

引用格式: 贾承造, 王祖纲, 姜林, 等. 中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题[J]. 世界石油工业, 2024, 31(4): 1-11.

JIA C Z, WANG Z G, JIANG L, et al. Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China[J]. World Petroleum Industry, 2024, 31(4): 1-11.

中国页岩油勘探开发研究进展与科学技术问题

贾承造^{1, 2, 3}, 王祖纲⁴, 姜林^{2, 3}, 赵文³

(1. 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007; 2. 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083; 4. 中国石油集团经济技术研究院, 北京 100724)

摘要: 近年来, 全球页岩油探明资源量和产量持续上升, 成为重要接续资源。针对中国页岩油勘探开发现状与资源潜力, 提出加快推进实现页岩油规模开发的建议, 这对于保障中国能源安全意义重大, 并将对全球能源经济和石油工业产业产生深远影响。中国勘探开发领域实现了非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破, 发展了全油气系统理论, 长水平井、多级压裂、夹层型页岩油开发关键技术等; 提出当前页岩油勘探开发在基础理论、关键技术、效率成本、持续发展等方面仍面临一定挑战。分析指出: ① 中国页岩油勘探取得积极进展, 具有巨大潜力, 要进一步加大页岩油勘探开发支持力度; ② 基础理论突破是页岩油开发的关键, 重点夯实理论基础有助于深化对页岩油成藏机理、储层特性、流动规律等方面的认识, 为开发技术创新提供科学依据和指导; ③ 成本控制与效率提升面临双重挑战, 应充分借鉴美国的经验, 结合自身特点, 探索适合中国国情的发展模式, 以实现效率和成本的最优平衡; ④ 通过勘探开发一体化、地质工程开发经济一体化、全生命周期管理、提高原油采收率、储层管理、产量分配以及储量评估等措施, 提升页岩油产业的持续发展能力。中国页岩油已进入规模化开发阶段, 随着勘探开发的不断推进, 页岩油将成为保障国家能源安全的重要支撑。

关键词: 页岩油; 勘探开发; 全油气系统理论; 长水平井; 多级压裂; 生命周期管理; 提高原油采收率; 地质工程开发经济一体化

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-0030(2024)04-0001-011 DOI: 10.20114/j.issn.1006-0030.20240530001

Progress and key scientific and technological problems of shale oil exploration and development in China

JIA Chengzao^{1,2,3}, WANG Zugang⁴, JIANG Lin^{2,3}, ZHAO Wen³

(1. China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China; 3. PetroChina Research Institute of Exploration and Development, Beijing 100083, China; 4. CNPC Economics and Technology Research Institute, Beijing 100724, China)

Abstract: In recent years, the proven reserves and production of global shale oil have continuously increased, becoming an important subsequent resource. Considering the exploration and development status and resource potential of shale oil in China, this paper proposes that accelerating the large-scale development of shale oil is not only of great significance for ensuring China's energy security, but also will have a profound impact on the global energy economy and the petroleum industry. China has made breakthroughs in unconventional oil and gas geological theories, formed the whole petroleum system theory, overcame long horizontal well drilling, multi-stage fracturing, and the key technologies of interlayer shale oil development; and pointed out that the shale oil exploration and development still face certain challenges in fundamental theories, key technologies, efficiency costs, sustainable development, and other aspects. ① The shale oil exploration in China has achieved positive progress and prove that it has immense potential, it is necessary to further increase support for shale oil exploration and development; ② Breakthroughs in fundamental theories are crucial for shale oil development, and a solid theoretical foundation will help deepen the understanding of shale oil accumulation mechanisms, reservoir characteristics, and flow patterns, providing scientific basis and guidance for technological innovation in development; ③ Facing the dual challenges of cost control and efficiency improvement, we should fully learn from the experience of the United States based on our own characteristics, and explore a development model that adapts to China's national conditions, so as to achieve the optimal balance between efficiency and cost; ④ By integrating exploration and development, integrating geology, engineering, and economics in development, adopting full lifecycle

收稿日期: 2024-05-29

修回日期: 2024-07-30

第一作者: 贾承造 (1948—), 男, 博士生导师, 中国科学院院士, 教授级高级工程师, 主要从事构造地质学、石油地质学研究和油气勘探工作。E-mail: jiacz@petrochina.com.cn

management, enhancing oil recovery, managing reservoirs, allocating production, assessing reserves, and other measures, enhance the sustainable development capacity of the shale oil industry. China's shale oil has entered the stage of large-scale development, and as exploration and development continue to advance, shale oil will become an essential pillar for safeguarding national energy security.

Keywords: shale oil; exploration and development; total petroleum system; long horizontal well; multi-stage fracturing; life-cycle management; enhanced oil recovery; geology-engineering-economy integration

0 引言

2023年,中国国内油气产量当量超过 3.9×10^8 t,连续7年保持千万吨级快速增长势头,年均增幅达 1.170×10^4 t油当量,形成新的产量增长高峰期。原油产量长期稳产 2.08×10^8 t的基本盘进一步夯实。近年来,中国页岩油勘探开发取得了系列重要进展。页岩油勘探开发稳步推进,新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳3个国家级页岩油示范区及长庆庆城页岩油田加快建设,苏北溱潼凹陷多井型试验取得商业突破,页岩油产量再创新高突破 400×10^4 t油当量^[1]。

中国陆相页岩油资源丰富, R_o 值(镜质体反射率)大于1.0%的页岩油地质资源量为 100×10^8 t, R_o 值小于1.0%的页岩油地质资源量为 $(700 \sim 900) \times 10^8$ t^[2],主要分布在准噶尔盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、三塘湖盆地、渤海湾盆地、松辽盆地、南襄盆地泌阳凹陷、江汉盆地、苏北盆地。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组、松辽盆地古龙凹陷白垩系青山口组一段、鄂尔多斯盆地三叠系延长组7段、渤海湾盆地沧东凹陷古近系孔店组二段及济阳坳陷古近系沙河街组三段—四段等页岩油勘探开发实现了突破^[3]。

页岩油是中国油气增储上产的战略接替资源,加快页岩油勘探开发不仅关系到国家能源安全,也是推动能源生产和消费革命的重要力量。页岩油作为一种新型油气资源,在石油地质学和开发角度上仍有许多未解的问题,特别是许多基本原理仍不清楚,未来发展仍面临一定挑战。从新疆吉木萨尔、大庆古龙、胜利济阳及长庆庆城页岩油勘探开发看,整体进展较为顺利,部分既定目标已接近完成,有些领域进展远超预期,有力证明了页岩油具有良好的发展前景。但同时,许多未预见的问题也开始显现,部分问题十分具有挑战性,表明中国页岩油勘探开发仍处于不断变化和发展的过程中,下一步应通过科技攻关和各方努力,推动实现中国页岩油大发展,助力国家能源安全保障能力跃上新台阶。

