

中国页岩气资源勘探开发挑战初论

王道富¹ 高世葵² 董大忠³ 黄旭楠³ 王玉满³ 黄金亮³ 王淑芳⁴ 蒲泊伶⁵

1.中国石油天然气股份有限公司 2.中国地质大学(北京)人文经管学院 3.中国石油集团科学技术研究院

4.北京大学 5.中国石油勘探开发研究院

王道富等.中国页岩气资源勘探开发挑战初论.天然气工业,2013,33(1):8-17.

摘要 鉴于地质条件与国情的明显差异,中国能否成功复制美国的“页岩气革命”成为时下关注的焦点。为此,分析了页岩气资源勘探开发拥有的良好机遇以及面临的严峻挑战。其中,机遇包括:①中国能源结构亟待改善,天然气需求量在未来5年的能源消费结构中的比例将增长1倍;②能源需求量持续攀升,到2020年中国天然气年均消费量仍将以19%的复合年增长率递增;③页岩气资源丰富,预测中国页岩气地质资源量为 $57 \times 10^{12} \sim 244 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $10.3 \times 10^{12} \sim 47 \times 10^{12} \text{ m}^3$;④已初步形成了页岩气勘探开发技术。挑战包括:①独特的页岩气形成与富集地质条件差异;②资源前景与核心区尚不完全落实;③勘探开发核心技术尚不掌握;④勘探开发成本偏高;⑤环境保护问题;⑥尽管中国已将页岩气定义为一个新的矿种,但就其根源和本质,页岩气还是油气资源中的一种类型,只不过与其他油气资源相比具有其独特性而已,因此非油气企业贸然从事页岩气勘探开发将会面临诸多挑战;⑦页岩气被设立为新矿种起,政府管理工作的挑战就产生了。结论认为:中国页岩气勘探开发正处在起步阶段,有诸多基础工作尚未深入开展,仍有系列严峻挑战需要应对。既不能因噎而废食,也需做好扎实工作。

关键词 页岩气革命 中国 能源结构 需求量 资源量 勘探开发技术 发展机遇 挑战

DOI:10.3787/j.issn.1000-0976.2013.01.002

A primary discussion on challenges for exploration and development of shale gas resources in China

Wang Daofu¹, Gao Shikui², Dong Dazhong³, Huang Xunan³, Wang Yuman³,
Huang Jinliang³, Wang Shufang⁴, Pu Boling⁵

(1. PetroChina Company Limited, Beijing 100007, China; 2. School of Humanities & Economic Management, CUGB, Beijing 100083, China; 3. CNPC Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China; 4. Peking University, Beijing 100871, China; 5. Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 33, ISSUE 1, pp.8-17, 1/25/2013. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: Due to obvious difference in geological and national conditions, whether or not China can successfully duplicate the American style of shale gas revolution to realize the scientific development of shale gas has already become the most concerned focus at present. In view of this, this paper analyzes good opportunities and severe challenges for the exploration and development of shale gas in China. Good opportunities include as follows: (1) The energy structure is to be changed. (2) The energy demand is keeping rising. (3) There is rich shale gas resources in China, the reserves of which in place is predicted to be 57 - 244 trillion m^3 and the technical recoverable reserves of which will be 10.3 - 47 trillion m^3 . (4) Technologies have been primarily formed for shale gas exploration and development. The following issues are severe challenges to be faced with: the difference in geological conditions between the specific formation process of shale gas and its accumulation; being unknown of prospective and target zones; being lack of key technologies for shale gas exploration and development; a relatively high cost for shale gas exploration and development; high requirement for environment protection. Besides, since the shale gas was regarded as a new mineral species, the government has been troubled by managing to deal with various problems. However, other companies will meet more unexpected challenges in this domain than oil and gas companies if not deliberating their decisions. In the end, this paper points out the fact is that because shale gas exploration and development is still at the initial stage, a lot of elemental work needs to do and great challenge has to be faced with; however, never shall we dare not to eat for fear of being choked, and be brave enough to overcome any difficulties for the purpose of exploring and recovering more shale gas resources in China.

