

特邀稿件

页岩油气革命与页岩油气、致密油气基础地质理论问题

贾承造^{1*}, 姜林², 赵文²

1 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007

2 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

* 通信作者, jiacz@petrochina.com.cn

收稿日期: 2023-10-19

中国石油科学研究与技术开发项目“油气地质基础新理论新技术研究”01课题“全油气系统理论与非常规油气成藏机理”(2021DJ0101)资助

摘要 页岩革命使美国摆脱了对进口石油天然气的依赖, 成为了石油天然气净出口国。本文回顾了美国页岩革命历程, 总结了页岩油气、致密油气的特点, 分析了我国页岩革命的发展现状, 提出了页岩油气、致密油气基础地质理论问题。研究表明: (A) 美国具有资源禀赋好、科学技术创新能力强、投资能力巨大、工程施工能力强大等优势, 已经实现了页岩革命, 中国页岩革命正在进行中。(B) 与常规油气相比, 页岩油气致密油气的成藏模式、开发方式均有所不同。其具有连续性大面积分布, 油气自封闭成藏, 开发生产工程量巨大, 油气田生产的“分布式”特点可灵活应对建产减产, 以及采收率低的特点。(C) 我国页岩油气进一步大幅上产需要满足7个条件: ①资源清楚; ②水平井、压裂技术成熟; ③成本可控; ④后期提高采收率工程空间大; ⑤符合环境要求; ⑥充分的资本投资; ⑦强大的工程施工能力。(D) 全油气系统具有常规油气—致密油气—页岩油气序列成藏的规律。页岩油气、致密油气藏具有储层致密、流体组成与相态复杂、油藏驱动方式多样的基本特征, 面临着储层地质模型与流动模型不清的问题。需要进一步开展全油气系统理论研究, 并大力发展甜点评价技术与压裂技术。

关键词 页岩革命; 页岩油气; 致密油气; 基础地质理论问题

The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas

JIA Chengzao¹, JIANG Lin², ZHAO Wen²

1 China National Petroleum Corporation, Beijing 100007, China

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

Abstract The shale revolution has weaned the US from its dependence on imported oil and gas to become a net exporter. This paper reviews the history of the shale revolution in the United States, summarizes the characteristics of shale oil and tight oil and gas, analyzes the development status of the shale oil and gas revolution in China, and puts forward the basic geological theory of shale oil and tight oil and gas. The research shows that: (A) The United States has advantages such as good resource endowment, strong scientific and technological innovation ability, huge investment capacity, and strong engineering construction capacity, and has already realized the shale revolution. China's shale revolution is now under way. (B) Compared with conventional oil and gas, shale oil and tight oil and gas have different accumulation modes and development methods. They have the characteristics of continuous large-area distribution, self-sealing oil and gas accumulations, huge development and production engineering, and the "distributed" characteristics of oil and gas field production can flexibly cope with the characteristics of production reduction

引用格式: 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. 石油科学通报, 2023, 06: 695-706

JIA Chengzao, JIANG Lin, ZHAO Wen. The shale revolution and basic geological theory problems of shale and tight oil and gas. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 695-706. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.065

and low recovery. (C) Seven conditions need to be met for the further production of shale oil and gas in China: These are (1) Clear resources; (2) Mature horizontal well and fracturing technology; (3) The cost is controllable; (4) The engineering space of enhanced oil recovery in the late stage is large; (5) Meet environmental requirements; (6) Adequate capital investment; (7) Strong engineering construction ability. (D) The whole oil and gas system has a sequence of conventional oil and gas, tight oil and gas and shale oil and gas. Shale oil and gas and tight oil and gas reservoirs have the basic characteristics of tight reservoirs, complex fluid composition and phase state, and diverse reservoir driving modes, and we are faced with the problem of unclear reservoir geological and flow models. It is necessary to carry out further theoretical research of the whole oil and gas system, and vigorously develop sweet spot evaluation technology and fracturing technology.

Keywords shale revolution; shale oil and gas; tight oil and gas; basic geological theory problem

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.06.065

0 引言

21世纪初,美国开始结合水平井技术和水力压裂技术从页岩储层中获取油气,这使得美国本土的石油天然气产量快速增加^[1]。由于页岩革命的成功,2019年,美国打破了75年来对进口石油的依赖,再次成为石油净出口国^[2]。

我国页岩油气资源丰富。页岩油资源量283亿t,在鄂尔多斯、准噶尔、松辽等盆地皆获得了重大突破。近年来页岩油新增探明储量13.4亿t,2021年页岩油产量240万t,剩余资源量270亿t。页岩气资源量105.7万亿m³,已在四川盆地获得重大突破,建成长宁-威远、涪陵、昭通3个国家级示范区,累计探明储量2.74万亿m³,2021年页岩气产量230亿m³,剩余资源量103万亿m³^[3]。

近些年来,我国石油工业坚定不移推动“油气增储上产七年行动计划”,油气增储上产取得阶段成效。2022年我国原油产量2.05亿t,时隔6年原油产量重回2亿t,天然气产量2201.1亿m³。但与此同时,2022年我国进口天然气1512亿m³,天然气对外依存度为40.7%,进口原油5.08亿t,原油对外依存度高达71.2%^[4]。能源安全仍然面临严峻的形势与挑战。我国页岩油气发展势头强劲,是未来油气增储上产的重要接替资源。

本文将回顾美国页岩革命的历程,总结美国页岩革命的优势,探讨页岩油气、致密油气的特点,分析我国页岩油气、致密油气的发展现状,提出我国页岩油气、致密油气基础地质理论问题。

1 我国页岩油气革命正在进行中

1.1 页岩革命的定义

“页岩革命”也叫“页岩油气革命”,页岩油气的

概念来自于美国,包括广义和狭义两种定义。广义的“页岩革命”包括了页岩油气、致密油气、煤层气等非常规油气(图1),狭义的页岩油气仅包括目前人们关注的页岩油和页岩气。

广义的页岩油气的定义包括了非常规油气的主体。非常规油气的出现成为了全球石油工业的重大事件。非常规油气与常规油气在成藏机理、分布规律、储层特征与流动机制、开发机理与技术等方面存在本质上的区别。尽管二者都属于同一个全油气系统中干酪根生烃的碳氢化合物,但在过去石油工业发展的100多年的时间里,人们缺乏对非常规资源的关注。

非常规油气的成功开发对石油工业产生了巨大影响。一是油气资源大幅增加,非常规油气的资源量已经超过了常规油气的资源量。二是非常规油气揭示了含油气盆地石油地质的新规律,这使得石油地质科学出现了新领域。三是发展了非常规资源开发需要的技术,为石油工业的下一步发展指明了新方向。

1.2 美国已经实现页岩油气革命

页岩油气的出现让世界石油工业的发展出现了转向。美国已经实现了页岩油气革命,中国正在进行页岩油气革命,俄罗斯、沙特等国家未来在常规油气大量开采后也会走向非常规油气的勘探开发。

页岩油气作为新的资源类型,人们对它从未知到已知,从部分了解到科学掌握的过程需要全新的理论和技术。同时,页岩革命是一个过程,页岩革命成功的标志是油气产量的大幅增加。

美国成功地实现了页岩革命。美国在很长时间内是全球油气产量最高的国家,其历史最高为1970年,产油4.8亿t,产气6200亿方。但随着美国常规油气勘探开发的进行,其常规油气资源逐渐枯竭。2008年,美国油气产量降至历史最低,石油产量降至2.48亿t,天然气产量降至4840亿方,降至世界第三

