

中国石油非常规油气发展现状、挑战与关注问题

李国欣¹ 朱如凯²

(1 中国石油勘探与生产分公司; 2 中国石油勘探开发研究院)

摘 要: 进入 21 世纪, 全球非常规油气发现进入活跃期, 致密油 / 页岩油产量快速增长, 页岩气产量持续增长, 致密气、煤层气产量稳定, 天然气水合物试采取得突破。近年来, 中国非常规油气勘探开发取得显著进展, 页岩气、致密油、致密气产量快速增长, 页岩油勘探开发上升到国家战略高度。中国石油天然气集团有限公司 (以下简称中国石油) 矿权区内致密油、页岩油资源丰富, 近期在 11 个区块相继获得勘探发现和突破, 初步建成了多个规模产能区; 在鄂尔多斯盆地开展了中低成熟度页岩油原位转化现场先导试验, 陆相页岩油革命正在积极组织推进。鉴于中国当前油气对外依存度居高不下、需求旺盛的实际情况和陆相沉积复杂的地质条件, 非常规油气的规模效益开发仍面临地质评价、“甜点”预测、钻完井与采油气工艺技术、经济评价和管理等方面的一系列挑战。为实现中国石油非常规油气资源效益勘探开发, 需重点关注和处理好全生命周期管理、一体化运作、大数据应用、合理的配产政策、技术与成本、市场化等关键问题, 以期推动非常规油气产业高质量发展, 保障国家能源安全。

关键词: 非常规油气; 页岩油; 致密油; 地质工程一体化

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

Progress, challenges and key issues of unconventional oil and gas development of CNPC

Li Guoxin¹, Zhu Rukai²

(1 PetroChina Exploration & Production Company; 2 PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development)

Abstract: Since the 21st century, discoveries of global unconventional oil and gas have entered an active period. The production of tight oil/shale oil has increased rapidly, the shale gas has continued to grow, the tight gas and Coal Bed Methane (CBM) have been stable and breakthroughs have been obtained in the early production tests of natural gas hydrate (NGH). In recent years, significant progress has been made in exploration and development of unconventional oil and gas in China. The production of shale gas, tight oil and tight gas have been increasing rapidly, the exploration and development of shale oil has risen to the national strategic level. The tight oil and shale oil resources in the mining-right blocks of China National Petroleum Corporation (CNPC) are abundant. Recently, exploration discoveries and breakthroughs have been made in 11 blocks, and several large-scale productivity blocks have been preliminarily established. Pilot tests of in-situ conversion of shale oil with medium-low maturity have been carried out in the Ordos Basin, and the continental shale oil revolution is being actively promoted. Currently, the external dependence of oil and gas is high in China, and the demand is strong. However, due to the complicated geological conditions of continental sediments, large-scale benefit development of unconventional oil and gas is still facing a series of challenges in geological evaluation, sweet spot prediction, drilling and completion, oil and gas production technologies, economic evaluation and management. In order to achieve the benefit exploration and development of unconventional oil and gas resources of CNPC, key issues should be focused and well treated, such as whole life cycle management, integration operation, big data application, appropriate production allocation strategy, technology and cost, marketization and so on, to promote the high-quality development of unconventional oil and gas industry and ensure the national energy security.

Key words: unconventional oil and gas, shale oil, tight oil, geology-engineering integration

0 引言

非常规石油主要包括致密油、页岩油、油页岩

油; 非常规气主要包括页岩气、致密气、煤层气、天然气水合物等^[1]。“非常规油气革命”得益于理论、技术、管理的三大创新驱动。

基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项“陆相中高成熟度页岩油勘探开发关键技术研究与应用”(2019E-26)。

第一作者简介: 李国欣 (1971-), 男, 山西忻州人, 硕士, 2005 年毕业于中国石油大学 (华东), 高级工程师, 现主要从事油气勘探管理和综合地质研究工作。地址: 北京市东城区东直门北大街 9 号 B 座中国石油勘探与生产分公司, 邮政编码: 100007。E-mail: guoxinli@petrochina.com.cn

收稿日期: 2020-01-07; 修改日期: 2020-02-10

进入21世纪,全球非常规油气发现进入活跃期。2018年,全球石油产量为 $44.5 \times 10^8 \text{t}$,非常规占14%左右;天然气产量为 $3.97 \times 10^{12} \text{m}^3$,非常规占25%左右^[2-3],非常规油气比例呈增长态势。

据美国能源信息署(EIA)2013年评价^[4],在全球46个国家104个盆地170多套页岩层系中,致密油、页岩油技术可采资源量为 $4188 \times 10^8 \text{bbl}$ ($473 \times 10^8 \text{t}$),主要分布在俄罗斯、美国、中国、阿根廷、加拿大等国家。美国2018年致密油/页岩油产量为 $3.29 \times 10^8 \text{t}$,助推美国原油产量达历史第二高峰并持续增长^[2,5]。页岩气革命持续,2018年全球页岩气产量为 $6703 \times 10^8 \text{m}^3$ (美国 $6072 \times 10^8 \text{m}^3$,加拿大 $480 \times 10^8 \text{m}^3$,中国 $108 \times 10^8 \text{m}^3$,阿根廷 $43 \times 10^8 \text{m}^3$),其中,美国页岩气产量增长势头强劲,发现了最大的Marcellus页岩气田和最老的Utica页岩气田,促使其天然气产量突破万亿立方米($10479 \times 10^8 \text{m}^3$),达到历史新高。全球致密气产量进入稳定发展期,2018年全球致密气产量为 $2218 \times 10^8 \text{m}^3$,加拿大、中国、美国、阿尔及利亚为致密气主要生产国,产量占全球的83%,西加拿大盆地Montney气田群是近年致密气产量增长最快的区域;全球致密气剩余可采储量为 $8.5 \times 10^{12} \text{m}^3$,主要分布于加拿大、中国、阿尔及利亚等国。世界埋深小于2000m的煤层气资源量约为 $258 \times 10^{12} \text{m}^3$,主要分布于俄罗斯、加拿大、中国、美国、澳大利亚等。近年来,美国和加拿大煤层气产量呈递减趋势:美国于1985年开始煤层气商业开发,2008年达产量高峰 $557 \times 10^8 \text{m}^3$,2018年降至 $260 \times 10^8 \text{m}^3$;加拿大于2002年开始煤层气商业开发,2010年达峰值产量 $94 \times 10^8 \text{m}^3$,2018年产

量为 $50 \times 10^8 \text{m}^3$;澳大利亚于2004年开始煤层气商业开发,2016年产量为 $320 \times 10^8 \text{m}^3$,2018年产量为 $410 \times 10^8 \text{m}^3$,成为全球最大的煤层气生产国^[2-3]。

中国油气资源以陆相为主,“陆相生油理论”是具有中国特色的石油地质理论,在中国石油工业发展中起到了关键性指导作用。中国陆上油气勘探开发历经60余年不懈努力,秉承“源控论”找油理念,遵循立足主力生烃凹陷、寻找供烃范围内有利常规油气田目标的原则,在东部中、新生界陆上及海域断陷盆地,中西部古、中生界克拉通、前陆盆地发现了一大批油气田^[6-7]。目前,全国含油气盆地总体进入勘探中—中后期,随着勘探程度不断增高,以构造—岩性为主的常规油气藏发现的概率越来越低,非常规油气正成为重要的资源类型。

本文简要介绍了中国石油非常规油气的勘探开发现状,重点阐述了中国陆相致密油、页岩油规模发育的地质条件、资源潜力及近年来中国石油在重点探区致密油、页岩油勘探开发方面取得的主要进展,分析了发展面临的主要挑战,并提出了实现中国石油非常规油气资源效益勘探开发需关注的问题,以期对探索适应中国非常规资源效益勘探开发之路、保障国家能源安全有所作为。

1 中国石油非常规油气勘探开发现状

中国石油非常规油气勘探开发经过十几年发展,历经概念提出与技术探索、工业化试验与试生产、规模发现与开发上产3个阶段,理论、技术、管理的进步推动了页岩气、致密油/页岩油产量快速增长(图1),尤其近几年取得了显著进展,已进入工业化实施阶段。