1 全球页岩油勘探开发现状

随着技术的不断进步和全球能源结构的转型升级,页岩油勘探开发已逐步由试验性探索转向商业化生产,页岩油在全球能源市场中扮演重要角色。全球页岩油资源丰富,主要分布在北美、欧亚大陆和其他地区。全球实现页岩油勘探开发的国家主要有美国、加拿大、俄罗斯、阿根廷及其他。北美海相页岩油勘探开发实践结果表明,稳定宽缓的构造背景、大面积分布的优质烃源岩、大面积分布的致密顶底板、合适的热演化程度、地质和工程“甜点”控制页岩油的规模富集。在资源潜力方面,美国页岩油总技术可采资源量约为 153×10^8 t,占全球总量的21%,位列世界第1位。

美国是全球最大的页岩油生产国,其主要页岩油区带分布在二叠盆地、巴肯区带、伊格尔福特区带、阿纳达科盆地、奈厄布拉勒区带、蒙特利区带。从地质条件来看,美国拥有得天独厚的页岩油气成藏地质条件,页岩油资源分布规律明确,有机质丰度高、储层有效厚度大,且多套页岩油层系叠加。来自二叠盆地、巴肯和伊格尔福特三大页岩油区产量占全美的近80%。美国海相页岩层系勘探开发历经技术探索期(1953—2009年)、快速发展期(2010—2016年)和效益发展期(2017年至今)3个时期的发展。2019年,美国页岩层系石油产量达 3.76×10^8 t,占美国原油总产量50%左右,助力美国成为油气净出口国,实现“能源独立”,并深刻影响世界能源格局^[4]。美国作为页岩油革命的先驱,技术与方法相对成熟,其技术核心在于水平井钻井和水力压裂技术,美国通过这些技术实现了页岩油商业化开采,使得美国页岩油产量显著增长。美国页岩油得天独厚的地质条件和完备的开发基础设施是实现商业化的基础。此外,美国的页岩油开发还注重甜点的分级评价,这在低油价下尤为关键,有助于提高开发效率。目前,仅有美国和加拿大两国实现了具有商业价值的页岩油开采,并将继续保持其在页岩油开采领域的领先地位。

2 中国页岩油勘探开发现状及潜力

2.1 中国页岩油资源储量与产量

中国页岩油资源丰富，目前已在10余个盆地发现16套页岩层系，页岩油储层主要以陆相湖盆泥页岩为主，具有非均质性强、累计厚度大、分布面积小、热演化程度相对较低、有机质类型多样等特点，可划分为夹层型、混积型和页岩型3类，不同地区的页岩油特征不同（见表1）。根据自然资源部的估算，中国可采资源潜力为 34.98×10^8 t，但中国大陆相页岩油资源的差异化富集以及页岩沉积相变快、储层非均质性强、成熟度较低，增加了勘探和开发的难度。

根据自然资源部的估算，十三五期间中国页岩

油资源量为 283×10^8 t，在资源部新一轮评估中，中国页岩油地质资源潜力为 397.46×10^8 t，可采资源潜力为 34.98×10^8 t。陆上中-高成熟度页岩油地质资源量约为 283×10^8 t，是中国石油资源重要的战略接续领域。预计2030年中国的油气产量当量保持 2.0×10^8 t稳产，其中致密油 1730×10^4 t、页岩油 1300×10^4 t，合计 3030×10^4 t，占总产量当量15%。未来，页岩油将成为石油稳产增产主力。

近年来，中国持续加大页岩油勘探力度，推动储量快速提升。但是，中国在页岩油资源评价与储量计算方面仍然面临一些挑战，资源储量的评价和计算尚未完全规范化，特别是在致密油和页岩油的区分上存在争议。目前，相关的计算方法和标准尚未完全出台，导致储量的计算具有一定的不确定性。

表1 中国不同地区页岩油特征对比表^[3]

Tab.1 Comparison table of characteristics of shale oil from different regions in China^[3]

地区	层位	盆地类型	页岩层系岩相	地层厚度/ m	埋藏深度/ m	$R_o/\%$		原油密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
						范围	动用或试采 区块值	
济阳拗陷	古近系沙河街组	咸水-半咸水湖盆	泥灰岩、灰泥岩	300~1500	3000~5500	0.5~1.2	0.7~0.9	0.82~0.89
沧东凹陷	古近系孔二段	半咸水-淡水湖盆	白云质、长英质页岩	50~200	2800~4200	0.5~1.1		0.86~0.89
松辽盆地	白垩系	淡水湖盆	长英质页岩	106~149	1600~2700	0.5~1.7	1.0~1.4	0.78~0.87
鄂尔多斯盆地	三叠系延长组7段	淡水湖盆	粉、细砂岩	10~40	1600~2900	0.7~1.2		0.80~0.86
准噶尔盆地	二叠系芦草沟组	咸水湖盆	白云质粉砂岩、 泥质白云岩	20~70	2500~4800	0.6~1.1		0.88~0.92
三塘湖盆地	二叠系	咸水湖盆	泥灰岩、灰质白云岩	15~100	2000~2800	0.6~1.3		0.85~0.90