Key words: shale gas revolution, China, energy structure, demand quantity, resource reserves, exploration and development technologies, developing opportunity, challenge

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(编号:2013CB228000)、国家科技重大专项(编号:2011ZX05-18-001、2011ZX05-28-002)、中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介:王道富,油气田开发工程博士,教授级高级工程师,本刊第七届编委会顾问;1982年毕业于原西南石油学院地质系,现为国家能源页岩气研发(实验)中心主任、中国石油天然气股份有限公司总地质师、中国石油勘探开发研究院院长、中国石油学会副理事长;长期从事低渗油气田开发理论、技术及生产实践研究,创新性地发展了适合于低渗透油气田的非达西渗流及变形介质渗流理论。地址:(100083)北京市海淀区学院路20号。E-mail:wangdaofu@petrochina.com.cn

近年来,由北美掀起的“页岩气革命”撼动了全球传统能源版图。越来越多的证据表明,这场“页岩气革命”的全球化及全球能源版图的重构,引发了各国政府及油气(能源)企业和公司对页岩气资源超乎想象的激情^[1]。富有机质页岩作为一种沉积岩,蕴藏了丰富的油气资源,长期以来一直被人们所忽视^[2]。过去的10年间来,随着全球能源需求量的增加、非常规油气地质勘探理论的进展、难采油气开采技术的突破,以及美国页岩气的成功开发,彻底改变并重新激活了人们对富有机质页岩的认识,使页岩气一跃成了全球最热、资源量最大、发展速度最快的天然气新资源。中国在能源需求量越来越大、供给越来越依赖外源的背景下,为保障国家能源安全,不可避免地被卷入到了全球“页岩气革命”的洪流中,并试图在中国领土上复制北美页岩气的成功。然而,北美页岩气的成功究竟能否在中国“再现”,中国油气或能源企业能否在页岩气领域“展现大局面”,各派观点并不统一。笔者认为,从客观与现实来看,页岩气在中国的发展既有良好的战略机遇、美好的前景,同时也存在着严峻的挑战,应该说“战略机遇与挑战并存”。抓住机遇迎接挑战,是未来5~10年中国页岩气勘探开发实现重大突破和长远可持续发展的关键。本文试图就发展机遇做出归纳,对面临挑战做出剖析,以谋求在中国页岩气发展进程中,有效利用机遇及时应对挑战。

1 中国页岩气发展的重要机遇

1.1 中国能源结构亟待改善

能源危机和环境问题同为当今世界人类发展面临的巨大威胁,环境问题在很大程度上是由能源结构不合理造成的。因此,能源消费结构是否合理是衡量一个国家和地区发展的重要指标之一,以煤为主的能源资源存量,决定了中国在相当长的时间内以煤为主的能源消费结构^[3]。在中国一次能源消费结构中^[4](图1,2),煤炭占到了69%,是世界煤炭消费量的50%,比美国高出47%、比世界平均水平高出约40%;而天然气仅占5%(为世界天然气消费量的4%),远低于美国的28%及24%的世界平均水平。为保障中国社会经济又好又快可持续发展,中国的能源结构亟待调整,需要充分开发和利用清洁能源。未来10年,中国政府希望在能源结构上发生重大改变,减少对煤炭和石油的依赖,尤其是对煤炭的需求量将从69%降低到60%。在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》(简称“《十二五规划》”)中,政府宣布将增加清洁能源的供应量,包括天然气、水电及核能,其中天然气需求量在未来5年能源消费结构中的比例将增长1倍,同时实现2020年中国国内单位生产总值CO₂的排放量比2005年下降40%~45%。