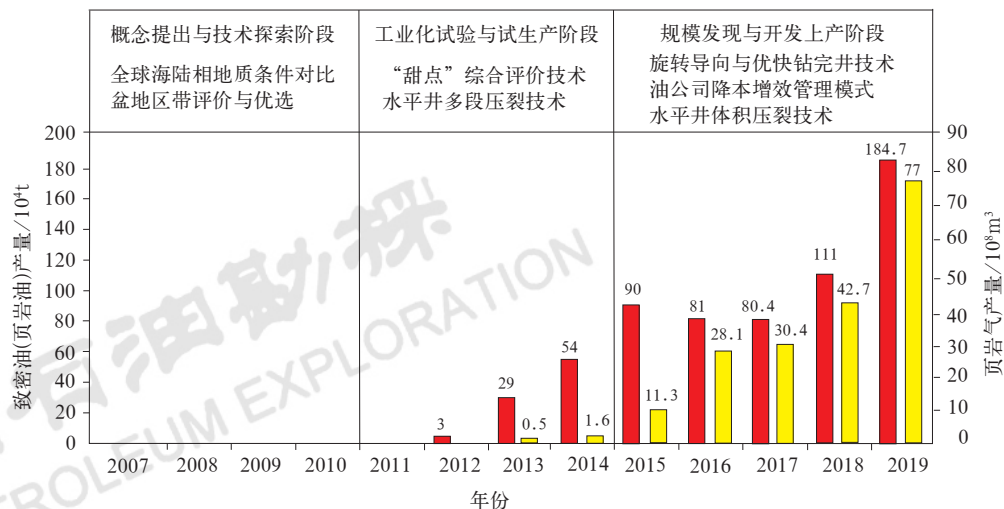


图1 中国石油致密油/页岩油、页岩气发展历程图

Fig.1 Development history of tight oil/shale oil and shale gas of CNPC

中国石油目前已探明致密油/页岩油地质储量 $7.37 \times 10^8 \text{t}$ ，剩余控制+预测储量为 $18.3 \times 10^8 \text{t}$ ，建成产能 $400 \times 10^4 \text{t/a}$ 以上。

中国石油目前已形成了鄂尔多斯盆地和四川盆地两大致密气区^[1,8]；截至2018年底，长庆油田已探明致密气储量 $4.38 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，可采储量为 $2.31 \times 10^{12} \text{m}^3$ ；落实了苏里格、盆地东部两个万亿立方米级大气区和盆地南部两个规模储量接替区；2018年盆地致密气产量为 $235 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2019年产量为 $256 \times 10^8 \text{m}^3$ 。西南油气田分公司在四川盆地三叠系须家河组已探明储量 $6921.82 \times 10^8 \text{m}^3$ ，三级储量 $1.39 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，2018年产量为 $6.58 \times 10^8 \text{m}^3$ ^[8]；近期侏罗系沙溪庙组致密气勘探开发取得新进展，多口探评井获得高产，证实秋林地区5套砂组含气，川中地区有望成为下一步增储上产的重要现实领域。

经过十余年发展，中国石油已建成四川长宁—威远和昭通国家级页岩气示范区^[1,9]。近年来，中国石油通过加大三维地震部署和平台式工厂化水平井实施力度，加强“甜点”区优选评价，2019年在长宁—威远和太阳区块分别新增探明页岩气地质储量 $7409 \times 10^8 \text{m}^3$ ，累计探明 $1.06 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，形成了川南万亿立方米级页岩气大气区，目前日产气量已超 $3000 \times 10^4 \text{m}^3$ ，建成年产气能力超 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2019年页岩气产量达 $80 \times 10^8 \text{m}^3$ 以上。2019年页岩气勘探评价有两大特点：一是深层页岩气实现了由点到面的突破，泸203井压裂段长1022m，测试井口压力为50.3MPa，测试日产气 $137.9 \times 10^4 \text{m}^3$ ，估算最终采收量(EUR)达 $2.5 \times 10^8 \text{m}^3$ ；钻成了中国迄今最深的页岩气水平井足202H2-2井，完钻井深为6366m，垂深为3970~4065m，水平段长2053m，水平井箱体穿越层

位为龙马溪组优质层段和五峰组，压裂34段，单段5~7簇射孔，簇间距为8~13m，总簇数为172簇^[10]，目前正在放喷排液。二是浅层页岩气首次取得突破，发现了中国第一个埋藏深度1000m左右、压力系数1.0~1.3的浅层页岩气田——太阳气田，并针对储层埋深浅、构造形变复杂、表层石灰岩溶洞发育和水平井水垂比大的特点，形成了经济实用的浅层页岩气关键技术。

中国石油煤层气钻井4700余口，探明储量 $5092 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2019年产量为 $19.1 \times 10^8 \text{m}^3$ ，形成了鄂东、沁水和筠连3个中高阶煤层气生产基地。

中国南海海域水合物资源丰富，中国石油作为国家重大工程项目海域水合物试采工程总承包商，全程参与项目前期研究、工程设计及现场组织实施，基本掌握了天然气水合物勘探开发的理论和工程技术。

2 中国陆相致密油、页岩油资源潜力

经典石油地质学理论认为，石油生成于一定的温度范围，原始有机质沉积以后，首先经过复杂的生物化学作用和聚合缩合作用形成干酪根，干酪根在达到一定的埋藏深度后，在温度的作用下发生热降解作用，逐渐生成石油。烃源岩生成的油，若排出运移至常规储层即为常规油藏，运移到致密储层则成为致密油，它们都属于源外型石油资源；若滞留在烃源岩中则成为页岩油，含有干酪根，未经过运移或运移距离很短，属于源内型石油资源。《致密油地质评价方法》(GB/T 34906—2017)和《页岩油地质评价方法》也对致密油和页岩油进行了定义。针对不同类型的石油资源，需要应用不同的开发技术。按页岩层系热成熟度，陆相页岩油可分为中高成熟度、中低成熟度两种资源类型^[11-14](图2)。

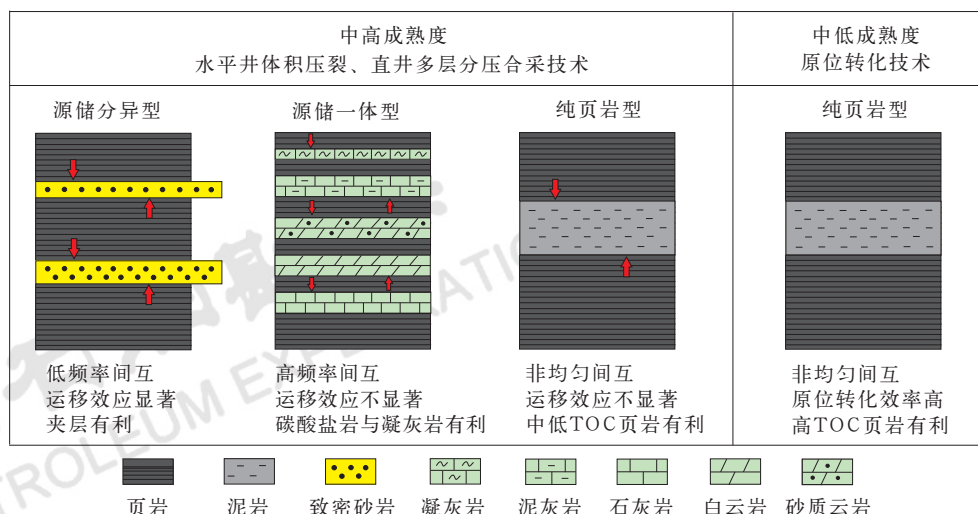


图2 中高成熟度和中低成熟度页岩油类型及特点

Fig.2 Types and characteristics of shale oil with medium-high maturity and medium-low maturity

中国陆相含油气盆地面积达 $310 \times 10^4 \text{km}^2$ ，富有机质页岩层系分布范围广，有机质丰度高、厚度大，主要处于生油窗内，为常规石油资源提供了丰富油源，尚有大量的石油滞留于烃源岩页岩层系内。陆相湖盆发育淡水与咸化两类典型烃源岩环境，均发育高总有机碳含量 (TOC) 的页岩、泥岩。淡水湖盆环境烃源岩 TOC 为 3%~32%， S_1 (残留烃) 为 0.2~7.1mg/g， S_2 (裂解烃) 为 0.3~46.1mg/g；咸化湖盆环境烃源岩 TOC 为 2%~14%， S_1 为 0.01~3mg/g， S_2 为 0.06~110mg/g，为致密油、页岩油规模富集提供了良好的烃源条件。陆相页岩层系广泛发育陆源碎屑岩、混积岩、湖相碳酸盐岩、(沉) 凝灰岩储集体，陆源沉积为主的湖盆在半深湖—深湖环境发育砂质碎屑流、滑塌体、浊流等储集体，内源沉积为主的湖盆在浅湖区发育石灰岩、白云岩等储层，在半深湖—深湖区发育混积岩、凝灰岩、浊积岩等储层，为致密

油、页岩油富集提供了良好的聚集空间。生烃模拟实验揭示烃源岩生烃可增压 50~60MPa，源储压差可达 7~8MPa，生烃增压是致密油、页岩油聚集的主要动力^[14-16]。

美国能源信息署 (EIA, 2013) 估算中国页岩油风险技术可采资源量约为 $322 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $45 \times 10^8 \text{t}$)，其中，松辽盆地青山口组 $114.6 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $16 \times 10^8 \text{t}$)，准噶尔盆地二叠系芦草沟组 $54.4 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $7.6 \times 10^8 \text{t}$)、三叠系 $67 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $9.38 \times 10^8 \text{t}$)，塔里木盆地奥陶系 $15.5 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $2.17 \times 10^8 \text{t}$)、三叠系 $64.7 \times 10^8 \text{bbl}$ (约 $9.06 \times 10^8 \text{t}$)，该评价没有包括潜力巨大的鄂尔多斯盆地和渤海湾盆地^[4]。近年来，美国联邦地质调查局 (USGS) 也对中国一些典型含油气盆地页岩油、致密油技术可采资源量开展了评估。总体看，不同机构对国内典型盆地页岩油资源评价结果差异较大 (表 1)。

