略侦察、水平井专探求产突破”的思路，已在博兴、渤南、牛庄、民丰、利津 5 个洼陷、3 种岩相（富碳酸盐页岩、混积型页岩、长英质页岩）、2 套层系（沙四上亚段、沙三下亚段）、不同演化程度 (R_o 为 0.65%~1.1%) 的多类型页岩油取得重大突破^[22-23]，已有 22 口专探水平井试获百吨以上高产油流，其中民丰洼陷丰页 1-1 井峰值日产油 263t，创国内页岩油测试最高日产纪录。在单井突破基础上，按照“加强评价、试验先行、规模建产”思路，强化技术迭代提升，立体开发实现了从单井到井组、从“3 套层组”（博兴洼陷 8 口井已投产）到“5 套层组”（牛庄洼陷 20 口井全部压完正放喷）再到“7 套层组”（民丰洼陷 39 口井正实施）的突

破。胜利济阳页岩油国家级示范区建设高质量推进,率先实现民丰等重点地区效益开发。同时向禹城等新洼陷新层系、超深层高演化(4500m, $R_o > 1.3\%$)、浅层低演化($R_o < 0.6\%$)、常压领域的持续攻关探索,先后发现了新兴、新丰和新河3个新油田,2023年新建产能 $30 \times 10^4 \text{t}$, 年产油 $32.6 \times 10^4 \text{t}$, 累计产油 $47 \times 10^4 \text{t}$, 已落实石油探明地质储量 $1.2 \times 10^8 \text{t}$ 、控制储量 $3.3 \times 10^8 \text{t}$ 、预测储量 $12.9 \times 10^8 \text{t}$, 提前超额完成国家示范区落实资源 $10 \times 10^8 \text{t}$ 的目标任务。

受济阳拗陷页岩油突破的启示,在苏北盆地溱潼凹陷、高邮凹陷及南襄盆地泌阳凹陷、南阳凹陷等页岩油勘探取得新突破^[24]。其中,在溱潼凹陷古近系阜宁组二段实施的风险探井沙垛1斜井试获峰值日产油51t,率先取得苏北盆地页岩油勘探重大突破,随后按照展开溱潼,突破高邮、海安、金湖的勘探思路,在不同凹陷甩开部署花页1、铜页1、海页1等风险井均获得工业油流,初步落实苏北盆地页岩油资源量 $15 \times 10^8 \text{t}$, 2023年新增页岩油控制+预测储量超 $1 \times 10^8 \text{t}$ 。在溱潼凹陷针对不同构造分区、不同甜点层段开展水平井、侧钻小井眼水平井、直斜井等井型试验,取得较好效果,证明其具备效益开发条件,发现了溱潼油田,2023年实现年产油 $6 \times 10^4 \text{t}$ 。在南襄盆地泌阳凹陷、南阳凹陷古近系核桃园组三段实施的阳页油1井、张店3井分别试获日产油 17.9m^3 、 10.5t ,实现了新区基质型页岩油战略突破。

在四川盆地石柱复向斜侏罗系实施的涪页10、涪页8-1、泰页1井等分别在自流井组东岳庙段和大安寨段、凉高山组试获工业油气流。随后针对凉高山组开展了提产攻关试验,兴页L1001井试获峰值日产油 71.6m^3 、日产气 $2.5 \times 10^4 \text{m}^3$, 兴页9井日产油 108.1m^3 、日产气 $1.58 \times 10^4 \text{m}^3$, 评价落实石柱复向斜侏罗系页岩油资源量为 $10.5 \times 10^8 \text{t}$ 、页岩气资源量为 $1.5 \times 10^{12} \text{m}^3$, 有望培育成为增储建产的新阵地。

1.3 攻关新层系页岩气,实现“走出志留系”战略构想

四川盆地涪陵页岩气田发现并商业开发后^[25],为持续扩大勘探成果,2018年提出“拓展志留系,攻关寒武系,探索二叠系,重新评价侏罗系,研究盆外区”的思路,聚焦四川盆地深水陆棚相页岩发育区,加强页岩气富集规律研究和关键技术攻关,形成涪陵万亿立方米储量大气田,培育川东南盆缘复杂构造带第二个万亿立方米规模新阵地,准备了綦江4500~5000m超深层万亿立方米规模资源新领域。同时在川东石柱

复向斜二叠系吴家坪—茅口组、普光二叠系大隆组及川西井研—犍为寒武系筇竹寺组取得新层系勘探重大突破,页岩气勘探实现三大跨越,实现了“走出志留系”的战略构想。

1.3.1 深化海相页岩气“二元富集”新认识

随着页岩气勘探开发持续向深层—超深层、常压及海相新层系拓展,海相页岩气“二元富集”理论认识得到进一步深化完善^[26-27]。首先,深水陆棚相优质页岩发育是页岩气“成烃控储”的基础,深水陆棚相主要发育硅质页岩、含灰硅质页岩和黏土质页岩,且深水环境中硅质生物繁盛为有机质富集提供有利的物质基础。其次,良好的保存条件是页岩气“成藏控产”的关键,四川盆地志留系龙马溪组海相页岩气经历了“早期滞留、晚期改造”的动态保存过程(图7)。保存条件好、气层超压,降低了页岩有效应力,“石英抗压保孔”和“流体超压”是孔隙发育和保持的关键。

1.3.2 形成4000~4500m深层页岩气勘探开发关键技术

攻关形成了以TOC、孔隙度、含气量等为核心的“甜点”地球物理预测技术,预测精度达85%以上。基于旋转导向+伽马成像,结合地质录井参数、三维地震精细解释预测及实时标定,形成“地质—地震—测井”一体化井轨迹精细控制技术,实施的重点探井优质页岩甜点钻遇率平均达到95%以上。攻关形成了“多段少簇密切割、大液量、高排量、中强加砂、双暂堵、一体化滑溜水变黏交替注入”深层页岩气体积压裂技术体系,测试产量实现了从 $10 \times 10^4 \text{m}^3$ 到 $50 \times 10^4 \text{m}^3$ 以上的提升效果(表2)。

1.3.3 页岩气勘探开发实现三大跨越

自2015年率先建成涪陵国家级页岩气示范区以来,持续攻关页岩气,实现了三大跨越,先后发现并探明涪陵、威荣、永川、綦江4个页岩气田,累计探明页岩气地质储量 $1.2 \times 10^{12} \text{m}^3$, 2023年产量超 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

一是国内首创多层立体开发调整技术,实现“焦石坝上再建焦石坝”^[28-29]。2019年按照“单井评价—井组试验—整体部署—滚动建产”的思路,创新建立我国首个页岩气三层立体开发模式,涪陵气田焦石坝有利区采收率提高到44.6%,达到国际领先水平。目前焦石坝区块立体开发调整区日产气水平达到 $1060 \times 10^4 \text{m}^3$, 推动涪陵页岩气田稳产上产。该项多层立体开发调整技术全面推广至江东、平桥、白马等复杂构造区,立体调整区阶段采收率平均提高5.4%。