产油国、第二产气国。

2008年美国开启了页岩油气革命的进程。2015年美国天然气产量7403亿方，重回全球第一，2021年产量已达9342亿方。2017年美国原油产量达到7.1亿t，当年俄罗斯原油产量为5.36亿t，沙特原油产量为5.15亿t，美国原油产量重回世界第一。页岩革命在美国实实在在获得了成功。美国油气产量大幅增加，原油产量增长了2倍，天然气产量增长了1倍

(图2)。

美国页岩油气发展历程可分为3个阶段：

(1)1990年以前，北美地区针对致密油气开展了不同程度的探索，但这种探索未引起重视^[6]。

(2)1990—2008年，人们开始有计划地积极开展页岩油气开发试验。典型事件是1997年美国页岩气之父乔治·费迪亚斯·米切尔(George Phydias Mitchell)的水力压裂技术成型，此时页岩油气开发技术已基本形

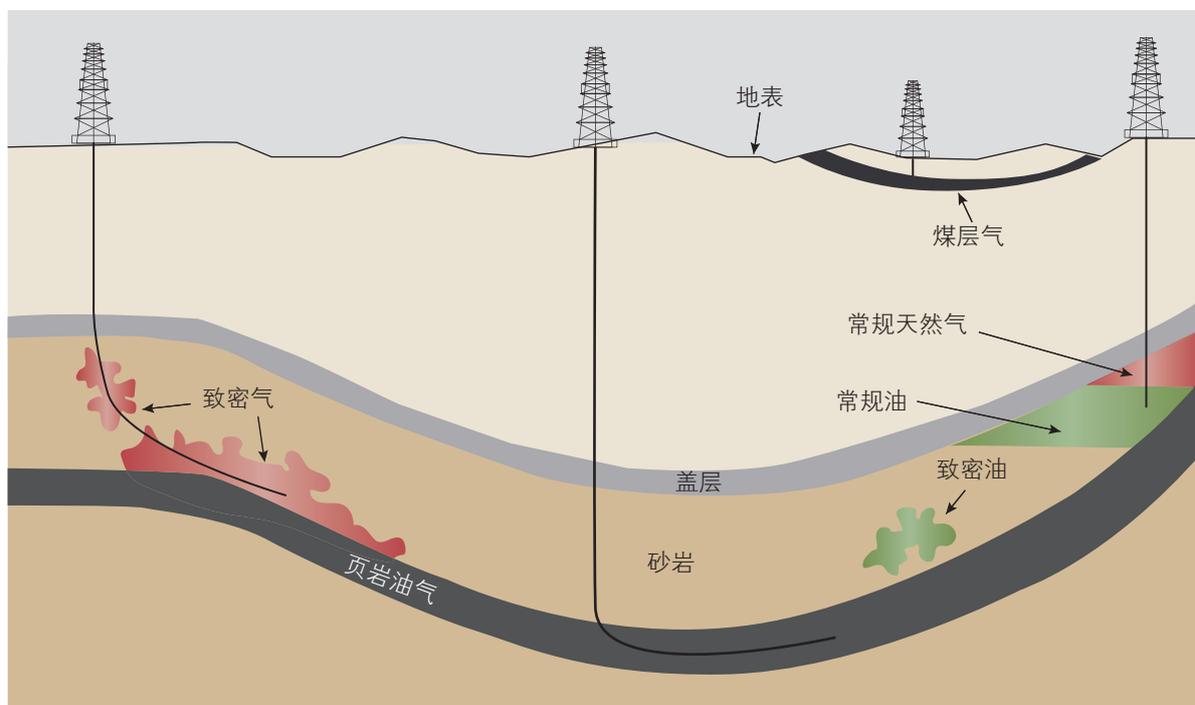


图1 页岩油气、致密油气、煤层气、常规油气分布示意图(据文献[5])

Fig. 1 Distribution diagram of shale oil and gas, tight oil and gas, coalbed methane and conventional oil and gas (according to reference [5])

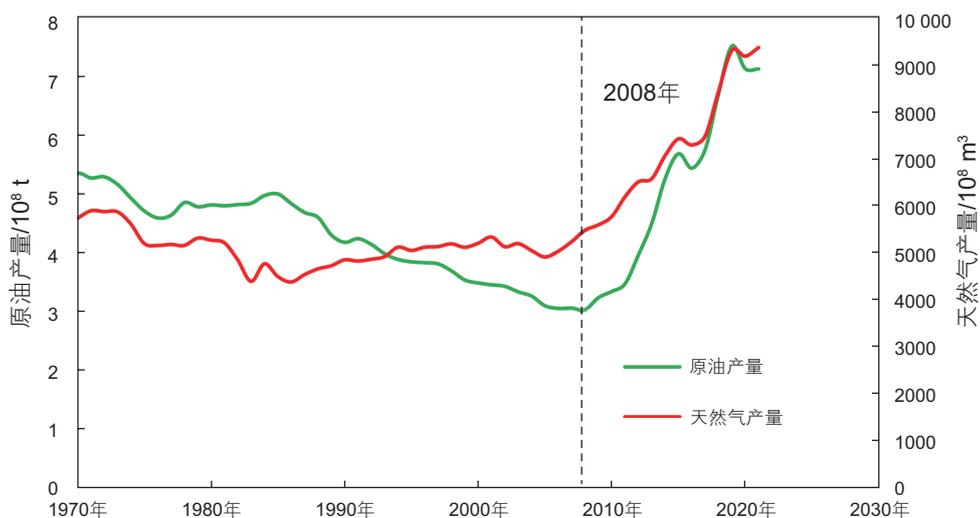


图2 美国历年石油天然气产量

Fig. 2 Oil and gas production in the United States over the years

成^[7]。

(3)2008年至今,页岩油气开发技术日趋成熟,资本开始大量进入,大规模的工业化页岩油气勘探开发拉开序幕^[8]。

由于美国页岩革命的成功,美国原油产量从2.48亿t增长到7.11亿t,增长了4亿t;天然气产量从4840亿方增长到9342亿方,增长了4500亿方。美国石油天然气的增量主要来自页岩油气,其页岩革命的成功具有自身的优势条件:

(1) 资源禀赋好

基础石油地质条件决定了常规油气资源,同时也决定了页岩油气资源。美国一直以来都是石油地质条件最好,常规油气资源最丰富的国家之一。美国石油工业发展早,常规油气资源开发较为充分。在其常规油气资源逐渐枯竭后,转向到非常规油气资源的开发。美国同样也是非常规油气石油地质条件好、资源量最大的国家,这支撑了美国页岩油气产量的快速增长。

(2) 科学技术创新能力强

美国钻井和压裂技术发展早,先发优势明显。随着美国石油工业的发展,贝克休斯等石油公司积累了大量钻井经验,这些宝贵的技术经验推动了美国水平井技术的突破^[8]。压裂技术也首先由美国哈里伯顿石油固井公司投入商业运营。这些石油企业创新能力强,技术先进,发展迅速。

(3) 投资能力巨大

近30年,美国政府先后投入了60多亿美元进行非常规天然气勘探开发活动,包括拨款、贷款和担保、培训资助、科研资助和勘探的直接投入。美国目前每口井的钻井压裂成本在600~800万美金。2009—2013年,美国每年新增钻井1万口左右,每年钻井压裂投资高达600~800亿美元。美国的页岩油气勘探开发具有十分充足的财力支持。

(4) 工程施工能力强大

美国石油工业工程能力强大。从2008年至今每年完钻、压裂水平井超过1万口,且技术先进、质量可靠、效率高,表现出很高的劳动生产率。中国石油天然气集团公司2022年共完钻2460口水平井,工程能力具有明显差距。