2.2 页岩油示范区

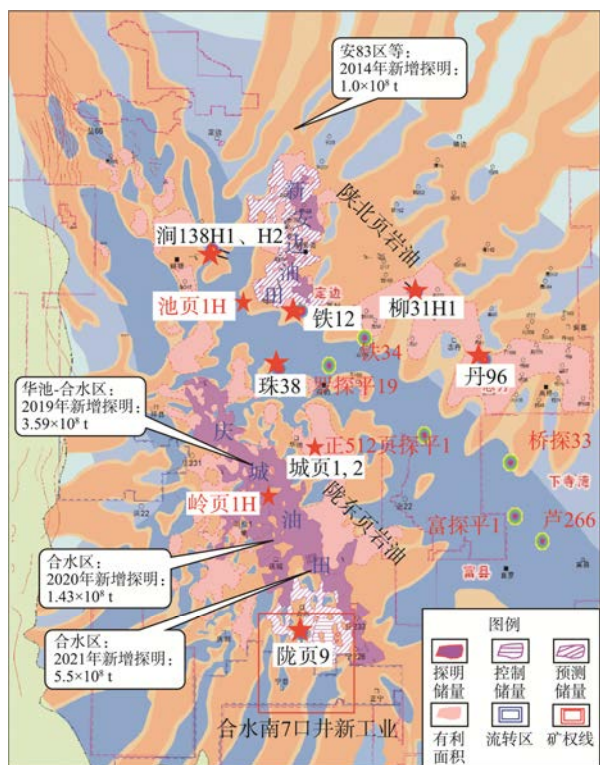
2.2.1 长庆陇东页岩油开发示范基地

长庆陇东示范区位于鄂尔多斯盆地西南部，长庆油田的页岩油可分为3种类型：夹层型、纹层型和纯页型。其中，夹层型较易开发，且储量较大。延长组长7段为半深湖-深湖相细粒沉积、横向连续性较差，广泛发育富有机质泥岩、页岩，夹多期薄层砂岩，其中长 7_1 亚段、长 7_2 亚段为泥页岩夹多期薄层粉-细砂岩的岩性组合，是典型的夹层型页岩油。

长庆油田在2022年探明了 12.56×10^8 t的页岩油储量，发现了庆城油气田，并实现了 220×10^4 t的年

产量。长庆油田的H100平台是亚洲最大的页岩油平台，拥有31口井，年产量为 12.4×10^4 t，单井平均日产量为10.6 t，显示出夹层型页岩油良好的开发前景。长水平井H90-3水平段长达5060 m，是亚洲陆上最长的水平井，控制储量 80×10^4 t，年产量达 1.42×10^4 t。当前，长7页岩油开发取得重大突破，未来将是中国石油增产的重点（见图1）。预计到2025年，长庆油田的页岩油产量将达到 350×10^4 t。

长庆油田在页岩油资源勘探和开发中，采用了多种先进技术。长水平井技术的应用有效增加了单井的控制范围和产量。这种长水平井的开发方式，显著提高了油田的经济效益和开发效率。

图1 鄂尔多斯盆地页岩油长 7_{1+2} 勘探成果图Fig.1 Exploration results of Chang 7_{1+2} shale oil in Erdos Basin

2.2.2 新疆吉木萨尔国家级陆相页岩油示范区

2020年1月,按照国家能源局、自然资源部批复,在新疆吉木萨尔设立中国首个国家级陆相页岩油示范区,推动吉木萨尔页岩油进入规模建产阶段。吉木萨尔凹陷芦草沟组发育以半深湖-深湖为主的细粒沉积体系^[5],页岩油资源量丰富,勘探开发前景广阔,是中国陆相混积型中高成熟度页岩油的典型代表,井控资源量 11.12×10^8 t,示范区内资源量 2.15×10^8 t。2020—2022年,吉木萨尔页岩油产量以每年 10×10^4 t的速度增长,全面进入水平井开发动用阶段,初步实现了页岩油效益开发;2023年,吉木萨尔页岩油产量达到 63.5×10^4 t,实现了效益建产;2024年第一季度,新疆油田和吐哈油田在吉木萨尔共生产页岩油 31.5×10^4 t,创历史新高。预计2025年将实现页岩油年产 170×10^4 t的目标。

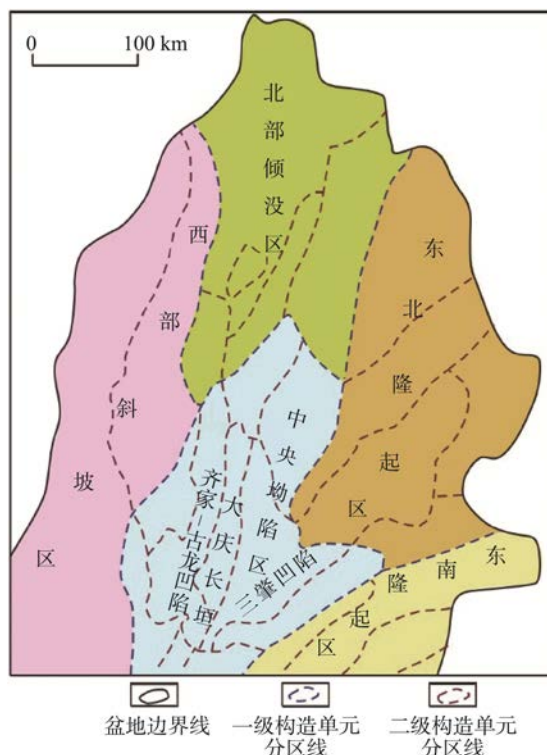
近年来,提出了咸化湖相页岩油赋存富集规律、云质混积岩沉积模式、夹层型页岩油甜点分布及分类标准,集成创新了页岩油资源潜力及地质评价、“甜点”表征及分类评价预测、配套工程、开发评价4项勘探开发配套技术,不断深化地质工程一体化综合研究及应用^[6]。应用“无杆泵采油+单井在线计量+无线数据传输+视频监控”技术实现了新型无人

采油模式的重大突破,采油效率进一步提升^[7]。通过技术和管理双向发力,“黄金靶体”钻遇率从43.4%提升至83.6%,资源动用程度由50%提高至89%,陆相页岩油开发技术整体达到国际领先水平。

2.2.3 大庆古龙陆相页岩油国家级示范区

大庆古龙陆相页岩油国家级示范区在2021年批复成立,规划到2025年实现年产量 100×10^4 t,产能 500×10^4 t。大庆古龙凹陷位于松辽盆地北部,古龙青山口组青一段为半深湖-深湖相沉积,页岩层系分布连续稳定,页理极其发育,是典型的页岩型页岩油。单井初始产量提高46%,单井EUR提高17%,落实探明地质储量超 2×10^8 t,2023年实现 30×10^4 t的产量。古龙示范区通过钻探74口水平井,日产量在8~15 t,总体开发进展顺利。

古龙页岩油主要位于中央坳陷区的齐家-古龙凹陷、大庆长垣和三肇凹陷等二级构造单元^[8],这些构造单元是古龙页岩油勘探的有利区(见图2)。在实际开发过程中,遇到一些井存在套变和产量快速递减的问题。套变问题主要是由于以往老井的遗留问题,而产量快速递减则需要通过优化压裂和增产措施来解决。尽管如此,古龙示范区的开发总体进展顺利,且已确定了适合不同层位的开发技术。

图2 松辽盆地古龙凹陷构造分区^[8]Fig.2 Structural division of Gulong Sag in Songliao Basin^[8]