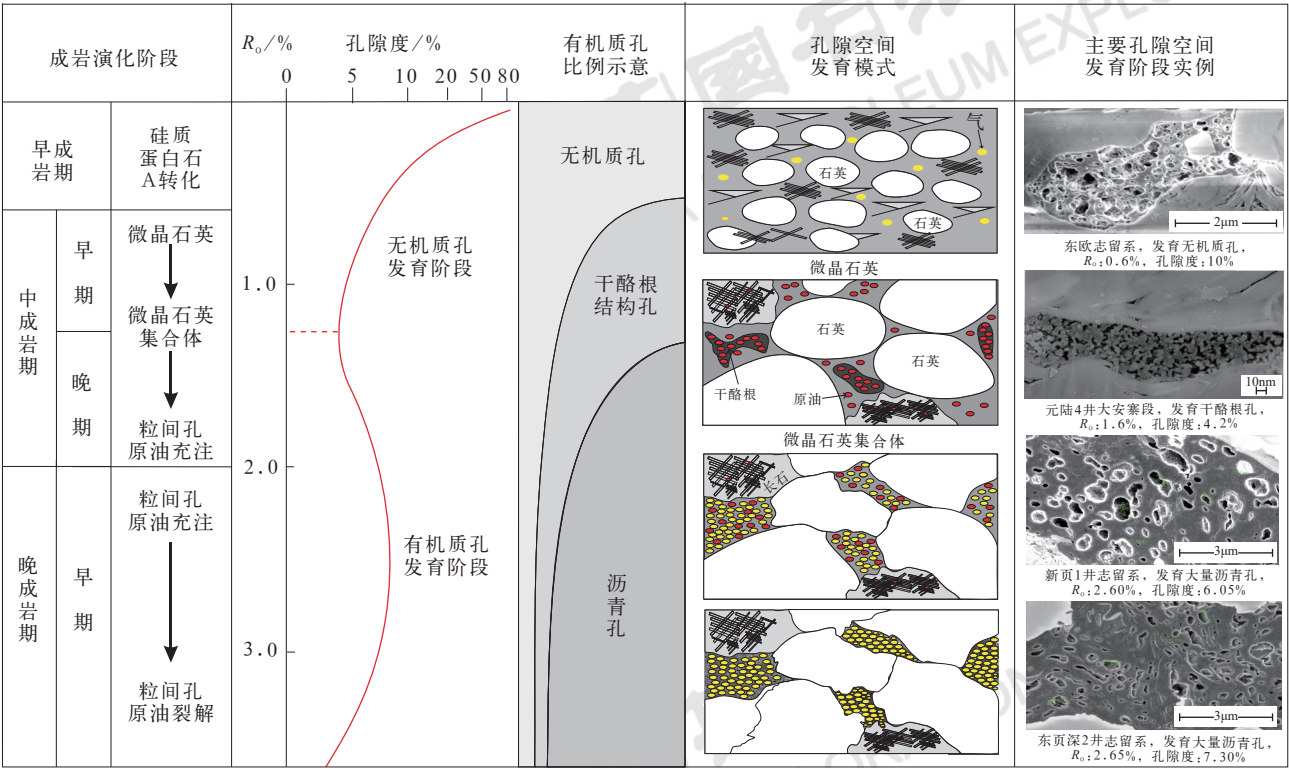


图 7 四川盆地五峰组—龙马溪组深水陆棚相页岩孔隙发育演化模式图

Fig.7 Pore development and evolution modes of deep-water shelf facies shale in Wufeng-Longmaxi Formation in Sichuan Basin

表 2 深层页岩气压裂技术攻关主要工艺参数表

Table 2 Main engineering parameters for hydraulic fracturing of deep shale gas wells

关键技术	攻关措施	提升效果	压裂后测试效果
密切割	平均段长：由 70~85m 降至 50m 左右； 簇间距：由 15~35m 降至 8~10m	诱导应力达到 12MPa 以上，增加水平段利用率	
增压扩体	压裂：井口限压由 95MPa 增至 112MPa， 提排量：由 12~13m ³ /min 增至 18m ³ /min； 增黏度：主体低黏变为高黏滑溜水； 前置 / 中置胶液； 压裂规模：单段液量由 2000m ³ 增至 3000m ³	大幅提升静压力：丁页 7 井缝内静压力为 17.3MPa； 提高复杂程度：单井立体缝网指数提高 30% 以上； 提高改造体积：单段 SRV（改造体积）提高 18% 以上	2022 年：新页 1 井日产气 53.19×10 ⁴ m ³ ；丁页 7 井日产气 42.83×10 ⁴ m ³ ； 2021 年：东页深 2 井日产气 41.20×10 ⁴ m ³ ； 2019 年：东页深 1 井日产气 31.18×10 ⁴ m ³
均衡延展	等孔径射孔、变密度射孔； 双暂堵	射孔打开率由 50% 增至 100%，非均衡延伸程度由 32% 降至 10%	
保充填	超前加砂、长段塞输砂； 小粒径支撑剂组合 (70/140 目 +40/70 目 +30/50 目)	加砂强度提高 50% 以上 (最大为 5.3t/m)； 导流能力提高 3 倍以上	

二是川东南深层页岩气勘探取得重大突破，实现“走出涪陵”。通过川东南盆缘构造带整体评价攻关^[30]，取得东溪、丁山、新场、林滩场等重大突破，展现出川东南盆缘深层页岩气良好勘探前景，落实有利区资

源量 $1.19 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，提交三级储量 $4466 \times 10^8 \text{m}^3$ ，綦江页岩气田探明页岩气地质储量 $1459 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

三是新层系页岩气勘探取得重大突破，实现“走出志留系”。2021 年，部署在川东石柱复向

斜的红页1井在吴家坪组试获日产气 $8.9 \times 10^4 \text{m}^3$,率先突破二叠系海相新层系。随后整体部署探井、评价井12口,其中实施的红页3-2井、红页7井分别试获日产气 $23.8 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $32.4 \times 10^4 \text{m}^3$ 高产气流,突破了4500m以深商业产能关,落实吴家坪组页岩气资源量 $6986 \times 10^8 \text{m}^3$;红页茅1井、红页茅2井在茅四段分别试获日产气 $6.4 \times 10^4 \text{m}^3$ 、 $6 \times 10^4 \text{m}^3$,评价茅四段有利区面积为 1800km^2 ,资源量为 $5400 \times 10^8 \text{m}^3$,有望形成一个页岩气规模增储新阵地。2023年,部署在普光地区的雷页1井在二叠系大隆组试获日产气 $42.66 \times 10^4 \text{m}^3$,落实资源量 $1727 \times 10^8 \text{m}^3$,实现大隆组新层系新类型页岩气勘探突破,成为普光气田稳产支撑的战略接替新领域。2022年,在川南井研一犍为地区实施的金石103HF井试获日产气 $25.87 \times 10^4 \text{m}^3$,首次实现国内寒武系新类型页岩气勘探重大突破,初步评价有利区资源量为 $3878 \times 10^8 \text{m}^3$,2023年新增预测地质储量为 $2532 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

1.4 攻坚中西部碎屑岩,培育多个规模效益增储阵地

中西部碎屑岩层系主要分布在鄂尔多斯、四川、准噶尔、塔里木等四大富油气盆地,中国石化探区多靠近盆地边缘、深坳部位,地质结构复杂、成藏条件相对苛刻。“十四五”以来,持续开展针对性勘探理论技术攻关,中西部碎屑岩领域实现区带、层系、类型上的有效拓展。

1.4.1 深化储层甜点发育与油气差异富集机理

深化准噶尔盆地深层—超深层成烃成储成藏机理认识。通过开展准噶尔盆地地震剖面解释与原型恢复,建立二叠系风城组强断陷碱湖烃源岩发育模式,明确了“碱湖富烃、温压控富、高效运聚”油气成藏特点,重新评价油气资源量超 $20 \times 10^8 \text{t}$ 。其中,基于山前带精细建模与原盆恢复,揭示准北哈山地区风城组烃源岩原始沉积边界向北扩大到谢米斯台山地区,发现了哈山次洼,有利勘探面积扩大了 1000km^2 ,落实超10亿吨级资源新阵地。聚焦深层—超深层碎屑岩储层发育机理研究,提出超深层碎屑岩“低温、超压、优相、烃充注”四要素控储机制,揭示了凹陷带内部深层—超深层存在优质储层,拓展有效储层下限至7000m以深^[31];深化构造沉积与源储匹配关系,认识到准中凹陷带发育多组继承性走滑断层,油气输导有利,初步建立准中深凹带“源—断—储”联控下的油气有序分布模式,展现了以二叠系为源的含油气