表 1 USGS 和 EIA 对中国典型盆地致密油 / 页岩油资源的评价结果

Table 1 Evaluation results of tight oil/shale oil resources in typical basins in China by USGS and EIA

盆地	地层	油			气		评估部门与时间
		类型	技术可采资源量 / 10^8bbl	技术可采资源量 / 10^8t	技术可采资源量 / 10^9ft^3	技术可采资源量 / 10^8m^3	
准噶尔盆地	芦草沟组	致密油	7.64	1.07	3465	981.2	USGS, 2016 ^[17]
	芦草沟组	页岩油	54.40	7.60			EIA, 2013 ^[4]
	三叠系	页岩油	67.00	9.38			EIA, 2013 ^[4]
三塘湖盆地	芦草沟组	致密油	2.41	0.34	72	20.4	USGS, 2018 ^[18]
松辽盆地	青山口组	页岩油	114.60	16.00			EIA, 2013 ^[4]
	青山口组	页岩油	21.31	2.98	569	160.1	USGS, 2017 ^[19]
	嫩江组	页岩油	11.92	1.67	318	89.5	USGS, 2017 ^[19]
渤海湾盆地	沙河街组	页岩油	20.36	2.85	2964	839.4	USGS, 2017 ^[20]
四川盆地	侏罗系	致密油	12.27	1.72	983	278.3	USGS, 2018 ^[21]
塔里木盆地	奥陶系	页岩油	13.73	1.92	959	268.8	USGS, 2018 ^[22]
	奥陶系	页岩油	15.50	2.17			EIA, 2013 ^[4]
	三叠系	页岩油	64.70	9.06			EIA, 2013 ^[4]

近年来，中国自然资源部 (国土资源部)、各石油公司均启动了致密油 / 页岩油资源评价工作 (表 2)。总体看，中国致密油 / 页岩油资源丰富，但潜力到底有多大仍不明确，应在国家层面尽快开展全国范围内的致密油 / 页岩油资源评价工作，准确掌握致密油 / 页岩油资源潜力及其分布特点，优选有利区。

3 中国石油致密油和页岩油重点探区勘探开发进展

中国陆相致密油和页岩油主要发育在准噶尔盆地二叠系 (芦草沟组、风城组、平地泉组)、鄂尔多斯盆地延长组 7 段、松辽盆地白垩系青山口组与嫩江

表2 中国致密油/页岩油资源量评价历程简表
Table 2 Summary of evaluation history of tight oil/shale oil resources in China

类型	资料来源	评价时间	资源量
致密油	中华人民共和国国土资源部	2015 年	地质资源量为 $146.6 \times 10^8 \text{t}$ ，技术可采资源量为 $14.54 \times 10^8 \text{t}$
	中国石油第四轮资评	2016 年	中国石油探区地质资源量为 $125.8 \times 10^8 \text{t}$ ，技术可采资源量为 $12.34 \times 10^8 \text{t}$
	国家“973”项目	2018 年	地质资源量为 $178.2 \times 10^8 \text{t}$ ，技术可采资源量为 $17.65 \times 10^8 \text{t}$
页岩油	李玉喜、罗承先	2011 年	初步估计页岩油可采资源量在 $100 \times 10^8 \text{t}$ 以上
	中华人民共和国国土资源部油气资源战略研究中心	2013 年	页岩油地质资源量为 $402.67 \times 10^8 \text{t}$ ，技术可采资源量为 $37.06 \times 10^8 \text{t}$
	中华人民共和国国土资源部	2013 年	全国页岩油技术可采资源量为 $153 \times 10^8 \text{t}$
	邹才能等	2013 年	初步预测页岩油可采资源量为 $(30 \sim 60) \times 10^8 \text{t}$
	中国石化	2012 年	中国石化探区页岩油地质资源量为 $85 \times 10^8 \text{t}$
	中国石化	2014 年	全国页岩油技术可采资源量为 $204 \times 10^8 \text{t}$
	中国石油	“十三五”	中国石油探区页岩油地质资源量为 $201.6 \times 10^8 \text{t}$
	中国石油	2016 年	全国页岩油技术可采资源量为 $145 \times 10^8 \text{t}$
	杜金虎等	2019 年	初步估算中国陆相中高成熟度页岩油地质资源量约 $200 \times 10^8 \text{t}$
	赵文智等	2020 年	中低成熟度页岩油原位转化技术可采资源量为 $(700 \sim 900) \times 10^8 \text{t}$ ；中等油价（60~65 美元/bbl）下的经济可采量为 $(150 \sim 200) \times 10^8 \text{t}$ ；中高成熟度页岩油地质资源量约为 $100 \times 10^8 \text{t}$

组、渤海湾盆地沙河街组—孔店组、四川盆地侏罗系、柴达木盆地古近系—新近系、三塘湖盆地二叠系（芦草沟组、条湖组）、江汉盆地古近系等^[14-16, 23-36]。自“十二五”以来，中国石油进行了十余年陆相致密油、页岩油的艰苦探索与不懈研究，加大了勘探开发力度，近期在 11 个区块的勘探相继获得了发现和突破（表 3）。主要开展了以下工作：一是加强基础研究，制订了《致密油地质评价方法》《页岩油地质评价方法》等国家标准，加强选区评价和“甜点”区/段分布预测研究和工程技术攻关，在地质认识、地球物理技术和工程技术等方面取得了一系列进展^[25-38]。二是加强重点地区攻关，在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地和松辽盆地等开展了致密油、中高成熟度页岩油的工业化试验，部署了一批重点井，取全取准了第一手资料，证实了地质认识的正确性与工程技术攻关的有效性，初步建成了多个规模产能区，在鄂尔多斯盆地发现 10 亿吨级庆城大油田，4000m 水平井试验成功，吉木萨尔页岩油国家级示范区获批设立。三是开展了中低成熟度页岩油原位改质试验、鄂尔多斯盆地长 7 段及松辽盆地嫩江组选区的评价研究，并在鄂尔多斯盆地延长组 7 段开展了现场先导试验，陆相页岩革命正在积极组织推进^[11, 25]。

3.1 准噶尔盆地

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷面积 1278km^2 ，二叠系芦草沟组页岩油发育上、下“甜点”段，有利区资源量为 $11.12 \times 10^8 \text{t}$ ，其中：一类区资源量为 $2.98 \times 10^8 \text{t}$ ，二类区资源量为 $6.2 \times 10^8 \text{t}$ ，三类区资源量为 $1.95 \times 10^8 \text{t}$ 。吉木萨尔已完钻页岩油井 178 口，其中水平井 93 口、直井 85 口。2017 年上“甜点”提交探明地质储量 $2546 \times 10^4 \text{t}$ ，探明储量区内已钻井 39 口，其中水平井 31 口，投产 27 口，开井 20 口，日产油 263.7t。探明储量区外已钻井 139 口，其中水平井 62 口，投产 29 口，开井 27 口，日产油 331.8t。2019 年开始规模建产^[28-32, 36, 38]。

玛湖凹陷和石树沟凹陷页岩油勘探开发也已取得重要进展^[31]。玛南下斜坡玛湖 28 井钻遇云质粉细砂岩 125m，3mm 油嘴最高日产油 36.5m^3 ，有利面积为 850km^2 ；玛北云质页岩油有利勘探面积为 1143km^2 ，2019 年新钻系统取心井玛页 1 井，钻遇白云岩、云质细粒沉积岩“甜点”储层 217.4m，含油显示良好，二叠系风城组以云质泥岩为主，夹薄层泥质白云岩，试油井段 4579~4852m，采用复合压裂和逆混合工艺相结合，分 9 级套管压裂，压裂后退液求产，2.5mm 油嘴放喷求产，日产油 20.21m^3 ，日排液 43.00m^3 。石树沟凹陷

表 3 中国 石油 勘探 区 致密 油 / 页 岩 油 主 要 地 质 参 数 及 勘 探 进 展 统 计 表
Table 3 Main geological parameters and statistics of exploration results of tight oil/shale oil in prospect areas of PetroChina

