

中国迎来页岩油气革命了吗?

金之钧^{1,2},白振瑞²,高波²,黎茂稳^{1,2}

(1. 页岩油气富集机理与有效开发国家重点实验室,北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083)

摘要:世界能源消费量随着经济的发展持续增长,但油气在世界一次能源消费中的主体地位将长期保持稳定。页岩油气在全球油气供应中的占比在不断增大,这主要得益于美国页岩革命的成功。页岩气开发使美国成为天然气净出口国,而页岩油使美国的石油对外依存度大幅下降。美国页岩革命带动了美国经济的发展,同时也对世界能源格局产生了深远的影响。在中国政府的大力推动下,通过国家石油公司的积极实践,中国页岩气在短期内快速实现了重大突破,中国成为继美国和加拿大之后第三个具有进行商业化开发页岩气能力的国家。虽然中国的页岩气勘探开发取得了较大的进展,但仍面临着诸多挑战,而这些难题的解决需要理论、技术和机制等方面的创新。中国具有巨大的页岩油资源潜力,但页岩油勘探开发困难重重,在陆相页岩油富集机理、分布规律、甜点预测与低成本开发等方面都需要开展深入的研究。总体来看,中国正迎来页岩气革命,而页岩油革命还未到来。

关键词:资源前景;世界能源格局;页岩气;页岩油;美国页岩气革命;页岩油气革命

中图分类号:TE132.2

文献标识码:A

Has China ushered in the shale oil and gas revolution?

Jin Zhijun^{1,2}, Bai Zhenrui², Gao Bo², Li Maowen^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 100083, China;

2. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of economy, the world energy consumption continues to grow, and the dominant position of oil and gas in the world primary energy consumption will remain stable for a long period. The proportion of shale oil and gas in the global oil and gas supply is increasing continuously, which is mainly due to the success of the American shale revolution. The successful development of shale gas has turned the United States into a net exporter of natural gas, while shale oil has greatly reduced its dependence on foreign oil to a new low of nearly 10%. The shale revolution in the United States not only has been boosting the economy development of the United States, but also has a far-reaching impact on the world's energy pattern. Under the vigorous promotion of the Chinese government and through the active practice of the NOCs, China's shale gas has achieved a major breakthrough in a short period of time, becoming the third country across the world with commercial development capability after the United States and Canada. Although China has made great progress in shale gas exploration and development, it still faces many challenges, the solution to which requires innovation in theories, technologies and business models. China has huge potential of shale oil resources, but the exploration and development of the shale oil are even more challenging. It is necessary to carry out in-depth research on the enrichment mechanism, distribution pattern, sweet-spot prediction and low-cost development technologies of continental shale oil. Overall, China is embracing the shale gas revolution, while the shale oil revolution has not yet arrived.

Key words: resource potential, global energy landscape, shale gas, shale oil, shale gas revolution in the U. S., shale oil & gas revolution

随着世界经济的发展,能源消费持续增长。2018年全球一次能源消费总量已达 135.1×10^8 t油当量,其中原油和天然气的占比分别为34.2%和23.4%^[1]。目前,油气是全球最为重要的一次能源类型。据全球

多家机构预测,到2040年油气在一次能源供给中的占比仍将保持在50%以上^[2-7]。油气主体地位的保持在很大程度上将得益于页岩油气的贡献。美国页岩革命的成功使美国的油气自给率大幅度提高,石油消费

对外依存度大幅度降低,天然气则由进口国转变为净出口国^[5]。此外,它对于扩大世界油气资源,保障全球油气供给也具有重要意义。近年来,随着中国经济的快速发展,油气需求大幅度增加,而国内油气产量增长乏力。2018年,中国石油和天然气对外依存度已分别达到了69.8%和45.3%。因此,大力推动页岩油气产业发展对于确保我国油气安全与经济增长具有重要意义。

1 美国页岩气革命回顾

1.1 页岩油气的基本概念

赋存在富有机质页岩层系(包含页岩中致密碳酸盐岩和碎屑岩夹层)中的石油叫页岩油,天然气则叫页岩气。页岩气的概念业界基本统一。但页岩油的概念还不一致,如美国地质调查局采用页岩油(“shale oil”)的概念;也有学者和机构称之为致密油,如美国石油工程师协会和EIA(Energy Information Administration,美国能源信息署)叫致密油(“tight oil”),国内学者或机构采用致密油叫法的基本是由此翻译而来。有意思的是,2011年笔者在访问戴文能源公司(Devon Energy Corporation)时发现他们两者并用。笔者更倾向于采用页岩油术语,主要是其地质意义更加清晰。