总而言之,美国页岩革命的成功取决于多方面的因素。既有自身页岩油气资源储量大,地质环境好的因素;也有资本市场完善,反应迅速灵活的原因;更有工程能力强,政策激励等因素。

1.3 页岩油气、致密油气的特点

页岩油气、致密油气与常规油气相比其成藏模式、开发方式均有所不同。具其自身的特点:

(1) 连续性大面积分布,油气自封闭成藏

页岩油气与致密油气相比于常规油气更容易成藏,容易保存,成藏门槛低,资源量大。但页岩油气、致密油气储层更为致密,渗透率普遍小于1mD,微-纳米级孔喉系统十分发育,孔喉普遍小于1~2 μm ,在渗流过程中难以形成达西流动。开发过程只能采用大规模水平井压裂技术,形成“人工油气藏”。

(2) 开发生产工程量巨大

常规油气可以形成优质资源,开发过程中可以实现“少井高产”的场面。如克拉2大气田,探明地质储量2800亿方,开发过程中仅用12口井便可达到年产120亿方天然气的产能,平均单井日产300万方。四川盆地安岳气田灯影组、龙王庙组等碳酸盐岩常规气藏,单井日产也能达到30万方以上。

页岩油气井、致密油气井单井产量偏低,难以高产。大规模产能的形成需要依靠更多的生产井数和大规模工程量来实现,产能与工程量基本成正比。如页岩气生产井压裂后平均配产仅能达到(6~10)万方气/天,且产量递减快,稳产增产需要加大钻井工程量、大规模压裂和重复压裂。

(3) 油气田生产具有“分布式”特点,可灵活应对建产和减产时的调整

大型页岩油气、致密油气田虽然有巨大的储量和产量,但却是由成百上千孤立的“人造油气藏”构成的,相互间几乎隔离,并没有统一的油气水界面和压力系统。因此,其建设与生产具有分布式特点。这使得页岩油气致密油气在分批分期建产增产及建产关井时具有极大的便利性和灵活性。这种优势在建设提产速度和应对低油价关井减产时,相对巨型深水常规油气田尤其明显。

(4) 采收率低

常规气田,如克拉2气田预测现有经济技术条件最终采收率采收率可达70%以上,但是鄂尔多斯盆地苏里格致密气藏预计现有经济技术条件最终采收率仅能达到30%以上,而对于页岩气藏来说,如四川盆地长宁气田预计现有经济技术条件采收率仅能达到20%。页岩油采收率仅能达到10%~20%页岩油气成本高,投资回报率低(表1)。

(5) 人类对非常规油气的认知程度低

页岩油气对我国石油工作者们来说是一个全新的

表 1 中国主要气藏采收率(据参考文献[11])

Table 1 Recovery rate of major gas reservoirs in China (according to references [11])

区块	气藏类型	预测现有经济技术条件最终采收率/%
克拉 2	中高渗碎屑岩气藏	71
安岳	碳酸盐岩气藏	58
涩北	疏松砂岩气藏	48
苏里格	致密砂岩气田	35
长宁	页岩气藏	22

领域,目前的储层地质模型,流动模型均未能很好地描述页岩油气藏。页岩油气、致密油气开发过程中的甜点控制因素不清,目前的地质认识和成功经验主要是工程实践的结果,远达不到对常规油气的科技认知程度,理论技术的创新难度大。

美国依靠先进低成本技术和规模效益,基本实现了效益开发,但仍未能从根本上完全解决这些问题,针对页岩油气、致密油气的勘探开发理论技术仍在不断研究改进中。尽管我国已取得很大成果,相比之下仍具有差距。

1.4 我国页岩油气发展现状

中国油气资源紧张,人口多,需求量大,地缘政治复杂,常规油气开发已经发展到较高勘探程度阶段,非常规油气资源意义重大,是未来油气产量重要的增长点。本文讨论的页岩油气概念包括了页岩油气、致密油气、煤层气 5 类资源。

1.4.1 致密气与页岩气

我国目前是世界第四大产气国,年产天然气 2200 亿方左右,是我国油气产量历史上排名最高的时期。我国非常规天然气勘探开发已经取得了较好的

进展,近些年天然气产量的增长主要依靠非常规天然气资源。2021 年我国年产天然气 2200 亿方,其中非常规天然气占比 40%,包括致密气 537 亿方,页岩气 230 亿方,煤层气 45 亿方,共 812 亿方。长期规划 2030 年全国产气 3000 亿方,预测非常规气达到 1500 亿,占比 50%,其中包括页岩气 600 亿方、致密气 700 亿方、煤层气 200 亿方。

我国致密气产量规模大,增长稳定^[9],致密气产量从 2006 年起快速上升(图 3),2020 年致密气产量达 470 亿 m³。苏里格致密气田已成为全国最大的气田。通过持续扩大目前已有建产区域和提高采收率技术的推广应用,预计我国致密气可在 500 亿方左右稳产^[10]。

经过 10 余年的勘探开发攻关,中国南方海相上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩气开发取得重大突破,2021 年产量达到 228 亿方^[11]。预计 2035 年可持续上产至 550 亿方,其产地主要分布在四川盆地泸州、渝西等海相深层和鄂东海陆过渡相区块^[12]。我国页岩气勘探开发目前主要面临着扩大规模,加快产能建设的挑战:

(1)如何寻找第二个大规模海相龙马溪型页岩气区,从而达到持续上产的目的。

(2)寻找新的资源类型,开拓新的领域。包括陆相海陆过渡相页岩气、湿气、凝析气等。美国页岩气主要为湿气,凝析油气,轻质油气,而我国的页岩气藏则基本为干气。塔里木盆地深层—超深层碳酸盐岩存在凝析油气资源,准噶尔盆地深层可能存在湿气、凝析油气、轻质油气资源,有待进一步发现页岩气资源。

(3)如果我国实现天然气年产 3000 亿方并稳产,必须建设 2 个千亿方大气区,要推进建设四川和鄂尔多斯千亿方大气区。

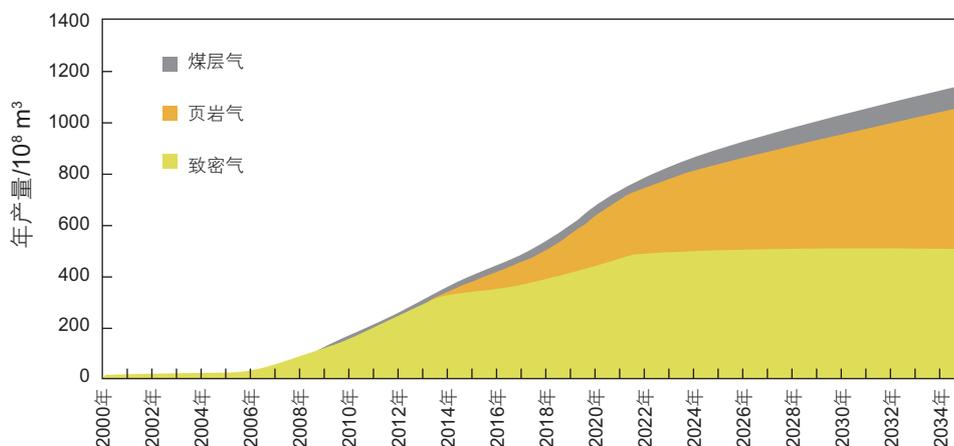


图 3 至 2035 年中国非常规气产量预测(据参考文献[12])

Fig. 3 Forecast of China's unconventional gas production to 2035 (according to reference [12])