盆地 / 凹陷 / 地区	层位	松辽	渤海湾				鄂尔多斯	四川	酒西	柴达木	三塘湖	准噶尔	
			辽河	沧东	歧口	束鹿						吉木萨尔	玛湖
烃源性	青山口组		沙河街组、孔店组				长 7 段	侏罗系	白垩系	古近系—新近系	条湖组、芦草沟组	芦草沟组	风城组
	TOC/%	0.7~8.7	2.0~21.0	0.13~12.9	1.09~2.37	1.08~4.0	3.0~28.0	0.5~4.27	1.0~2.5	0.7~1.2	2.0~8.0	1.08~26.66	0.42~4.01
	R_o /%	0.5~2.0	0.32~0.7	0.6~1.2	0.7~1.2	0.3~0.5	0.6~1.1	0.9~1.5	0.5~0.8	0.6~1.8	0.5~1.3	0.48~1.12	0.59~1.14
	S_1+S_2 /($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	4.3~23.66	1.24~38.2	22.6	22.0	9.56~17	7.44~36.43	1.0~7.0	6.25~9.1	0.69~3.7	11.0~28.0	6.0~176	2.0~26.0
岩性	氯仿沥青“A”/%	0.2~1.0	0.2~2.0	0.1~3.65	0.13~0.84	0.12~0.18	0.6~1.2	0.3~1.0	0.08~0.2	0.3~0.5	0.2~0.7	0.3~1.5	0.1~0.5
	岩石类型	泥页岩、粉砂岩	泥页岩、粉砂岩、碳酸盐岩、混积岩				泥页岩、粉砂岩	泥页岩、碳酸盐岩	云质页岩、白云岩	混积岩、泥页岩、碳酸盐岩	泥页岩、沉凝灰岩、混积岩	泥页岩、粉砂岩、混积岩	泥页岩、粉砂岩、云质岩、混积岩
	厚度/m	50.0~200.0	30.0~200.0	300.0	100.0~500.0	20.0~160.0	10.0~40.0	15.0~50.0	50.0~200.0	30.0~200.0	20.0~100.0	20.0~260.0	25.0~175.0
	孔隙度/%	3.4~16.0	1.2~11.4	0.28~13.2	2.4~12.2	0.5~2.5	6.0~12.0	0.35~13.65	2.0~7.0	1.0~15.2	1.1~17.9	5.5~19.84	2.0~13.0
物性	渗透率/mD	0.01~1.0	0.05~2.14	0.03~10	0.56~1.59	0.5~1.6	0.03~0.5	0.01~0.49	0.05~5.0	0.02~40.2	0.001~30.1	0.0004~1.95	0.003~47.9
	原油黏度/($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	20.0~200.0	5.0~30.0	8.0~30.0	15.0~31.0	5.0	6.1~6.3	5.0~20.0	10.0~200.0	2.91~30.13	8.15~545.7	55.0~125.0	25.7
	原油密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	0.78~0.87	0.82~0.86	0.85~0.90	0.85~0.89	0.75~0.82	0.8~0.85	0.76~0.87	0.82~0.87	0.72~0.8	0.85~0.92	0.87~0.93	0.83~0.94
	气油比/($\text{m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	50.0~120.0	50.0~130.0	50.0~130.0	200.0	200.0	60.0~120.0	179.0	182.0	87.0	50.0	17.0	82.0~110.0
脆性	电性(含油饱和度)/%	40.0~80.0	60.0~85.0				65.0~85.0	52.0~65.0	54.0~63.0	50.0~65.0	66.0~92.0	70.0~98.0	
	脆性指数/%	37.0~58.0	40.0~80.0	55.0~80.0	70.0	38.0~50.0	40.0~55.0	63.4	71.0~90.0	40.0~50.0	40.0~55.0	45.0~55.0	35.0~42.0
	泊松比	0.25~0.35	0.2~0.35	0.27~0.3	0.15~0.4	0.35	0.2~0.3		0.21~0.30	0.25~0.35	0.25~0.3	0.2~0.3	0.26~0.29
	压力系数	1.2~1.58	1.3~1.9	0.96~1.33	0.95~1.17	0.9~1.4	0.75~0.85	1.23~1.72	1.3~1.4	1.4~1.5	1.0~1.2	1.1~1.3	>1.5
应力	两向应力差/MPa	<10.0		6.0~25.0	1.0~2.0	6.0~9.0	5.0~8.0		20.0~30.0			<6.0	7.0~8.0
	埋深/m	1800~2400	1500~5000				1500~3000	1500~2500	3500~6000	3500~4600	1500~4500	1800~4500	
	有利面积/ 10^4km^2	0.8~1.0	0.6~1.0				7.0~8.0	2.33	0.15	0.56	0.5~1.0	0.6~1.0	
	资源量/ 10^4t	54.6	4.65	6.8	5.7	4.2	60.5	20.9	0.3	5.9~8.57	3.9	25.1	25.1
勘探进展		致密油建成百万吨产能,页岩油多井获工业油流,古页岩油平1井已见油	雷家、高升地区获探明储量,累计产量大于 $80 \times 10^4 \text{t}$	GDI1701H和GD 1702H水平井持续稳产,实现有效动用	优选20口老井重新试油,效果显著	19口井见显示,3口井获工业油流	2019年发现10亿吨级大庆城油田,针对长7 ₃ 的城页1井、城页2井试油获得高产	探明储量7000 $\times 10^4 \text{t}$ 以上,生产原油400 $\times 10^4 \text{t}$ 以上	多井获工业油流	英西地区泥灰岩勘探取得突破,发现了规模储量,控制量+预测储量1 $\times 10^4 \text{t}$ 以上	已探明储量4000多万吨,年产能达25.6 $\times 10^4 \text{t}$,芦页1井有望获得突破	已形成10亿吨级页岩油储量规模区,2019年开始规模建产	风南2、风南7等多井获工业油流,玛页1井获突破

石树 011H 井日产油 10.03t, 展示了良好的勘探前景。

3.2 鄂尔多斯盆地

在鄂尔多斯盆地长 7_{1+2} 亚段发现了 14 个有利区带, 持续开展以水平井 + 体积压裂、工厂化作业为主的工程技术攻关, 开辟先导试验区, 24 口水平井试油平均日产初产油超百吨, 目前平均日产油 6.01t, 稳产能力好; 2014 年新增探明储量 1×10^8 t, 2019 年发现 10 亿吨级庆城大油田, 探明含油面积 782.73km², 新增探明地质储量 3.58×10^8 t, 预测含油面积 1573km², 预测地质储量 6.93×10^8 t。2018—2019 年, 示范区共完钻水平井 159 口, 平均水平段长 1715m^[25,36]; 至 2019 年底投产 117 口井, 当年产油 26.3×10^4 t。

近期评价发现, 湖盆中心纯页岩油连续分布, “甜点”区受岩相、沉积微相、有机相及热演化程度综合控制, 混合水体积压裂改造试验完成试油井 29 口, 获工业油流井 13 口, 其中宁 148 井获 24.23t/d 高产油流, 但产量难稳定^[25]。2019 年, 针对长 7_3 页岩层段部署的风险探井城页 1 和城页 2 水平井测试分别获得百吨高产, 目前正在进行试采, 效果值得期待。

3.3 渤海湾盆地

在渤海湾盆地, 页岩油勘探在多个凹陷取得了重要突破。大港油田在沧东凹陷孔 2 段 15 口直井获得工业油流, 分布面积为 400km², 页岩油资源总量约 6.8×10^8 t; 官东 1701H 和官东 1702H 水平井于 2018 年 9 月投产, 500 天分别累计产油 7882t 和 10066t, 持续稳产, 初步形成亿吨级增储战场; 歧口凹陷沙一下亚段老井复查初见成效, 优选 20 口老井重新试油, 效果显著^[26-27]。

辽河油田在辽西凹陷雷家地区探明储量 1342×10^4 t, 累计产油 78.8×10^4 t, 近期部署预探井 14 口, 在杜三油层新增探明储量 681.82×10^4 t, 在高升地区新增探明储量 4711×10^4 t^[35]。

华北油田束鹿凹陷束探 1H 井、束探 2X 井和束探 3 井试采效果好, 晋 97 井、晋 116X 井和晋 98X 井等多口井获得工业油流, 初步估算井控石油地质储量约 4000×10^4 t, 展示了页岩油良好的勘探前景。

冀东油田高柳地区高柳断层以南地区的沙一段、拾场次洼斜坡带 Es_3^3 底— Es_3^5 段页岩油也具有一定勘探前景^[14]。

3.4 松辽盆地

松辽盆地致密油主要分布在扶余油层, 勘探面

积为 1.5×10^4 km², 资源规模为 22.44×10^8 t, 目前三级储量为 9.41×10^8 t。2018 年产量为 24.7×10^4 t; 目前乾安等试验区地质工程一体化正规模发展, 提交三级地质储量为 2.2×10^8 t, 近期将在亿吨级储量区建成百万吨产能^[14-15,34]。