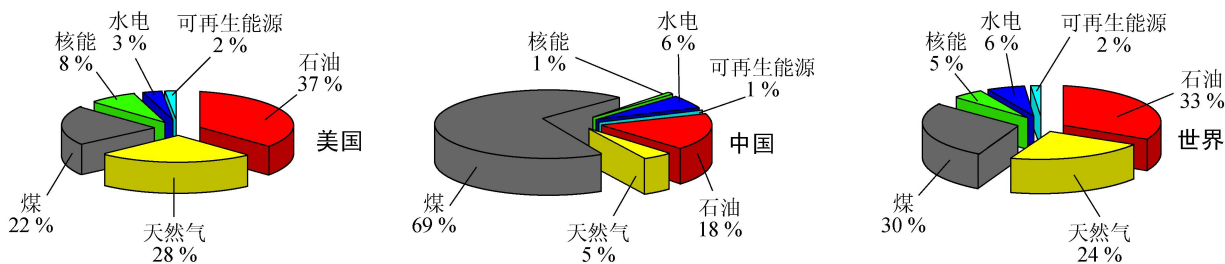


图1 2011年美国、中国与世界能源结构对比图

注:据《BP世界能源统计》,2012

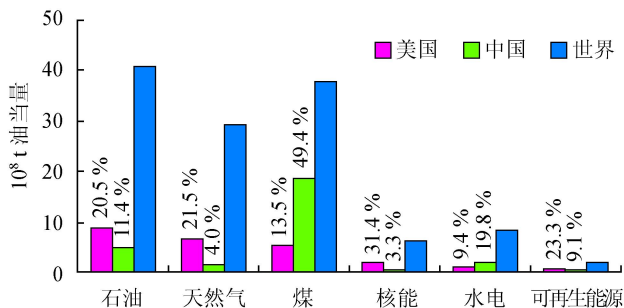
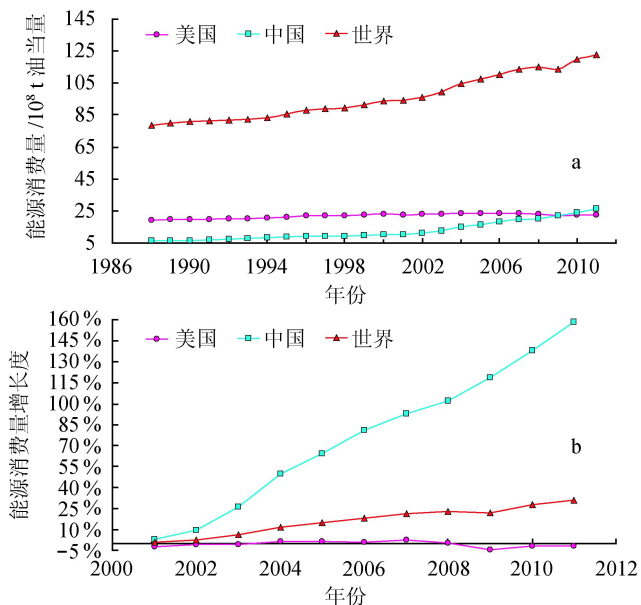


图2 2011年中国、美国不同能源消费量占世界比例的对比图

注:据《BP世界能源统计》,2012

1.2 中国能源需求量持续攀升

中国社会经济持续高速发展,能源需求量屡创新高。2011年中国一次能源生产总量为 $2\,446.1 \times 10^6$ t油当量,一次能源消费量为 $2\,613.2 \times 10^6$ t油当量^[3]。2000—2011年世界平均能源消费量增长为31.2%,而中国能源消费量则增长了158.6%,占世界总能源消费增长量的21.3%,超过了美国等发达国家(图3)。但中国能源资源量仍非常低,尤其是人均油气资源量仅占世界平均水平的6%。中国1993年首次成为石



油净进口国,2006 年天然气也跨入净进口国之列^[5]。中国石油对外依存度由 1993 年的 1.2% 飙升到 2011 年的 58%,天然气对外依存度由 2006 年的 0.8% 迅速攀升至 2011 年的 23%,成为全球能源市场中最重要进口国。在天然气需求中,近年来(2006—2011 年)尽管中国的天然气产量每年平均增长 13% 以上,成为全球天然气产量增长最快的国家之一,但总量还是非常少的。2011 年中国天然气产量为 $1\ 025 \times 10^8 \text{ m}^3$,天然气消费量同期年均增长量超过 18%,2011 年中国天然气消费量达 $1\ 307 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。据预测,到 2020 年中国天然气年均消费量仍将以 19% 的复合年增长率递增,在中国能源结构中的比例将由 2011 年的 5% 提高到 10%~15%,而届时中国天然气产量仅为 $2\ 000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右。