总体而言,我国页岩气、致密气的勘探开发与地质理论水平,生产指标包括采收率基本上与美国相当,目前主要面临规模不足的问题。

1.4.2 致密油

致密油是页岩革命的重要组成。中国致密油起步晚、发展快,我国2022年致密油产量1400万t,主要包括鄂尔多斯盆地长6段、长8段和准噶尔盆地玛湖致密砾岩油藏。我国石油工业界有关页岩油/致密油的定义不统一,油气田开发界将鄂尔多斯盆地长6段、长8段油藏定义为特低渗透油藏,但实际上长6段、长8段是典型的致密油藏。2008年起,长6段、长8段开始开发,2014年原油产量已经达到800万t,目前年产达到860万t。

准噶尔盆地玛湖砾岩致密油藏自2017年开始开发,2022年原油产量300万t,预计2025年原油产量可达500万t。准噶尔盆地致密油资源量巨大,除百口泉组砾岩致密油外,还包括岩性复杂的风城组储层中的页岩油以及火山岩、砾岩等致密油。三叠系至二叠系的乌尔禾组同样具有很大潜力。

1.4.3 页岩油

页岩油在国内受关注度最高,远高于致密油、致密气和页岩气。这主要是因为相比天然气资源,我国石油资源更加紧张。我国2008年原油产量1.8亿t,2015年产量达到历史最高2.15亿t,2016年产量下降至1.89亿t。2018年习总书记提出加大油气勘探开发力度,国家能源局制定七年行动计划,2022年产量达2.04亿t,重回2亿t。这个过程充分表明我国目前原油产量压力大,资源紧张,增产难度大的现状。

我国石油工业界对页岩油的开发寄予了极大期望,开展了大量的勘探试采和地质工程技术攻关。尽管2022年我国页岩油产量近300万t,但外界仍感到我国页岩油勘探开发发展缓慢,对我国页岩油发展进程存在一定误解,这主要是因为:

(1)页岩油是一种全新的油气资源,人们对其地质特征、开发规律认识薄弱,成功开发页岩油对我国石油工业是一个革命性的挑战。

(2)与常规油气勘探开发相比,页岩油开发需要大批全新的技术装备。必须依靠旋转导向设备、水平井钻井技术、压裂技术等,需要通过持续的技术攻关才能形成成熟技术。

(3)目前尚未掌握页岩油开发规律。页岩油的开发过程不仅初期要实现“出油”,更需要给后续的开发预留技术空间,必须持续攻关提高采收率技术,以达到高效开发的目的。

(4)由于页岩油单井产量低、开发工程量巨大,成本高,而投资回报率低,需要持续优化开发技术,降低成本。

纵观石油工业的发展历程,新型油气资源的成功开发普遍要经历3个阶段:首先在第一阶段要预探发现新资源;然后在第二阶段开展技术攻关和试采,形成成熟的系列开发技术;最后在第三阶段才能大规模投资,最终实现规模建产。

我国页岩油勘探开发目前处在第二阶段,仍在技术攻关和试采。页岩油下一步大幅上产需要基本满足7个条件:

(1)资源清楚。有充足的优质资源。

(2)技术成熟。水平井钻井与体积压裂技术成熟。

(3)成本可控。达到预期资本回报率。

(4)给未来的提高采收率留下空间。页岩油一次采收率非常低,需要持续发展提高采收率技术以实现高效开发。

(5)符合环境要求。实现绿色开发。

(6)充分的资本投资。

(7)强大的工程施工能力。

我国页岩革命正在进行中,对比以上7个标准,我们目前资源逐步清楚,技术接近成熟,但是成本仍然偏高,提高采收率技术尚在实验阶段,仍存在相当差距,需要持续攻关,完善地质理论和工程技术。特别是投资不足,工程能力仍然薄弱的问题,制约了下一步的规模开发。

页岩油开发已经在鄂尔多斯长7段、松辽盆地青一段,渤海湾盆地胜利油田和准噶尔盆地二叠系取得重大进展,随着三大石油公司的强力推进和国家的大力支持,我国必将在陆相页岩油开发中取得成功,陆相页岩油将成为我国今后石油长期稳产增产的主力资源。

我们预测,我国2030年如果保持原油2亿t稳产,需要页岩油产量达到1700万t,致密油产量达到1300万t,如果进一步增产到2.2亿t,则需要页岩油产量达到3000万t,致密油产量达到2000万t。

2 页岩油气、致密油气基础地质理论问题

2.1 全油气系统常规油气-致密油气-页岩油气序列成藏规律

全油气系统内发育3种不同的动力场:自由动力场、局限动力场与束缚动力场。成藏过程中,动力场的差异控制着不同类型油气藏形成的动力学过程。自

由动力场主要存在于高孔隙度、高渗透率的地层中，浮力控制着油气运聚过程，主要形成常规油气藏；局限动力场主要出现在低孔隙度、低渗透率的地层中，此时生烃膨胀力与毛细管压力主导着油气运聚过程，主要形成致密/页岩油气藏；束缚动力场主要存在于更为致密的储层中，此时扩散作用主导着油气运聚过程，主要形成页岩气(图4)。

在动力场的控制下，常规油气-致密油气-页岩油气序列成藏。准噶尔盆地二叠系由浅至深，依次发育常规油藏-致密油藏-页岩油藏(图5)。

以玛湖地区为例，常规油气藏主要分布在准噶尔

盆地西北缘阶梯式断裂带沿线的高孔、高渗的浅层储层中，分布于百口泉组、克拉玛依组和侏罗系八道湾组，平均孔隙度约为17.5%，渗透率约为205.3 mD。油气主要来自于风城组页岩烃源岩，具有圈闭成藏的基本特征，受浮力驱动控制。

致密油分布于百口泉组与上乌尔禾组，非浮力运移成藏。储层普遍为致密砾岩储层，呈现出连续性分布的特征，平面上没有明显的油水边界。渗透率为0.01~1 mD，单井产量低。玛湖凹陷斜坡带压裂水平井日产仅为20~30 t/d，气油比100~200。一类井EUR 45 000 t左右，二类井EUR 30 000 t左右。