页岩油资源主要赋存在青山口组一段中上部和青山口组二段中下部三角洲前缘砂岩型与砂泥互层型地层中, 砂岩型分布在龙虎泡齐家地区, 砂泥互层型分布在齐家到古龙西侧。纯页岩型主要是青山口组一段, 主要分布在齐家—古龙到三肇地区, 通过开展纯页岩段地质评价和现场试验, 多口井获工业油流^[34], 于 2019 年完成的古页 1 井 5 层 15 簇压裂, 用液量为 10827m³、支撑剂用量为 406m³, 测试已经获油。吉林油田 2018—2019 年完钻探井 18 口, 10 口获得工业油流, 其中黑 197 井直井日产油 20.04t; 针对乾安—大安纯页岩型完钻 6 口探井, 初步圈定两个“甜点”区, “甜点”区资源量超 10.3×10^8 t。

3.5 三塘湖盆地

马朗凹陷二叠系条湖组致密油基本实现了规模开发, 有利区面积为 486km², 资源规模为 1.43×10^8 t, 探明储量 3698×10^4 t, 2018 年产油 25.9×10^4 t, 累计产油 49.5×10^4 t, 2019 年预计产量 25×10^4 t。盆地内芦苇沟组有利区面积为 598km², 资源规模为 4.43×10^8 t, 目前钻遇芦苇沟组探井 54 口, 其中 51 口见油气显示, 2019 年芦页 1 井风险探井钻遇芦苇沟组 2 段多套凝灰岩有利储层, 有望获得突破^[33]。

4 中国石油致密油和页岩油发展面临的主要挑战

与常规石油勘探开发相比, 中国致密油和页岩油勘探开发尚面临着地质评价、“甜点”预测、钻完井与采油工艺技术、经济评价和管理等一系列挑战, 必须不断进行创新研究和工业实践, 才能实现大规模工业化、商业化开发。

4.1 陆相沉积的复杂性

中国陆相沉积盆地具有致密油、页岩油发展的资源基础, 但与美国典型的以古生代中—高成熟度海相致密油、页岩油相比有特殊性, 中国陆相致密油、页岩油主要发育于中、新生代湖盆背景(表 4、图 3), 沉积环境变化剧烈, 不同盆地间矿物组成差异大, 岩心水平方向层理、裂缝发育, 纵向薄层较多、分布不均。

表4 中国陆相致密油、页岩油与美国海相页岩油对比简表 (据文献[13], 有修改)
Table 4 Brief comparison between continental tight oil/shale oil in China and marine shale oil in the US
(modified after [13])

对比因素		美国	中国
地质条件	盆地类型	稳定克拉通边缘盆地、前陆盆地 (二叠盆地、威利斯顿盆地)	大型坳陷盆地、断陷盆地 (鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、松辽盆地、渤海湾盆地等)
	岩性	相对简单, 海相碳酸盐岩、混积岩、粉砂岩、页岩、泥岩、白垩、硅质岩	复杂, 非均质性强, 粉—细砂岩、湖相碳酸盐岩、泥岩、页岩、混积岩、(沉)凝灰岩
	沉积相	海相 (稳定, 厚度大)	陆相 (相变快, 厚度薄)
	成熟度	成熟—高成熟	中低成熟度为主, 局部高成熟
	流体性质	黏度低	高蜡油为主, 黏度高
工程技术	主体技术	成熟	正在探索

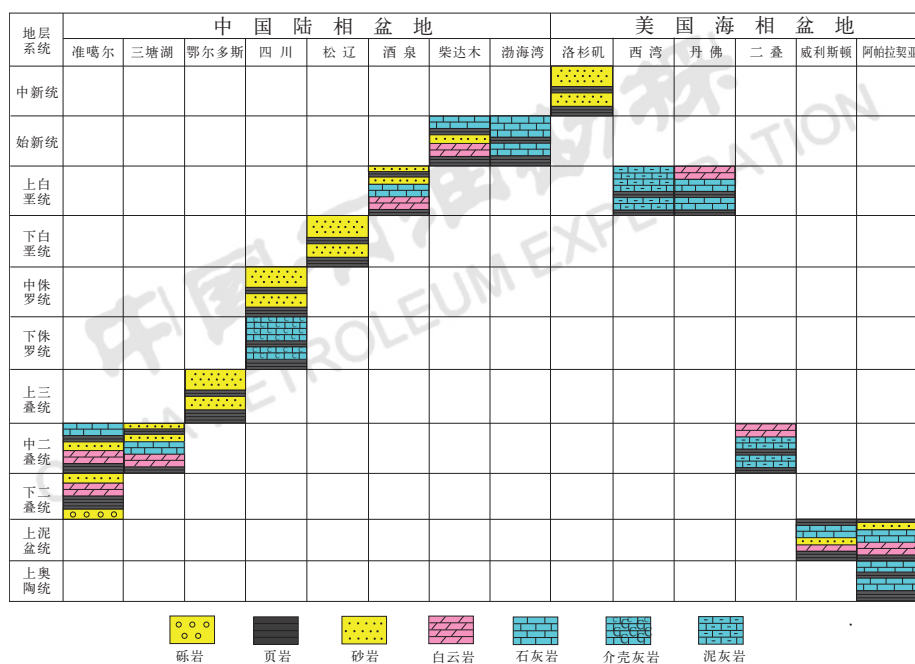


图3 中国陆相与美国海相页岩油和致密油发育层位与储层岩性对比图

Fig.3 Comparison of development formations and reservoir lithology between continental shale oil/tight oil in China with marine shale oil in the US

4.2 工程技术的不适应性

与美国的海相致密油 / 页岩油地质条件相对优越, 沉积环境、地质构造稳定, 分布面积广、厚度大, 热成熟度高、埋深适中, 页岩层系压力高、含油饱和度高、气油比高、流动性较好等特点不同, 中国不同盆地、不同类型陆相页岩层系具有热演化程度偏低、黏土含量高、脆性指数低、压力系数低、驱动能力不足等特点。如鄂尔多斯盆地长7段页岩层系的 R_o 值主要为0.8%~1.2%, T_{max} 主要分布于440~460℃;

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩层系 R_o 值为0.52%~1.03%, T_{max} 为440~455℃, 其中, R_o 值小于0.80%的样品占53%, R_o 值大于0.80%的样品占47%, 整体处于低成熟—成熟演化阶段; 渤海湾盆地沙河街组页岩层系以I型干酪根为主, 有机质成熟度较低, R_o 值一般为0.45%~0.94%, 绝大部分页岩层系的 R_o 值大于0.76%, 其中沙三下亚段含有部分II型干酪根, R_o 值为0.70%~0.93%。由于热成熟度偏低, 一方面导致陆相页岩层系气油比偏低, 石油的密度与黏度偏高, 以常压—低压为主, 地层能

量不足,可流动性较差;另一方面导致储层矿物热稳定性偏差,塑性矿物含量偏高,影响了储层的可压裂性。如准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组油质偏重,地面原油密度为 $0.888\sim 0.918\text{g}/\text{cm}^3$, $50\text{ }^\circ\text{C}$ 时黏度为 $73\sim 300\text{mPa}\cdot\text{s}$,平均含蜡量为 9.04% ,平均凝固点为 $13.49\text{ }^\circ\text{C}$,属于中—重质原油,流动性较差;鄂尔多斯盆地长7段地层原油密度为 $0.717\sim 0.760\text{g}/\text{cm}^3$,黏度为 $0.89\sim 1.21\text{mPa}\cdot\text{s}$,尽管呈现出低密度、低黏度的轻质原油特征,但地层能量不足,压力系数主体处于 $0.7\sim 1.0$,黏土矿物中伊/蒙混层、蒙脱石比例偏高,影响了储层改造中人造裂缝的形成与展布,造成产量快速递减,应加强陆相非常规油气递减规律研究。

另外,陆相页岩层系储层纵向上薄层较多、储层分布不均匀,裂缝纵向延伸难以突破隔层,难以达到预期改造效果,不同的地质特征给工程技术带来不同的挑战,水平井开发模式是否具有普适性也是必须考虑的问题,应尽快开展包括直井/大斜度井分层压裂多层合采等开发方式的攻关研究与现场试验。

针对陆相页岩层系特点的关键技术系列包括:“甜点”地震预测技术、高端成像测井装备与技术、人工改造油气藏有效渗流能力的描述和评价技术、一趟钻技术与薄层长水平井精确成井技术(包括旋转导向技术)、显著降低储层伤害的压裂液体系、保持长期高导流能力的高效多分段压裂技术、非水压裂技术、多井“井工厂”作业技术、连续管技术装备、地质—工程一体化综合提速系统、高效化学驱油压裂液体系、高效气体增能压裂和吞吐驱油技术、显著改善储层流动性降黏压裂技术、低成本压裂材料、重复压裂技术、直井“井工厂”开发技术等。必须加快核心技术、重大装备的研发与应用,尽快攻关形成陆相致密油/页岩油配套技术系列。