1.3 中国页岩气资源丰富

页岩气在中国虽显些许陌生,但目前在中国陆地上已发现从前寒武纪到新生代均有丰富的富有机质页岩发育(图 4)^[5],初步预测中国具有丰富的页岩气资源量。美国学者(Rogner, 1997)^[6-7]、美国能源信息署(EIA, 2011)^[8]预测全球页岩气资源量为 $456 \times 10^{12} \sim 716 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (图 4),接近或超过了全球常规天然气资源量($471 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。其中所预测的中国页岩气资源量为 $100 \times 10^{12} \sim 144.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占世界页岩气总资源量的 20% 左右(图 5)。2005 年以来,中国机构或学者借鉴北美成功经验,加快页岩气地质认识,强化页岩气勘探开发技术攻关,通过广泛开展中国页岩气地质

距今 Ma	界(系)	松辽	渤海湾	鄂尔多斯	扬子	吐哈-准噶尔	塔里木	羌塘
65	新生代	N						
	E		●●●					
	K	●●●						
135	中生代	J	●		●●	●●●	●●	●●
	T			●●●	●		●	●
	225	上古生代	P	●●	●●	●●	●	
280	下古生代	C	●	●	●	●		
	D				●			
	395	下古生代	S			●		
435	下古生代	O	●	●	●		●●	
	C				●		●	
	570	AnPt		●●●		●		

图 4 中国陆上各地质年代富有机质页岩发育分布状况图

注:圆点数量代表富含有机质页岩在每个时代出现的次数,圆点大小代表富含有机质页岩发育程度,点越大越发育;红色为海相页岩,绿色为过渡相—湖沼相煤系页岩,黑色为湖相页岩

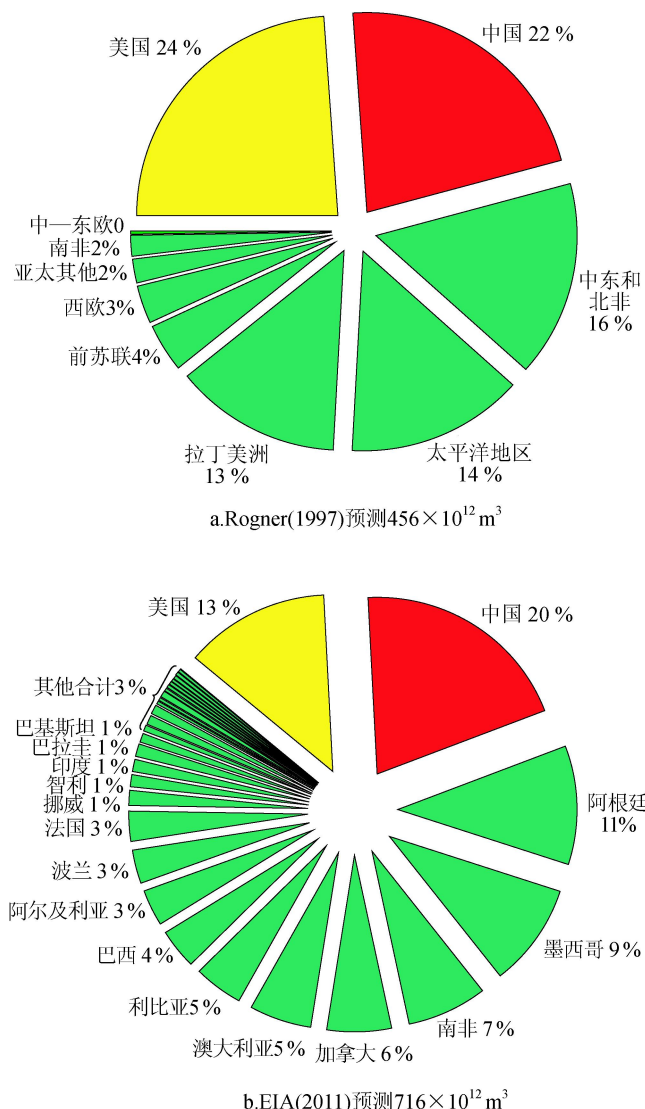


图 5 全球页岩气资源量预测图

评价与典型区块的勘探开发先导试验,在四川、鄂尔多斯等盆地和重庆黔江、湖南涟源等地区的页岩气勘探开发中相继取得突破,证实了中国页岩气(资源)的广泛存在,具良好的勘探开发前景。利用露头地质调查、探井及实验测试等取得的实际数据,预测中国页岩气地质资源量为 $57 \times 10^{12} \sim 224 \times 10^{12} \text{ m}^3$,技术可采资源量为 $10.3 \times 10^{12} \sim 47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表1)^[5]。2012年中国政府已依据中国丰富的页岩气资源量、勘探开发先导试验的可喜成果,制定了雄心勃勃的《中国页岩气“十二五”发展规划》;2015年中国页岩气产量达到 $65 \times 10^8 \text{ m}^3$,2020年力争实现页岩气产量 $600 \times 10^8 \sim 800 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[9]。