页岩油气藏以如下基本特征区别于常规油气藏:①“自生自储”,油气运移距离十分有限;②非构造高点控制,往往分布于烃源岩发育的斜坡区或洼陷的中央区,分布范围广;③资源丰度低,必须经过大规模人工压裂改造才能实现油气藏的经济、有效开发。页岩革命首先是勘探理念的转变,从传统的找储层、找圈闭,到找烃源层、找“甜点”。这一观念早在20世纪30年代就由美国石油地质学家提出。但直到1987年,由George Mitchell领导的Mitchell能源公司经过近20年的努力,才实现了页岩气商业开采。从这个意义上讲,页岩革命是典型的“灰犀牛”事件,而不是“黑天鹅”事件。

1.2 美国页岩气革命的历程

美国的页岩气发展历程大致可以划分为3个阶段。第一个是偶遇发现阶段(1821—1975年)。这个阶段经历的时间比较漫长,页岩气年产量小于 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。第二个是探索阶段(1976—2005年)。期间美国投入了大量的人力和物力开展页岩气开发探索和技术研发,到2005年页岩气产量突破了 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。第三个是快速发展阶段(2006年至今)。从2006年起,美国页岩气进入了快速发展时期。到2018年,页岩气产量达

到了 $6\,138 \times 10^8 \text{ m}^3$,大致占美国天然气总产量的64.4%^[8]。据EIA预测,在基准情形下,到2040年页岩气产量将达到 $9\,443 \times 10^8 \text{ m}^3$,大约占美国干气总产量的75.8%^[2]。

在页岩气开发取得成功后,相关的技术被引入到页岩油的开发,带动了美国页岩油的快速发展。美国页岩油发展也可大致划分为3个阶段。第一个是探索阶段(1953—1986年),开发活动主要集中在巴肯(Bakken)页岩区,产量比较低。第二个是起步阶段(1987—2006年),以水平井技术的成功应用为标志,而且开发活动扩展到了伊格尔福特(Eagle Ford)页岩油区。第三个是快速发展阶段(2007年至今),以水平井分段压裂技术的应用为标志,开发活动向其他页岩区拓展。到2018年,美国页岩油产量达到了 $23.49 \times 10^8 \text{ bbl}$,占美国石油总产量的64.7%^[9]。据EIA预测,在基准情形下,到2040年页岩油产量将达到 $946 \times 10^4 \text{ bbl/d}$,在美国石油总产量中占比约为67.3%^[2]。

1.3 美国页岩气革命的影响

美国页岩革命带动了美国经济的发展,同时也对世界能源格局产生了深远的影响,主要表现在以下6个方面。第一,改变了世界油气贸易流向,影响着大国外交(图1)。欧佩克石油出口流向发生了改变,向美国的出口量快速下降,向中国等亚洲主要石油消费国的出口量增长^[1,10]。第二,改变了人们对油气资源稀缺性的认识。USGS(United States Geological Survey,美国地质调查局)对美国主要页岩区带的重新评价得出了远大于以往认识的资源量^[11-12](图2)。随着世界其他含油气盆地油气资源的重新评价,油气可能会从稀缺的资源转变为比较丰富的资源。第三,导致国际油价走低,促进天然气价格分化。第四,加快了美国能源独立的进程。第五,促进了GDP增长与政府收入增加。到2035年,美国油气基础设施建设将为GDP贡献 $(1.50 \sim 1.89) \times 10^{12}$ 美元^[13]。第六,增加了就业岗位。2017—2035年间,美国油气基础设施建设预计每年将提供 $(82.8 \sim 104.7) \times 10^4$ 个就业岗位(包括间接产生的岗位)^[13]。