4.3 经济效益的巨大挑战

致密油/页岩油开发具有投资规模大、投资回收期长等特点,在技术攻关中和大规模工业化量产之前,花费是常规石油勘探开发成本的数倍甚至数十倍,前期投入巨大。美国的致密油/页岩油开发得益于雄厚的资本投入、配套的税收优惠政策、灵活的投融资环境和竞争的市场机制,用了 $5\sim 6$ 年的时间将成本降至与常规石油差不多的水平^[39]。如美国页岩气完全成本,2018年为 $0.38\text{元}/\text{m}^3$,与2011年相比降低了 62% ;勘探开发成本,2017年为 $0.09\text{元}/\text{m}^3$,与2011年相比降低了 69% 。

中国的“地面”与“地下”情况更复杂,目前在市场竞争与管理机制、财税优惠与国家补贴政策方面还有待完善,缺乏有效的投融资环境和鼓励竞争的市场化环境,成本发展曲线目前难以估算。根据中国石油企业行业标准《油田开发方案经济评价方法》要求的现金流折现法——内部收益率计算方法初步测算,在油田已开展致密油/页岩油开发试验区的现有技术水平 and 油价 $55\sim 60\text{美元}/\text{bbl}$ 情况下,中国陆相页岩油、致密油内部收益率在 4.0% 左右。从准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油目前开发试验效益分析来看,其内部收益率整体在 4% 以下。其中,I类“甜点”区,在 3000m 以浅,高产期日产油 $33\sim 76\text{t}$,平均为 50t ,第一年单井平均日产油 30t ,内部收益率为 4% ,规模化实施建产成本降低之后,预计内部收益率可以达到 6.97% ;在 3000m 以深,内部收益率为 3.2% 。II类“甜点”区目前投产的水平井,相同条件下,第一年平均日产油 $22\sim 24\text{t}$,内部收益率为 2.57% 。鄂尔多斯盆地长7段页岩油,在固定油价 $55\text{美元}/\text{bbl}$ 情况下,开发试验显示内部收益率为 4.26% 。渤海湾盆地大港沧东凹陷孔2段页岩油,在目前技术水平和油价 $60\text{美元}/\text{bbl}$ 情况下,内部收益率为 4.6% 。由此可以看出,要实现致密油和页岩油整体规模开发,还需大幅降低成本,提高单井产量,且需要政策支持。

5 非常规油气资源效益勘探开发需要关注的问题

非常规油气资源的时代已经或正在到来,唯有创新才能适应新形势、才有新出路,为实现中国非常规油气资源的效益勘探开发,保障国家能源安全,需重点关注以下问题。

(1) 积极推进全生命周期管理模式。传统油气行业接力式的勘探开发阶段划分、总体开发方案(ODP)编制理念及审批制度等,已经不适应于非常规油气快速反应、及时调整的需求。非常规油气资源需要非常规理念,全生命周期管理是非常规油气资源高效动用最有效的组织模式,包括了初期勘探、精细评价、试验优选、方案确定、计划实施和执行评估调整等阶段,各阶段有明确的任务和目标,不可逾越,不可脱节,无缝衔接,浑然一体,只有完整地完上—阶段的各项任务,才可以转入下一阶段工作。非常规油气资源更应注重前期研究,前期研究的认识程度是决定项目最终收益最关键的要素,通过前期精细的研究和充足的投入(其实所占比例并不高),才能保障后期更好地开发效果。项目前期要允许有一定的风险率,项目

的推进过程,就是认识积累和学习曲线不断迭代进步成熟的过程,随着项目的推进,认识不断积累,技术逐步成熟,风险得到控制,最终保证项目的收益率。

(2) 必须采用一体化模式组织运作。一体化运作既是一种工作组织模式,也是一种管理理念,非常规油气一体化运作包括勘探开发、地质工程、地面地下、科研生产、生产经营、设计监督等多个方面,是全生命周期管理最有效的载体和手段,可以大大提高效率效益,须长期遵循,扎实推进。围绕非常规油气“掌控资源、建设产能和拿到产量”三大任务,各专业需要改变过去传统的“铁路警察各管一段”的工作组织方式,必须顶层设计、通盘考虑,各专业换位思考/相互补台,最终实现效益最大化。

例如加拿大都沃内致密油项目,在设计初期就考虑到未来建产的规模和摆布,申请了长期供水许可,超前配套永久性输水系统,在作业区内建设了多座大型人工储水池,各储水池通过地下网线连通,便于统一调配,既满足了冬季大规模钻井和压裂施工的生产需要,还有利于返排液的回收和重复利用,同时,在生产空闲期为邻区提供供水转运服务,还可获得可观的创收,一举几得。综合用水成本从项目初期 50 加元/ m^3 下降到建产期的 2 加元/ m^3 ,大大降低。一体化运作是实实在在的,点滴都融在项目总体设计的细节中,看似前期修建输水系统花费较大,但给后期生产带来了高效率和高收益,实现了“前期局部的高投入,换取整体的高效益”。

(3) 大力推进非常规油气勘探开发大数据平台建设与应用。让数据说话,用数据决策,是非常规资源科学高效动用的显著特点。拥有海量数据是大公司的优势,只要管理理念和分析应用得当,单一的革新在集团内部推广就会产生很大的影响,大家均可在大数据分析迭代中快速学习与提高,这也是解决大公司内部效率低下、部门沟通不畅的一个新途径。中国石油可以充分发挥正在建设的梦想云大数据平台,将各专业数据、成果、知识等信息统一管理,打破信息壁垒,强化数据共享和应用分析,率先在鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地吉木萨尔等多家油田参与的重点项目上推进实施,打通底层数据平台,实现信息和经验共享^[40]。

(4) 重视非常规油气单井最终采出量(EUR)的评价工作。在构造型等常规油气藏的勘探中,只要搞清了圈闭形态、面积、油气水分布关系、有效厚度、开采方式等要素,油气藏的储量规模(探明地质储量和可采储量)就能确定下来,并不因为低部位没有打井而影响储量评价,甚至在开发阶段有时也无

须在低部位钻开发井仍然可以有效全面开发。而对于非常规油气聚集一般不受水动力系统控制,其储层大面积分布,没有清晰界定的油气藏边界。同时,非常规油气聚集的原始储层物性条件极差,烃类在常规开采技术条件下很难流动到井底实现有效开发,需实施大规模水平井压裂等特有非常规技术形成人工改造油气藏才能有效开发。由于非常规油气需要形成针对地质特点的非常规技术系列和人工改造成藏才能有效开发,要求对储层等地质特征的三维变化特征更加清晰描述,这种地质特征例如渗透率的变化尺度可能比常规油气藏小,但变化幅度较大,对每口井的单井控制地质储量和最终采出量(EUR)影响较大,具体表现为非常规单井 EUR 具有统计分布规律,但相邻井 EUR 可能变化很大,不具相互代表性,这与常规油气藏有较大差异,在国内陆相非常规油气储量评价中更值得重视。因此说,在非常规储量评估中,缝控、井控储量研究远远比国内按油气藏整体计算地质储量后再计算可采储量更重要。国际上,通常从单井控制最终采出量(EUR)研究为基础,分析单井 EUR 变化规律,并根据勘探开发阶段及开发方案评估项目井控最终采出量,用井控 EUR 等术语来表达非常规储量掌控程度,且最重要和最受关注的就是井控可采储量。因此,如果工作中用常规油气藏思路来评价非常规油气藏,就会出现提交了过大的探明地质储量,而实际生产中因井控范围小而采出量少,进而得出采收率极低的结论。例如美国二叠盆地沃夫坎普(Wolfcamp)包含了 A、B、C3 段,鹰滩(Eagle Ford)储层也分为上段和下段,而开发动用仅是其中一部分而已。

就非常规资源开采而言,油藏采收率并不是常见的衡量指标,因动态标定时间短、经验公式不适用等原因,采收率计算的准确性有待提高和验证。根据全球石油咨询公司 D&M 的经验,衡量北美非常规油气资源勘探开发技术成功的关键指标是单井最终采出量(EUR),确定井位,优化完井策略,实施节流管理和人工举升等措施,都是为了使单井最终采出量最大化。目前我国的储量管理模式已不适应非常规油气资源的管理,应适时做出调整。

(5) 合理确定非常规油气资源开发政策。“初期高产快速收回投资,还是合理控制采油速度最终获得更高采油量”,一直是非常规油气业内争论的问题。北美基本采用“初期高产快速收回投资、后期长时间稳定低产、产能不足后区块接替”的方式组织生产,更多考虑其快速收回投资和较高的经济回报,这一思

路对于地大物博、地广人稀，不必承担“保供”等任务、只注重经济性的北美油公司来说无可厚非。但对于我国来说，最大的现状是有利勘探面积少、回旋余地小、资源丰度低、油气需求旺盛、供给保障压力大，因此必须树立“努力将地下每一个烃分子都逮出来”的理念。所以在开发政策上，初期应控制一定产量，让地层保有充足的能量，尽可能延长相对高产的生产周期，努力提高单井采出量。