系统“高效成烃、高压优储、近源富气、全域成藏”的勘探潜力。

深化四川盆地须家河组致密砂岩气成藏富集条件再认识,提出“断缝体”成因、概念与成藏特征^[32-33],建立“断裂伴生”与“褶皱伴生”两类储层地质模型与“大、中、小、断褶”4级断缝体规模划分标准,建立有效裂缝发育精细结构模型,明确微裂缝分布规律,提出断缝型、孔隙型、复合型3类储层划分方案,揭示须家河组具有“多源供烃、相带控储、两类成藏、差异富集、缝孔高产”富集高产规律,建立以“断缝体”为核心的致密气差异富集模式(图8)。指导实现须家河组致密砂岩勘探由“大面积成藏”到“甜点富集带”的转变。

深化鄂尔多斯盆地南部中生界致密油“断缝体”富集机理认识,重新认识走滑断裂对油气成藏的控制作用,指出中生界油藏具有“断砂输导、三期充注、立体成藏”的特征,建立了离散型、平行型、拉分型3类断缝体划分标准,通过分类评价部署实施,钻获一批高产油流井,打开了鄂南石油效益动用的突破口^[34]。深化鄂尔多斯盆地盆缘过渡带致密气差异聚集规律认识。加强盆地整体性构造、沉积演化与成藏要素差异配置分析,揭示了上古生界天然气“近源优先、断砂输导、调整定型、单砂控富”准连续—非连续差异成藏规律;揭示了砂砾质辫状河粗粒相对富石英砂岩“早期抗压保孔、晚期破裂增缝”的甜点储层形成机理,建立了坡折区与沟槽带复合叠加地貌控制下的3种分区沉积模式和2类6种甜点储层叠置模式^[25,35-36],支撑了鄂尔多斯盆地北缘两个千亿立方米大气区的快速探明。

1.4.2 攻关形成一体化勘探技术

储层甜点预测方面,创新了多属性融合的断褶裂缝体刻画技术及分频重构高分辨率反演的储层预测技术,砂组有效裂缝预测符合率、储层预测吻合率大幅提升,支撑了甜点储层评价及井位目标优选。

超深井钻井技术方面,通过个性化聚晶金刚石(PDC)钻头优选、精细控压钻井,引进抗高温、封堵、抑制合成基钻井液,实现超深井打得快、打得好,机械钻速提高32%。

储层改造技术方面,历经“小规模解堵改造、分段加砂压裂、精细分段体积压裂”3个阶段,迭代形成了以“精细分段+超高压+大排量+高强度”为核心的精细分段体积压裂,川西须家河组探井产能为前期井的3~7倍,储层改造成效再上台阶。

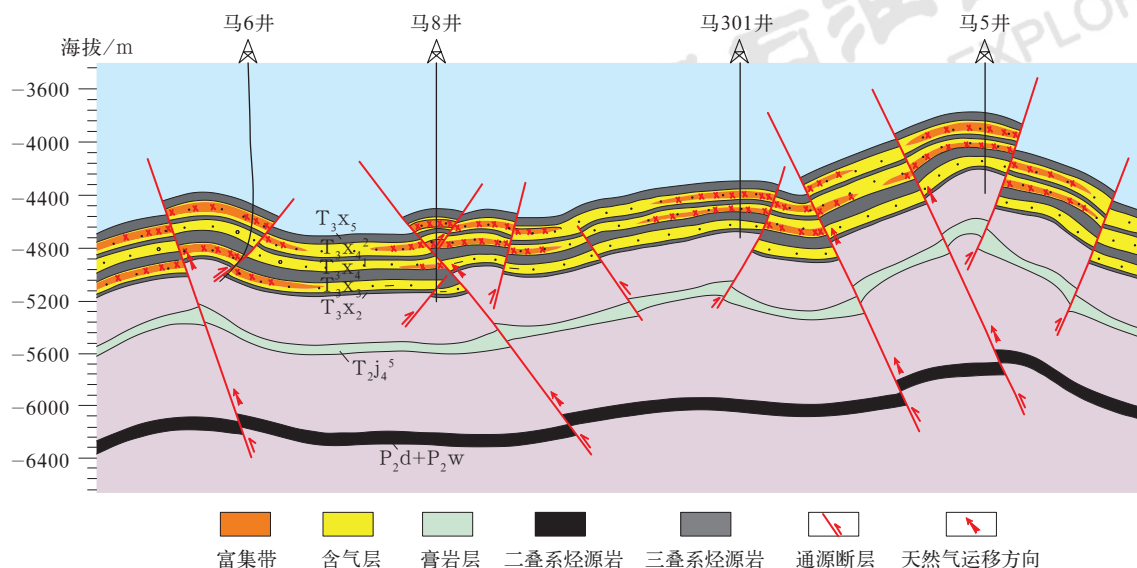


图8 四川盆地须家河组致密砂岩气“断缝体”成藏富集模式

Fig.8 Hydrocarbon accumulation and enrichment pattern of tight sandstone gas in “fault fractured reservoir” in Xujiahe Formation in Sichuan Basin

T_3x_5 —上三叠统须家河组五段; $T_3x_4^2$ —上三叠统须家河组四段上亚段; $T_3x_4^1$ —上三叠统须家河组四段下亚段; T_3x_3 —上三叠统须家河组三段; T_3x_2 —上三叠统须家河组二段; $T_2j_4^5$ —中三叠统嘉陵江组四段; P_2d —上二叠统大隆组; P_2w —上二叠统吴家坪组

1.4.3 探明3个大气田、1个大油田，培育2个亿吨级规模增储接替新阵地

“十四五”以来，依靠多学科联合一体化攻关，勘探开发一体化部署实施，先地质工艺评价，再先导试验攻关，在中西部盆地致密碎屑岩领域实现了多区带、多层系、多类型的有效拓展，相继探明了3个大型天然气田、1个大型油田，同时培育2个亿吨级规模增储接替新阵地。

在四川盆地川西坳陷，加强基础研究和一体化攻关，勘探甩开评价、开发滚动建产、工艺持续迭代，实现高产富集认识更清、储层预测精度更高、测试改造效果更好，探明了合兴场气田，新增天然气探明地质储量 $1330 \times 10^8 \text{m}^3$ ，有望形成一个近 $5000 \times 10^8 \text{m}^3$ 规模探明储量区。在鄂尔多斯盆地北部盆缘复杂构造带，开展大连片资料处理解释，地震—地质一体化探明了新召千亿立方米气区，新增天然气探明地质储量 $1161 \times 10^8 \text{m}^3$ ，发现了中国石化在鄂尔多斯盆地继大牛地、东胜气田后的第3个千亿立方米气区。在四川盆地川北巴中地区，开展须家河组致密砂岩地质评价研究和提产工程工艺攻关，发现第3个须家河组致密砂岩气田——巴中气田，新增天然气探明地质储量 $305 \times 10^8 \text{m}^3$ 。在准噶尔盆地哈山山前带，新增石油探明地质储量 $3173 \times 10^4 \text{t}$ ，形成了以哈山、春晖、阿拉德等油田组成的亿吨级油田群。同时，在准噶尔盆地

中央坳陷二叠系—三叠系、四川盆地川北侏罗系培育了两个超亿吨级的规模增储接替新阵地。

2021—2023年，中西部碎屑岩领域累计新增天然气探明地质储量 $3385 \times 10^8 \text{m}^3$ ，石油探明地质储量 $7273 \times 10^4 \text{t}$ ，已成为中国石化油气增储上产的重要领域。