2.2.4 胜利济阳页岩油国家级示范区

济阳坳陷位于渤海湾盆地东南部,属于渤海湾盆地的一个次级构造单元,发育的成化湖盆烃源岩厚度大、无机孔及层理缝发育、储集物性及保存条件好,是济阳页岩油实现高产的物质基础^[9]。济阳页岩油先后经历了勘探偶遇、主动探索、创新突破、评价建产4个阶段^[10-12]。截至2023年12月,济阳页岩油累计部署水平井112口,完钻80余口,投产69口,展现了济阳页岩油巨大的开发前景及商业价值^[3]。胜利济阳陆相页岩油示范区建设稳步推进,实现“五个洼陷、三种岩相、两套层系、多种类型”的全面突破,博兴、渤南多类型页岩油取得重大突破,牛庄洼陷顺利投产,2023年,22口井累产油过 1×10^4 t,年产量突破 30×10^4 t,预计到2025年将实现年产量 50×10^4 t。济阳坳陷页岩油属于高碳酸盐型,具有较好的储层压裂性、油流动性和较强的亲水性,有利于油气的采出率。这些特点使得济阳坳陷页岩油开发具有较高的经济性和技术可行性。

3 页岩油勘探开发技术进展

3.1 发展了全油气系统理论

近年来,中国勘探开发领域实现了非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破:提出连续型油气聚集理论,突破了传统圈闭成藏的概念;提出致密储层中纳米级孔喉系统,突破了传统储层的概念;提出非常规油气源-储一体理论,突破了传统生储盖组合的概念;形成非常规油气滞留烃成藏与非浮力聚集理论,突破了传统油气系统运移聚集模式;发现生烃层

系控制了油气连续分布与甜点富集,突破了传统油气区带富集概念;实现油气从气液相扩展到气液固相,在游离态、溶解态的基础上增加了吸附态。

贾承造提出全油气系统(Whole Petroleum System, WPS)概念^[13],被定义为含油气盆地中一套或多套相互关联的有效烃源岩层系生成的油气,从生成演化到非常规连续性聚集成藏和常规圈闭中聚集成藏,以及后期调整改造的全部地质要素与地质过程的自然系统。提出未来石油天然气地质学应该建立一个新的全油气系统理论框架,包括含油气盆地常规与非常规油气成藏全要素、形成演化全过程、资源分布全序列、预测评价全方位^[14],有效弥补了传统的含油气系统理论仅包括了常规油气的重大缺陷。全油气系统主要包括7方面:①全油气系统的结构;②常规油气-致密油气-页岩油气序列成藏规律;③全油气系统成藏模式;④非常规油气成藏机理(油气自封闭作用);⑤页岩油气-致密油气储层地质模型、流动模型与开发生产机理;⑥常规油气浮力成藏与达西流动特征;⑦含油气盆地地球动力学过程、烃类生成演化过程及盆地沉积体系对全油气系统的控制作用^[15]。

3.1.1 全油气系统结构

全油气系统结构主要包括3个流体动力场:达西流动力场、局限达西流动力场、束缚动力场;3种油气藏与资源:常规油气、致密油气、页岩油气;2种成藏作用:常规油气浮力成藏、非常规油气自封闭作用成藏(包括非浮力运移烃成藏、滞留烃成藏)。全油气系统内发育3个不同动力场,并控制着3类不同油气藏的形成分布(见图3)。

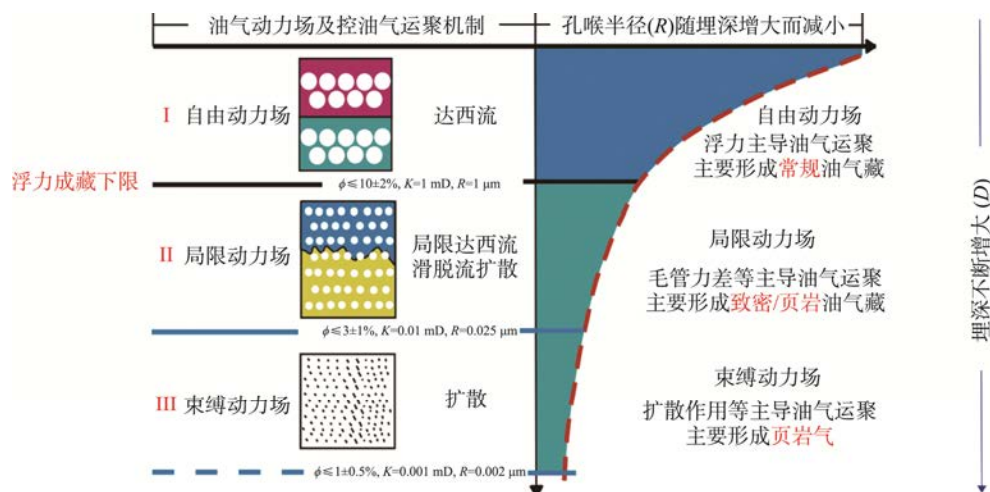


图3 全油气系统内3个不同动力场控制3类不同油气藏的形成

Fig.3 Formation of three different types of oil and gas reservoirs controlled by three different dynamic fields within whole petroleum system

以准噶尔盆地二叠系地层剖面图为例（见图4），该地层形成于快速沉降的咸化湖盆，序列完整，油气向上运移充注，即从风城组生油岩向上依次充注形成致密油-常规油，风城组滞留烃形成页岩油^[16]，形成由浅至深依次为常规油-致密油-页岩油的油气资源分布。① 4 000~5 500 m以上中浅层（A）：已发现多层系常规油气藏，浮力成藏，高孔高渗高产；② 4 000~5 500 m以下中深层（B）：百口泉组与上乌尔禾组为致密油气藏，非浮力成藏，低孔低渗低产；③ 5 500 m以下深层和超深层（C）：风城组烃源岩层为滞留烃形成的页岩油气藏，非浮力成藏，需通过压裂改造等措施获得商业产能。

3.1.2 全油气系统成藏模式

在全油气系统中，认为油气成藏遵循常规油气-致密油气-页岩油气空间分布和形成时间的有序性、基于成因机理的序列合理性。对于陆相盆地油气序列成藏类型及控制因素为陆相多类型盆地与复杂沉积体系，具体模式包括准噶尔盆地玛湖模式、鄂尔多斯盆地延长组模式、松辽盆地白垩系模式。对于海相盆地及控制因素为海相多旋回与沉积相稳定性，具体模式包括巴肯模式（海相碎屑岩盆地）和二叠盆地模式（海相碳酸盐岩盆地）。以准噶尔盆地二叠系全油气系统为例，生油岩包括油页岩、灰黑色泥岩、灰黑色白云质泥岩，泥页岩厚度大，有机质丰度高，平面广泛分布于二叠纪前陆富烃凹陷，其成藏模式与全油气系统成藏模式（见图5）相吻合。

