

文章编号: 1000-0747(2020)01-0120-09 DOI: 10.11698/PED.2020.01.11

中国石油海外油气田开发技术进展与发展方向

穆龙新, 陈亚强, 许安著, 王瑞峰

(中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要: 通过系统回顾中国石油海外油气田开发技术的发展历程, 总结已形成的特色开发技术, 并针对海外油气开发面临的挑战, 提出未来海外业务的发展目标与技术发展方向。中国石油经历海外 20 多年的油气田开发实践, 将国内成熟油气田开发技术与海外油气藏特征相结合, 形成了以海外砂岩油田高速开发及稳油控水技术、大型碳酸盐岩油气藏高效开发和超重油油藏整体水平井泡沫油冷采开发技术为代表的海外特色开发技术。在深入分析海外油气开发面临的挑战和技术需求的基础上, 结合国内外油气开发技术发展趋势, 提出未来海外油气开发技术需重点研发人工智能储集层预测与三维地质建模、海外砂岩油田高速开发后二次开发及提高采收率、海外碳酸盐岩油气藏注水注气提高采收率、海外非常规油气经济有效开发、海域深水油气藏高效开发配套技术等, 实现海外高含水砂岩油田提高采收率技术继续保持国际领先, 碳酸盐岩油气藏开发技术达到国际先进, 非常规和海域深水油气开发技术逐步缩小差距, 实现快速追赶等目标。图 3 表 4 参 40

关键词: 海外油气开发; 砂岩油田; 大型碳酸盐岩油田; 非常规油气; 海域深水油气; 技术进展; 发展方向

中图分类号: TE329

文献标识码: A

Technological progress and development directions of PetroChina overseas oil and gas field production

MU Longxin, CHEN Yaqiang, XU Anzhu, WANG Ruifeng

(PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

Abstract: This study reviews the development history of PetroChina's overseas oil and gas field development technologies, summarizes the characteristic technologies developed, and puts forward the development goals and technological development directions of overseas business to overcome the challenges met in overseas oil and gas production. In the course of PetroChina's overseas oil and gas field production practice of more than 20 years, a series of characteristic technologies suitable for overseas oil and gas fields have been created by combining the domestic mature oil and gas field production technologies with the features of overseas oil and gas reservoirs, represented by the technology for high-speed development and stabilizing oil production and controlling water rise for overseas sandstone oilfields, high efficiency development technology for large carbonate oil and gas reservoirs and foamy oil depletion development technology in use of horizontal wells for extra-heavy oil reservoirs. Based on in-depth analysis of the challenges faced by overseas oil and gas development and technological requirements, combined with the development trends of oil and gas development technologies in China and abroad, overseas oil and gas development technologies in the future are put forward, including artificial intelligence reservoir prediction and 3D geological modeling, secondary development and enhanced oil recovery(EOR) of overseas sandstone oilfields after high speed development, water and gas injection to improve oil recovery in overseas carbonate oil and gas reservoirs, economic and effective development of overseas unconventional oil and gas reservoirs, efficient development of marine deep-water oil and gas reservoirs. The following goals are expected to be achieved: keep the enhanced oil recovery (EOR) technology for high water-cut sandstone oilfield at international advanced level, and make the development technology for carbonate oil and gas reservoirs reach the international advanced level, and the development technologies for unconventional and marine deep-water oil and gas reservoirs catch up the level of international leading oil companies quickly.

Key words: overseas oil and gas field production; sandstone oilfield; large carbonate oilfield; unconventional oil and gas field; marine deep-water oil and gas; technological progress; development direction

引用: 穆龙新, 陈亚强, 许安著, 等. 中国石油海外油气田开发技术进展与发展方向[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 120-128.

MU Longxin, CHEN Yaqiang, XU Anzhu, et al. Technological progress and development directions of PetroChina overseas oil and gas field production[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(1): 120-128.

0 引言

中国石油天然气集团有限公司(以下简称中国石油)海外油气业务从1993年开始,经过20多年的艰苦创业,历经基础发展、规模发展、优化发展3个阶段,取得了辉煌的业绩,建成了中亚-俄罗斯、中东、非洲、美洲和亚太5大油气合作区,基本完成了全球油气业务战略布局^[1]。目前海外油气业务在全球32个国家共管理运行88个油气合作项目,其中包含58个油气开发项目,占比为2/3,年油气生产能力接近 2×10^8 t。在海外业务20多年的成功发展过程中,海外油气开发技术经历了国内技术集成应用—集成创新—研发创新的发展历程,逐步形成了以砂岩油田天然能量高速开发、碳酸盐岩油气田整体开发部署优化、超重油油藏水平井泡沫油冷采开发为代表的海外油气田开发特色技术系列^[1-2]。这一系列技术极大地提升了中国石油的技术核心竞争力,最大程度规避和降低了海外投资风险,取得了巨大的经济效益,为中国石油海外油气业务有质量有效益可持续发展提供了有力的技术支撑和保障。

随着海外业务内外部形势的不断变化,海外油气开发也面临一系列的问题与挑战:①大部分砂岩油田高速开发后进入开发中后期,面临“双高”(含水率大于80%,采出程度超过60%)挑战,需要研究海外高含水砂岩油田开发调整策略和二次开发技术系列^[1-3];②大型碳酸盐岩油田注水开发矛盾突出,持续稳产面临挑战,急需攻关大型碳酸盐岩油气藏高效注水注气提高采收率技术^[1-2, 4];③海外在建、待建项目主要是油砂、页岩气、深水、极地和LNG(液化天然气)等项目,属于非常规和新业务领域,技术难度大、要求高,国内又缺少可借鉴的成熟经验和成熟技术,需要创新研发非常规及深水油气经济高效开发技术^[1-2]。针对上述问题,本文在回顾中国石油海外油气田开发技术发展历程及特色开发技术基础上,结合国内外油气田开发技术发展趋势,提出未来海外业务的发展目标与技术发展方向。

1 发展历程

20多年来,伴随着海外油气业务的发展,海外油气开发技术经历了直接应用国内成熟开发技术、集成创新海外适应开发技术、研发创新海外特色开发技术3个阶段。在每个阶段,海外开发技术发展的特点和重点均不同。