1.5 拓展“三新”领域，东部成熟探区呈现勘探新活力

中国石化东部断陷盆地是指以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷为代表的16个富油凹陷^[37]，勘探面积为 $6.69 \times 10^4 \text{km}^2$ ，石油地质资源量为 $132.55 \times 10^8 \text{t}$ 。东部断陷盆地尽管勘探程度高、资源探明程度高，与中国石化其他探区相比仍具有石油勘探发展的资源优势、理论技术优势，是持续增储的“压舱石”^[38]。

“十四五”以来，在东部断陷盆地勘探中，树立富油气盆地勘探无禁区理念，解放思想、创新思路，深化全含油气系统及油气成藏有序性研究，统筹常规与非常规、精细勘探与规模拓展勘探、地震勘探与提效部署、工程技术与突破转化等关系，持续优化常规与非常规差异化部署、加大高精度高密度地震勘探、优化“三新”领域突破和一体化评价部署。在潜江凹陷斜坡过渡带湖相碳酸盐岩、东营凹陷风暴滩沉积及惠民凹陷、泌阳凹陷、南阳凹陷致密油等新类型，东营凹陷与沾化凹陷沙四下亚段—孔

店组、苏北盆地戴南组洼陷带近源深部新层系，埕岛滩海、长岭断陷^[39]、东濮凹陷新区带等“三新”领域取得新突破，在主力区带的储量“空白区”实现了效益增储，2021—2023 年新增三级石油地质储量为 $6.3 \times 10^8 \text{t}$ ，其中探明石油地质储量 $1.6 \times 10^8 \text{t}$ ，在东部断陷盆地成熟探区探索出了一条效益优先、高质量勘探之路^[40-42]。

1.5.1 细化复杂岩相带评价，潜江凹陷发现千万吨级规模整装储量区

江汉盆地潜江凹陷盆缘碎屑岩勘探程度高，

“十三五”以来，针对深凹区盐间页岩油开展探索，但未取得商业突破。2022 年以来，重新认识砂岩—盐岩过渡带复杂岩性，重构碳酸盐岩沉积模式，揭示潜江组由盆缘向洼陷带依次发育砂泥岩—碳酸盐岩—盐岩的盐湖沉积相序，平面上呈环带状分布；颗粒碳酸盐岩和颗粒混积岩孔径大（ $50 \sim 200 \mu\text{m}$ ）、物性好（孔隙度为 $5\% \sim 13\%$ ），为优质储层。碳酸盐岩与上下页岩组合形成“垂向侧向短距离运聚、岩性物性侧向封堵、大面积分布”的源储共生成藏系统，成藏组合有利（图 9）。

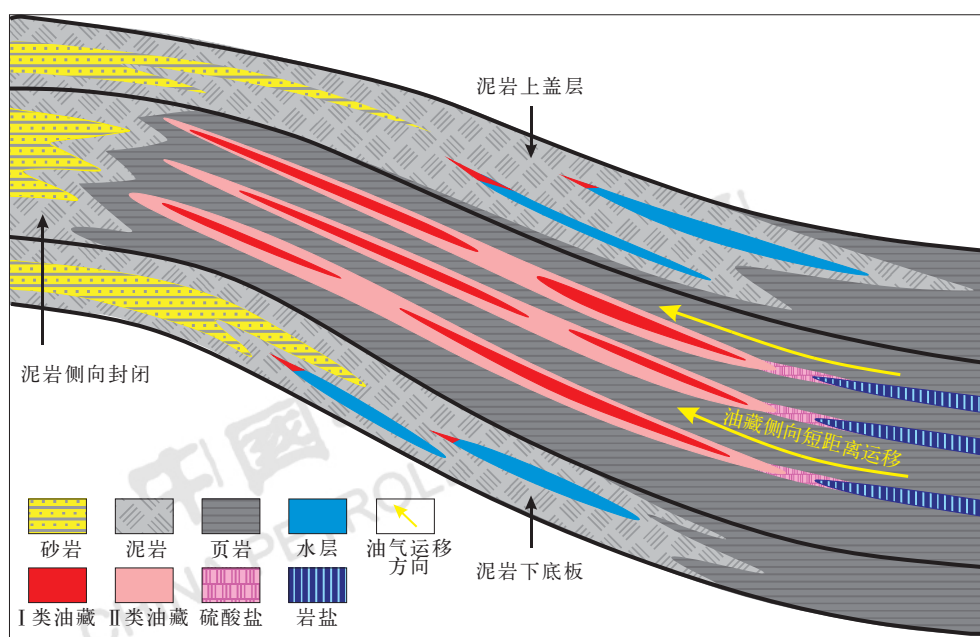


图 9 潜江凹陷湖相碳酸盐岩油藏成藏模式图

Fig.9 Hydrocarbon accumulation pattern of lacustrine carbonate oil reservoir in Qianjiang Sag

在上述认识指导下，重建了含油性评价体系与测井精细解释模型，攻关以复合酸压为主的针对性工艺技术方法，通过老井复查结合专探井部署，共 15 口获得工业油流。其中，专探井黄 61 斜井测井解释油层 9 层 123.2m，对潜 3⁴10 韵律碳酸盐岩油层 1 层 23.2m 测试，获得自喷日产油 12.04m^3 的商业油流；随后开展不同层位碳酸盐岩油层试油取得成功，实现潜 3⁴油组向潜 3³、潜 3³下纵向拓展。随后，加大勘探开发一体化评价实施，新增石油控制地质储量 $907 \times 10^4 \text{t}$ 、预测地质储量 $1054 \times 10^4 \text{t}$ ，形成了一个近两千万吨级规模增储新阵地。

1.5.2 深化成盆成烃评价，济阳坳陷深层勘探持续拓展

古近系沙四上亚段—沙三段为济阳坳陷的主力勘探层系，整体勘探程度高，“十四五”以来深化成盆、成烃、成藏研究，持续向沙四下亚段—孔店组深层探

索取得多项新突破。

基于济阳坳陷大剖面研究，明确沙四下亚段发育自源型和他源型两种成藏体系^[43]。针对自源型含油气系统，加强烃源岩条件和成藏规律分析，部署实施的丰深斜 11、丰深斜 101、永 941 等井先后在东营凹陷北带取得发现，证实 4200m 以深的碎屑岩仍发育较好的储层（孔隙度可达 8% 以上）。针对他源型含油气系统，重点加强储层分析，部署在渤南洼陷带的渤中斜 10、罗 176 等井获得工业油流。济阳坳陷沙四下亚段勘探实现了深层系多类型、多地区拓展，落实控制地质储量规模 $3500 \times 10^4 \text{t}$ 。

针对孔店组红层，深化构造演化、充填样式、成藏规律认识，在东营凹陷北部洼陷带广利构造实施莱深斜 2 井钻遇孔二段 270m 暗色泥岩， R_o 为 $0.98\% \sim 1.02\%$ ，TOC 为 $0.5\% \sim 2.0\%$ ，综合评价为

好—优质烃源岩；该井在孔二段常规测试获油气流，油源对比分析证实油气主要来自孔二段烃源岩，首次证实济阳拗陷深层发育孔店组含油气系统^[44]，解决了长期困扰深层勘探源—油对应的问题，落实孔店组石油资源量 $3.85 \times 10^8 \text{t}$ 。在东营凹陷南部博兴洼陷，建立“源—断—储—圈”耦合控藏模式^[45]，实施的高斜 86 井在与沙四上亚段油源无明显对接的孔一段获得日产油 41m^3 的高产油流，首次在洼陷带“红层”取得突破，新增预测石油地质储量 $2751 \times 10^4 \text{t}$ ，有望实现沙四段烃源岩之下深部成藏体系的有效拓展。