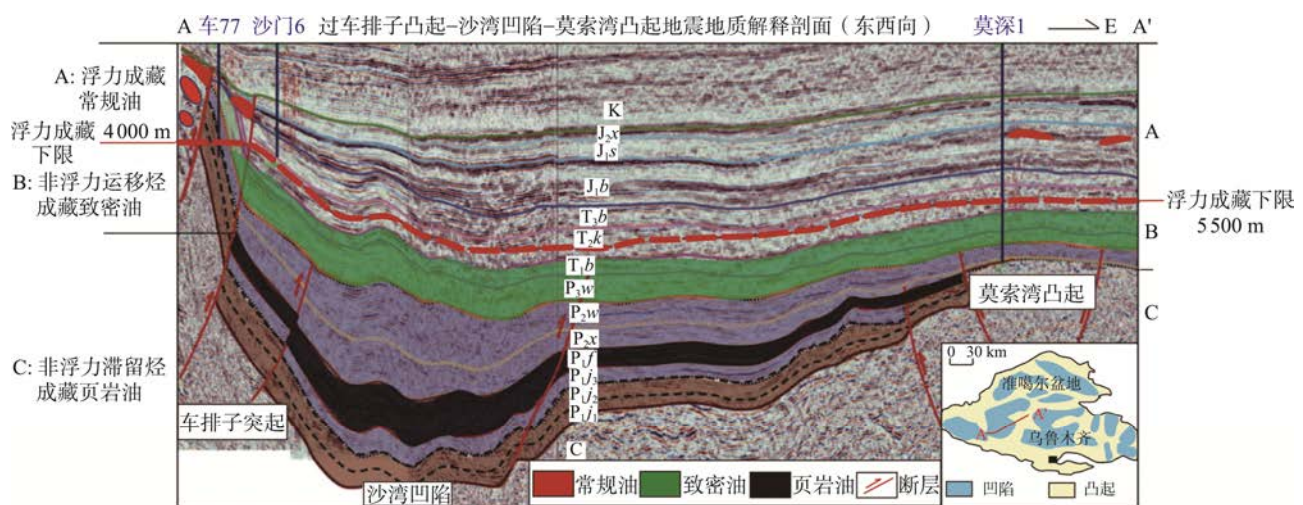


图4 准噶尔盆地二叠系全油气系统结构图

Fig.4 Structural diagram of whole petroleum system in the Junggar Basin Permian

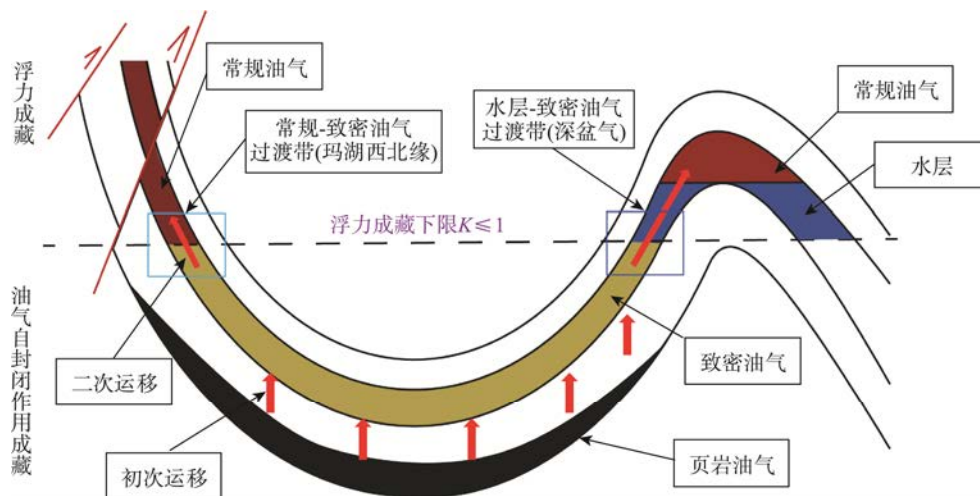


图5 全油气系统成藏模式

Fig.5 Hydrocarbon accumulation model of whole petroleum system

3.2 页岩油开发技术进展

(1) 长水平井技术的应用。在页岩油勘探开发的技术革新中,中国已经成功应用了长水平井技术,这一技术的应用显著提升了单井的产出效率和经济效益。长水平井技术通过增加井筒在油气层中的延伸,扩大了单井的控制范围,使得油气开采更为高效。这种技术的应用,不仅提高了油气的初始产量,还延长了单井的生产周期,对提升整个油田的开发效率和经济效益产生了深远影响。

(2) 多级压裂技术的创新与实践。中国页岩油开发的另一项关键技术是多级压裂技术。该技术通过在水平井段中创建多个压裂点,有效地提高了储层改造的效果,增加了裂缝网络的复杂性,从而提升了油气流动效率。在长庆油田的H100平台,通过优化压裂参数和改进压裂液体系,实现了夹层型页岩油产量的显著提升。多级压裂技术的应用,不仅提高了单井的产量,也为页岩油的高效开发提供了强有力的技术支持。

(3) 夹层型页岩油开发的技术突破。夹层型页岩油的开发技术在中国取得了重要的突破。长庆油田针对夹层型页岩油的特点,开展了大量的开发实验,并取得了显著成果。长庆油田夹层型页岩油主要分布在长7的长 7_1 、长 7_2 和长 7_3 段,主要由粉砂岩和页岩组成。通过采用适合不同岩性和层位的开发工艺,实现了高产量的页岩油生产。H100平台的年产量达到了 12.4×10^4 t,单井平均日产量为10.6 t,这些成果展示了夹层型页岩油在开发上的广阔前景。

(4) 地质工程一体化高度结合压裂改造效果突出。新疆吉木萨尔以测井级精度的三维地质建模技术、地震精细识别技术为基础,形成基于油藏品质、轨迹的“一井一工程,一段一参数”差异化设计模式,针对井轨迹进入夹层、隔层的异常段,精心优化设计泵注程序及射孔工艺,结合三维压裂缝网模拟,实现最优的压裂改造效果,为高效连续施工提供有力支撑。大庆古龙页岩油示范区采用了多项创新技术和工艺,形成了以“精确甜点预测与靶层优选、立体开发井网设计与排采制度优化、水平井优快钻完井、缝控体积改造2.0”为核心的地质工程一体化技术体系。