①直接应用国内成熟开发技术阶段(1993—1996年)。此阶段由于海外业务刚起步,还没有跨国生产经营管理经验,海外油气开发主要集中在常规砂岩老油田综合挖潜领域,秘鲁6/7区塔拉拉、加拿大阿奇森和委内瑞拉卡莱高勒斯等老油田成功应用了国内砂岩油田成熟开发技术,实现了海外油田开发生产零的突破。

②集成创新海外适应开发技术阶段(1997—2008年)。此阶段随着苏丹1/2/4区、苏丹6区、苏丹3/7区、哈萨克斯坦阿克纠宾等一批代表性项目陆续投入开发,海外开发技术在集成应用国内成熟技术的基础上,开展集成创新,形成了一系列适应海外特点的油气开发技术。如海外砂岩油田天然能量高速开发技术、异常高压特低渗透碳酸盐岩油藏开发技术、带凝析气顶碳酸盐岩油田注水开发技术、薄层碳酸盐岩油田水平井注水开发技术、大型高凝油油藏高效开发技术等^[1-5]。

③研发创新海外特色开发技术阶段(2009年至今)。随着海外油气业务范围和种类逐步扩展至中东大型碳酸盐岩油田、中亚复杂碳酸盐岩气田、加拿大油砂和页岩气、澳大利亚煤层气、北极LNG及深水油气等多样化领域,通过持续攻关制约海外主营业务发展的关键瓶颈技术,创新形成了海外大型碳酸盐岩油藏整体开发部署优化技术、边底水碳酸盐岩气田群高效开发技术、带凝析气顶碳酸盐岩油藏气顶油环协同开发技术、超重油油藏整体水平井泡沫油冷采开发技术等特色技术^[1-2, 4, 6-7]。

2 发展现状与成效

在中国石油海外20多年的油气开发实践中,通过将国内成熟油气田开发技术与海外油气田特点相结合,创新形成了适应海外特点的系列特色开发技术(见表1),其中最具代表性的有海外砂岩油田天然能量高速开发技术、大型碳酸盐岩油藏整体开发部署优化技术、边底水碳酸盐岩气田群高效开发技术、超重油油藏整体水平井泡沫油冷采开发技术、页岩气水平井分段体积压裂技术、煤层气有利储集层预测与SIS水平井(从地面钻水平井贯穿煤层,趾端与另一口直井在煤层中对接)开发技术等。

2.1 海外砂岩油田天然能量高速开发技术

以苏丹项目为代表的海外砂岩油田具有天然能量充足、储集层物性与油品性质好、投资环境风险极高等特点^[1-3]。国内成熟砂岩油藏注水开发技术在海外受合同和投资风险的限制而难以应用^[8],针对该问题,在

表 1 中国石油海外油气开发技术发展现状 (据文献[1-7]修改)

油气领域	开发技术系列	技术内涵与应用
常规砂岩	海外砂岩老油田综合挖潜与开发调整技术	借鉴国内砂岩老油田综合挖潜成熟技术,推广应用于海外边际油田调整挖潜和提高采收率
	海外砂岩油田天然能量高速开发技术	形成有别于国内的海外砂岩油藏高速开发模式,针对海外砂岩油田制定高速开发技术政策,实现海外砂岩油田的高速、高效开发
碳酸盐岩	大型碳酸盐岩油藏整体开发部署优化技术	创立薄层生物碎屑灰岩油藏平行正对水平井整体注采井网开发模式、巨厚生物碎屑灰岩油藏大斜度水平井采油+直井注水的排状注采井网模式,创新形成“上产速度+投资规模+增量效益”的多目标协同优化技术
	边底水碳酸盐岩气田群高效开发技术	创新形成裂缝-孔隙型边底水碳酸盐岩气藏整体大斜度井快速建产技术和基于产品分成合同模式的气田群整体协同优化开发技术
	带凝析气顶碳酸盐岩油藏气顶油环协同开发技术	明确了不同开发方式下气顶油环协同开发技术政策,油环开发效果明显改善,原油产量递减明显减缓,同时气顶气保持稳定生产
非常规	超重油油藏整体水平井泡沫油冷采开发技术	系统揭示了泡沫驱油机理,创新了超重油油藏泡沫油水平井非常规溶解气驱冷采特征评价方法,形成了超重油油藏水平井开发优化设计技术
	特高含凝析油页岩气开发关键技术	形成页岩气水平井分段体积压裂技术,水平段长度为1 000~2 000 m,最多压裂22~26段
	煤层气有利储集层预测与SIS水平井开发技术	形成煤层气高产储集层预测技术,中煤阶煤层气田SIS水平井开发优化技术

深入研究高速开发机理的基础上,明确了天然水体大小、原油流动能力、地饱压差、储集层有效厚度、开发技术政策等影响天然能量高速开发的5大主控因素,提出了定量分析方法^[3],并创新建立了“充分利用天然能量高速开发,延迟注水,快速回收投资,规避投资风险”的海外砂岩油田高效开发模式和“稀井高产、大段合采、大压差生产”的技术政策^[3],同时确定了初始井网井距500~1 200 m,单井配产140~200 t/d,高

峰期采油速度2.0%~2.5%等主要开发指标(见表2)。根据苏丹油田各油藏渗透率及油品性质,建立流度矩阵表(见表3),划分原油类型,进而确定与原油类型相适应的井网密度,创新形成了充分利用天然能量的井网井距加密技术^[3,9-10]。海外砂岩油田天然能量高速开发技术的广泛应用不仅有力支撑了苏丹两个主力项目快速建产至1500×10⁴ t/a,而且也有力支撑了海外其他砂岩油田的高速高效开发。

表 2 苏丹地区3个主力油田开发数据表 (据文献[9]修改)

油田	投产年份	初始井距/m	高峰产量水平/(t·d ⁻¹)	高峰期采油速度/%	高峰稳产期/年	开发井数/口	采出程度/%	含水率/%
H油田	1999	1 130	7 900	2.3	2	103	19.9	92.3
P油田	2006	991	23 000	1.9	3	305	9.7	49.5
FN油田	2004	547	3 700	2.5	3	109	14.7	49.2