1.5.3 坚持新区探索，新区带取得新发现

以“全油气系统”理论认识为指导，探索东部断陷盆地近源地质体，多区带取得新发现，实现了勘探空间的有效拓展。

重新解剖松辽盆地长岭断陷结构，落实了两个五百亿立方米天然气资源阵地。在断陷西部地区，部署的北 12 井钻遇营城组暗色泥岩 51m，对营城组 3066.1~3216.6m 井段测试获得日产油 3.73m^3 、日产气 7037m^3 的工业油气流。北 12 井的突破，首次揭示长岭断陷西部地区发育有效烃源岩，发现了聚宝山含油次洼。在东部断阶带，按照“拆离滑脱控制断陷成盆”模式，部署实施的风险探井达深 1 井钻遇沙河子组优质烃源岩 224m，在营城组和火石岭组两套火山岩成藏组合中均试获天然气流，发现三平山含油次洼，扩大生烃洼槽面积 180km^2 。

重新认识东濮凹陷成盆、成烃、成圈、成储、成藏条件，明确西南洼陷带具有“多套烃源岩供烃、构造背景控藏、源储配置控富”的有利成藏条件，优选南何家构造部署实施何 301 井，对沙二下段 3794.8~3822.9m 进行射孔后自喷，日产油 37.76m^3 、日产气 3439m^3 ，新增预测石油地质储量 $1358 \times 10^4 \text{t}$ ，形成了一个千万吨级增储上产新阵地。

在滩海地区，加强地震拓频、属性预测等技术在储层描述方面的应用，部署埕北 85 井、埕北 832 井在东营组三段分别测试获得 30.3t、27.9t 工业油流，突破了 3600m 的商业产能下限。2022 年，埕岛地区东营组三段新增预测石油地质储量 $2264 \times 10^4 \text{t}$ ，实现了滩海地区新层系、新类型勘探新突破。

1.6 探索深层煤层气，大牛地气田太原组煤层气取得重大突破

煤层气勘探于 20 世纪 90 年代开始，经历了 3 个勘探阶段，分别以“浅层富煤区构造高点富集”理

论、“水动力控气—构造调整—单斜缓坡成藏”理论、“微超压、高饱和吸附成藏”认识指导寻找埋深小于 800m、800m 扩展到 1500m、大于 2000m 的深层煤层气^[46]。2021 年以来，通过深化地质认识，加强深层煤层气地质—工程一体化研究，加大有效支撑压裂技术攻关试验，实现了鄂尔多斯盆地深层煤层气的重大突破。

1.6.1 深化深层煤层气富集高产认识

深层煤层气具有“广覆式生烃、高含气、低含水、高饱和、高压束缚游离气与吸附气共存”的赋存特征^[47]。其中，高压束缚游离气主要以高压压缩气状态赋存在孔裂隙中。随 R_0 增高，孔径变小、比表面积增大，煤层吸附能力增强，最大吸附量大于 $20 \text{m}^3/\text{t}$ ；受温压耦合控制，吸附气量存在临界深度，1500m 以深游离气量逐渐增大；深层保存条件变好，煤层总含气量增大，埋深 3000m 总含气量大于 $30 \text{m}^3/\text{t}$ 。

煤岩品质、宏孔与裂隙占比决定了游离气占比。深层高煤阶煤岩平均游离气含量为 21.4%，而深层中—低煤阶煤岩平均游离气含量可达 50%；宏孔与裂隙占比大，初期采出游离气，投产即见气、见气即高产，随即出现首个产量高峰^[46]；之后，压力下降，吸附气解吸产出，出现第 2 个产量高峰。

1.6.2 形成深层煤层气配套工程技术工艺

中国石化针对深层煤层气非均质性强、易垮塌、有效造缝难、应力敏感强等难点，强化基础地质、钻完井工艺、排采制度等研究与地质工程一体化攻关，创新形成深层煤层气高效勘探开发技术系列，如精细甜点评价“布好井”、优化钻井液体系“打好井”、大规模饱和加砂“压好井”、优化排采制度“管好井”。其中在压裂方面，开展不同类型煤岩力学实验，根据煤岩结构，制定“一段一策”差异化设计思路；以“控近扩远”实现煤层“饱和加砂、有效支撑”复杂体积缝网为目标，配套小压测试技术、液氮伴注助排、前置酸处理等 7 项关键技术，以及广域电磁法裂缝监测、量子示踪剂监测技术 2 项监测方案，实现煤层复杂缝网体积压裂。

1.6.3 阳煤 1 井勘探取得重大突破

基于对深层煤层气富集高产理论认识，中国石化聚焦深层煤储层含气性和可压裂性难题，强化富集机理研究与改造工艺适配性，在鄂尔多斯盆地大牛地气田部署的阳煤 1HF 井钻遇石炭系太原组 8 号煤厚 12m，含气量为 $26 \text{m}^3/\text{t}$ ，证实深煤层具有“高含气量、富含游离气”特征，井口敞放试获日产

气 $10.4 \times 10^4 \text{m}^3$, 实现盆地 2800m 以深测试产量最高纪录。基于中国石化“十四五”资源评价初步结果, 评价中国石化探区 1500m 以深煤层气资源量为 $7.6 \times 10^{12} \text{m}^3$, 其中鄂尔多斯盆地深层煤层气资源量为 $3.1 \times 10^{12} \text{m}^3$, 占中国石化深层煤层气总资源量的 41%, 评价认为鄂尔多斯盆地大牛地、杭锦旗、富县及旬宜等有望成为深层煤层气勘探突破和规模增储新阵地。

2 发展战略

2.1 发展机遇

在百年未有之大变局下, 我国能源安全面临着国际地缘政治深刻变化、“双碳”目标约束及能源转型发展等诸多挑战^[48]。我国油气工业走过 70 余年的辉煌历程, 2022 年成为全球第六大产油国、第四大产气国。但是随着我国经济社会的高速发展, 国内油气供给远不能满足经济发展需求, 2018 年 7 月习近平总书记做出了“今后若干年要大力提升勘探开发力度, 保障我国能源安全”的重要批示。牢记习近平总书记殷切嘱托, 加大国内油气勘探开发与油气增储上产力度, 破解油气资源接续困局, 是中国石化的政治、经济、社会责任与使命, 为中国石化上游勘探发展指明了发展方向、注入了强大的发展动力。

2.2 发展挑战

油气矿业权局限一直是制约中国石化上游发展的核心问题。中国石化油气探矿权面积为 $36.86 \times 10^4 \text{km}^2$, 其中渤海湾(陆上)、塔里木、四川、准噶尔、鄂尔多斯、松辽等六大富油气盆地探矿权面积仅占 12.7%, 规模展开勘探开发回旋余地小。随着我国油气管理体制的深化改革, 油气探矿权硬性退减、竞争性出让竞争激烈, 为探矿权的保护与有效拓展带来较大挑战。

科技创新和工程保障能力亟待加强。中国石化油气勘探领域多样, 地下地质条件复杂、地表施工条件复杂, 勘探对象不断向“深”“小”“低”“非”延伸, 亟待加强油气地质理论的创新与工程技术保障能力的提升。其中, 深层—超深层海相碳酸盐岩领域的地质结构、储层结构复杂条件下油气成藏机理^[49-51], 东部断陷盆地常规+非常规转换时期的剩余油气分布预测与不同类型油藏控制因素, 中西部致密碎屑岩油气差异富集机理与模式, 页岩油气成储成烃与

油气富集规律^[27,52]等认识亟待深化, 以引领勘探部署; 目标识别与刻画、储层描述与“甜点”预测等高精度地震勘探技术, 地质—工程—经济一体化预测技术方法, 超深层、超高温、超高压等复杂地层条件下的提速、提效、提质优快安全钻完井技术与装备, 水平井体积压裂、直井分层压裂、高温高压深层储层改造等提高单井产量等有待攻关完善, 以支撑高质量勘探。