2 中国页岩气勘探开发历程及发展趋势

2.1 勘探开发历程

中国页岩气是在政府大力推动下和国家石油公司积极实践中快速发展起来的,其勘探开发大致经历了3个阶段。

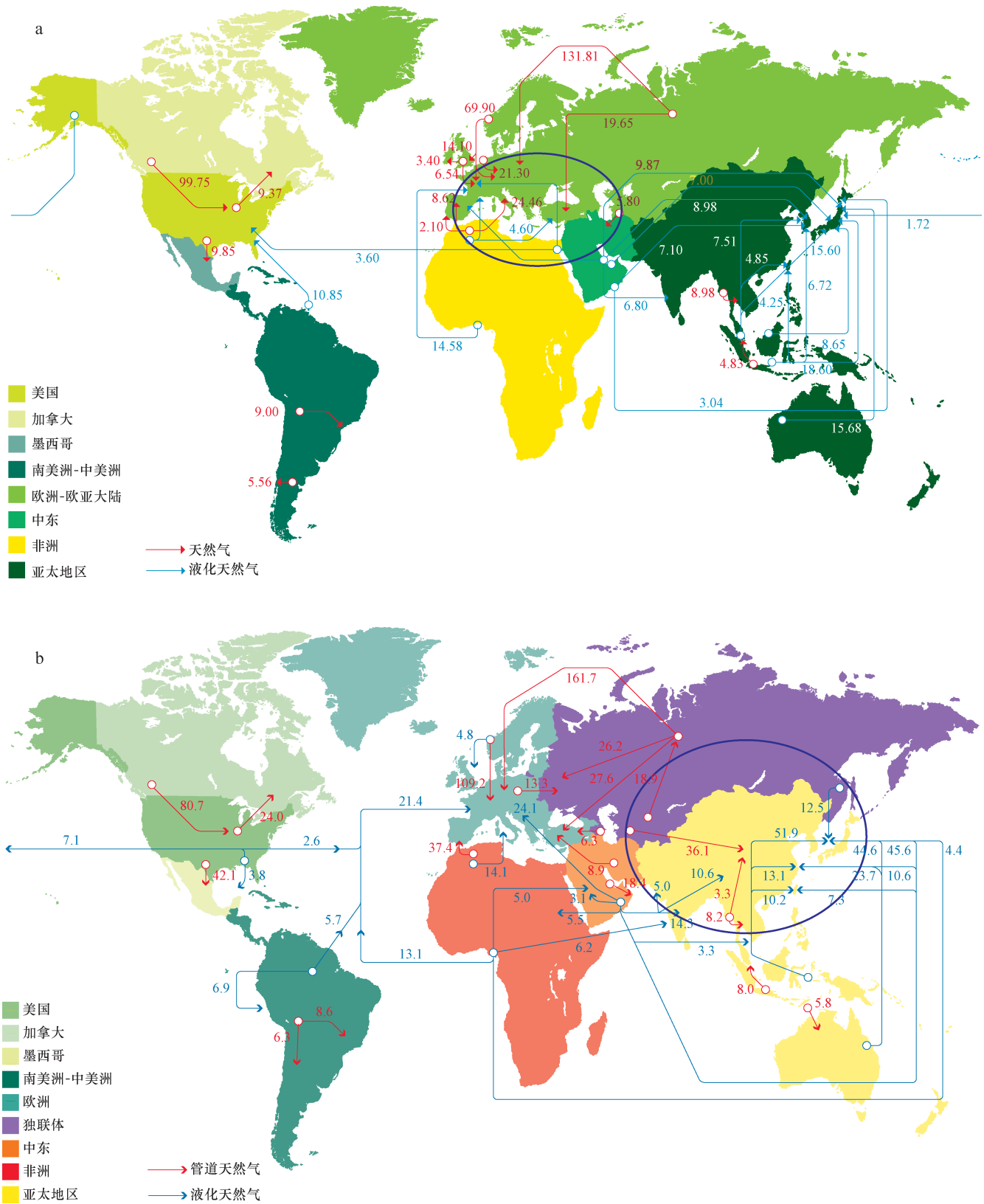


图 1 2006 年(a)和 2017 年(b)全球天然气贸易流向对比(BP,2007,2018)

Fig. 1 Comparison of global natural gas trade flow in 2006(a) and in 2017(b) (BP,2007,2018)

1) 学习借鉴阶段(2003—2008 年)。2003 年,我国学者开始关注美国页岩气的勘探开发及研究进展^[14-16]。随后,中国石化石油勘探开发研究院启动了

“中国页岩气早期资源潜力分析”项目,对我国南方海相古生界、华北地区石炭系—二叠系等重点领域主要烃源岩层系的页岩气形成条件进行了研究,评价了页岩

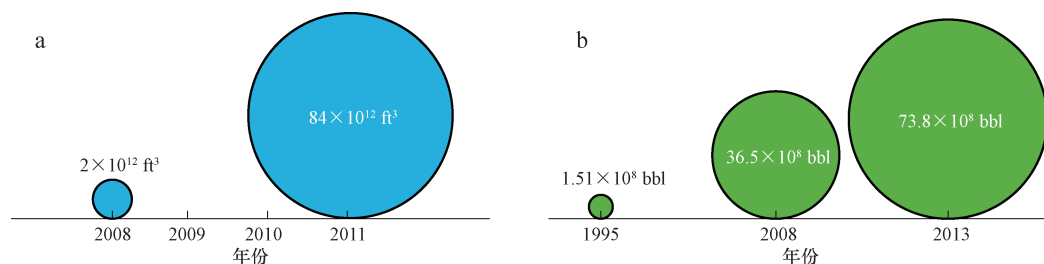


图2 美国地质调查局对伊格尔福特页岩气(a)和巴肯页岩油(b)待发现技术可采资源量的评价结果变化情况示意图(据 USGS 所发布的相关油气资源评价报告)

Fig. 2 Schematic diagram showing the variation of the U. S. Geological Survey's evaluation of the technologically recoverable reserves in the Eagle Ford shale gas(a) and Bakken shale oil(b) (according to the relevant oil and gas resources evaluation report issued by the USGS)