表 3 苏丹3个主力油田流度矩阵表 (据文献[9]修改)

渗透率/ 10 ⁻³ μm ²	不同原油黏度下的流度/(10 ⁻³ μm ² ·(mPa·s) ⁻¹)						
	5 mPa·s	10 mPa·s	15 mPa·s	20 mPa·s	30 mPa·s	40 mPa·s	50 mPa·s
800	160	80	53	40	27	20	16
1 000	200	100	67	50	33	25	20
1 500	300	150	100	75	50	38	30
2 000	400	200	133	100	67	50	40
2 500	500	250	167	125	83	63	50
3 000	600	300	200	150	100	75	60
3 500	700	350	233	175	117	88	70
4 000	800	400	267	200	133	100	80
5 000	1 000	500	333	250	167	125	100

注: 第1类原油; 第2类原油; 第3类原油

2.2 海外大型碳酸盐岩油藏整体开发部署优化技术

以伊拉克等大型生物碎屑灰岩油藏为研究对象,针对生物碎屑灰岩优质储集层预测难度大、非均质性极强影响开发效果等难题^[1,4,11-12],通过细分孔隙结构类型,建立微观孔喉类型与岩相关系^[2](见表4),实

现了基于微观孔渗关系的地震与沉积相双重控制的储集层三维建模,集成创新形成生物碎屑灰岩储集层多信息一体化相控建模技术^[1-2,4]。针对艾哈代布和哈法亚碳酸盐岩油田规模巨大、纵向上含油层系多、隔夹层发育、油藏差异大等特点,创立薄层生物碎屑灰岩油藏平行正对水平井整体注采井网开发模式(见图1)、巨厚生物碎屑灰岩油藏大斜度水平井采油+直井注水的排状注采井网模式^[1,4],形成主力油藏骨干井网与次主力油藏枝干井网空间相匹配的立体井网模式,解决了地下多层系井网空间结构匹配及地面和安保限制难题。针对如何实现油田快速整体建产和最佳经济效益之间的平衡,创新形成“上产速度+投资规模+增量效益”的多目标协同优化技术^[1,4],制定艾哈代布油田“水平井网一步到位,优势资源重点突破,两翼稳步展开”的部署策略,制定哈法亚油田“整体部署,分区分层系有效接替,早期高产层优先动用,中心突破,两边展开,最大化节约前期投资”的开发策略,利用最小

表 4 哈法亚油田 Mishrif 油藏孔隙结构与岩相分类特征表 (据文献[2]修改)

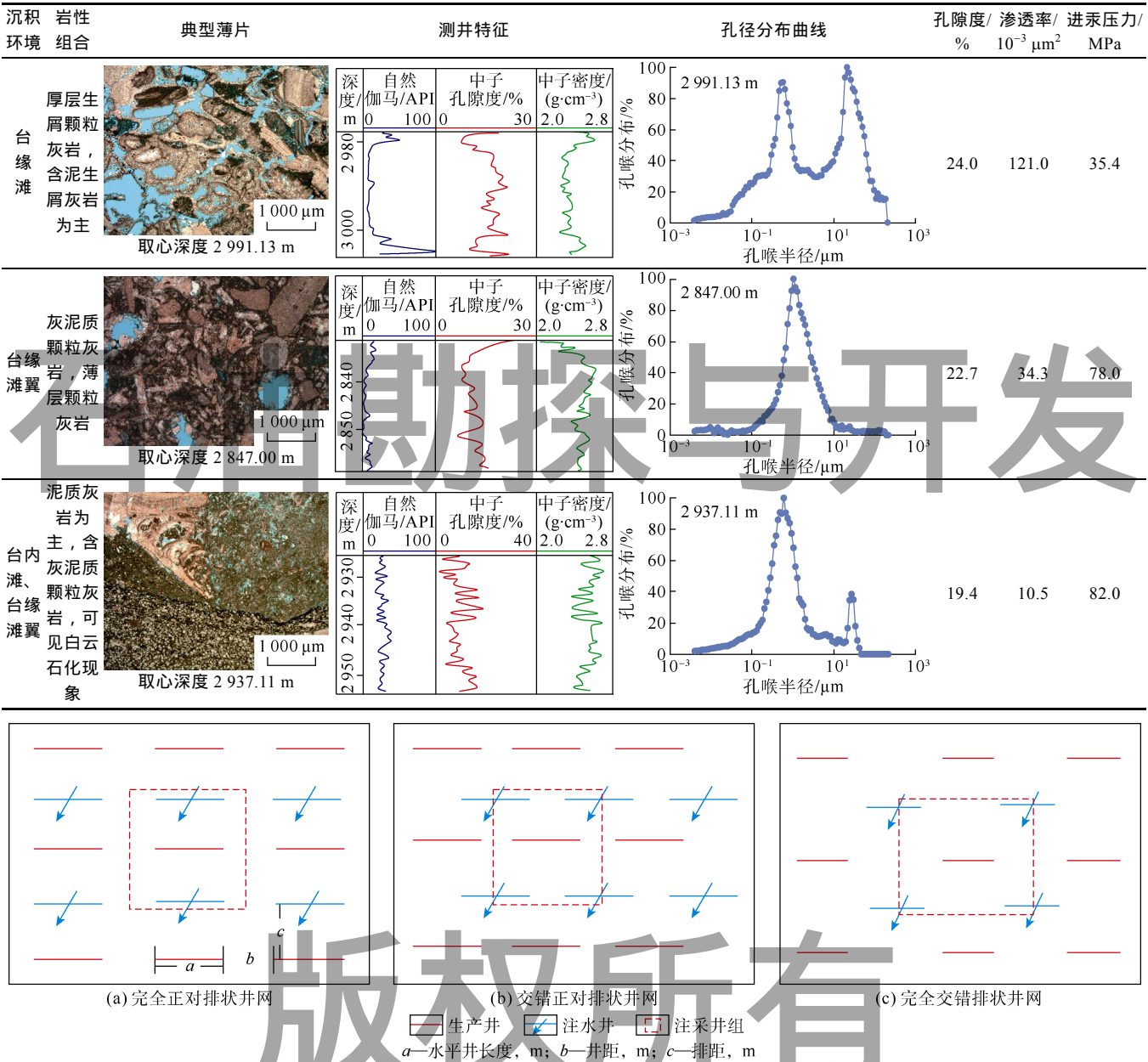


图 1 艾哈代布油田水平井整体注采 3 种井网开发模式 (据文献[1, 4]修改)