2.3 发展潜力

截至目前, 中国石化主要探区剩余常规石油地质资源量为 $197.50 \times 10^8 \text{t}$, 石油资源探明率为 32.57%, 东部断陷盆地的资源探明程度达到 50% 以上, 其中东营、惠民、东濮、泌阳、潜江、高邮等主力凹陷资源探明程度超过 55.00%^[38], 处于勘探中后期, 储量保持缓慢增长; 海相碳酸盐岩领域石油资源探明程度为 31.82%、中西部碎屑岩领域石油领域资源探明率为 12.58%, 处于勘探早中期, 储量保持快速增长。常规天然气地质资源量为 $34.3 \times 10^{12} \text{m}^3$, 资源探明程度为 9.33%, 处于勘探早期, 探明储量将保持快速增长。页岩油地质资源量为 $90 \times 10^8 \text{t}$ 、页岩气地质资源量为 $38 \times 10^{12} \text{m}^3$, 深层煤层气资源量为 $7.6 \times 10^{12} \text{m}^3$, 均处于勘探发现的初期, 通过进一步加强攻关与技术准备, 预期可实现规模发展。

根据资源条件、技术准备程度, 海相碳酸盐岩、致密碎屑岩、东部断陷盆地、页岩油气、深层煤层气、海域等八大领域仍是未来长时间内持续突破增储的重点, 2024—2030 年具备年均新增石油探明储量 $2 \times 10^8 \text{t}$ 、天然气探明储量 $2800 \times 10^8 \text{m}^3$ 的能力。

2.4 发展思路

以“深地工程”为统领, 加快推动深层—超深层规模增储上产。持续打造深层—超深层理论技术高地, 高效推进 7000~8500m 勘探开发、攻关 8500~10000m 特超深层。加快推进塔里木盆地顺北、集中评价四川盆地二叠系—三叠系, 实现规模增储上产; 风险勘探塔里木盆地寒武系盐下、四川盆地震旦系—寒武系, 拓展战略接替新阵地; 精细评价塔河、普光、元坝等油气田, 实现稳定增储; 准备塔里木、四川等潜在新区, 准备战略接替新领域。

攻坚中西部碎屑岩, 实现规模增储、效益上产。通过深化油气差异富集认识, 攻关形成“地质+工程+经济”甜点预测技术、发展完善提高单井产能

技术,实现致密碎屑岩层系效益发展。主攻准噶尔盆地中央坳陷二叠系—三叠系、准噶尔盆地山前带、塔里木盆地天山山前带、顺北地区碎屑岩、鄂尔多斯盆地地下古生界,形成战略接替大场面;精细评价鄂尔多斯盆地北部上古生界、四川盆地川西坳陷侏罗系、松辽盆地梨树长岭断陷,技术攻关四川盆地须家河组、鄂尔多斯盆地鄂南上古生界,实现致密气效益增储上产。

以统筹勘探为引领,实现东部成熟探区持续高效稳产。统筹常规与非常规勘探、地震部署与提效勘探、精细评价与规模拓展勘探^[38],通过深化剩余资源空间分布预测,大力推进勘探开发一体化,实现成熟领域高效增储、“三新”领域规模发现、深层致密油攻关突破,确保实现效益增储。

超前准备,积极推进海域油气资源战略。大力推进渤海海域和东海合作区,实现规模增储上产;加快推进海域招商区块突破,形成南海近海海域勘探开发基地;加强南海南部、深水等海洋油气资源的战略选区,为介入深水勘探开发做准备。

以页岩油气示范工程为引领,加强适应性技术攻关,加快推进页岩油气战略转型接替。在页岩油方面,以胜利济阳页岩油国家级示范区为基地,加强差异富集机理研究^[52],攻关完善页岩油地质—工程双甜点综合评价技术体系、攻关配套页岩油水平井钻完井技术及立体开发技术,实现成熟度(R_o)大于0.7%、埋深小于3500m的济阳、苏北等盆地页岩油的规模商业开发,攻关突破成熟度(R_o)大于0.7%、埋深小于4500m中—高成熟度页岩油,形成资源接替。在页岩气方面,以涪陵页岩气国家级示范区为重点,持续推进页岩气多层立体开发技术,攻关配套工程工艺、增产提速降本,力争实现持续稳产上产;攻关四川盆地内深层—超深层、四川盆地外残留向斜常压页岩气效益开发工艺技术,实现“走出志留系”;加快突破川东二叠系、川南寒武系等新层系页岩气,实现“走出志留系”战略部署。

2.5 发展战略

坚定资源发展定力,加快破解资源接续困局,解放思想、创新攻关,常非统筹、油气并重,示范引领、一体化评价,全力打好高质量勘探进攻仗,夯实石油稳定发展、天然气快速发展的储量基础。

坚定不移推进优质矿权保护。以地质评价为依据、矿权到期期限为节点,保持勘探力度、优化部署结构,突出向低认知探矿权区甩开部署,突出向富油

气区带常非一体化部署,确保优质探矿权保护最大化与规模整装储量落实最优化。

坚定不移推进新领域战略突破。深化战略领域研究和大目标准备,强化方案设计与实施管理,保持风险勘探力度不降,加强深地、海域、山前带等领域的风险勘探,力争实现战略大突破。

坚定不移推进石油规模增储。统筹东部断陷盆地页岩油规模增储与常规石油“三新”领域精细勘探,加快推进塔里木盆地和准噶尔盆地勘探突破,形成西部探区规模增储、东部探区稳定增储、页岩油战略接替的石油发展格局。

坚定不移推进天然气大发展。做大四川盆地多类型立体勘探,加大新区新层系页岩气突破,加强塔里木盆地超深层天然气技术攻关,做优鄂尔多斯盆地古生界多层系勘探,打造深层煤层气增储大场面,积极推进西湖、松南效益增储,推动天然气高质量大发展。

坚定不移推进科技创新。坚持问题导向,统筹先导试验型和基础研究型重大项目,大力推进研究方向盆地化、研究内容体系化、研究单位协同化、研究成果共享化,持续加强深层海相碳酸盐岩、致密碎屑岩、陆相页岩油等领域油气地质理论创新,以理论创新引领勘探工作。以地质任务为核心,迭代攻关超深井、长水平段水平井优快钻完井、体积压裂、高温高压测井、录井技术等,分区建立学习曲线,进一步提升工程技术的保障能力。

坚定不移强化管理创新。立足新形势新要求,开拓思路,加强合作,创新勘探评价体系,研究建立大盆地统筹勘探、多层系立体勘探、水平井提产攻关、富集区规模培育等勘探开发新模式,推动高质量勘探示范项目建设,实现勘探提质增效降本。

3 结论与认识

(1)“十四五”以来,中国石化突出战略引领与科技创新,大力推进高质量勘探,在塔里木、四川、渤海湾、准噶尔、鄂尔多斯等盆地超深层碳酸盐岩、陆相页岩油、深层页岩气、中西部碎屑岩、成熟探区隐蔽油气藏、深层煤岩气等领域取得了重要勘探成果,新增石油地质储量重上2亿吨大关、天然气储量持续高位增长。

(2)面对资源接续困局,中国石化坚决扛起保障国家能源安全的主责主业,持续加大勘探力度,以深地工程、页岩油气示范工程、致密碎屑岩效益攻坚、常非一体化统筹为抓手,强化理论技术创新,坚定不