表1 中国页岩气资源预测表 10^{12} m^3

预测机构	地质资源量	技术可采资源量
中国工程院	/	11.5
国土资源部	57~244/134.4	10.3~47/25.1
油公司研究院所	86~166/100	15~30/20

注:数值表示最小值~最大值/期望值

1.4 中国已初步形成了页岩气勘探开发技术

在页岩气勘探开发前,中国已在沁水盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地成功实现了煤层气和致密砂岩气的规模化工业生产,基本明确了非常规天然气的地质特征、富集规律,基本形成了一套有效的地质评价、富集区选择方法,初步摸索出了一套有效的勘探开发技术。在页岩气勘探开发进程中,中国充分借鉴、学习北美的成熟技术^[10],充分利用中国在常规及其他非常规油气勘探开发中形成的先进有效技术,在致力于页岩气地质理论研究的同时,初步探索形成了多项页岩气勘探开发适用技术(图6),包括页岩气形成与富集特征研究方法、页岩气地质评价与选区方法、页岩气资源评价方法、页岩气测井识别与处理解释技术、地震采集处理与储层识别预测技术、水平井钻完井技术、水平井分段体积压裂工艺技术、页岩储层改造配套工具、储层改造低摩阻与速溶滑溜水体系、多种裂缝监测诊断评估技术等。

2 中国页岩气发展面临的挑战

页岩气是早在1821年于美国东部阿帕拉契亚盆地纽约州Chautauga县泥盆系Perrysbury组Dunkirk黑色富有机质页岩中发现的天然气。页岩气自被发现以来,走过了近200年复杂艰辛的发展道路^[6-7],2000年以来才正式成为天然气勘探开发的新目标,并迅速对世界能源供给格局和地缘政治产生了重大影响。页