的投资在最短时间内建成初始商业产能, 实现油田自身滚动发展和经济效益最大化。这些技术的应用成功助推伊拉克艾哈代布项目提前 3 年实现 700×10^4 t/a 高峰产能, 内部收益率提高 3% 以上; 哈法亚项目快速建成年产 $2\,000\times 10^4$ t 原油生产能力, 百万吨产能建设投资约 21×10^8 元, 创造了中国石油海外项目百万吨产能建设投资规模的新低, 有力支撑了中东地区原油产量从 2010 年的 358×10^4 t/a 迅速增加至 2018 年的 $8\,000\times 10^4$ t/a。

2.3 海外边底水碳酸盐岩气田群高效开发技术

土库曼阿姆河右岸项目开发对象为复杂海相碳酸

盐岩气藏, 具有普遍发育裂缝、储集层非均质性强、气水关系复杂、部分气田水体较为活跃等特征, 气田井网部署、合理高效开发难度大^[1-2]; 项目气田数量众多、储量规模不一、地理位置分散、受产品分成合同条款等约束, 项目整体实现有序接替、稳定供气面临巨大挑战^[4]。针对上述问题, 从单个气田和气田群两个层面入手, 综合气藏构造、储集层、裂缝和水体等因素, 以财务净现值为目标函数建立多变量数学模型, 实现了井网类型与斜井段长度、避水高度及总井数等关键参数的同步优化, 创新形成了裂缝-孔隙型边底水气藏整体大斜度井优化开发技术^[1, 4]。同时, 在揭示单

个气田采气速度与稳产期末采出程度定量关系的基础上,建立了考虑产品分成合同模式的气田群整体优化开发模型,并采用改进的遗传算法进行求解,得到了最优的气田投产次序和产能规模,创新形成基于产品分成合同模式的气田群整体协同优化开发技术^[2,4]。边底水碳酸盐岩气田群高效开发技术已经全面应用于阿姆河右岸的产能建设中,实现了气田的高效开发,取得了良好的经济效益。与常规大斜度井网优化技术相比,主力别-皮气田产能规模提高 20%,钻井总进尺减少 13%,财务净现值增加 11%^[13]。整个阿姆河右岸项目建成天然气产能 $170 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,上产、稳产期 15 年,为实现中国能源进口多元化、保障能源安全、建设美丽中国做出了突出贡献。

2.4 海外超重油油藏整体水平井泡沫油冷采开发技术

委内瑞拉奥里诺科重油带中深层超重油具有“四高一低可流动”的特点:高密度(原油密度 $1.007 \sim 1.022 \text{ g/cm}^3$),高含沥青质(沥青质含量 $9\% \sim 24\%$),高含硫(硫化氢含量大于 3.5%),高含重金属(重金属含量大于 500 mg/L),地下原油黏度相对较低(黏度 $1\,000 \sim 10\,000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$)。冷采过程中原油可流动^[14],通过泡沫油驱油物理模拟实验,系统揭示了泡沫油驱油机理^[1,4,15-16]。泡沫油中含有大量分散微气泡,能够较长时间滞留在油相中,显著地增加流体的压缩性,提高弹性驱动能量,冷采过程中一定条件下能就地形成泡沫油流,具有较高冷采产能,且油藏压力下降较慢,采收率较高(可超过 12%)。采用多组分数值模拟方法,再现泡沫油中分散气泡的形成、破裂和聚并的动态过程(见图 2)及以泡点压力和拟泡点压力为分界点的三段式开发特征^[6,17](见图 3),建立泡沫油水平井初始产能预测公式和无因次 IPR(流入动态曲线)模型^[18],形成超重油油藏冷采开发技术政策界限确定和水平井

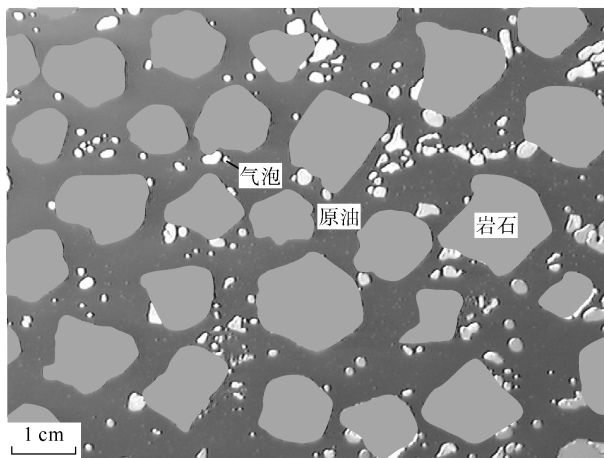


图 2 泡沫油微观驱油机理(据文献[15]修改)

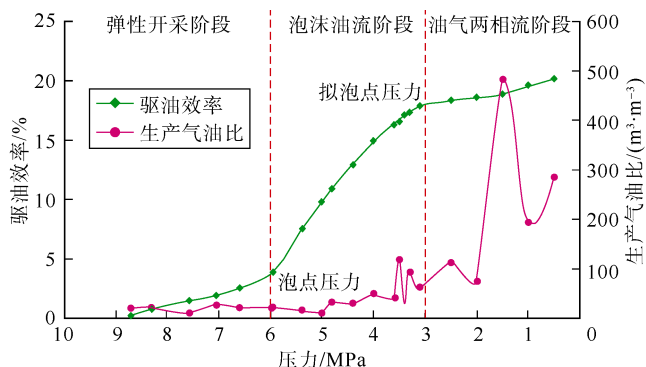


图 3 泡沫油驱替特征实验曲线(据文献[5]修改)