移推进新领域战略突破、石油规模增储、天然气大发展三大工程,夯实可持续高质量发展的资源基础。

参考文献

- [1] 蔡勋育,刘金连,张宇,等.中国石化“十三五”油气勘探进展与“十四五”前景展望[J].中国石油勘探,2021,26(1):31-42.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhang Yu, *et al.* Oil and gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan period and prospect forecast for the 14th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2021,26(1):31-42.
- [2] 郭旭升,蔡勋育,刘金连,等.中国石化“十三五”天然气勘探进展与前景展望[J].天然气工业,2021,41(8):12-22.
Guo Xusheng, Cai Xunyu, Liu Jinlian, *et al.* Natural gas exploration progress of Sinopec during the 13th Five-Year Plan and prospect forecast during the 14th Five-Year Plan[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(8):12-22.
- [3] 蔡勋育,刘金连,赵培荣,等.中国石化油气勘探进展与上游业务发展战略[J].中国石油勘探,2020,25(1):11-19.
Cai Xunyu, Liu Jinlian, Zhao Peirong, *et al.* Oil and gas exploration progress and upstream development strategy of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):11-19.
- [4] 金之钧,蔡勋育,刘金连,等.中国石油化工股份有限公司近期勘探进展与资源发展战略[J].中国石油勘探,2018,23(1):14-24.
Jin Zhijun, Cai Xunyu, Liu Jinlian, *et al.* The recent exploration progress and resource development strategy of China Petroleum and Chemical Corporation[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(1):14-24.
- [5] 蔡勋育,赵培荣,高波,等.中国石化页岩气“十三五”发展成果与展望[J].石油与天然气地质,2021,42(1):16-27.
Cai Xunyu, Zhao Peirong, Gao Bo, *et al.* Sinopec's shale gas development achievements during the “Thirteenth Five-Year Plan” period and outlook for the future[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(1):16-27.
- [6] 冯建辉,蔡勋育,牟泽辉,等.中国石化“十二五”油气勘探进展与“十三五”展望[J].中国石油勘探,2016,21(3):1-13.
Feng Jianhui, Cai Xunyu, Mou Zehui, *et al.* Oil and gas exploration of China Petroleum and Chemical Corporation during the 12th Five-Year Plan and the prospect for the 13th Five-Year Plan[J]. China Petroleum Exploration, 2016,21(3):1-13.
- [7] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.
Jiao Fangzheng. Discovery significance and prospect analysis of deep fault-karst carbonate hydrocarbon reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018,39(2):207-216.
- [8] 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.
- [9] 曹自成,路清华,顾忆,等.塔里木盆地顺北油气田1号和5号断裂带奥陶系油气藏特征[J].石油与天然气地质,2020,41(5):975-984.
Cao Zicheng, Lu Qinghua, Gu Yi, *et al.* Characteristics of Ordovician reservoirs in Shunbei 1 and 5 fault zones, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2020,41(5):975-984.
- [10] 云露.顺北地区奥陶系超深断溶体油气成藏条件[J].新疆石油地质,2021,42(2):136-142.
Yun Lu. Hydrocarbon accumulation of ultra deep Ordovician fault karst reservoirs in Shunbei area[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2021,42(2):136-142.
- [11] 云露,朱秀香.一种新型圈闭:断控缝洞型圈闭[J].石油与天然气地质,2022,43(1):34-42.
Yun Lu, Zhu Xiuxiang. A new trap type: fault-controlled fracture-vuggy trap[J]. Oil & Gas Geology, 2022,43(1):34-42.
- [12] 马永生,蔡勋育,云露,等.塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J].石油勘探与开发,2022,49(1):1-17.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Yun Lu, *et al.* Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022,49(1):1-17.
- [13] 漆立新,云露,李宗杰.顺北地区奥陶系断控缝洞型油气藏勘探实践[M].北京:科学出版社,2023.
Qi Lixin, Yun Lu, Li Zongjie. Exploration practice of Ordovician fault-controlled fracture-cavity type oil and gas reservoirs in the Shunbei area[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [14] 漆立新.塔里木盆地顺北地区海相超深碳酸盐岩油气勘探物探技术需求与创新应用[J].石油物探,2023,62(3):381-394.
Qi Lixin. Technical demand and innovative application of geophysical exploration technology for marine ultra-deep carbonate rocks in Shunbei area, Tarim Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2023,62(3):381-394.
- [15] 张煜,毛庆言,李海英,等.顺北中部超深层断控缝洞型油气藏储集体特征与实践应用[J].中国石油勘探,2023,28(1):1-13.
Zhang Yu, Mao Qingyan, Li Haiying, *et al.* Characteristics and practical application of ultra-deep fault-controlled fractured-cavity type reservoir in central Shunbei area[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(1):1-13.
- [16] 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.
- [17] 孙焕泉,蔡勋育,周德华,等.中国石化页岩油勘探实践与展望[J].中国石油勘探,2019,24(5):569-575.
Sun Huanquan, Cai Xunyu, Zhou Dehua, *et al.* Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):569-575.
- [18] 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.
- [19] 黎茂稳,金之钧,董明哲,等.陆相页岩形成演化与页岩油富集机理研究进展[J].石油实验地质,2020,42(4):489-505.
Li Maowen, Jin Zhijun, Dong Mingzhe, *et al.* Advances in the basic study of lacustrine shale evolution and shale oil accumulation[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2020, 42(4):489-505.