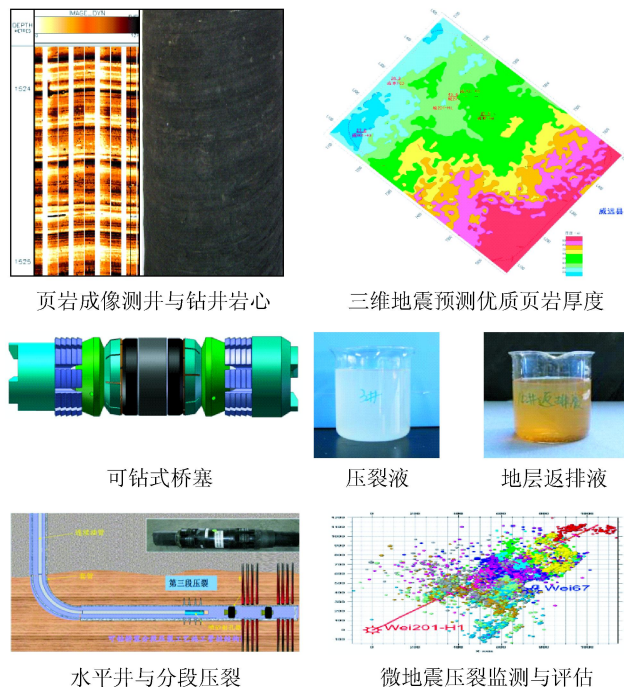


图6 页岩气地质评价与勘探开发相关技术图

岩为典型的细粒沉积岩石,由粉砂和黏土级颗粒经压实作用而形成,是全球大多数常规油气藏的主要源岩或封盖层。页岩不同于其他黏土岩和泥岩,页岩呈薄层状且易破裂,可以沿其薄层理破碎或裂开,容易形成裂缝。尽管页岩十分常见(在地壳沉积岩中有60%是页岩),但能够作为有远景的油气资源开发的页岩储层并不多,能成为勘探开发的有效含气页岩仅是那些富含有机质、沉积后得到较好保存、生成的天然气多数仍被圈闭在超低渗透率的岩石基质中的页岩^[2]。在可开采的含气页岩储层中,页岩气部分以游离气自由分布在页岩基质的原生孔隙与次生孔隙中,部分以吸附气的形式附着在页岩中干酪根的表面。页岩储层渗透率极低,一般为 $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-6} \text{ mD}$,比常规储层渗透率低数个数量级^[2],页岩气储层必须通过钻大位移水平井和实施多级水力压裂才能形成工业产能。因此,大位移水平井钻井和多级水力压裂是确保页岩气经济有效的两项重要技术。但美国页岩气开发的经验发现,从页岩储层中开发天然气绝非仅靠钻水平井和实施水力压裂那么简单,而是要充分综合运用多种来源、各种规模的资料,加强对页岩储层特征的认识,针对性地改进开发工艺和技术,优化钻井、完井、增产措施,才能成功地从页岩储层中开采出油气资源来^[2]。中国尽管在页岩气资源勘探开发上已展露良好机遇,也在现有先导试验区取得了可喜进展,但要实现

规模有效发展,还面临一系列重大挑战,不可忽视^[11-13]。这些重大挑战包括中国独特的页岩气形成与富集地质条件、复杂的地表地貌条件与成本控制、适用勘探开发核心技术与配套装备的形成、水资源利用与环境保护等。

2.1 独特的页岩气形成与富集条件差异的挑战

在地质特征上,作为有勘探开发远景的含气页岩储层既要有产气潜力大的物质基础——高质量储层(RQ),也要是能进行有效压裂的目标——良好的钻完井地层(CQ)。有机质含量高的富含有机质页岩是在特殊条件下形成的^[2],这种特殊的条件使得所有页岩

气储层都有其独特性(图 7)^[6-7],即便是同一套页岩储层的地质特征在纵横向上也往往会有非常明显的变化。每一页岩储层要实现工业化规模开发都需要花费一定的时间对其地质特征进行认识,摸索适应的工程技术。从对比研究的结果可知,与北美地台页岩气储层相比,中国页岩气形成与富集地质条件非常复杂,除页岩沉积总面积可能相当外,其他条件都相差较远。美国产气页岩主要是海相沉积,而中国除海相页岩外,还有较为发育的海陆过渡相和陆相页岩(图 8)。美国页岩气主要产自上古生界—中生界,中国自元古界到新近系都有页岩发育^[1]。美国页岩热演化成熟度