开发优化设计方法^[4,17],创新研发了一套超重油油藏整体丛式水平井冷采开发技术。应用这样一套技术实现了超重油经济高效开发,支撑了委内瑞拉 MPE3 项目 2016 年建成年产重油 $1\,000 \times 10^4 \text{ t}$ 规模,包含钻井平台 25 座,水平井 423 口,平均单井初产 100 t/d 以上,而且实现 $1\,000 \times 10^4 \text{ t/d}$ 油藏产能规模下持续效益开发:2016—2018 年,实现中方净利润 47×10^8 元,平均单位操作成本 130 元/t,取得了显著的经济效益。

3 面临的问题与挑战

中国石油海外油气业务计划未来作业产量规模保持在年产 $2 \times 10^8 \text{ t}$ 以上水平,其中碳酸盐岩约占 60% ,砂岩占 30% ,非常规占 10% ^[1]。但如何实现稳产、上产和经济有效开发仍面临着一系列问题和挑战:砂岩老油田稳油控水提高采收率难;碳酸盐岩油气田稳产难;非常规油气开发“甜点区”预测难;超重油和油砂经济有效开发难等。因此,急需创新研发一系列合适的开发技术,主要有:高含水老油田稳油控水及提高采收率技术;碳酸盐岩油藏注水/注气开发和提高采收率技术;复杂碳酸盐岩气藏高效开发关键技术;基岩潜山复杂油藏开发技术;煤层气、致密气和页岩气“甜点区”预测与经济高效开发技术;超重油油藏冷采稳产与改善开发效果技术;油砂 SAGD(蒸汽辅助重力泄油)高效开发技术等^[1]。

4 发展目标与技术

4.1 发展目标

未来海外油气开发业务发展重点是陆上常规砂岩、大型复杂碳酸盐岩、非常规和海域深水 4 大领域。重点是加快中东大型碳酸盐岩油藏上产和持续稳产,延缓中亚碳酸盐岩油藏递减,提高中亚、非洲高含水砂岩老油田采收率,推进不同类型复杂气田高效开发,加强非常规油气经济有效开发技术攻关,支撑海外油

气业务作业产量规模保持在年产 2×10^8 t 以上水平。据此,需要创新形成一系列满足海外油气开发需要的特色技术体系,其发展目标是^[1]:高含水砂岩油田提高采收率技术保持国际领先;碳酸盐岩油气藏开发技术达到国际先进水平;非常规和海域深水油气开发技术逐步缩小国际差距,实现快速追赶。

4.2 重点技术

4.2.1 人工智能储集层预测与三维地质建模技术

传统的储集层预测和三维地质建模技术已经难以满足海外追求高速高效和高精度地质研究的要求,目前人工智能技术的快速发展为未来高速高效和高精度储集层预测和三维地质建模提供了可能。在新的信息技术支撑下,利用大数据、文本解析、图像识别、知识图谱等学习型知识标注抽提方法^[19-20],可以高效准确地收集所需的各种资料;利用机器学习方法^[21]可以实现对特定地区数据、曲线和各种地质信息的快速处理;通过机器学习和深度学习等技术手段^[22]可以实现油气储集层测井、地震、地层对比和储集层的智能化解释与预测。经同类油藏的类比,实现储集层预测和三维地质建模的智能化评价、诊断、预测和优化,从而实现高速高效和高精度的储集层预测和三维地质建模。

4.2.2 海外砂岩油田高速开发后的二次开发与提高采收率技术

海外砂岩油田自中方收并购后,为了快速回收投资,普遍选择高速开发,目前总体进入高含水、高采出程度的“双高”开发后期阶段,面临着含水上升快、综合含水高、采出程度高、油藏压力保持水平低、递减大等生产问题^[1,3];平面上注采井网不完善、纵向上采用笼统注水方式,水驱储量控制程度和动用程度低^[3]。为了有效进行稳油控水并进一步提高采收率,满足砂岩油田继续高效开发需求,未来海外砂岩油田开发技术将重点向以下2个方面发展。

①人工注水与天然水驱协同开发技术。海外砂岩油田天然能量高速开发后,其剩余油分布特征与国内早期注水开发油田的剩余油分布具有很大差异,因此需揭示天然能量高速开发后剩余油分布规律并建立定量描述方法,探索天然能量强度评价方法,明确天然水驱和人工注水协同开发的调整策略和技术政策界限^[3],发展高速开发后剩余油定量描述技术和剩余油局部加密调整技术,创新形成一套天然能量与人工注水的协同开发技术。

②海外油田二次开发技术。借鉴国内老油田二次开发调整理念,建立以深化油藏地下认识、转化开发

模式、优化工艺技术、强化技术经济评价的海外砂岩老油田二次开发理念和方法^[3],立足老油田主要依靠天然能量或笼统注水的开发现状,将“总体控制、方式转换、井网重组、层系细分、堵水调驱、整体优化”的海外砂岩老油田开发调整工作思路具体化,形成海外砂岩老油田开发调整策略和二次开发技术系列。

4.2.3 海外碳酸盐岩油气藏注水注气提高采收率技术

伴随着海外油气田开发以砂岩油藏为主转为以碳酸盐岩油藏为主的发展趋势,海外碳酸盐岩油藏产量比例将超过60%^[1],碳酸盐岩油藏将成为未来海外开发业务的主要拓展领域和核心。以中东为代表的海外碳酸盐岩油藏,其地质、油藏特征与国内相比差异大,表现为规模巨大、厚度巨大、非均质性极强等特点^[1,4],早期规模建产任务已经完成,现在面临着上产和稳产的难题,因此研发适应海外碳酸盐岩油藏的注水注气提高采收率技术就成为未来的攻关方向,其发展重点有3个方面。