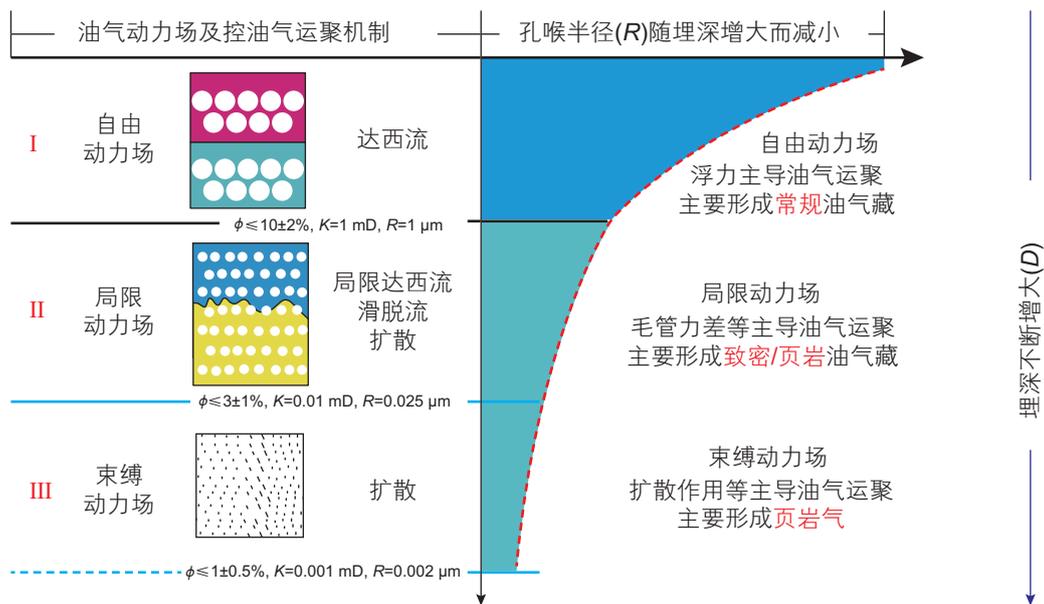


图4 全油气系统中发育的三种动力场

Fig. 4 Three dynamic fields developed in a whole oil and gas system

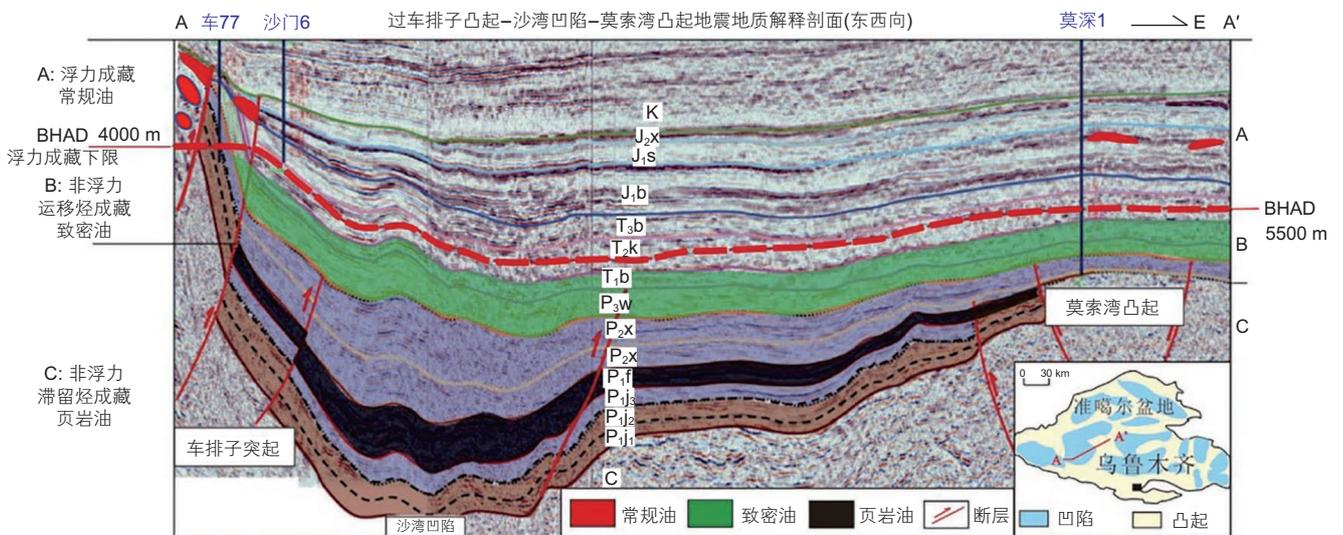


图5 准噶尔盆地二叠系全油气系统“页岩油-致密油-常规油”序列分布模式

Fig. 5 Distribution pattern of “shale oil-tight oil-conventional oil” in the whole Permian oil and gas system in Junggar Basin

页岩油分布于风城组,非浮力滞留烃成藏。MY1井在风城组4579~4852 m页岩段试油,2.5 mm油嘴最高日产油30.5 t,累产油1948.5 t,原油密度为0.84~0.90 g/cm³,50 °C下黏度为8.86~52.73 mPa·s,油质较轻^[13]。

准噶尔盆地玛湖地区油气序列完整,油气向上充注运移。由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。

准噶尔盆地玛湖地区油藏自烃源岩向上序列分布了页岩油、致密油、常规油,而鄂尔多斯盆地延长组则与此不同(图6)。长7段为一套优质的湖相烃源岩,厚度50~110 m,分布面积达8.5×10⁴ km²,有机质丰度TOC=2%~18%,R_o=0.9%~1.2%,主要发育I型、II型干酪根。在长7段发育页岩油(资源量31.2亿t)。油

气自长7段生成后,分布向上、向下排出,在长4+5—长6段与长8段形成连续分布的致密油藏。长4+5—长6段渗透率0.5~0.6 mD,致密油资源量53亿t,长8段渗透率0.57 mD,致密油资源量31.2亿t。油气继续向上下两个方向运移,最终在长1—侏罗系与长9段形成常规油气(表2)

2.2 页岩油气、致密油气储层地质模型与流动模型

与常规油气相比,页岩油气、致密油气储层孔喉分布从纳米尺度到微米尺度均有分布,具有多尺度的特点。页岩油气、致密油气的储层地质模型、流动模型与常规油气相比具有明显差异。

2.2.1 地质模型

页岩油气、致密油气普遍具有广泛式分布的特点。

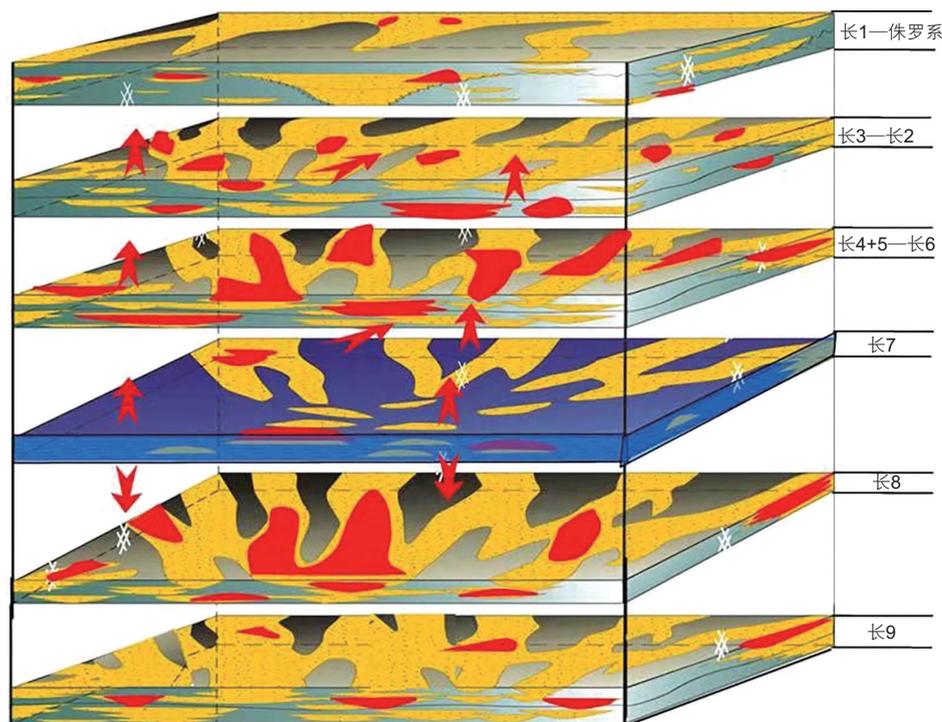


图6 鄂尔多斯盆地三叠系延长组成藏模式

Fig. 6 Reservoir model of Triassic extension in Ordos Basin

表2 鄂尔多斯盆地三叠系延长组序列分布

Table 2 Sequence distribution of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin