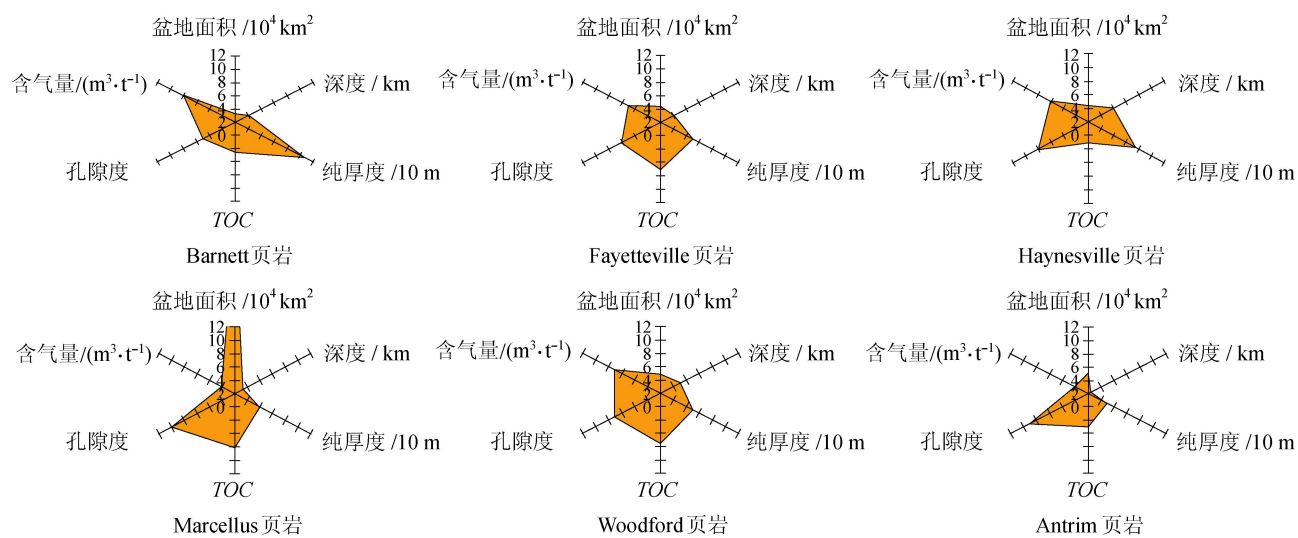
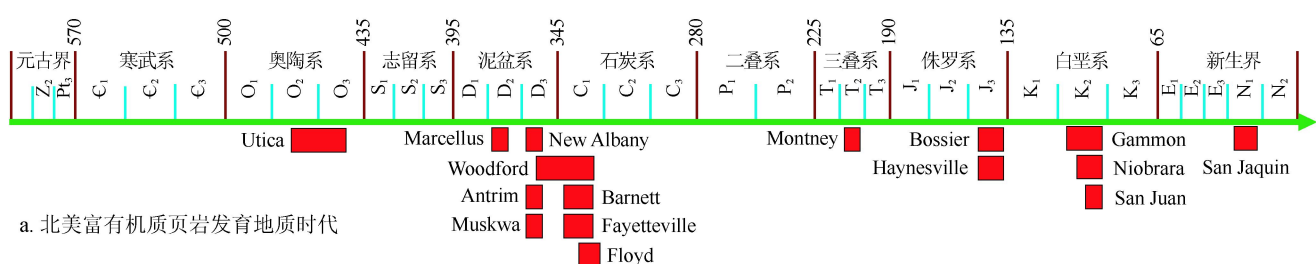
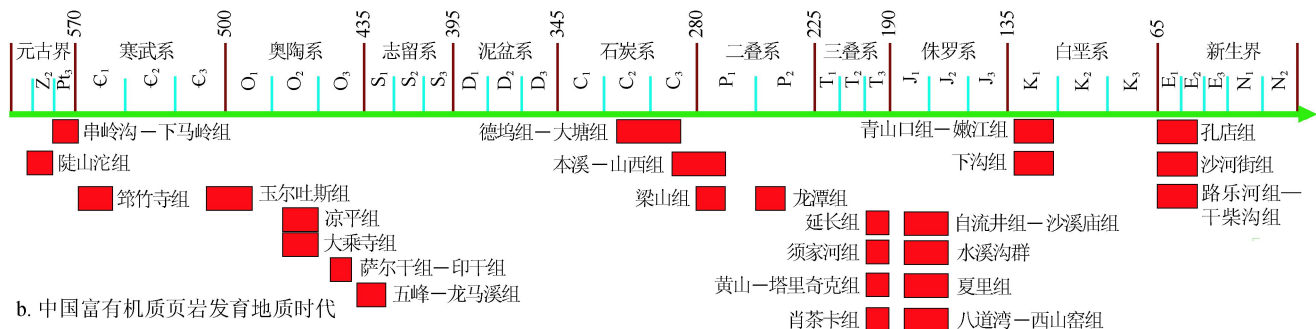


图 7 美国主要产气页岩地质参数图



a. 北美富有机质页岩发育地质时代



b. 中国富有机质页岩发育地质时代

图 8 中美富有机质页岩发育时代对比图

(R_o)为1.0%~3.5%,处在生气高峰期,中国海相页岩 R_o 为2.3%~5.1%,为高一过成熟热裂解成气阶段,陆相页岩 R_o 为0.4%~1.2%,处于低熟—成熟阶段,以生油为主,局部生气。北美地台构造稳定,断裂少,页岩自沉积、成岩、成气以来,除有一定抬升外,很

少有大的构造改造,中国构造背景总体处在活动性较强的区域,断裂发育,大部分页岩都经历了强烈的后期多次改造,南方海相页岩大面积出露。另外,从图9中可明显看出,中国页岩储层杨氏模量较低、泊松比高,岩石脆性指数低于美国页岩储层,可压性差。