①碳酸盐岩油藏储集层非均质性定量评价和一体化三维建模技术。针对伊拉克大型生物碎屑灰岩油藏非均质性特征的定量描述与空间展布刻画难题,急需开展生物碎屑灰岩储集层非均质性成因分析与储集层微观孔隙结构评价,建立不同岩石类型的测井定量识别标准与方法^[1,4],开展高渗透层的成因与定量识别、隔夹层的定量识别与多尺度分布预测研究,明确高渗透层的空间展布规律,实现对伊拉克大型生物碎屑灰岩储集层非均质性的定量评价和一体化三维建模。

②生物碎屑灰岩油藏高效注水开发技术。未来海外碳酸盐岩油藏需要通过注水等方式保持较长时间的稳产,但薄层生物碎屑灰岩油藏水平井注水恢复压力与含水快速上升的矛盾日益突出,而巨厚生物碎屑灰岩油藏高效注水则是世界级难题。因此,未来急需研究薄层生物碎屑灰岩油藏水平井整体注水、稳油控水及综合调整技术,攻关巨厚生物碎屑灰岩油藏高效注水开发技术^[1,4,23-24],建立巨厚生物碎屑灰岩油藏与高渗透层相对应的注采模式和分区、分层注水开发技术政策^[1,4,25-27],确保有限水资源高效利用,分区、分块高效注水开发,从而提高巨厚生物碎屑灰岩油藏波及效率及注水开发效果。

③碳酸盐岩气顶油环复杂油气藏注水、注气开发调整和提高采收率技术。针对中亚地区碳酸盐岩气顶油环复杂油气藏历经多年油环注水和气顶采气开发,面临着地层压力水平低、储集层动用程度低、气顶油环协同开发难等问题,需进一步发展双重介质碳酸盐岩油藏三维建模和剩余油定量评价技术^[28],明确影响

注水、注气开发效果的主控因素,制定双重介质储集层注水、注气开发技术政策^[29],丰富碳酸盐岩气顶油环复杂油气藏开发中后期注水、注气开发调整技术和开发模式^[30]。同时研究气水交替、聚表剂驱油等提高采收率技术的适应性,创新形成一套碳酸盐岩气顶油环复杂油气藏开发中后期提高采收率技术。

4.2.4 海外非常规油气经济有效开发技术

全球非常规油气资源丰富,资源量占总资源量的1/3,新增储量占全球的45%左右^[31-32],已成为常规油气资源的重要补充,是各大油公司资源配置的重要领域。目前中国石油海外拥有重油、油砂、致密气、页岩气等众多非常规油气项目,且剩余可采储量超过 20×10^8 t,规模巨大,但缺乏低成本高效开发技术,从而使海外非常规油气开发处于亏损或停滞状态,因此,急需创新攻关海外非常规油气经济有效开发技术,其发展重点有3个方面。

①超重油油藏冷采稳产优化和提高采收率技术。随着委内瑞拉超重油油田水平井持续冷采,地层压力下降、产量递减、气油比上升,开发效果逐渐变差,冷采潜力逐渐减小,冷采稳产面临较大挑战,需深化研究水平井冷采下的剩余油分布规律和定量描述技术,制定激励泡沫油驱的开发技术政策,发展超重油油藏二次泡沫油非热采保压开采和提高单井产量技术^[1],创新形成一套以冷采加密调整和保压开发技术为主的超重油油藏冷采稳产优化技术^[6]。同时积极研究冷采后热采提高采收率技术,尤其是新一代蒸汽驱和火烧油层技术^[7],重视注非热介质提高采收率技术的研究,尤其是注混相气体、非凝析气体、聚合物、化学剂等介质提高采收率技术的研究^[7],创新发展一套超重油油藏冷采后期经济有效提高采收率技术。

②改善油砂SAGD效果和提高采收率经济有效开发技术。目前中国石油在加拿大油砂项目应用的是SAGD开发技术,其成本高、效益差,如何提高SAGD开发效果和探索提高采收率的经济有效开发技术是业界公认的难题,主要攻关方向包括:研究多元热流体(N_2 、 CO_2 、蒸汽)辅助SAGD开发技术和注过热蒸汽SAGD开发技术^[7,33],以大幅提高SAGD开发效果;研究新一代火烧油层技术^[7,34],以大幅提高油砂采收率。

③致密油气甜点预测和水平井高精度智能分段压裂技术。包括页岩油气、煤层气等在内的非常规致密油气具有大面积连续分布、源储一体、油气受层系控制、资源规模巨大、没有明显油气水圈闭边界等特点,寻找“甜点区段”、水平井和压裂改造是开发该类资源

的主要手段,是典型的“人工油气藏”^[35-36]。因此需要研发“甜点区段”多参数综合预测技术,并以油气“甜点区段”为单元,通过压裂、注入与采出一体化方式,重建应力场、温度场、化学场、渗流场,形成“人造高渗区、重构渗流场”^[35-36],研发低成本致密气水平井高精度智能分段压裂技术等^[37-38]。

4.2.5 海域深水油气藏高效开发配套技术

全球海洋油气资源丰富,总体勘探开发程度低。目前全球海域剩余油气可采储量 $1\ 840\times 10^8$ t,待发现资源量 $1\ 293\times 10^8$ t,分别占全球的43.7%和42.2%^[31-32]。深水、超深水是热点领域,海洋是各大国际石油公司资源配置的主战场。而中国石油海域深水油气藏开发技术和经验严重不足,面对不同于陆相的深水油气藏更复杂的地质情况、更少的资料、更大的井距和更难的海洋工程,急需发展一系列的深水、超深水低成本开发配套技术,主要有深水—超深水重力流储集层表征和预测技术、大井距剩余油分布定量预测技术、深水油气藏与海工一体化布井优化技术、深水油气藏高效开发技术政策、深水油气田开发调整及提高采收率技术、深水油气田开发策略与优化技术、海上自动化钻完井及深水采油工艺等技术^[39-40],从而使中国石油海外深水油气开发技术尽快赶上世界先进水平。

5 结语

回顾过去,中国石油海外油气业务在20多年的发展历程中实现了从无到有、从小到大、由弱变强的跨越式发展,海外油气开发技术也走过了从国内技术集成应用、集成创新到研发创新并形成一系列特色技术的发展历程,形成了以砂岩油田天然能量高速开发、碳酸盐岩油气田整体开发部署优化、超重油油藏水平井泡沫油冷采开发为代表的海外油气田开发特色技术系列,极大地提升了中国石油的核心技术竞争力,为海外油气业务实现跨越式发展提供了有力的技术保障。