序号	层位	油藏类型	孔隙度/%	渗透率/mD	资源量/10 ⁸ t
1	长1段—侏罗系	常规油	15	10~100	1.2
2	长3段—长2段	致密油	12~16	0.7~0.9	16.0
3	长4+5段—长6段	致密油	11	0.5~0.6	53.0
4	长7段	页岩油	8.5	0.12	31.2
5	长8段	致密油	8.1	0.57	31.2
6	长9段	常规油	12.2	5.7	5.7

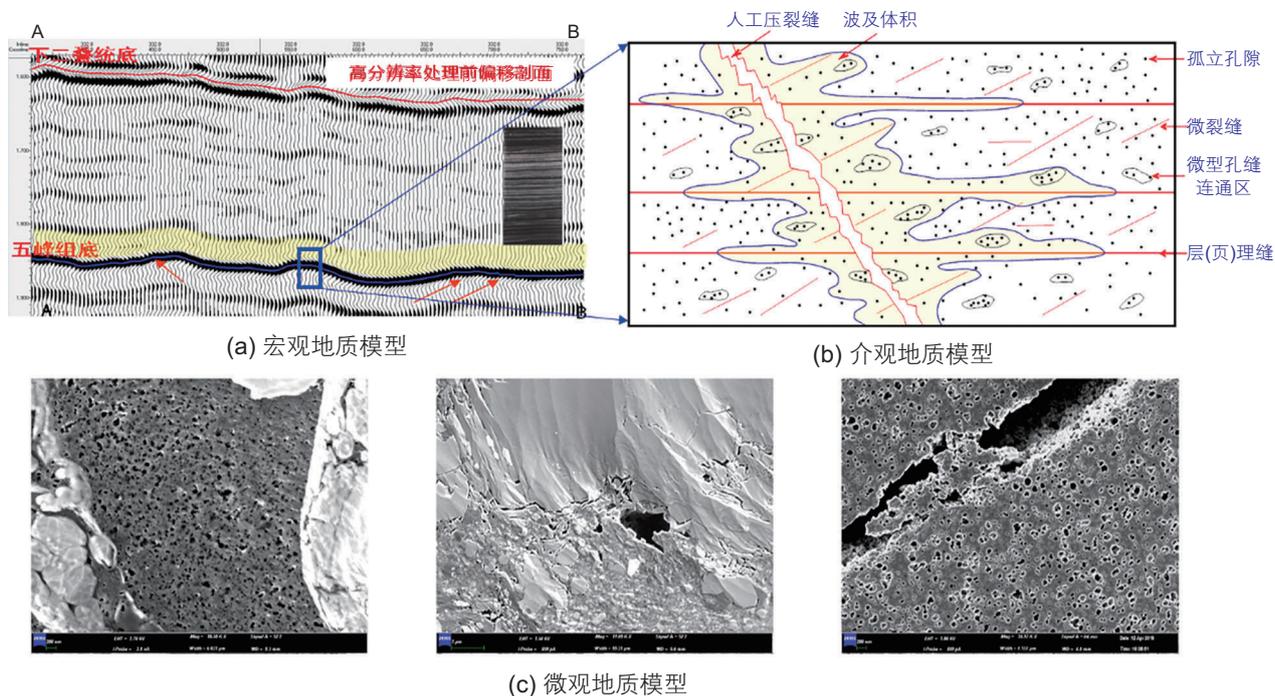


图7 页岩油气储层多尺度地质模型

Fig. 7 Multi-scale geological model of shale oil and gas reservoir

宏观上表现出一种均质性，具有大面积连续分布成藏、层序控制、岩性及物性稳定少变的特征(图7a)。

介观上，在总体致密的基础上，不均匀分布裂缝(缝网)与孔隙，裂缝包括微裂缝(构造、成岩、生烃成因)、层理缝、页理缝以及人工压裂缝(图7b)。

而微观上则分布着不同尺度的孔隙与微裂缝，孔隙包括孤立微纳米孔隙(有机或无机)、微型孔-缝连通区(微孔缝系统)(图7c)。

页岩油气、致密油气储层具有宏观上相对均质而微观上则表现出较强非均质性的特征。从纳米尺度的有机质孔隙，到微米尺度的微裂缝，到更大尺度的人工裂缝。相比于常规油气储层，页岩油气、致密油气储层具有多尺度的特征，这导致了油气流动模型上的差异。

2.2.2 流动模型

常规油气储层孔喉尺度较大，油气在其中的渗流规律符合达西流动规律，但非常规油气在流动方式上与常规油气十分不同。由于非常规油气储层具有多尺度的特征，油气在储层中的流动可同时存在达西流动、局限达西流动、滑脱流动与扩散四种流动模式(图8)。

在较大的孔喉或微裂缝中，油气表现为达西流动，此时的流动机理与常规油气相同；当孔喉尺度缩小后，油气表现为局限达西流动，对于致密油气与页岩油气来说，其开发过程中主要体现为局限达西流动。在非均质缝网的控制下，表现出不稳定驱替压差与相态变

化的特点，体现出多种流动方式、多相态混合的非典型渗流的特征。当孔喉进一步缩小后，孔喉中的油相难以流动，由于限域效应，气相则表现出扩散滑脱流动或扩散流动的特点。

从纳米到微米，从微裂缝到人工裂缝，从达西流动到扩散作用，非常规油气藏跨越了多个尺度，具有十分复杂的渗流机制与规律。

2.3 页岩油气、致密油气的基本特征与开发生产机理

由于储层更为致密，相比于常规油气藏，页岩油气藏、致密油气藏具有其独特的油气地质特征与开发生产机理。

2.3.1 油气藏基本特征

(1) 有限体积的裂缝-微孔隙致密储层

致密油气、页岩油气储层致密，储集空间十分有限，主体发育纳米级孔喉系统，局部发育微米-毫米级孔隙。其中页岩气储层孔径为5~200 nm，致密砂岩气储层孔径为40~700 nm，致密灰岩油储层孔径为40~500 nm，致密砂岩油储层孔径为50~900 nm(图9)。

(2) 流体组成与相态复杂

页岩油气藏、致密油气藏地下流体组成复杂。包括气态的干气、湿气、凝析气、人工注入气体，以及液态的轻质油、黑油、少量地层水、压裂液等。复杂的流体组成给开发带来了困难。

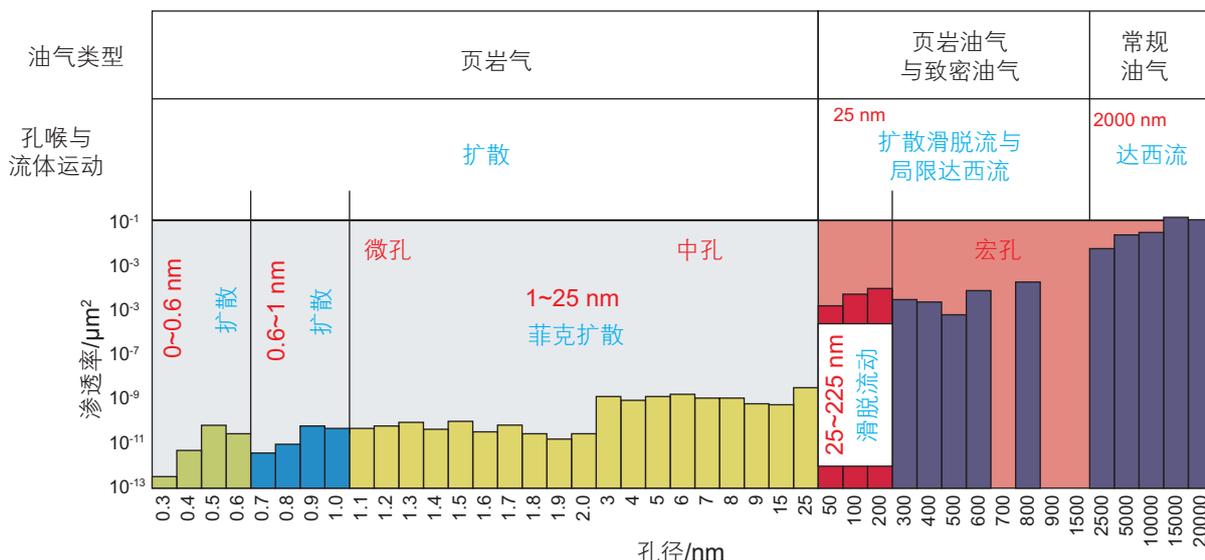


图 8 页岩油气、致密油气与常规油气流体运动特征(据参考文献[14]修改)