水平井能量补充技术是提高非常规油气采收率的重要手段，目前北美主要采用二次压裂、人工助排/举升、压后焖井等举措。针对中国陆相沉积的地质特点，在开发技术政策上，应加大室内研究及现场试验的力度，尽快研究二次压裂时机与规模、人工助排时机选择、焖井后地层中流体流动相态是否变化等关键问题，超前准备能量补充技术，以提高单井和区块最终采出量。追求单井更高的EUR是中国非常规油气开发的关键和永恒主题，水平井长期高产稳产动态规律研究及工艺优化需要抓紧开展。

(6) 积极推行市场化，努力提高非常规项目盈利能力。“充分发挥市场在资源配置中的决定性作用”是我国已经确定的大政方针。市场化是全球油气行业最普遍、最现实、最高效的组织模式。北美非常规油气领域普遍采用市场化运作模式，分工明确、协同配合、高效实施、合作共赢是最显著特点，油公司作为甲方，负责项目设计与现场组织工作，并与钻井、录井、测井、固井、钻头、定向以及钻井液等专业服务公司单独签署合同，同时，派技术总监负责每口井的现场施工，全权负责各专业公司的生产组织管理，下达施工指令。各专业公司作为承包商，负责设备和人员管理，保障现场实施。甲方通过乙方的业绩表现，选择最适合的合作伙伴，双方严格按照合同条款执行，保障生产无缝衔接，非生产时间和低效生产环节得到有效控制。

为了实现成本递减、利润递增，甲方会设立单项奖励，对成本结余或效率提高的参与人员和服务公司进行奖励。如设立提高钻遇率奖，设计某一数值（通常为80%~90%，并不是很高）作为投标设计钻遇率的底线，每提高5%~10%分别奖励，把100%的钻遇率分解成80%+10%+10%，既可以缓解承包商因合同底线过高（比如95%）担心完不成扣款而产生的忧虑，也大大激发了承包商提高钻遇率获得奖励的热情，最终甲方获得了高钻遇率的高效井，承包商获得了理想的收益；设立服务方施工天数考核奖，用区块已钻井的历史数据的平均值作为基本奖励考核点，缩短钻

井周期则给予奖金奖励或新钻井工作量奖励。一系列举措大大调动了各方积极性，激发了不断创指标的热情，最终实现双赢。

(7) 高度重视管理变革与管理创新。北美的页岩革命实际上包括了两场革命：一场是技术革命，另一场是管理革命。以非常规油气地质理论水平井+体积压裂为主体的技术革命，是可对标、可学习、可复制的，是显性的、易组织和易突破的；以全生命周期为核心、以市场化为纽带、一体化运作为组织模式的管理革命，是隐形的、内在的、深刻的，既包括了石油公司本身的流程再造，也包括服务公司对市场规则的遵从，还包括政府的政策制定与调整等。从某种程度上看，管理革命比技术革命更重要，更值得关注，只有转变观念、适应形势，才能在竞争中进步，在学习中提高。

(8) 加强宏观政策和规律性研究，积极争取政府扶持政策。非常规等低品位资源的规模有效开发离不开国家政策的支持与引导，连续稳定的优惠政策有利于投资者信心的建立。比如加拿大政府规定，非常规项目在投资回收之前矿费（Royalty）按销售量的5%征收，待投资回收之后再按销售量的25%征收，这一政策大大减轻了企业负担，使之可以快速收回投资。此外，政府还规定，如果业主在钻井过程中有应用新技术或探索新层系等积极举措，矿费收取还可以继续打折优惠征收，通过这些规定，一般情况下，矿费还可以再减少1%~2%。由于开发初期年产量高，矿费征收率低，并且能通过工程指标的优化而进一步获得矿费优惠，这一举措极大地调动了项目投资的热情，推动实现更优化的工程设计指标。

中国也应应对非常规油气项目加大政策支持力度，强化顶层设计，建立不同类型的非常规油气资源开发示范区，加强非常规油气实验平台和标准体系建设，加强科技攻关，突破关键“卡脖子”技术和装备，出台减免税赋政策并保持较长时间的连续性，以推动我国非常规油气产业的发展。

6 结论

(1) 近年来，中国石油在非常规油气地质理论创新、技术研发与勘探开发方面取得了重要进展，已经建成了一批资源开发示范区，正成为资源接替与产量增长的重要领域，鄂尔多斯盆地长7段，准噶尔盆地二叠系芦草沟组和风城组、三塘湖盆地条湖组，渤海湾盆地沙河街组—孔店组，松辽盆地青一段和青二段是近期增储上产的重点层系。

(2) 中国石油矿权区内非常规油气资源丰富, 页岩气、致密气资源量相对明确, 但致密油和页岩油目前评价的资源量数据差异较大, 应开展资源量分级评价, 明确技术、经济可动用资源潜力。

(3) 由于中国陆相沉积盆地致密油和页岩油的特殊性, 仍面临许多工程技术的不适应性, 目前的开发收益率整体较低; 提出了针对陆相页岩层系的关键技术系列和基础研究攻关方向。

(4) 为实现中国石油非常规油气资源的效益勘探开发, 油田公司层面应积极推进全生命周期管理模式, 加强一体化运作组织, 大力推进非常规油气勘探开发大数据平台建设与应用, 重视非常规油气单井最终采出量(EUR)的评价工作, 合理确定非常规资源开发政策, 积极推行市场化, 最终实现互利双赢。从更高层面, 应高度重视管理变革与管理创新, 加强宏观政策和规律性研究, 积极争取政府扶持政策, 提高公司盈利能力。在低品位资源勘探开发中努力实现高质量发展。

参考文献

- [1] 邹才能, 陶士振, 侯连华. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
Zou Caineng, Tao Shizhen, Hou Lianhua. Unconventional petroleum geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [2] US Energy Information Administration. Annual energy outlook 2019 with projections to 2050[R]. Washington: US Energy Information Administration, 2019.
- [3] US Energy Information Administration. International energy outlook 2018[R]. Washington: US Energy Information Administration, 2018.
- [4] US Energy Information Administration(EIA). Technically recoverable shale oil and shale gas resources: An assessment of 137 shale formations in 41 countries outside the United states[R]. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/pdf/overview.pdf>. 2013.
- [5] 杨雷, 金之钧. 全球页岩油发展及展望[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5):553-559.
Yang Lei, Jin Zhijun. Global shale oil development and prospects[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5):553-559.
- [6] 胡文瑞. 重新发现石油——石油将缓慢地失去青睐度[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018.
Hu Wenrui. A new understanding of petroleum—oil attractiveness is gradually fading[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [7] 贾承造, 邹才能, 杨智, 朱如凯, 陈竹新, 张斌, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):546-560.
Jia Chengzao, Zou Caineng, Yang Zhi, Zhu Rukai, Chen Zhuxin, Zhang Bin, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):546-560.
- [8] 孙龙德, 邹才能, 贾爱林, 位云生, 朱如凯, 吴松涛, 等. 中国致密油气发展特征与方向[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(6):1015-1026.
Sun Longde, Zou Caineng, Jia Ailin, Wei Yunsheng, Zhu Rukai, Wu Songtao, et al. Development characteristics and orientation of tight oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(6):1015-1026.
- [9] 邹才能, 杨智, 王红岩, 董大忠, 刘洪林, 施振生, 等. “进源找油”: 论四川盆地非常规陆相大型页岩油气田[J]. 地质学报, 2019, 93(7):1551-1562.
Zou Caineng, Yang Zhi, Wang Hongyan, Dong Dazhong, Liu Honglin, Shi Zhensheng, et al. “Exploration petroleum inside source kitchen”: Jurassic unconventional continental giant shale oil & gas field in Sichuan Basin, China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(7):1551-1562.
- [10] 严星明, 卢海兵. 中国最深页岩气水平井压裂施工取得圆满成功, 工艺技术获重大突破[R]. <http://www.riped.petrochina.com/riped/gdtpxw/Pages/20191216-C7770.aspx>. [2019-12-16].
Yan Xingming, Lu Haibing. The fracturing operation of the deepest horizontal shale gas well in China has achieved complete success and a major breakthrough has obtained in process technology[R]. <http://www.riped.petrochina.com/riped/gdtpxw/Pages/20191216-C7770.aspx>. [2019-12-16].
- [11] 赵文智, 胡素云, 侯连华. 页岩油地下原位转化的内涵与战略地位[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4):537-545.
Zhao Wenzhi, Hu Suyun, Hou Lianhua. Connotation and strategic role of in-situ conversion processing of shale oil underground in the onshore China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4):537-545.
- [12] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 杨涛, 李欣, 郭彬程, 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, Yang Tao, Li Xin, Guo Bincheng, 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.
- [13] 金之钧, 白振瑞, 高波, 黎茂稳. 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, Li Maowen. Has China ushered in the shale oil and gas revolution[J]. Oil and Gas Geology, 2019, 40(3):451-458.
- [14] 杜金虎, 胡素云, 庞正炼, 林森虎, 侯连华, 朱如凯. 中国陆相页岩油类型、潜力及前景[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5):560-568.
Du Jinhui, Hu Suyun, Pang Zhenglian, Lin Senhu, Hou Lianhua, Zhu Rukai. The types, potentials and prospects of continental shale oil in China[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(5):560-568.
- [15] 胡素云, 陶士振, 闫伟鹏, 门广田, 唐振兴, 薛建勤, 等. 中国陆相致密油富集规律及勘探开发关键技术研究进展[J]. 天然气地球科学, 2019, 30(8):1083-1093.
Hu Suyun, Tao Shizhen, Yan Weipeng, Men Guangtian, Tang Zhenxing, Xue Jianqin, et al. Advances on continental tight oil accumulation and key technologies for exploration and development in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2019, 30(8):1083-1093.
- [16] 赵政璋, 杜金虎. 致密油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
Zhao Zhengzhang, Du Jinhui. Tight oil and gas[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [17] U.S. Geological Survey. Assessment of permian tight oil and gas resources in the Junggar Basin of China, 2016, <https://energy.usgs.gov>. 2017-4.
- [18] U.S. Geological Survey. Assessment of tight-oil and tight-gas resources in the Junggar and Santanghu Basins of Northwestern China, 2018, <https://energy.usgs.gov>. 2019-6.
- [19] U.S. Geological Survey. Assessment of undiscovered continuous oil and gas resources of Upper Cretaceous Shales in the Songliao Basin of China, 2017, <https://energy.usgs.gov>. 2018-5.
- [20] U.S. Geological Survey. Assessment of undiscovered continuous oil and gas resources in the Bohaiwan Basin Province, China, 2017, <https://energy.usgs.gov>. 2018-2.

