

# 中、美页岩气开发现状的对比与思考

王莉, 于荣泽, 张晓伟, 郭为, 雷丹凤, 邵昭媛

中国石油勘探开发研究院廊坊分院; 国家能源页岩气研发(实验)中心, 廊坊 065007

**摘要** 通过对中、美页岩气开发的资源基础、地质条件、开发技术等方面的对比, 认为当前中国页岩气开发具有资源基础较好、勘探开发技术起点较高的有利因素, 但也存在地质及地表条件相对差、技术尚未成熟、配套不完善等不利因素。针对这些实际情况, 需要解决核心区优选、研发和优化等适合中国地质条件和地表条件的开发工程技术系列, 发展“工厂化”作业模式等关键技术, 以克服诸多客观因素带来的不利影响。

**关键词** 页岩气开发; 资源量; 地质条件; 开发技术

页岩气作为一种具有较大开发潜力的天然气资源, 日益受到国内外能源行业的重视。美国是实现页岩气商业开发最早、产量最高的国家, 2014年产量达到3700亿 $m^3$ <sup>[1]</sup>。中国页岩气资源丰富, 但开发整体上仍处于探索阶段, 开发技术主要借鉴北美地区的成熟经验。很多学者从不同角度对中外页岩气的开发现状进行了综述, 但主要集中于开发的政策体制及关键技术, 而对页岩气的开发环境、开发成本等研究相对较少。本文在分析美国各页岩气区带开发现状的基础上, 对比分析了中国页岩气的资源基础、开发地质条件、关键技术、开发成本和开发环境, 指出了中国页岩气开发需要解决的核心问题。

## 1 中、美页岩气开发现状

### 1.1 美国页岩气开发现状

美国从20世纪80年代初开发页岩气, 距今已有30多年的历史。从最早的Barnett页岩(1981年开发)到较近的Haynesville页岩(2004年开发), 已实现页岩气商业化开采的区带达到近20个(图1<sup>[2]</sup>)。



图1 美国主要页岩气区带分布  
Fig. 1 Map of US shale gas plays

美国主要的页岩气区带开发面积约77万 $km^2$ , 其中已开发区和未开发区面积各占50%(表1<sup>[2]</sup>)。其中, Marcellus气藏的总开发面积最大, 约为24.6万 $km^2$ , 占全美页岩气区带开发面积的近1/3。

表1 美国主要页岩气区带的开发面积

Table 1 Active areas of typical shale gas plays in US

序号	页岩气区带	面积/万 $km^2$	
		已开发区	未开发区
1	Marcellus	2.75	21.83
2	Antrim	0.14	3.04
3	Devonian Low Thermal Maturity	11.87	0.0
4	New Albany	0.41	10.85
5	Greater Siltstone	5.93	0.0
6	Big Sandy	2.25	0.52
7	Haynesville	0.93	1.41
8	Eagle Ford	0.28	
9	Floyd-Neal & Conasauga	0.63	
10	Fayetteville	2.33	
11	Woodford	1.22	
12	Canawoodford	0.18	
13	Barnett	1.06	0.62
14	Barnett-Woodford	0.70	
15	Mancos	4.25	
16	Lewis	1.94	

在过去的十几年里, 美国页岩气产量呈指数级增长, 至2014年, 页岩气年产量已达到3700亿 $m^3$ 。2012—2014年, 页岩气累计产量位居美国前3位的区带分别为Marcellus、Haynesville和Barnett(图2)。这3个区带2014年的页岩气年

收稿日期: 2016-01-13; 修回日期: 2016-08-16

作者简介: 王莉, 高级工程师, 研究方向为页岩气开发, 电子邮箱: wangli1968@petrochina.com.cn

引用格式: 王莉, 于荣泽, 张晓伟, 等. 中、美页岩气开发现状的对比与思考[J]. 科技导报, 2016, 34(23): 28-31; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.23.002