岩气资源前景,并初步指出了有利区。2007年,《石油地质科技动态》出版了页岩气专刊“页岩气勘探开发研究的典型实例:美国得克萨斯州巴奈特页岩”。2008年,对四川盆地页岩气成藏地质条件和中国页岩气资源潜力研究有了初步的分析结果^[17-18]。在这期间,中国石油勘探开发研究院启动了北美页岩气新进展调研和中国页岩气有利区筛查工作。2008年,中国石油确定了以蜀南海相五峰组-龙马溪组作为页岩气勘探的主要目的层系,并于当年实施了页岩气地质资料井——长芯1井,这是中国针对页岩气实施的第一口井。

2) 选区评价与探井实施阶段(2009—2012年)。原国土资源部于2009年组织实施了“中国重点地区页岩气资源潜力及有利区带优选”项目,并于2010年设置了川渝黔鄂页岩气资源战略调查先导试验区。2011年,原国土资源部将页岩气列为了新的独立矿种,并先后于2011年5月和2012年9月面向社会进行了两轮页岩气探矿权招标。2012年3月,国家发改委、财政部等多部委联合制定了《页岩气发展规划(2011—2015)》,并联合出台“页岩气”开发补贴政策。

中国石化于2009年完成了中国石化南方探区页岩气选区评价,明确保存条件对南方复杂构造区页岩气富集具有重要的控制作用。2012年11月,涪陵焦石坝地区焦页1HF井在下志留统龙马溪组下部优质页岩段压裂测试获得日产 $20.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的页岩气流,实现了中国石化海相页岩气勘探的战略突破。中国石化于2010年在四川盆地威远地区钻探了页岩气直井评价井——威201井,在五峰组-龙马溪组页岩测试产量 $(0.3 \sim 1.7) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2011年,中国石化又钻探了宁201-H1水平井,分10段压裂试气,测试产量 $15 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。延长石油集团2011年4月对柳坪177井长7段页岩压裂测试,获得日产 $2\,350 \text{ m}^3$ 的页岩气

流;随后钻探页岩气井16口,单井日产气 $1\,000 \sim 2\,000 \text{ m}^3$ 。

3) 规模建产阶段(2013年至现今)。中国石化分别于2013年和2015年启动了涪陵页岩气田一期和二期各 $50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的页岩气产能建设。2017年底,已经建成产能 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$,累计产气 $154.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。此外,在四川盆地及周缘的页岩气勘探也取得一批新发现。

中国石化于2013年启动长宁威远和昭通两个国家级页岩气示范区建设。第一批页岩气开发方案,建设产能 $25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2016年,第二批页岩气开发方案获得通过。2017年,年产 $120 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的开发方案获批,当年实现页岩气产量 $30 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2012年9月,陕西省延长石油集团设立了“延长石油延安国家级陆相页岩气示范区”,云页平3井区山西组单井日产量均在 $2 \times 10^4 \text{ m}^3$ 左右。预计到“十三五”末,延长石油集团将建成页岩气产能 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2 中国页岩气发展前景与挑战

2.2.1 发展前景

不同单位采用类比法或体积法对我国页岩气资源进行了初步估算,虽然结果相差较大,但可采资源量都在 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,说明我国页岩气资源比较丰富(表1)。预计在政策支持到位和市场开拓顺利的情况下,2020年全国有望实现页岩气产量 $(200 \sim 300) \times 10^8 \text{ m}^3$,而到2030年可望达到 $(800 \sim 1\,000) \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

2.2.2 面临的挑战

中国的页岩气勘探开发面临以下4个方面的重大挑战:①深层页岩气地应力高,页岩脆性降低,压裂难度大;②低压和常压页岩气单井产量低,一般小于 $5 \times$

表 1 不同单位采用类比法或体积法对我国页岩气资源进行评价的结果

Table 1 Evaluation results of shale gas resources in China by analogy or volumetric method from different agencies

评价单位	估计可采资源量/ (10^{12} m^3)	时间	备注
中国石化石油勘探 开发研究院	18.6	2014	全国陆域
美国能源 信息署(EIA)	31.55	2013	主要盆地
国土资源部油气 资源战略研究中心	25.08	2012	全国陆域
国土资源部油气 资源战略研究中心	21.8	2015	全国陆域
中国工程院	10~13(均值 11.5)	2012	主要盆地和地区
美国能源 信息署(EIA)	36.1	2011	四川和塔里木 盆地
中国石油勘探 开发研究院	10~20	2009	主要盆地

$10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;③陆相页岩气储层相变快,粘土含量高,尚未形成适应性工程技术;④页岩气开发成本普遍较高^[19-21]。