(5) 页岩油立体开发技术有效支撑了全周期优化调控。胜利济阳坳陷取得进行了多项技术创新。以“三元”(储元、缝元、压元)协同储渗理

论为指导,初步形成了以页岩油立体开发井网优化设计、立体均衡压裂、全周期优化调控等技术为核心的页岩油立体开发技术,有效支撑了济阳页岩油开发实践。

4 页岩油勘探开发面临的挑战及关键问题

4.1 基础理论问题

中国页岩油资源主要赋存于陆相层系,形成于多旋回构造与频繁的沉积环境演变过程中,岩石组分复杂、非均质性强,相对较高的黏土矿物含量造成了微纳米孔喉系统的复杂性^[17];陆相页岩有机质成熟度整体较低、页岩油含蜡量高且气油比较小、流动性偏差。

在页岩油勘探开发中面临的关键问题包括储层孔隙和裂缝系统的复杂性、储层非均质性的挑战、储层改造技术的局限性、储层模型的不确定性、多尺度流动特性的理解不足等的技术难题。解决问题需要跨学科的合作,加强基础理论研究,并结合实际工程经验,不断优化和创新勘探开发技术。

页岩油的成储机理涉及到页岩孔隙、喉道、裂缝及矿物组成等因素,这些因素直接影响页岩油的可动性和可动量。而页岩油在页岩中的赋存机理则与油-岩相互作用密切相关,这一相互作用决定了石油在页岩中的分布和聚集模式。因此,对这些机理的深入理解对于提高页岩油勘探开发的成功率至关重要。

储层地质模型是理解和预测地下油气分布的基础,但目前的储层地质模型往往无法完全准确地反映复杂的地质条件和流体动力学行为。页岩油以游离、吸附或溶解等多种形式赋存于微裂缝、纳米孔隙,有机质内部等多种孔隙空间中(见图6),不同赋存状态的原油流动机理和有效动用条件不明;缺乏针对页岩油储层的流体运移数学模型、分析计算方法和手段^[18],这导致了在页岩油勘探和开发过程中,无法有效预测储层特性、单井生产动态和产量递减规律。多尺度流动特性的理解不足也限制了对页岩油开采策略的优化和原油采收率的提高。页岩油的流动特性受到多种因素的影响,包括孔隙尺度、裂缝尺度以及它们之间的相互作用。目前,对于这些多尺度流动特性的理解仍然不足,这对于优化页岩油的开采策略和提高采收率至关重要。

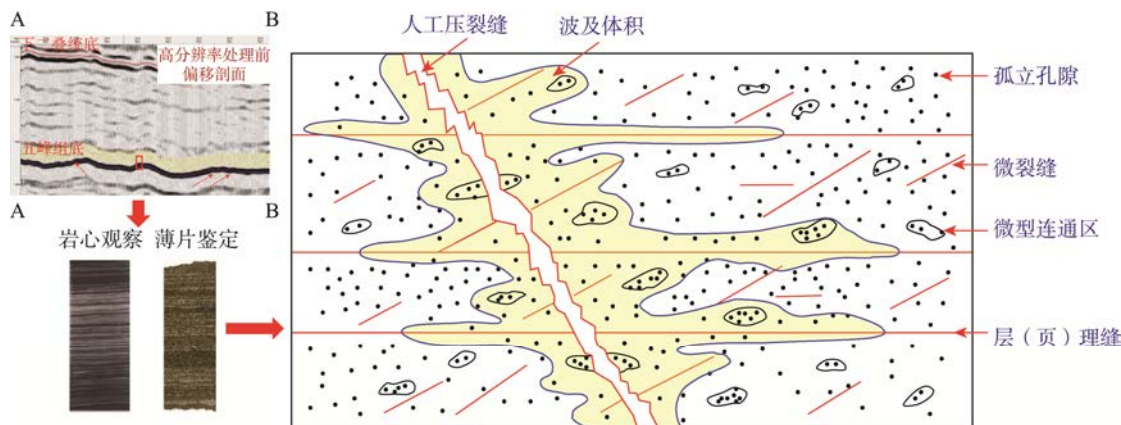


图6 页岩油气储层介观地质模型

Fig.6 Mesoscopic geological model of shale oil and gas reservoirs

4.2 关键技术问题

中国页岩油开发利用面临甜点区落实程度低、压裂改造难度大、工程技术装备要求高、勘探开发成本高等挑战。适用于页岩油气开发的旋转导向钻井、超深层优快钻井、长水平段分级压裂、微地震监测、大型电动压裂装备等关键技术和装备尚不成熟。通过自主创新、引进国际先进技术,提升针对中高成熟度高压区页岩油资源、中高成熟度常压低压区页岩油资源、中低成熟度页岩油资源整体开发技术水平,才能在未来的页岩油开发中取得更大突破。

4.2.1 钻井效率

中国已经开始重视并逐步发展定向井钻井技术,以提高钻井机械钻速并缩短建井周期,但与美国相比,中国在钻井速度提升方面仍有较大的提升空间。美国钻井技术的进步尤为突出,通过采用高效率可移动钻机、井工厂优化设计、钻井优化设计等一系列低成本钻井关键技术,有效提高了页岩油气开发的经济效益。这些技术的应用提高了钻井时效,例如对于水平井“一趟钻”技术的推广使用,使其页岩油完井周期在13~16 d,大幅缩短钻井周期,提升钻井效率,还降低了作业成本,实现了单井钻井投资的大幅降低和节能减排优势,为页岩油气的高效开发奠定了基础。

中国在钻井完井技术方面也存在一些特有的挑战,地层埋藏深、地质构造复杂,这使得勘探投资金额大、施工风险高。针对中国特有的地质和技术条件,对于提高钻井速度提出了更高的要求,需要开展针对性的创新技术研发和应用试验,以进一步提高中国页岩油勘探开发的效率和经济效益。