Fig. 8 Fluid movement characteristics of shale oil and gas, tight oil and gas and conventional oil and gas (according to reference [14])

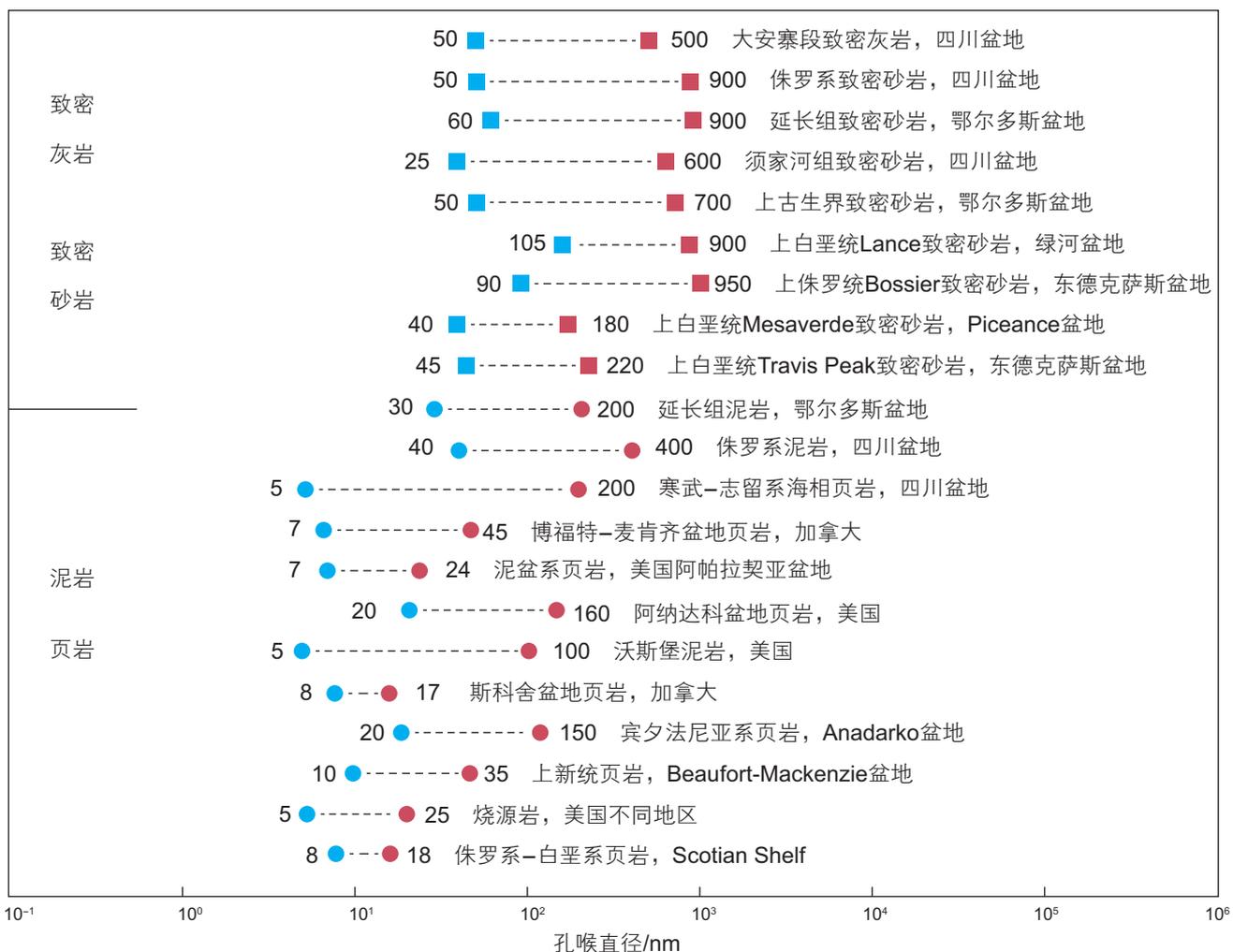


图 9 全球典型非常规油气储层纳米孔喉分布(据文献[15])

Fig. 9 Distribution of nanopore throat in typical unconventional oil and gas reservoirs around the world (according to reference [15])

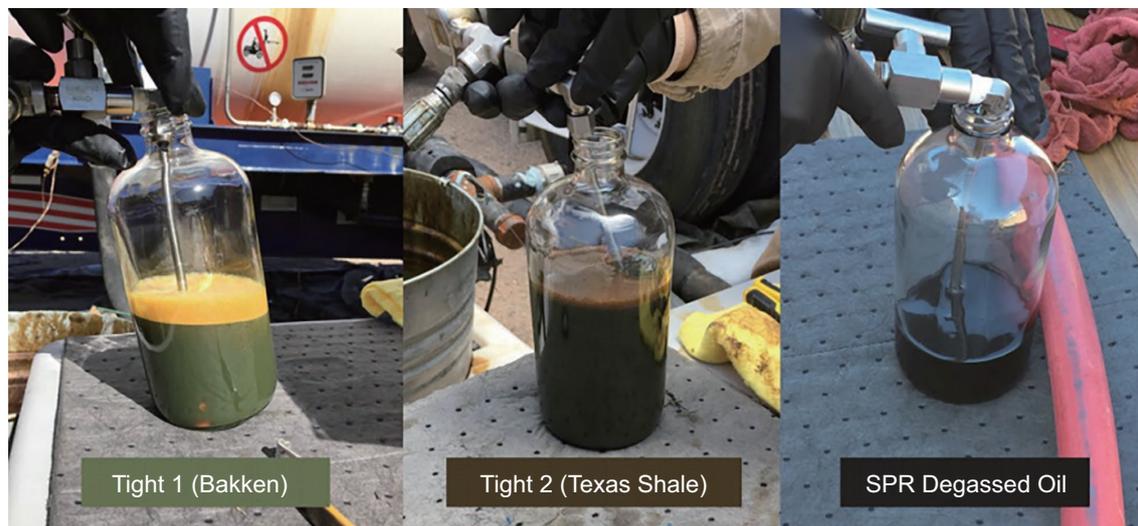


图 10 页岩油与常规油对比(原油温度 75~80 °F, 环境压力 11 psia, 海拔 7000 ft)(图片来源: 美国能源部)

Fig. 10 Shale oil v.s. conventional oil (oil temperature 75~80 °F, ambient pressure 11 psia, altitude 7000 ft) (US Department of Energy)

同时, 流体相态对页岩油、致密油开发效果有重大影响。北美已经成功开发了高气油比、以轻质油凝析油为主的页岩油资源(图 10, 从左向右依次为 Bakken 页岩油、Texas 页岩油、以及普通的脱气原油)。我国也已经突破高气油比的轻质页岩油资源, 目前正在探索低气油比的黑油页岩油开发。