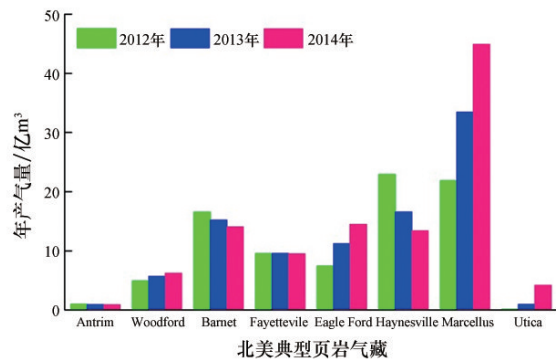


图2 2012—2014年美国主要页岩气区带产量分布  
Fig. 2 Shale gas productions of typical shale gas plays in US from 2012 to 2014

产量分别达到44.9、13.9和14.1亿 $m^3$ ,分别占2014年美国页岩气产量的1.21%、0.38%和0.38%。

### 1.2 中国页岩气开发现状

自2013年1月起,中国国家能源局先后批复了四川长宁—威远(面积6534  $km^2$ )、滇黔北昭通(面积15078  $km^2$ )、重庆涪陵(面积7308  $km^2$ )和延安(陆相)(面积4000  $km^2$ )4个国家页岩气示范区。目前,各示范区已完成多批次页岩气的勘探开发试验和有利区筛选,四川盆地开始了商业性开发,中国南方其他地区见到了较好的苗头,鄂尔多斯盆地的勘探开发有了实质性突破。

据国土资源部报告,截至2014年底,中国钻探页岩气井400余口,累计生产页岩气约13亿 $m^3$ ,平均单井产量可达10万 $m^3/d$ 。中国石油在四川长宁—威远和云南昭通地区实现了页岩气勘查突破,获得三级储量超过2000亿 $m^3$ 、产量1.6亿 $m^3$ ;中国石化在重庆涪陵区块获得页岩气三级储量超过2500亿 $m^3$ 、已探明地质储量1067.5亿 $m^3$ 、产量11.4亿 $m^3$ ;延长石油在陆相页岩气示范区初步落实三叠系含气面积250  $km^2$ ,概算页岩气地质储量387.5亿 $m^3$ ,建成年产能2000万 $m^3$ <sup>[9]</sup>。

## 2 中美页岩气开发对比

### 2.1 页岩气资源基础与开发前景对比

根据美国能源信息署(EIA)2013年数据,美国页岩气可采资源量18.83万亿 $m^3$ <sup>[4]</sup>,中国国土资源部2012年数据显示,中国页岩气可采储量25.08万亿 $m^3$ ,保守估计是美国的1.33倍。

中国有着巨大的天然气需求市场和缺口,然而却面临能源结构调整的压力,截至2014年底,中国页岩气产量达到13亿 $m^3$ ,而美国页岩气产量是中国的280多倍。中、美页岩气储量和产量的巨大差异,说明了中国页岩气具有非常大的开发潜力和产量增长空间。

### 2.2 页岩气开发地质条件和地表环境条件对比

美国页岩气储层埋藏深度适中(大多位于1000~3000 m),有机质成熟度适中(1.1~2.0),含气量整体较高(平均3.0~

6.0  $m^3/t$ ),构造稳定;而中国页岩气储层埋藏较深(大多数位于2500~6500 m),有机质成熟度偏高( $>2.0$ ),含气量区域性变化较大(平均1.0~3.0  $m^3/t$ ),构造相对复杂(图3<sup>[5]</sup>)。美国页岩气区带地势较平坦,地广人稀,水资源丰富,有利于勘探生产;中国页岩气富集区多处于地表复杂的山区和丘陵,地形高差较大,工程作业困难,水资源整体紧缺<sup>[5]</sup>。