- [20] 刘惠民. 济阳拗陷页岩油勘探实践与前景展望[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1):73-87.
Liu Huimin. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1):73-87.
- [21] 刘惠民. 济阳拗陷古近系页岩油地质特殊性及其勘探实践: 以沙河街组四段上亚段—沙河街组三段下亚段为例[J]. 石油学报, 2022, 43(5):581-594.
Liu Huimin. Geological particularity and exploration practice of Paleogene shale oil in Jiyang Depression: a case study of the upper submember of member 4 to the lower submember of member 3 of Shahejie Formation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(5):581-594.
- [22] 潘继平. 中国油气勘探开发新进展与前景展望[J]. 石油科技论坛, 2023, 42(1):23-31.
Pan Jiping. New progress and outlook of China's oil and gas exploration and development[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(1):23-31.
- [23] 李宇志, 周肖肖, 隋凤贵, 等. 东营凹陷民丰地区沙四段下亚段烃源岩特征[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(3):28-41.
Li Yuzhi, Zhou Xiaoxiao, Sui Fenggui, et al. Characteristics of source rock of Es₄x in Minfeng area, Dongying Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(3):28-41.
- [24] 罗家群, 张永华, 谢春安, 等. 泌阳凹陷下二门地区核桃园组油气藏再认识[J]. 地质科技通报, 2022, 41(3):1-8.
Luo Jiaqun, Zhang Yonghua, Xie Chun'an, et al. Re-understanding on hydrocarbon accumulation of the Hetaoyuan Formation in Xiaermen area of the Biyang Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(3):1-8.
- [25] 郭旭升, 胡东风, 魏志红, 等. 涪陵页岩气田的发现与勘探认识[J]. 中国石油勘探, 2016, 21(3):24-37.
Guo Xusheng, Hu Dongfeng, Wei Zhihong, et al. Discovery and exploration of Fuling shale gas field[J]. China Petroleum Exploration, 2016, 21(3):24-37.
- [26] 郭旭升. 南海相页岩气“二元富集”规律: 四川盆地及周缘龙马溪组页岩气勘探及实践认识[J]. 地质学报, 2014, 8(7):1209-1218.
Guo Xusheng. Rules of Two-Factor enrichment for marine shale gas in southern China: understanding from the Longmaxi Formation shale gas in Sichuan Basin and its surrounding area[J]. Acta Geologica Sinica, 2014, 8(7):1209-1218.
- [27] 郭旭升, 腾格尔, 魏祥峰, 等. 四川盆地深层海相页岩气赋存机理与勘探潜力[J]. 石油学报, 2022, 43(4):453-468.
Guo Xusheng, Tenger, Wei Xiangfeng, et al. Occurrence mechanism and exploration potential of deep marine shale gas in Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(4):453-468.
- [28] 孙焕泉, 周德华, 蔡勋育, 等. 中国石化页岩气发展现状与趋势[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2):14-26.
Sun Huanquan, Zhou Dehua, Cai Xunyu, et al. Progress and prospect of shale gas development of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2):14-26.
- [29] 包汉勇, 梁榜, 郑爱维, 等. 地质工程一体化在涪陵页岩气示范区立体勘探开发中的应用[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(1):88-98.
Bao Hanyong, Liang Bang, Zheng Aiwei, et al. Application of geology and engineering integration in stereoscopic exploration and development of Fuling shale gas demonstration area[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1):88-98.
- [30] 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.
- [31] 刘惠民, 张关龙, 范婕, 等. 准噶尔盆地腹部征沙村地区征 10 井的勘探发现与启示[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5):1118-1128.
Liu Huimin, Zhang Guanlong, Fan Jie, et al. Exploration discoveries and implications of well Zheng 10 in the Zhengshacun area of the Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5):1118-1128.
- [32] 黄仁春, 刘若冰, 刘明, 等. 川东北通江—马路背地区须家河组断裂体储层特征及成因[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4):873-883.
Huang Renchun, Liu Ruobing, Liu Ming, et al. Characteristics and genesis of fault-fracture reservoirs in the Xujiahe Formation, Tongjiang-Malubei area, northeastern Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4):873-883.
- [33] 刘振峰, 刘忠群, 郭元岭, 等. “断裂体”概念、地质模式及其在裂缝预测中的应用: 以四川盆地川西拗陷新场地区须家河组二段致密砂岩气藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(4):973-980.
Liu Zhenfeng, Liu Zhongqun, Guo Yuanling, et al. Concept and geological model of fault-fracture reservoirs and their application in seismic fracture prediction: a case study on the Xu 2 member tight sandstone gas pool in Xinchang area, western Sichuan Depression in Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(4):973-980.
- [34] 何发岐, 张宇, 王付斌, 等. 鄂尔多斯盆地中国石化“十三五”油气勘探进展与新领域[J]. 中国石油勘探, 2022, 27(5):1-12.
He Faqi, Zhang Yu, Wang Fubin, et al. Petroleum exploration progress and new field of Sinopec in Ordos Basin during the 13th Five-Year Plan period[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(5):1-12.
- [35] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6):39-49.
He Faqi, Wang Fubin, Zhang Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6):39-49.
- [36] 张威, 何发岐, 闫相宾, 等. 鄂尔多斯盆地北部构造叠置与天然气聚集研究[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(4):689-703.
Zhang Wei, He Faqi, Yan Xiangbin, et al. Tectonic superposition and accumulation of natural gas in northern Ordos Basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(4):689-703.
- [37] 程喆, 徐旭辉, 邹元荣, 等. 中国东部部分富油断陷盆地增储潜力与勘探对策[J]. 石油实验地质, 2013, 35(2):202-206.
Cheng Zhe, Xu Xuhui, Zou Yuanrong, et al. Reserve growth potential and exploration measures of oil-rich faulted basins in eastern China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(2):202-206.
- [38] 张宇, 刘超英, 程喆. 中国石化东部断陷盆地成熟探区勘探转型发展探讨[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(3):12-22.
Zhang Yu, Liu Chaoying, Cheng Zhe. Discussion on exploration transformation and development of mature exploration areas in

- eastern fault basins of Sinopec[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(3):12–22.
- [39] 金帅, 蒋有录, 苏圣民, 等. 长岭断陷龙凤山地区断裂与火石岭组火山岩油气运聚关系[J]. 地质科技通报, 2023,42(2):137–145.
Jin Shuai, Jiang Youlu, Su Shengmin, *et al.* Relationship between faults and hydrocarbon migration and accumulation in Huoshiling Formation volcanic rocks in Longfengshan area, Changling Fault Depression[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023,42(2):137–145.
- [40] 宋明水, 王永诗, 李友强. 济阳拗陷油气精细勘探评价及实践[J]. 中国石油勘探, 2020,25(1):93–100.
Song Mingshui, Wang Yongshi, Li Youqiang. Evaluation and practice of fine petroleum exploration in the Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):93–100.
- [41] 宋明水, 王永诗, 李友强. 成熟探区“层勘探单元”划分与高效勘探[J]. 石油勘探与开发, 2018,45(3):520–527.
Song Mingshui, Wang Yongshi, Li Youqiang. Division of “layer exploration unit” and high-efficiency exploration in mature exploration area[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018,45(3):520–527.
- [42] 宋明水. 济阳拗陷勘探形势与展望[J]. 中国石油勘探, 2018,23(3):11–17.
Song Mingshui. The exploration status and outlook of Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2018,23(3):11–17.
- [43] 宋明水, 王永诗, 郝雪峰, 等. 渤海湾盆地东营凹陷古近系深层油气成藏系统及勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2021,42(6):1243–1254.
Song Mingshui, Wang Yongshi, Hao Xuefeng, *et al.* Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021,42(6):1243–1254.
- [44] 刘惠民, 高阳, 秦峰, 等. 渤海湾盆地济阳拗陷油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2023,44(12):2141–2159.
Liu Huimin, Gao Yang, Qin Feng, *et al.* New fields, new types and resource potentials of hydrocarbon exploration in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023,44(12):2141–2159.
- [45] 杨怀宇, 张鹏飞, 邱贻博, 等. 东营凹陷深层自源型油气成藏模式与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2023,28(2):92–101.
Yang Huaiyu, Zhang Pengfei, Qiu Yibo, *et al.* Deep self-source type hydrocarbon accumulation pattern and exploration practice in Dongying Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2023,28(2):92–101.
- [46] 杨秀春, 徐凤银, 王虹雅, 等. 鄂尔多斯盆地东缘煤层气勘探开发历程与启示[J]. 煤田地质与勘探, 2022,50(3):30–41.
Yang Xiuchun, Xu Fengyin, Wang Hongya, *et al.* Exploration and development process of coalbed methane in eastern margin of Ordos Basin and its enlightenment[J]. Coal Geology & Exploration, 2022,50(3):30–41.
- [47] 何发岐, 董昭雄. 深部煤层气资源开发潜力: 以鄂尔多斯盆地大牛地气田为例[J]. 石油与天然气地质, 2022,43(2):277–285.
He Faqi, Dong Zhaoxiong. Development potential of deep coalbed methane: a case study in the Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022,43(2):277–285.
- [48] 程喆, 白振瑞. 做好油气资源接续才能真正端牢能源饭碗[J]. 中国石化, 2023(2):24–27.
Cheng Zhe, Bai Zhenrui. Only by ensuring the continuity of oil and gas resources can we truly secure our energy supply[J]. Sinopec Monthly, 2023(2):24–27.
- [49] 郭旭升. 以关键核心技术突破带动我国深层、超深层油气勘探开发突破[J]. 能源, 2022,164(9):46–50.
Guo Xusheng. Drive breakthroughs of deep and ultra-deep hydrocarbon exploration in China through breakthroughs of key core technologies[J]. Energy, 2022,164(9):46–50.
- [50] 马永生, 蔡勋育, 李慧莉, 等. 海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究进展[J]. 石油实验地质, 2021,43(5):737–748.
Ma Yongsheng, Cai Xunyu, Li Huili, *et al.* Advances in basic research on the mechanism of deep marine hydrocarbon enrichment and key exploitation technologies[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021,43(5):737–748.
- [51] 郭旭升, 胡宗全, 李双建, 等. 深层—超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报, 2023,8(4):461–471.
Guo Xusheng, Hu Zongquan, Li Shuangjian, *et al.* Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023,8(4):461–471.
- [52] 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.