4.2.2 压裂效果

压裂技术是页岩油开发中实现油气从致密储层中有效释放的重要手段。中国陆相页岩油储层类型多样、流量低、非均质性强、压力系数低,使得压裂过程中不易形成较好的体积裂缝或缝网,断裂韧性偏高,即使裂缝形成,维持裂缝向前延伸的能力也较弱,难以形成有效的支撑缝网;储层敏感性高、渗透率低、含水饱和度高等问题也限制了页岩油的有效开采,现有压裂技术不适用。为在页岩油储层中得到更好的压裂效果,不断创新压裂技术,发展了多种新型压裂工艺,如分段压裂、体积压裂等。随着页岩油勘探开发持续推进和地质特征认识不断深化,针对不同区域的页岩油差异明显,体积压裂技术与储层的匹配性亟需优化与提升。

综上所述,压裂效果的提升依赖多种技术的综合应用和不断创新。通过优化压裂液配方、采用新型压裂工艺、评估压裂效果以及应用先进的监测手段,以期提高页岩油勘探开发的效率和效果。

4.3 效率和成本问题

页岩油开发需要大量的资金投入,包括钻井、压裂以及后续的生产维护。效率和成本是页岩油勘探开发成功的关键因素。美国2012年页岩油的成本平均约为128美元/bbl,2017年页岩油的成本平均仅为46美元/bbl,生产成本大幅下降^[19]。美国页岩油的成功经验表明,通过技术创新、精细管理和市场机制的有效运用,可以显著提升作业效率并降低成本。

中国页岩油开发的成本普遍较高,主要原因是技术水平不足和劳动生产率低,在一些关键技术领

域,如钻井速度和压裂效果与美国相比仍存在显著差距,这极大制约了勘探开发效率的提升。截止2020年,鄂尔多斯盆地庆城油田长7段页岩油的生产成本为52美元/bbl,准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组页岩油的生产成本为72美元/bbl,部分地区因处于开发试验初期,价格更高达90美元/bbl以上^[19]。

中国页岩油产业在发展过程中,页岩油开发成本的控制面临着很大的困难,高成本导致投资回报率,影响企业的投资意愿。应充分借鉴美国的经验,结合自身特点,探索适合中国国情的发展模式,以实现效率和成本的最优平衡。

4.4 持续发展的问題

(1) 缺少全生命周期开发认识。在页岩油勘探开发的复杂过程中,从初期开始就对页岩油井的整个生命周期进行细致规划,包括设计、建设、运营、维护直至最终废弃和环境恢复等各个阶段。全生命周期管理的目的在于优化资源配置,降低长期运营成本,提高页岩油井的经济效益。在地层高温高压及纳米尺度条件下,页岩油储层的表征、赋存状态、相态演化以及岩石力学变化等方面缺乏有效的试验研究和模拟技术,需要提升研究手段、深化规律性认识,建立规模效益开发评价标准和指标体系,构建不同类型页岩油规模效益开发模式和系统管理,以指导页岩油的科学开发^[20]。通过这种全生命周期的开发管理,可以确保页岩油产业在面临油价波动、技术更新和政策变化等不确定因素时,仍能保持稳定和持续的发展。

(2) 尚未建立提高采收率技术体系。页岩油采收率整体偏低,提高采收率技术体系尚未建立。中国陆相页岩油目前水平井+体积压裂开发方式下产量呈“L”型快速递减特征,递减速度快,采收率平均低于10%。

页岩油的采收率低的主要原因在于地质条件复杂和技术限制。中国页岩油资源分布广泛,但各地质区块的特性差异较大,导致统一的开采方案难以有效实施;受陆相沉积体系多样性影响,储层非均质性强,甜点小而多;已开发页岩油区的气油比低、部分原油流动性差、高蜡、单井产量低,EUR偏低。页岩纹层交互发育,纹层间存在渗透率差异,驱替过程中渗流模式不清楚。

(3) 中国陆相页岩油普遍面临着流动性差、递减快、一次采收率低的问题。为达到高效、低成

本的标准,亟需攻关陆相页岩油提高采收率技术,提高页岩油开发效益,如立体井网开发技术、重复压裂技术、CO₂压裂技术、CO₂驱替技术等^[21-24]。重复压裂作为一种有效的提高采收率手段,在国际上已有广泛应用,但在中国由于技术和管理上的挑战,尚未得到广泛实施。此外,如何平衡提高采收率与成本控制之间的关系,也是页岩油产业需要深入研究的问题。

5 结论

(1) 页岩油是中国油气增储上产的战略接替资源,加快勘探开发不仅关系到国家能源安全,也是推动能源生产和消费革命的重要力量。中国页岩油勘探领域近年来取得了显著进展,4个页岩油开发示范区的设立,标志着页岩油开发进入了新的阶段。尽管在实际操作中遇到了许多挑战,但页岩油作为一种新型资源,其勘探潜力得到了业内的广泛认可。随着研究和开发的不断推进,页岩油的未来发展,对国家的能源安全和经济发展具有重要意义。

(2) 基础理论突破是页岩油开发的关键。技术创新能够直接推动页岩油勘探和开发的进程,提高开发效率和降低成本。基础理论的研究有助于深化对页岩油成藏机理、储层特性、流动规律等方面的认识,为技术创新提供科学依据和指导。中国陆相页岩油成藏地质条件复杂多样,因此,需要进一步开展陆相页岩油地质理论与开发理论研究,建立具有中国地质特色的陆相页岩油地质开发理论体系。

(3) 成本控制与效率提升面临双重挑战。页岩油开发的成本普遍较高,这直接影响了投资回报率和企业的投资意愿。中国页岩油产业在发展过程中,应充分借鉴美国的经验,结合自身特点,探索适合中国国情的发展模式。通过技术创新、精细管理和市场机制的有效运用,可以提升作业效率并降低成本。力争“十四五”时期,助力老区原油稳产接替,通过技术组合创新和管理机制探索,将平衡油价降低到较合理的水平(如40~50美元/bbl)。

(4) 持续发展问题是页岩油勘探开发中需要重点关注的问题。通过勘探开发一体化、地质工程开发经济一体化、全生命周期管理、提高采收率、储层管理、产量分配以及储量评估等措施,有效提升页岩油产业的持续发展能力。

参考文献:

- [1] 钱兴坤, 陆如泉, 罗良才, 等. 2023年国内外油气行业发展及2024年展望[J]. 国际石油经济, 2024, 32(2): 1-13.
QIAN X K, LU R Q, LUO L C, et al. Global oil and gas industry in 2023 and outlook for 2024[J]. International Petroleum Economics, 2024, 32(2): 1-13.
- [2] 赵文智, 胡素云, 侯连华, 等. 中国陆相页岩油类型、资源潜力及与致密油的边界[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(1): 1-10.
ZHAO W Z, HU S Y, HOU L H, 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.
- [3] 杨勇. 济阳页岩油开发“三元”储渗理论技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(2): 337-347.
YANG Y. Shale oil development techniques and application based on ternary-element storage and flow concept in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(2): 337-347.
- [4] 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 X S, LI M W, ZHAO M Y. Shale oil development and utilization and its role in energy industry[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(1): 38-47.
- [5] 支东明, 李建忠, 杨帆, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践[J]. 中国石油勘探, 2023, 28(4): 14-23.
ZHI D M, LI J Z, YANG F, et al. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar Sag, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2023, 28(4): 14-23.
- [6] 蔚远江, 王红岩, 刘德勋, 等. 中国陆相页岩油示范区发展现状及建设可行性评价指标体系[J]. 地球科学, 2023, 48(1): 191-205.
YU Y J, WANG H Y, LIU D X, et al. Development status and feasibility evaluation index system of continental shale oil demonstration area in China[J]. Earth Science, 2023, 48(1): 191-205.
- [7] 叶俊华, 高亮, 陈宇, 等. 智能油田建设在吉木萨尔页岩油开发中的探索与实践[J]. 智能制造, 2021(增刊1): 39-42, 74.
YE J H, GAO L, CHEN Y, et al. Exploration and practice of intelligent oilfield construction in the development of Jimusaer shale oil[J]. Intelligent Manufacturing, 2021(S1): 39-42, 74.
- [8] 林铁锋, 王瑞, 张金友, 等. 松辽盆地古龙页岩油富集规律及有利区分布[J]. 大庆石油地质与开发, 2024, 43(3): 88-98.
LIN T F, WANG R, ZHANG J Y, et al. Enrichment law and favorable areas distribution of Gulong shale oil in Songliao Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2024, 43(3): 88-98.
- [9] 王勇. 济阳拗陷古近系沙三下—沙四上亚段咸化湖盆证据及页岩油气地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2024, 48(3): 27-36.
WANG Y. Evidence of paleogene saline lake basin in the 3rd and 4th members of Shahejie Formation in Jiyang Depression and geological significance of shale oil and gas[J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2024, 48(3): 27-36.
- [10] 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 H M. Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2022, 27(1): 73-87.
- [11] 杨勇. 济阳陆相断陷盆地页岩油富集高产规律[J]. 油气地质与采收率, 2023, 30(1): 1-20.
YANG Y. Enrichment and high production regularities of shale oil reservoirs in continental rift basin: A case study of Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2023, 30(1): 1-20.
- [12] 李阳, 赵清民, 吕琦, 等. 中国陆相页岩油开发评价技术与实践[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(5): 955-964.
LI Y, ZHAO Q M, LYU Q, et al. Evaluation technology and practice of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(5): 955-964.
- [13] JIA C Z, PANG X Q, SONG Y. Whole petroleum system and ordered distribution pattern of conventional and unconventional oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Science, 2023, 20(1): 1-19.
- [14] 贾承造, 庞雄奇, 郭秋麟, 等. 基于成因法评价油气资源: 全油气系统理论和新一代盆地模拟技术[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1399-1416.
JIA C Z, PANG X Q, GUO Q L, et al. Assessment of oil-gas resources based on genetic method: Whole petroleum system theory and new generation basin modeling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(9): 1399-1416.
- [15] 贾承造, 庞雄奇, 宋岩. 全油气系统理论基本原理[J/OL]. 石油勘探与开发, 2024(2024-06-28)[2024-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20240627.0943.002.html>.

- JIA C Z, PANG X Q, SONG Y. Basic principles of full oil and gas system theory[J/OL]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024 (2024-06-28) [2024-07-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2360.TE.20240627.0943.002.html>.
- [16] 贾承造, 姜林, 赵文. 页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(6): 695-706.
- JIA C Z, JIANG L, ZHAO W. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(6): 695-706.
- [17] 刘惠民, 王敏生, 李中超, 等. 中国页岩油勘探开发面临的挑战与高效运营机制研究[J]. *石油钻探技术*, 2024, 52(3): 1-10.
- LIU H M, WANG M S, LI Z C, et al. Challenges and efficient operation mechanism of shale oil exploration and development in China[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2024, 52(3): 1-10.
- [18] 唐大麟. 当前我国页岩油发展中面临的问题与对策: 访中国科学院院士、石油地质学家金之钧[J]. *中国石油企业*, 2022(10): 16-19, 127.
- TANG D L. Problems and countermeasures in the development of shale oil in China: Visited Jin Zhijun, academician of Chinese Academy of Sciences and expert of petroleum geology[J]. *China Petroleum Enterprise*, 2022(10): 16-19, 127.
- [19] 贾承造. 中国石油工业上游前景与未来理论技术五大挑战[J]. *石油学报*, 2024, 45(1): 1-14.
- JIA C Z. Prospects and five future theoretical and technical challenges of the upstream petroleum industry in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45(1): 1-14.
- [20] 袁士义, 雷征东, 李军诗, 等. 陆相页岩油开发技术进步及规模效益开发对策思考[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(5): 13-24.
- YUAN S Y, LEI Z D, LI J S, et al. Progress in technology for the development of continental shale oil and thoughts on the development of scale benefits and strategies[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2023, 47(5): 13-24.
- [21] 吴宝成, 李建民, 邬元月, 等. 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 B C, LI J M, WU Y Y, et al. 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.
- [22] 张涛, 李相方, 王香增, 等. 低渗致密复杂叠置储层组合立体井网高效动用方法: 以延安气田为例[J]. *石油学报*, 2018, 39(11): 1279-1291.
- ZHANG T, LI X F, WANG X Z, et al. Efficient mobilization method of stereoscopic well pattern in low-permeability complex superimposed tight reservoir: A case study of Yan'an gasfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2018, 39(11): 1279-1291.
- [23] 雷群, 胥云, 才博, 等. 页岩油气水平井压裂技术进步与展望[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(1): 166-172, 182.
- LEI Q, XU Y, CAI B, et al. Progress and prospects of horizontal well fracturing technology for shale oil and gas reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(1): 166-172, 182.
- [24] 赵玉龙, 黄义书, 张涛, 等. 页岩气藏超临界CO₂压裂—提采—封存研究进展[J]. *天然气工业*, 2023, 43(11): 109-119.
- ZHAO Y L, HUANG Y S, ZHANG T, et al. Research progress on supercritical CO₂ fracturing, enhanced gas recovery and storage in shale gas reservoirs[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(11): 109-119.
- (编辑: 王环 曹梦迪)