要解决这些难题,需要在理论、技术和体制机制方面进行创新。在页岩气地质理论方面,需重点形成复杂构造区海相页岩气富集高产理论、陆相页岩气富集高产理论、页岩气田高效开发理论以及新一代智能气田开发理论与技术。在技术研发方面,需集中力量攻关深层水平井分段压裂技术、低压常压页岩气低成本水平井分段压裂技术、无水或少水压裂新技术以及页岩气开采环境评价与保护技术。在体制机制方面,需要创新管理模式,形成适应页岩气勘探开发一体化的矿权管理机制、多种投资主体合作开发机制、鼓励新技术试验和应用机制以及页岩气安全和环保监管机制,还要建立页岩气技术交流合作平台。

3 中国页岩油勘探开发历程及发展前景

3.1 勘探开发历程

中国陆相页岩油勘探开发大致经历了“常规石油”兼探和“非常规页岩油”探索两个阶段。

1) “常规石油”兼探阶段(2010 年以前)。这一时期在鄂尔多斯、渤海湾和江汉等盆地烃源层系均发现了泥页岩裂缝型油气。如渤海湾盆地济阳坳陷在常规油气钻探过程中 320 余口井在泥页岩发育段见到油气显示,其中 30 余口井试获油气流,单井最高日产量达

到 93 t;东营凹陷河 54 井在沙河街组三段下亚段 2 962~2 964.4 m 井段中途测试,日产油 91.4 t,日产气 $2\,740 \text{ m}^3$ ^[22-23]。但总体上,该阶段储产量规模有限,发展较为缓慢。

2) “非常规页岩油”探索阶段(2010—2014 年)。中国石化和中国石油选取了若干典型盆地,在凹陷边缘构造高部位部署了一批页岩油专探井。早在 2010 年,中国石化引入北美页岩油勘探开发理念和体积压裂技术,在河南油田的泌阳凹陷,针对核桃园组三段实施了 2 口页岩油水平井;泌页 HF-1 井垂深 2 450 m,在近 1 000 m 水平井段实施 15 级分段压裂后获工业油流,最高日产油 23.6 m^3 ;泌页 2HF 井垂深 2 816 m,在 1 276 m 水平井段实施 22 级分段压裂,最高日产油 28 m^3 。但是,由于地层压力系数仅为 0.9 左右,驱动力弱,导致高产期短,累计产油量低,致使整体经济效益差。在胜利油田部署的渤页平 1 和渤页平 2 井分段压裂均获得低产油流。但由于布井仍遵循常规勘探思路,优选高部位埋藏较浅区域,导致储层内有机质整体成熟度较低,原油粘度大、流动性差,加之工程工艺不适应,单井产量递减快、稳产困难,无法形成规模有效动用。由于上述原因,加之 2014 年下半年油价断崖式下跌,2015—2017 年中国石化页岩油勘探无实物工作量投入。

2011 年以来,中国石油则高度重视致密油勘探。2011 年,在鄂尔多斯盆地西 233 井区长 7 油层利用水平井+体积压裂技术开展致密油提产增效试验取得成功;随后,在单井点试验的基础上,先后成功建立了鄂尔多斯盆地安 83、庄 183 和松辽盆地北部垣平 1 等 9 个致密油开发试验区,多井获较高产量,展示了良好的开发前景。其中,西 233 实验区开发效果良好,采用体积压裂技术实施 10 口井,初期单井平均日产原油 13.9 t,目前平均单井产量 9.6 t,有 6 口井试采累计产量已超过万吨。截至 2016 年底,累计生产原油近 $200 \times 10^4 \text{ t}$ 。在准噶尔盆地,优选吉木萨尔凹陷、玛湖凹陷西斜坡和沙帐-石树沟为页岩油重点勘探领域,分别部署吉 25、火北 2 和风南 7 井,3 口井二叠系均获工业油流,拉开了页岩油勘探序幕。随后,根据烃源岩、储层、构造背景及保存等条件综合评价,聚焦吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组。该地层厚度为 25~300 m,有上、下两个页岩油甜点段;内部发育微、纳米孔喉系统,平均孔隙度在 10% 以上,平均渗透率在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右,具有中低孔、特低渗特征;含油饱和度超过 70%,地层压力系数为 1.3,且脆性较好;虽然地面原油质稠、流量低,但地层原油粘度适中,资源可动用