(a) 中国

(b) 美国

图3 页岩气开发地表环境对比

Fig. 3 Ground-surface conditions for shale gas development

### 2.3 页岩气开发技术对比

美国页岩气产量之所以能在30年时间增长近190倍,与其日趋成熟的页岩气勘探开发技术密不可分。美国页岩气开发核心技术主要包括地震储层预测、水平井钻井、压裂、微地震监测、平台式“工厂化”作业模式等。这些技术解决了寻找页岩气甜点核心区、提高单井产量以及降低开发成本的问题。尤其是水平钻井技术与多级压裂技术的结合,使页岩气的开采取得了突破性进展<sup>[6]</sup>。在水平井钻探中,有效的井身设计、精确的轨迹定位、优质的固井质量,以及钻进过程中应用的地质导向技术,保证了水平井钻探的高成功率。目前,美国页岩气水平井水平段长基本在1500 m以上,最长的超过3000 m<sup>[7]</sup>。多级压裂的设计、关键工具和装备、液体体系、实时监测、返排控制的有效结合及实施,保证了压裂作业效果,提高了单井产能。单井压裂段数普遍在10~20段,最高可达40多段<sup>[8]</sup>。通过平台式“工厂化”作业模式,对人员、材料、设备进行集约化使用与管理,加以“工厂化”的作业流程,形成了一定的规模效益,因而使成本得到有效控制。

中国页岩气勘探开发起步较美国晚,目前,页岩气的地球物理、钻井、压裂和试气等勘探开发技术已被初步掌握,页岩气的勘探开发技术及装备正在逐步实现国产化。初步掌握“工厂化”水平钻井、完井等关键技术,页岩气井水平段超高密度水基钻井液获得突破,水平段长可达到2000 m。初步形成页岩气储层大型水力压裂改造技术体系,基本形成完备的压裂液体系,自主研发的3000型压裂车达到世界压裂装备的领先水平。可在同一平台进行两口井的工厂化拉链式压裂,每口井的压裂段数达到20段以上。在国土资源部的积极推进下,基本建立了页岩气资源评价、选区评价技术方法和标准体系。中国的石油公司借鉴国际行业和企业标准,形成了页岩气钻井工程、采气工程、健康安全环保等百余项技术

规范和标准。由于中国页岩气开发地质条件复杂,某些核心技术仍不成熟,需要在借鉴的基础上针对中国页岩气开发的特殊性有所创新。

## 2.4 页岩气开发成本对比

美国 8 个主要页岩气区带的单井开发成本多在 3~9 百万美元(表 2<sup>[2]</sup>),具有良好的投资回报率。

表 2 美国主要页岩气区带单井成本

Table 2 Average well costs of typical shale gas plays in US

序号	区带	井深/m	成本/百万美元	发布年份
1	Marcellus	2000	3~4	2010
2	New Albany	800	0.8~1	2011
3	Antrim	400	0.3~0.5	2008
4	Haynesville	3600	6~7/7~9	2008/2010
5	Fayetteville	1200	2.9	2009
6	Woodford	1500~2800	6~7/4.6~8	2007/2008
7	Barnett	2200	2~3(核心区)/1.6~3.7(南部、西部)	2008/2009
8	Barnett-Woodford	3000	6.5	2008

中国目前页岩气开发成本较高,单井投入一般在 5000~7000 万元人民币,主要原因是中国页岩气目前仍处于前期的探索阶段,开发时间较短,地质、地表条件复杂。但随着钻井、压裂、储层改造、带压作业等一系列关键装备的国产化,装备投入的费用将缩减。如分段压裂的关键工具可钻式复合桥塞,过去依赖从国外公司进口,每口井的桥塞购置费就高达 220 多万元人民币,而国产化复合桥塞的使用,除了在性能上满足了使用要求外,还使单井成本减少近 200 万元人民币。由于“工厂化”开发模式的推广,目前页岩气水平井单井钻井周期大幅下降,由过去平均 150 天降至现在的平均 70 天、最短 46 天的水平,也是降低页岩气开发成本另一途径。

## 2.5 页岩气开发政策对比

美国政府在 20 世纪 70 年代末期的《能源意外获利法》中,规定了非常规能源开发税收补贴政策,德克萨斯州自 20 世纪 90 年代初以来,对页岩气的开发不征收生产税。另外,美国还专门设立了非常规油气资源研究基金,为页岩气快速发展提供了有利条件<sup>[9]</sup>。