- [21] U.S. Geological Survey. Assessment of mesozoic tight-oil and tight-gas resources in the Sichuan Basin of China, 2018, <https://energy.usgs.gov>. 2019-4.
- [22] U.S. Geological Survey. Assessment of Paleozoic shale-oil and shale-gas resources in the Tarim Basin of China[R]. 2018, <https://energy.usgs.gov>. 2019-5.
- [23] 孙焕泉, 蔡勋育, 周德华, 高波, 赵培荣. 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, Gao Bo, Zhao Peirong. Practice and prospect of Sinopec shale oil exploration[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5): 569-575.
- [24] 宋明水. 济阳拗陷页岩油勘探实践与现状[J]. 油气地质与采收率, 2019,26(1):1-12.
Song Mingshui. Practice and current status of shale oil exploration in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019,26(1):1-12.
- [25] 付金华, 牛小兵, 谈卫东, 冯胜斌, 梁晓伟, 辛红刚, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长 7 段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):601-614.
Fu Jinhua, Niu Xiaobing, Dan Weidong, Feng Shengbin, Liang Xiaowei, Xin Honggang, et al. The geological characteristics and the progress on exploration and development of shale oil in Chang7 Member of Mesozoic Yanchang Formation, Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):601-614.
- [26] 赵贤正, 周立宏, 蒲秀刚, 金凤鸣, 时战楠, 肖敦清, 等. 断陷湖盆湖相页岩油形成有利条件及富集特征——以渤海湾盆地沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019,40(9):1013-1029.
Zhao Xianzheng, Zhou Lihong, Pu Xiugang, Jin Fengming, Shi Zhannan, Xiao Dunqing, et al. Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: a case study of Member 2 of Kongdian formation in Cangdong sag, Bohai Bay basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(9):1013-1029.
- [27] 蒲秀刚, 金凤鸣, 韩文中, 时战楠, 蔡爱兵, 王爱国, 等. 陆相页岩油甜点地质特征与勘探关键技术——以沧东凹陷孔店组二段为例[J]. 石油学报, 2019,40(8):997-1012.
Pu Xiugang, Jin Fengming, Han Wenzhong, Shi Zhannan, Cai Aibing, Wang Aiguo, et al. Sweet spots geological characteristics and key exploration technologies of continental shale oil: a case study of Member 2 of Kongdian formation in Cangdong sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2019,40(8):997-1012.
- [28] 吴宝成, 李建民, 郭元月, 韩东, 赵廷峰, 邹雨时. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组页岩油上甜点地质工程一体化开发实践[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):679-690.
Wu Baocheng, Li Jianmin, Wu Yuanyue, Han Dong, Zhao Tingfeng, Zou Yushi. Development practices of geology-engineering integration on upper sweet spots of Lucaogou Formation shale oil in Jimsar sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):679-690.
- [29] 郭旭光, 何文军, 杨森, 王江涛, 冯右伦, 贾希玉, 等. 准噶尔盆地页岩油“甜点区”评价与关键技术应用——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 天然气地球科学, 2019,30(8):1168-1179.
Guo Xuguang, He Wenjun, Yang Sen, Wang Jiangtao, Feng Youlun, Jia Xiyu, et al. Evaluation and application of key technologies of “sweet area” of shale oil in Junggar basin: case study of Permian Lucaogou formation in Jimusar depression[J]. Natural Gas Geoscience, 2019,30(8):1168-1179.
- [30] 支东明, 唐勇, 杨智峰, 郭旭光, 郑孟林, 万敏, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷陆相页岩油地质特征与聚集机理[J]. 石油与天然气地质, 2019,40(3):524-536.
Zhi Dongming, Tang Yong, Yang Zhifeng, Guo Xuguang, Zheng Menglin, Wan Min, et al. Geological characteristics and accumulation mechanism of continental shale oil in Jimusar sag, Junggar basin[J]. Oil and Gas Geology, 2019,40(3):524-536.
- [31] 支东明, 唐勇, 郑孟林, 徐洋, 曹剑, 丁靖, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油藏地质特征与成藏控制因素[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):615-623.
Zhi Dongming, Tang Yong, Zheng Menglin, Xu Yang, Cao Jian, Din Jing, et al. Geological characteristics and accumulation controlling factors of shale reservoirs in Fengcheng Formation, Mahu sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):615-623.
- [32] 王小军, 杨智峰, 郭旭光, 王霞田, 冯右伦, 黄立良. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷页岩油勘探实践与展望[J]. 新疆石油地质, 2019,40(4):402-413.
Wang Xiaojun, Yang Zhifeng, Guo Xuguang, Wang Xiatian, Feng Youlun, Huang Liliang. Practices and prospects of shale oil exploration in Jimsar sag of Junggar basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019,40(4):402-413.
- [33] 梁世君, 罗劝生, 王瑞, 陈旋, 杨斌, 马强, 等. 三塘湖盆地二叠系非常规石油地质特征与勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):624-635.
Liang Shijun, Luo Quansheng, Wang Rui, Chen Xuan, Yang Bin, Ma Qiang, et al. Geological characteristics and exploration practice of unconventional Permian oil resources in the Santanghu Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):624-635.
- [34] 吴河勇, 林铁峰, 白云凤, 张金友, 刘鑫, 霍秋立, 等. 松辽盆地北部泥(页)岩油勘探潜力分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2019,38(5):78-86.
Wu Heyong, Lin Tiefeng, Bai Yunfeng, Zhang Jinyou, Liu Xin, Huo Qiuli, et al. Analyses of the mudstone (shale) oil exploration potential in North Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2019,38(5):78-86.
- [35] 李晓光, 刘兴周, 李金鹏, 田志. 辽河拗陷大民屯凹陷沙四段湖相页岩油综合评价及勘探实践[J]. 中国石油勘探, 2019,24(5):636-648.
Li Xiaoguang, Liu Xingzhou, Li Jinpeng, Tian Zhi. Comprehensive evaluation and exploration practice of Sha 4 lacustrine shale oil in Damintun sag, Liaohe depression[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):636-648.
- [36] 李鹭光, 何海清, 范士芝, 刘合年, 杨涛, 万仑坤, 等. 中国石油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):1-10.
Li Luguang, He Haiqing, Fan Tuzhi, Liu Henian, Yang Tao, Wan Lunkun, et al. Oil and Gas Exploration Progress and Upstream Development Strategy of PetroChina[J]. China Petroleum Exploration, 2020,25(1):1-10.
- [37] 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.
- [38] 李国欣, 毛锐, 王振林, 牟立伟. 具有埋深校正的岩石静态脆性指数计算方法——以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. 新疆石油地质, 2018,39(5):603-608.
Li Guoxin, Mao Rui, Wang Zhenlin, Mou Liwei. A rock static brittleness index calculation method considering burial depth correction: a case study of permian Lucaogou formation in Jimsar sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2018,39(5):603-608.
- [39] 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):576-589.
Yang Guofeng, Zhou Qingfan, Lu Xuemei. Study on the cost of shale oil exploration and development[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(5):576-589.
- [40] 李国欣, 王峰, 皮学军, 刘合. 非常规油气藏地质工程一体化数据优化应用的思考与建议[J]. 中国石油勘探, 2019,24(2):147-152.
Li Guoxin, Wang Feng, Pi Xuejun, Liu He. Optimized application of geology-engineering integration data of unconventional oil and gas reservoirs[J]. China Petroleum Exploration, 2019,24(2):147-152.