展望未来,海外油气业务面临的合作环境更加复杂多变,海外业务实现优质高效发展存在更大挑战,因此,需要充分发挥科技进步对海外业务发展的重要支撑作用。未来海外油气开发业务需针对短板和瓶颈技术进行持续科研攻关,在高含水砂岩油田稳油控水及提高采收率技术方面保持国际领先,碳酸盐岩油气藏注水注气提高采收率技术方面达到国际先进,非常规和海域深水油气开发技术方面实现快速追赶,为中国石油海外油气业务实现高质量发展提供强有力的技术支撑和保障。

致谢：本文在撰写过程中参考了中国石油勘探开发研究院和中国石油国际勘探开发公司从事海外技术支持和生产管理人员 20 多年来的大量研究成果，凝结了许多专家的智慧 and 辛劳。在此向范子菲、郭睿、陈和平、吴向红、夏朝辉、赵伦、冯明生、董俊昌、刘尚奇、郭春秋及未能在此一一列出的各位专家谨致谢忱！

参考文献：

- [1] 穆龙新. 海外油气勘探开发(中国石油科技进展丛书)[M]. 北京：石油工业出版社, 2019.
MU Longxin. Overseas oil and gas exploration and development (CNPC Science and Technology Progress Series)[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2019.
- [2] 穆龙新. 海外油气勘探开发特色技术及应用[M]. 北京：石油工业出版社, 2017.
MU Longxin. Overseas oil and gas exploration and development characteristic technology and application[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2017.
- [3] 吴向红. 海外砂岩油田高速开发理论与实践[M]. 北京：石油工业出版社, 2018.
WU Xianghong. High-speed development theory and practice of overseas sandstone oilfields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [4] 范子菲. 海外碳酸盐岩油气田开发理论与技术[M]. 北京：石油工业出版社, 2018.
FAN Zifei. Development theory and technology of overseas carbonate oil and gas fields[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [5] 穆龙新, 吴向红, 黄奇志. 高凝油油藏开发理论与技术[M]. 北京：石油工业出版社, 2015.
MU Longxin, WU Xianghong, HUANG Qizhi. Development theory and technology of high pour point oil reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [6] 陈和平. 超重油油藏冷采开发理论与技术[M]. 北京：石油工业出版社, 2018.
CHEN Heping. Theory and technology of extra-heavy oil reservoir development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [7] 穆龙新. 重油和油砂开发技术新进展[M]. 北京：石油工业出版社, 2012.
MU Longxin. New progress of heavy oil and oil sand development technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [8] 穆龙新, 范子菲, 许安著. 海外油气田开发特点、模式与对策[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 690-697.
MU Longxin, FAN Zifei, XU Anzhu. Development characteristics, models and strategies for overseas oil and gas fields[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 690-697.
- [9] 穆龙新, 王瑞峰, 吴向红. 苏丹地区砂岩油藏衰竭式开发特征及影响因素[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(3): 347-351.
MU Longxin, WANG Ruifeng, WU Xianghong. Development features and affecting factors of natural depletion of sandstone reservoirs in Sudan[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(3): 347-351.
- [10] 李香玲. 苏丹 1/2/4 区块状底水油藏高效开发技术[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(2): 121-127.
LI Xiangling. Effective development technologies of blocky bottom water reservoirs in Block 1/2/4, Sudan[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Natural Science Edition), 2010, 32(2): 121-127.
- [11] 邓亚, 郭睿, 田中元, 等. 碳酸盐岩储集层隔夹层地质特征及成因：以伊拉克西古尔纳油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(1): 136-144.
DENG Ya, GUO Rui, TIAN Zhongyuan, et al. Geologic features and genesis of the barriers and intercalations in carbonates: A case study of the Cretaceous Mishrif Formation, West Qurna oil field, Iraq[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(1): 136-144.
- [12] 王君, 郭睿, 赵丽敏, 等. 颗粒滩储集层地质特征及主控因素：以伊拉克哈法亚油田白垩系 Mishrif 组为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 367-377.
WANG Jun, GUO Rui, ZHAO Limin, et al. Geological features of grain bank reservoirs and the main controlling factors: A case study on Cretaceous Mishrif Formation, Halfaya Oilfield, Iraq[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(3): 367-377.
- [13] 吕功训. 阿姆河右岸盐下碳酸盐岩大型气田勘探与开发[M]. 北京：科学出版社, 2013.
LYU Gongxun. Exploration and development of large gas field of pre-salt carbonate along right bank of the Amu Darya River[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [14] 穆龙新. 委内瑞拉奥里诺科重油带开发现状与特点[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(3): 338-343.
MU Longxin. Development actualities and characteristics of the Orinoco heavy oil belt, Venezuela[J]. Petroleum Exploration and Development, 2010, 37(3): 338-343.
- [15] 陈亚强, 穆龙新, 常毓文, 等. 泡沫型重油微观驱油机理[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(19): 138-143.
CHEN Yaqiang, MU Longxin, CHANG Yuwen, et al. Microcosmic drive mechanism of foamy heavy oil[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2015, 41(19): 138-143.
- [16] 刘尚奇, 孙希梅, 李松林. 委内瑞拉 MPE-3 区块超重油冷采过程中泡沫油开采机理[J]. 特种油气藏, 2011, 18(4): 102-104.
LIU Shangqi, SUN Ximei, LI Songlin. Foamy oil recovery mechanism in cold production process of super heavy oil in Venezuela MPE-3 block[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(4): 102-104.
- [17] 李星民, 陈和平, 韩彬, 等. 超重油油藏水平井冷采加密优化研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(1): 118-120.
LI Xingmin, CHEN Heping, HAN Bin, et al. Research on cold recovery and infilling optimization of horizontal well in ultra-viscous oil reservoir[J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2015, 22(1): 118-120.
- [18] 陈亚强, 穆龙新, 张建英, 等. 泡沫型重油油藏水平井流入动态[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 363-366.
CHEN Yaqiang, MU Longxin, ZHANG Jianying, et al. Horizontal well inflow performance relationship in foamy heavy oil reservoirs[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 363-366.
- [19] 刘坤, 谭营, 何新贵. 基于粒子群优化的过程神经网络学习算法[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 238-244.
LIU Kun, TAN Ying, HE Xingui. Particle swarm optimization based