基础较好。评价认为,该区页岩油相对优质资源为 4.8×10^8 t。但由于受 2015 年以来低油价影响,实际工作量投入不足,产能建设缓慢。

2014 年以来,尽管受低油价影响,中国石油和中国石化两大石油公司页岩油勘探开发投入锐减,但是在国家“973”计划项目和油气重大专项支持下,陆相页岩油地质评价及开采关键技术攻关全面启动,并取得了可喜进展。地质评价研究明确了纹层状页岩是最有利岩相、干酪根成熟度大于 0.9% 是有效开采的必要条件,认识了受构造和热演化控制的页岩油多种赋存模式,建立了陆相页岩油两类富集模式,提出了 3 种不同类型陆相页岩油高产要素,为有利区优选提供了依据(黎茂稳,“973”计划项目“中国东部陆相页岩油富集机理与分布规律”结题报告)。在工程技术方面也取得了新突破^[24-27]。中国石化提出了东部探区新一轮页岩油选区评价方案建议,已经开始实施 4 口评价井。中国石油在渤海湾盆地沧东凹陷孔二段部署 2 口专探井。

3.2 发展前景

3.2.1 资源潜力

据 EIA(2015)估算,中国页岩油技术可采资源量为 43.7×10^8 t,这一评价明显偏低。根据我国第三轮全国油气资源评价数据,重点盆地主要生油层系的生油量、排油量和残留油量分别为 $7\,851.70 \times 10^8$, $4\,129.67 \times 10^8$ 和 $3\,722.10 \times 10^8$ t。中国石化石油勘探开发研究院研究团队在执行国家“973”计划项目“中国东部陆相页岩油富集机理与分布规律”研究过程中,针对渤海湾和江汉盆地古近系陆相泥页岩样品进行热释烃和溶剂抽提试验,发现其中低分子量饱和烃占 8.53%~46.85%,平均为 32.8%,它们是泥页岩中最可动的组分。这一研究成果与北美多个海相页岩油单井控制的最终采收率在 2%~8% 基本相当。由此认为,页岩油采出 2%,5% 甚至 10% 都是可能的。因此,我们以新一轮油气资源评价结果中残余油为基数,权

且采用成因法,分别乘以 2%,5% 和 10%,来估算我国页岩油资源量。按上述方法,初步估算中国陆上主要盆地页岩油资源量分别为 74×10^8 , 186×10^8 和 372×10^8 t。从大区分布看,中国页岩油资源主要分布在东部地区和中西部地区。按照 5% 采收率计算的资源量,东部和中西部地区页岩油资源量分别为 98.27×10^8 t 和 84.69×10^8 t,分别占中国页岩油资源量的 52.8% 和 45.5%,勘探开发潜力巨大;从资源丰度比较,东部页岩油资源丰度为 3.373×10^8 t/km²,中西部为 1.54×10^8 t/km²,东部页岩油勘探开发前景好于中西部。页岩油资源量相对集中在几个大型含油气盆地中。纵向上,页岩油主要分布在古近系、白垩系、三叠系和二叠系 4 套层系中。

3.2.2 面临的挑战

中国陆相页岩油与北美海相页岩油地质条件差异巨大(表 2),面临以下 6 个方面的挑战:①陆相页岩油沉积相变快,非均质性强,赋存机理认识不清,评价手段亟待完善;②储层矿物成分和孔隙结构类型复杂多变,甜点构成要素不清,预测技术尚不完善;③不同赋存状态的原油流动机理和有效动用条件不明,开发参数难以确定;④大部分储层韧性强,难以形成有效的压裂缝网;⑤有机质成熟度低、流体粘度高和驱动能力不足等因素导致流动能力差、采出困难;⑥井深、异常高压、储层强敏感及盐间储层失稳带来一系列工程技术复杂问题^[28-29]。

3.2.3 发展对策与路径

针对上述挑战,应当从以下几个方面开展攻关研究:①查明重点地区盆地陆相页岩油形成条件和富集主控因素,建立评价指标体系,优选有利区带及勘探目标;②针对陆相页岩油储层微观结构复杂性、非均质性、强各向异性和力学特性,明确甜点地球物理响应特征,建立甜点地球物理识别与预测有效方法和技术系

表 2 中国陆相页岩油与北美海相页岩油地质条件对比

Table 2 Comparison of geological conditions between Chinese continental shale oil and North American marine shale oil		美国	中国
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、威尔斯頓等)	断陷盆地、克拉通边缘盆地 (松辽、渤海湾、鄂尔多斯等)
	沉积相	海相(稳定)	陆相(非均质性强)
	成熟度	高-过成熟	东部中-低成熟为主, 局部高成熟,埋藏深
	流体性质	粘度低	高蜡油
工程技术	主体技术	比较成熟	正在探索

列;③揭示陆相页岩油流动机理,形成优快钻井技术、复杂裂缝改造优化技术、页岩油井数值模拟技术及盐间页岩油有效开采增产稳产技术,探索页岩油流动性改善技术;④在松辽、渤海湾及鄂尔多斯等盆地重点区带开展有利目标优选及勘探、评价井位部署,建立勘探开发试验区。

依据资源品位和开发难易程度将攻关目标划分为3个层次:

1) 层次一为中-高成熟度生烃洼陷高压区页岩油层系,如济阳坳陷深洼区、潜江凹陷和川北下侏罗统等。美国页岩油勘探开发经验表明,随着成熟度的增加,页岩油气油比逐渐增大,因此储层的能量应该较为充足,该类资源应成为甜点预测的重点方向。针对该类资源应优先富有机质纹层和异常高压叠合带,兼探低幅度正向构造及薄砂条夹层。同时,由于该类资源通常埋藏较深,存在异常高压,必须加强钻井及储层改造等工程实施中的储层保护工作。

2) 层次二为中-高成熟度生烃洼陷常压、低压区,如松辽盆地、鄂尔多斯盆地和泌阳凹陷等。这类页岩油储层压力系数正常或偏低,单纯依靠弹性能量开采通常效果不佳。因此,针对该类资源应重点研究提高驱动能量方法,发展储层增能技术,提高开发效率。

3) 层次三为中-低成熟度页岩油层系,如松辽盆地、渤海湾盆地、准噶尔盆地和苏北盆地等。对应的烃源岩为中-低成熟度,储层原油通常表现为粘度高、含蜡量高,目前单独开发经济效益较差。因此,应在勘探常规油气藏的同时,兼探该类页岩油气资源,重点研究改善流动性方法,发展化学、加热及注气等技术,提高储层原油流动性。

4 结语

世界一次能源已展现出“多元化”供给的发展趋势,但一种能源对另外一种能源的替代所需时间都以数十年甚至百年计。预计到2050年,油气在世界一次能源消费中的占比仍然在50%上下。页岩油气是石油工业未来的重要发展方向之一,由于开发难度大,只能通过技术进步大幅度降低生产成本才能实现效益开发。美国的页岩革命已取得成功并在全球产生广泛影响,中国也正迎来页岩气革命,页岩油革命处于突破前夜。要加快中国页岩气革命前进的步伐和尽早迎来页岩油革命,需要政府的激励政策,需要产、学、研的密切合作,更需要全社会的大力支持。建议国家在专项和

基金方面加大投入,支持关键技术和新技术的攻关;加大安全环保监督机制创新,确保页岩油气的绿色开发;建立国家实验室,形成国家层面技术交流平台,实现成果共享。石油公司应持续推进国家页岩气示范区建设,加快建立页岩油示范区。通过各方的共同努力,形成常规油气与页岩油气共促发展的新格局,确保国家油气能源安全和油气工业可持续发展。

致谢:在本论文准备过程中,邹才能院士和朱如凯教授提供了中国石油页岩油气基本情况,李志明研究员和牛骏高级工程师帮助查阅核对了部分数据和资料,作者对他们的帮助表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] BP. Statistical review of world energy [EB/OL]. (2018-06). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2018-full-report.pdf>.
- [2] EIA. International energy outlook 2019 [EB/OL]. (2019-01). <https://www.eia.gov/outlooks/ieo>.
- [3] World Coal Association. Global primary energy demand; IEA WEO 2017 insights [EB/OL]. (2018-01). <https://www.worldcoal.org/global-primary-energy-demand>.
- [4] BP. BP energy outlook [EB/OL]. (2018). <https://www.bp.com/content/dam/bp/en/corporate/pdf/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2018.pdf>.
- [5] Exxon Mobil. 2018 outlook for energy: A view to 2040 [EB/OL]. (2018-03). <http://corporate.exxonmobil.com/en/energy/energy-outlook/a-view-to-2040>.
- [6] OPEC. World oil outlook 2017 [EB/OL]. (2017). <https://www.opec.org>.
- [7] US Energy Information Administration. Short-term energy outlook [EB/OL]. (2018-04). <https://www.eia.gov/outlooks/steo>.
- [8] EIA. Natural gas weekly update [EB/OL]. (2019-02). <https://www.eia.gov/naturalgas/weekly>.
- [9] EIA. Weekly petroleum status report [EB/OL]. (2019-02). <https://www.eia.gov/petroleum/supply/weekly>.
- [10] BP. Statistical review of world energy [EB/OL]. (2007-06). <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2007-full-report.pdf>.
- [11] USGS. Assessment of undiscovered oil and gas resources in conventional and continuous petroleum systems in the Upper Cretaceous Eagle Ford Group, U. S. Gulf Coast Region [R]. USGS Fact Sheet 2012-3003, 2012.
- [12] USGS. Assessment of undiscovered oil resources in the Bakken and Three Forks Formations, Williston Basin Province, Montana, North Dakota, and South Dakota [R]. USGS Fact Sheet 2013-3013, 2013.
- [13] Petak K, Vidas H, Manik J, et al. U. S. oil and gas infrastructure investment through 2035 [R]. American Petroleum Institute, 2017.
- [14] 陈建渝, 唐大卿, 杨楚鹏. 非常规含气系统的研究和勘探进展