(3) 油藏驱动方式多样

页岩油气藏、致密油气藏需要压裂后才能形成工业油气流。开发过程中页岩油藏、致密油藏驱动方式多样, 压裂过程中, 压裂液的渗吸作用同样可以起到驱油的作用。还包括超压地层弹性驱动、高地应力岩石骨架弹性驱动、气体(包括溶解气)弹性膨胀驱动、重力驱动、人工抽吸动力驱动等。

页岩气、致密气则普遍表现为大面积连续分布的特征, 没有明显的边底水, 与常规油气藏相比, 缺少边底水弹性驱动。

2.3.2 开发生产机理与提高采收率方向

页岩油气藏、致密油气藏基本地质特征与常规油气藏的差异也导致了其开发机理与未来提高采收率方向的不同。

(1) 开发生产机理

与常规油气成机理不同, 页岩油气、致密油气的保存的核心在于其自身的自封闭作用, 而页岩油气、致密油气的开发则是这种自封闭作用的破除。页岩油气、致密油气的开发的实质是通过人工压裂产生的裂缝增大了储层渗透率、改变了毛细管作用、增大了渗流波及体积与解吸比表面积。

(2) 甜点评价技术

页岩油气藏、致密油气普遍具有广泛式、连续式分布的特征。如美国页岩油资源存在黑油、凝析油、干气等资源, 在开发过程中有选择性地开采轻质油、凝析油等易于流动的资源。页岩油气藏、致密油气开发的难点在于如何优选高气油比区与凝析油气区, 优选天然裂缝发育区。需要进一步发展甜点评价技术。

(3) 压裂技术

压裂技术的突破直接推动了页岩革命的进程。与北美相比, 我国压裂规模较小, 成本较高。亟需发展体积压裂、整体开发、重复压裂技术以提高储量动用程度, 扩大供气区面积与波及体积。同时, 发展新型压裂材料, 改变表面毛细管力作用, 强化渗吸作用。

页岩油气、致密油气地质理论和开发包涵着重大复杂的科学技术问题, 是未来石油工业理论创新的重要领域。我国页岩革命仍面临严峻的形势, 页岩油气一定是我国长期油气资源中最重要的资源接替。

3 结论

(1) 页岩革命成功的标志是非常规油气产量的大幅增长, 美国已经实现了页岩革命, 中国页岩革命尚在进行中。我国页岩革命仍面临严峻的形势, 但页岩油气一定是我国长期油气资源中最重要的接替资源。

(2) 与常规油气相比, 页岩油气、致密油气的成藏模式、开发方式均有所不同。其具有连续性大面积分布, 油气自封闭成藏, 开发生产工程量巨大, 油气田

生产的“分布式”特点可灵活应对建产减产,以及采收率低的特点。

(3)我国页岩油气下一步大幅上产需要满足7个条件:①资源清楚;②水平井、压裂技术成熟;③成本可控,达到预期资本回报率;④工程空间大,给未来的提高采收率留下空间;⑤符合环境的要求,均衡占地成本和环境保护要求;⑥充分的资本投资;⑦强大

的工程施工能力。

(4)油气系统具有常规油气-致密油气-页岩油气序列成藏的规律。需要进一步开展全油气系统理论研究,深化页岩油气、致密油气的多尺度地质模型、流动模型、开发生产机理研究,大力发展甜点评价技术与压裂技术。

参考文献

- [1] UT Austin. The U. S. shale revolution [EB/OL]. (2015-06-28). <https://www.strausscenter.org/energy-and-security-project/the-u-s-shale-revolution/>.
- [2] 新华社. 美国70年来首次成为石油净出口国[EB/OL]. (2019-12-02). [Xinhua News Agency. The United States has become a net exporter of oil for the first time in 70 years [EB/OL]. (2019-12-02). <http://www.mofcom.gov.cn/article/i/jyj/e/201912/20191202918644.shtml>.]
- [3] 贾承造. 全国油气勘探开发形势与发展前景[J]. 中国石油石化, 2022(20): 14-17. [JIA C Z. The situation and prospect of oil and gas exploration and development in China [J]. China Petroleum and Petrochemical Industry, 2022(20): 14-17.]
- [4] 余国. 2022国内外油气行业发展报告[M]. 北京: 石油工业出版社, 2023. [YU G. 2022 domestic and foreign oil and gas industry development report [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2023.]
- [5] VINCE C. King coal, big oil and the dangerous allure of shale [EB/OL]. (2011-03-20) [2023-9-18]. <http://cosmopolitanreview.com/king-coal/>.
- [6] NUTTALL B C, ANDREWS W M. Historic oil fields of Eastern Kentucky and big Andy Ridge[M]. Kentucky: Kentucky Geological Survey, University of Kentucky, 2001.
- [7] HOLLOWAY M L. Innovation dynamics and policy in the energy sector: Building global energy markets, institutions, public policy, technology and culture on the Texan innovation example[M]. Academic Press, Texas, 2021.
- [8] ARMENDARIZ A. Emissions from natural gas production in the Barnett shale area and opportunities for cost-effective improvements[R]. Report prepared for Environmental Defense Fund, Austin TX, 2009.
- [9] 邱中建, 赵文智, 邓松涛. 我国致密砂岩气和页岩气的发展前景和战略意义[J]. 中国工程科学, 2012, 14(6): 4-8. [QIU Z J, ZHAO W Z, DENG S T. Development prospect and strategic significance of tight sandstone gas and shale gas in China [J]. Engineering Science, 2012, 14 (6): 4-8.]
- [10] 贾爱林, 位云生, 郭智, 等. 中国致密砂岩气开发现状与前景展望[J]. 天然气工业, 2022, 42(01): 83-92. [JIA A L, WEI Y S, GUO Z, et al. Development status and prospect of tight sandstone gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(1): 83-92.]
- [11] 马新华, 王红岩, 赵群, 等. 川南海相深层页岩气“极限动用”开发实践[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(06): 1190-1197. [MA X H, WANG H Y, ZHAO Q, et al. “Extreme utilization” development of deep shale gas in South Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(6): 1190-1197.]
- [12] 贾爱林, 何东博, 位云生, 等. 未来十五年中国天然气发展趋势预测[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(1): 17-27. [JIA A L, HE D B, WEI Y S, et al. Predictions on natural gas development trend in China for the next fifteen years [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 17-27.]
- [13] 姜福杰, 胡美玲, 胡涛, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷风城组页岩油富集主控因素与模式[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(04): 706-718. [JIANG F J, HU M L, HU T, et al. Controlling factors and models of shale oil enrichment in Lower Permian Fengcheng Formation, Mahu Sag, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(4): 706-718.]
- [14] 王国臻, 姜振学, 唐相路, 等. 四川盆地焦石坝地区龙马溪组页岩气不同传输类型的临界孔径与传输能力[J]. 地质学报, 2023, 97(1): 210-220. [WANG G Z, JIANG Z X, TANG X L, et al. Critical conditions and capabilities of shale gas diffusion and seepage types in the Longmaxi Formation in Jiaoshiaba area, Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 210-220.]
- [15] 邹才能, 朱如凯, 吴松涛, 等. 常规与非常规油气聚集类型、特征、机理及展望——以中国致密油和致密气为例[J]. 石油学报, 2012, 33(02): 173-187. [ZOU C N, ZHU R K, WU S T, et al. Types, characteristic, genesis and prospects of conventional and unconventional hydrocarbon accumulations: taking tight oil and tight gas in China as an instance [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(2): 173-187.]