- learning algorithm[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2011, 47(2): 238-244.
- [20] BERGH F V D, ENGELBRECHT A P. A study of particle swarm optimization particle trajectories[J]. *Information Sciences*, 2006, 176(8): 937-971.
- [21] WU T, XIE K, SONG G, et al. Numerical learning method for process neural network[R]. Wuhan: Advances in Neural Networks - ISSN 2009, 6th International Symposium on Neural Networks, 2009.
- [22] 杨婷婷. 基于人工神经网络的油田开发指标预测模型及算法研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- YANG Tingting. Research on model and algorithm for prediction of oilfield development indexes based on artificial neural network[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [23] AL-DABBAS M, AL-JASSIM J, AL-JUMAILY S. Depositional environments and porosity distribution in regressive limestone reservoirs of the Mishrif Formation, Southern Iraq[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2010, 3(1): 67-78.
- [24] LI B, NAJEH H, LANTZ J, et al. Detecting thief zones in carbonate reservoirs by integrating borehole images with dynamic measurements[R]. SPE 116286-MS, 2008.
- [25] CHAWATHE A, DOLAN J, CULLEN R, et al. Innovative enhancement of an existing peripheral waterflood in a large carbonate reservoir in the Middle East[R]. SPE 102419-MS, 2006.
- [26] 宋新民, 李勇. 中东碳酸盐岩油藏注水开发思路与对策[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 679-689.
- SONG Xinmin, LI Yong. Optimum development options and strategies for water injection development of carbonate reservoirs in the Middle East[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 679-689.
- [27] 张琪, 李勇, 李保柱, 等. 礁滩相碳酸盐岩油藏贼层识别方法及开发技术对策: 以鲁迈拉油田 Mishrif 油藏为例[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(2): 1-6.
- ZHANG Qi, LI Yong, LI Baozhu, et al. Identification methods and development strategy study of thief zone in reef-bank carbonate reservoirs: A case study of the Mishrif reservoir in Rumaila oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(2): 1-6.
- [28] 范子菲, 李孔绸, 李建新, 等. 基于流动单元的碳酸盐岩油藏剩余油分布规律[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(5): 578-584.
- FAN Zifei, LI Kongchou, LI Jianxin, et al. A study on remaining oil distribution in a carbonate oil reservoir based on reservoir flow units[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(5): 578-584.
- [29] 宋珩, 傅秀娟, 范海亮, 等. 带气顶裂缝性碳酸盐岩油藏开发特征及技术政策[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(6): 756-761.
- SONG Heng, FU Xiujian, FAN Hailiang, et al. Development of complex carbonate reservoir with condensate gas cap[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(6): 756-761.
- [30] 赵文琪, 赵伦, 王晓冬, 等. 弱挥发性碳酸盐岩油藏原油相态特征及注水开发对策[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(2): 281-286.
- ZHAO Wenqi, ZHAO Lun, WANG Xiaodong, et al. Phase behavior characteristics and water-flooding development technical policy of weakly volatile oil in carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(2): 281-286.
- [31] 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.
- [32] 童晓光. 跨国油气勘探开发研究论文集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- TONG Xiaoguang. A collection of research papers on multinational oil and gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [33] YUAN J, MCFARLANE R. Evaluation of steam circulation strategies for SAGD startup[J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 2011, 50(1): 20-32.
- [34] 卢竟蔓, 张艳梅, 刘银东, 等. 加拿大油砂开发及利用技术现状[J]. *石化技术与应用*, 2014, 32(5): 452-456.
- LU Jingman, ZHANG Yanmei, LIU Yindong, et al. Current situation of oil sands development and utilization in Canada[J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2014, 32(5): 452-456.
- [35] 邹才能, 丁云宏, 卢拥军, 等. “人工油气藏”理论、技术及实践[J]. *石油勘探与开发*, 2017, 44(1): 144-154.
- ZOU Caineng, DING Yunhong, LU Yongjun, et al. Concept, technology and practice of “man-made reservoirs”[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(1): 144-154.
- [36] 邹才能, 杨智, 何东博, 等. 常规-非常规天然气理论、技术及前景[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(4): 575-587.
- ZOU Caineng, YANG Zhi, HE Dongbo, et al. Theory, technology and prospects of conventional and unconventional natural gas[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2018, 45(4): 575-587.
- [37] 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.
- [38] SIEMINSK A, MAISONNEUVE C. Status and outlook for shale gas and tight oil development in the U. S.[R]. Houston, TX: Platts-North American Crude Marketing Conference, 2013.
- [39] 周守为, 李清平, 朱海山, 等. 海洋能源勘探开发技术现状与展望[J]. *中国工程科学*, 2016, 18(2): 19-31.
- ZHOU Shouwei, LI Qingping, ZHU Haishan, et al. The current state and future of offshore energy exploration and development technology[J]. *Chinese Academy of Engineering*, 2016, 18(2): 19-31.
- [40] 吕建中, 郭晓霞, 杨金华. 深水油气勘探开发技术发展现状与趋势[J]. *石油钻采工艺*, 2015, 37(1): 13-18.
- LYU Jianzhong, GUO Xiaoxia, YANG Jinhua. Development status and trend of deepwater oil-gas exploration and development technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2015, 37(1): 13-18.

第一作者简介: 穆龙新(1960-), 男, 陕西汉中, 博士, 中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事开发地质和油气田开发工程方面的研究和管理工作。地址: 北京市海淀区学院路20号, 中国石油勘探开发研究院院办, 邮政编码: 100083。E-mail: mlx@petrochina.com.cn

收稿日期: 2019-08-12 修回日期: 2019-11-10

(编辑 唐俊伟)