2013 年 10 月,中国国家能源局出台了《页岩气产业政策》,页岩气开发纳入国家战略性新兴产业,页岩气勘探开发等的财政扶持力度加大:国家将按照页岩气的开发利用量对页岩气生产企业直接进行补贴;地方财政根据情况对页岩气生产企业进行补贴,对页岩气开采企业减免矿产资源补偿费、矿权使用费。国家应对页岩气勘探开发等项目进口的自用设备(包括随设备进口的技术)免征关税。在中国页岩气开发初期,这一系列的扶持政策能够有效激发页岩气生产企业的积极性。

## 2.6 页岩气勘探开发环境问题对比

在美国页岩气发展初期,由于缺乏对环境影响的考虑,环境问题日益突出。近年来,随着各州政府对诸如水力压裂对环境的影响等问题的重视,颁布了相关新法规,对开发中存在的耗水量大、污染地下水、因气体泄漏造成的空气污染等

隐患采取了相应的监管、预防和处理措施。对页岩气井水力压裂返排液采取了封存在地下井中、水处理达标后排放到地表水中,以及原地处理后重新用于水力压裂或钻井的 3 种处理方式。不同页岩气产区的水力压裂返排液(含不同的化学试剂)要求不同的水处理解决方案。目前,美国页岩气开发中 70% 的用水来自水力压裂回收处理的水,减缓了当地水资源的紧缺,降低了作业成本。同时通过技术创新,减少了压裂用水量及压裂液中的有害添加剂含量<sup>[10]</sup>。

中国页岩气开发刚刚起步,虽然尚未形成规模效应,但与其开发相关的环境问题得到高度重视。中国页岩气开发在吸收其他国家经验教训的基础上,遵循《中华人民共和国环境保护法》的规定,各生产企业也制定了相关条款和措施,因而环境问题得到了有效解决,中国页岩气的勘探开发基本实现绿色环保。勘探开发过程中主要采取 4 方面的措施:一是建立废水、废气、废渣和噪音的预防和治理措施;二是建立严格工艺流程,有效保护环境;三是采用“井工厂”作业模式,节约利用土地;四是边生产、边建设、边复垦。同时开展了页岩气勘探开发环境影响研究,经过长期对水力压裂的浅层地下水动态监测,目前尚未发现与页岩气开发活动相关的污染事件。

## 3 结论

1) 实现中国页岩气商业化开发有利的因素包括:资源基础较好,开发前景可观;勘探开发技术起点较高;在开发之初对环保问题给予高度重视,并得到政府积极的政策扶持。不利因素包括:地质及地表条件相对较差;技术系列尚未成熟配套。

2) 要实现中国页岩气经济性商业化开发,需要克服诸多客观因素带来的不利影响,解决目前面临的关键技术问题。做好储层精细描述、优选核心区、精确定位最佳钻井层位等技术,以提高投入回报率。通过不断实践与创新,研发和优化适合中国地质条件和地表条件的开发工程技术系列,包括

专用设备及工艺,配套相关的技术标准和作业规范。发展和推广“工厂化”作业模式,通过集约化生产降低页岩气开发的单井盈亏平衡点。

3) 在技术成熟的条件下,中国页岩气开发应逐步向定制化方向发展。根据油气价格、技术需求,在钻井、测量、测井、液体、钻头、压裂泵车等的选择上倾向于量身定制,使页岩气开发更为经济,这也是未来的发展趋势。