- [J]. 地质科技情报, 2003, 22(4): 55-59.
- Chen Jianyu, Tan Daqing, Yang Chupeng. Advances in the research and exploration of unconventional petroleum systems[J]. Geological Science and Technology Information, 2003, 22(4): 55-59.
- [15] 张金川, 薛会, 张德明, 等. 页岩气及其成藏机理[J]. 现代地质, 2003, 17(4): 466.
- Zhang Jinchuan, Xue Hui, Zhang Mingde, et al. Shale gas and reservoiring mechanism[J]. Modern Geology, 2003, 17(4): 466.
- [16] 张金川, 金之钧, 袁明生, 等. 页岩气成藏机理和分布[J]. 天然气工业, 2004, 24(7): 15-18.
- Zhang Jinchuan, Jin Zhijun, Yuan Mingsheng, et al. Reservoiring mechanism of shale gas and its distribution[J]. Natural Gas Industry, 2004, 24(7): 15-18.
- [17] 张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. 天然气工业, 2008, 28(2): 151-156.
- Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, et al. Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(2): 151-156.
- [18] 张金川, 徐波, 聂海宽, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- Zhang Jinchuan, Xu Bo, Nie Haikuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China[J]. Natural Gas Industry, 2008, 28(6): 136-140.
- [19] 邹才能, 董大忠, 王玉满, 等. 中国页岩气特征、挑战及前景(一)[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(6): 689-701.
- Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Yuman, et al. Shale gas in China: Characteristics, challenges and prospects[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6): 689-701.
- [20] 金之钧, 胡宗全, 高波, 等. 川东南地区五峰组-龙马溪组页岩气富集与高产控制因素[J]. 地学前缘, 2016, 23(1): 1-10.
- Jin Zhijun, Hu Zongquan, Gao Bo, et al. Controlling factors on the enrichment and high productivity of shale gas in the Wufeng-Longmaxi Formations, southeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2016, 23(1): 1-10.
- [21] 赵文智, 李建忠, 杨涛, 等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.
- Zhao Wenzhi, Li Jianzhong, Yang Tao, et al. Geological difference and its significance of marine shale gases in South China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2016, 43(4): 499-510.
- [22] 董冬, 杨申铤, 项希勇, 等. 济阳坳陷的泥质岩类油气藏[J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(6): 15-22.
- Dong Dong, Yang Shenbiao, Xiang Xiyong, et al. Muddy hydrocarbon reservoirs in Jiyang Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1993, 20(6): 15-22.
- [23] 孙焕泉. 济阳坳陷页岩油勘探实践与认识[J]. 中国石油勘探, 2017, 22(4): 1-14.
- Sun Huanquan. Exploration practice and cognitions of shale oil in Jiyang Depression[J]. China Petroleum Exploration, 2017, 22(4): 1-14.
- [24] 付茜. 中国页岩油勘探开发现状、挑战及前景[J]. 石油钻采工艺, 2015, 37(3): 58-62.
- Fu Qian. The status, challenge and prospect of shale oil exploration and development in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2015, 37(3): 58-62.
- [25] 王勇, 宋国奇, 刘惠民, 等. 济阳坳陷页岩油富集主控因素[J]. 油气地质与采收率, 2015, 22(4): 20-25.
- Wang Yong, Song Guoqi, Liu Huimin, et al. Main control factors of enrichment characteristics of shale oil in Jiyang Depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(4): 20-25.
- [26] 王芙蓉, 何生, 郑有恒, 等. 江汉盆地潜江凹陷潜江组盐间页岩油储层矿物组成与脆性特征研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(2): 211-218.
- Wang Furong, He Sheng, Zheng Youheng, et al. Mineral composition and brittleness characteristics of the inter-salt shale oil reservoirs in the Qianjiang Formation, Qianjiang Sag[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(2): 211-218.
- [27] Liu H, Zhang S, Song G, et al. A discussion on the origin of shale reservoir inter-Laminar fractures in the Shahejie Formation of Paleogene, Dongying Depression[J]. Journal of Earth Science, 2017, 28(6): 1064-1077.
- [28] 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 致密油与页岩油内涵、特征、潜力及挑战[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 3-16.
- Zou Caineng, Zhu Rukai, Bai Bin, et al. Significance, geologic characteristics, resource potential and future challenges of tight oil and shale oil[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(1): 3-16.
- [29] 盛湘, 陈祥, 章新文, 等. 中国陆相页岩油开发前景与挑战[J]. 石油实验地质, 377(3): 267-271.
- Sheng Xiang, Chen Xiang, Zhang Xinwen, et al. Prospects and challenges of continental shale oil development in China[J]. Petroleum Geology & Experiment, 377(3): 267-271.

(编辑 李 军)