#### 参考文献 (References)

- [1] 曾会生. 页岩油气开发让美国逐步走向“能源独立”[EB/OL]. (2014-01-09) [2016-07-10]. <http://www.chinanews.com/cj/2014/01-09/5716237.shtml>.  
Zeng Huisheng. US gradually steps to "energy independence" by shale oil and gas development [EB/OL]. (2014-01-09) [2016-07-10]. <http://www.chinanews.com/cj/2014/01-09/5716237.shtml>.
- [2] EIA US. Review of emerging resources: U.S. shale gas and shale oil plays[EB/OL]. (2011-07-08) [2016-07-10]. <http://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/>.
- [3] 国土资源部中国地质调查局. 中国页岩气资源调查报告[EB/OL]. (2015-06-11) [2016-07-10]. <http://www.ngac.cn/Public/AttachFile/201506/20150611050301df77.pdf>.  
China Geological Survey, Ministry of Land and Resources. China shale gas resources survey report[EB/OL]. (2015-06-11) [2016-07-10]. <http://www.ngac.cn/Public/AttachFile/201506/20150611050301df77.pdf>.
- [4] 江怀友, 鞠斌山, 李治平, 等. 世界页岩气资源现状研究[J]. 中外能源, 2014, 19(3): 14-22.  
Jiang Huaiyou, Ju Binshan, Li Zhiping, et al. A study on the world's shale gas resources today[J]. Sino-Global Energy, 2014, 19(3): 14-22.
- [5] 杨艳, 王礼茂, 方叶兵. 中国页岩气资源开发利用的可行性评价[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2127-2136.  
Yang Yan, Wang Limao, Fang Yebing. Feasibility evaluation for exploitation and utilization of china shale gas resources[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2127-2136.
- [6] 申延平, 吴朝东, 梅丹, 等. 页岩油气发展的石油地质意义及决定因素[J]. 天然气地球科学, 2014(25): 150-155.  
Shen Yanping, Wu Zhaodong, Mei Dan, et al. The petroleum significance of shale oil & gas and key factors[J]. Natural Gas Geoscience, 2014(25): 150-155.
- [7] 杨金华, 何艳青, 郭晓霞. 美国油气钻井业发展的新特点与启示建议[J]. 国际石油经济, 2014(9): 21-28.  
Yang Jinhua, He Yanqing, Guo Xiaoxia. Newly developed features of the US oil and gas drilling industry and their implications[J]. International Petroleum Economics Monthly, 2014(9): 21-28.
- [8] 李明. 国外页岩油气藏压裂改造技术[J]. 内蒙古石油化工, 2014(3): 101-104.  
Li Ming. Foreign shale oil & gas reservoir fracturing technology[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2014(3): 101-104.
- [9] 张焕芝, 何艳青. 全球页岩气资源潜力及开发现状[J]. 石油科技论坛, 2010(6): 53-57.  
Zhang Huanzhi, He Yanqing. Resource potential and development status of global shale gas[J]. Oil Forum, 2010(6): 53-57.
- [10] 顾家瑞. 美国多措并举控制页岩气开发环境污染[J]. 石油和化工节能, 2013(1): 45-47.  
Gu Jiarui. US takes multi-measure to control environment pollution in shale gas development[J]. Petroleum & Chemical Energy Conservation, 2013(1): 45-47.

## Shale gas development in China and US: Comparison and thinking

WANG Li, YU Rongze, ZHANG Xiaowei, GUO Wei, LEI Danfeng, SHAO Zhaoyuan

PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang; National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Centre, Langfang 065007, China

**Abstract** Through a comparison between China and US in shale gas resource, geology, development technologies and other aspects, it is shown that the shale gas development in China is characterized by favorable resource bases and high starting point of both exploration and development technologies, in addition to the positive policy support from government. On the other hand, much attention has been paid to environmental protection from the government and enterprises as well. However, there are still some negative factors, such as relatively poor geological and surface conditions, immature technical series and assistant technologies. Therefore, for the actual situation, some key technical issues must be resolved to overcome the adverse aspects caused by these actual factors and realize commercial shale gas development in China. These technical issues include core-zone optimization, development and optimization of engineering technology series which are applicable to specific geological and surface conditions, development of “gas-factory” operation mode, etc.

**Keywords** shale gas development; resource; geology; development technology

(编辑 韩丹岫)