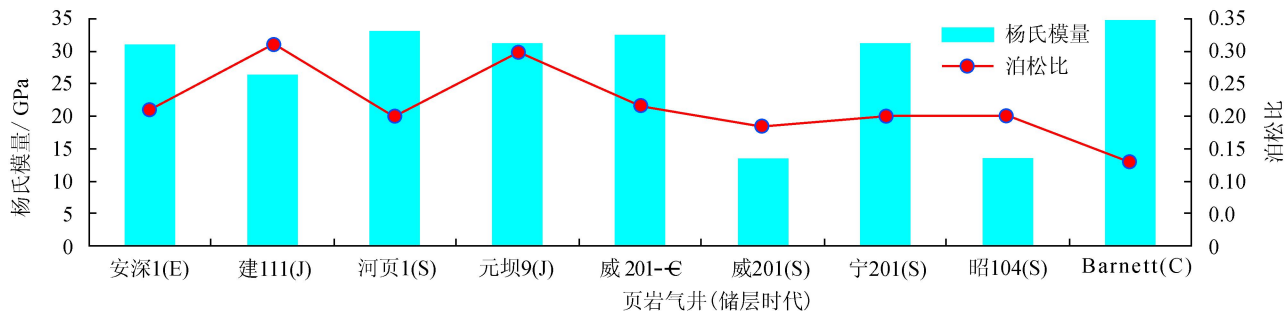


图9 中国页岩与美国 Barnett 页岩岩石力学性质对比图

2.2 中国页岩气资源前景与核心区待落实的挑战

初步研究结论指出(图8),中国南方地区、华北地区、新疆塔里木盆地、西藏羌塘盆地发育海相页岩,南方地区、华北地区、新疆地区发育海陆过渡相—湖沼相煤系页岩,松辽盆地、渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地等发育湖相页岩,上述3类页岩都具备页岩气形成与富集的条件。国内外专家预测:中国页岩气资源非常丰富,或许超过常规天然气资源量(图5、表1)。实际上,中国到底会有多少页岩气资源,从目前国内流行的

多版本资源数据就可见一斑,每个预测数据看似依据都很充分,但实际又都不可信,关键缘由是目前中国页岩气资源预测的基础非常差。美国是在经历了数10年页岩气勘探开发实践的基础上,才逐步解决了页岩气资源问题,其页岩气资源量估算基础是建立在工业化规模开发的9大页岩气区带、近60000口页岩气生产井、近30年页岩气规模生产经验上,采用了单井(生产)最终可采储量法。即便是如此,美国的页岩气资源量在不同经济、技术条件下,仍然还会随时有较大的变化(表2)^[14]。

表2 美国页岩气剩余资源量预测变迁表

序号	盆地	2006年	2007年	2008年	2009年	2010年	2011年	2012年
1	Appalachian	0.42	0.42	0.40	1.44	1.67	12.49	5.30
2	Fort Worth	1.13	1.10	1.08	1.70	1.70	0.57	0.54
3	Michigan	0.31	0.31	0.31	0.28	0.28	0.59	0.51
4	San Juan	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.34	0.28
5	Illinois	0.08	0.08	0.08	0.11	0.11	0.31	0.31
6	Williston	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11	0.20	0.08
7	Arkoma		1.19	1.19	1.39	1.27	1.53	0.76
8	Anadarko		0.08	0.08	0.20	0.17	0.08	0.37
9	TX-LA-MS Salt				2.04	2.04	2.27	1.87
10	Western Gulf					0.51	0.59	1.67
11	Columbia					1.44	1.16	0.34
12	Uinta					0.20	0.59	0.31
13	Permian						1.90	0.76
14	Greater Green River						0.51	0.37
15	Black Warrior						0.11	0.14
合计		2.33	3.57	3.53	7.55	9.78	23.24	13.61

中国页岩气勘探开发历时刚 5 个年头,仅在四川、鄂尔多斯等盆地、重庆黔江、湖南涟源等地区见到好苗头,全国各类(包括地质浅井、评价井、先导试验井等)页岩气钻井不足 100 口,尚无正式进入开发阶段的页岩气田,必要的实验、生产数据很少,尤其是来自井下的数据稀少,页岩含气量、单井可控制资源等关键参数极其有限,页岩气资源估算所采用的方法是简单的类比法,预测的资源结果相对比较粗略。事实上,中国页岩气资源前景在未来一段时期内仍将是一个未知数,需要深入的地质认识、大量的钻井实践、足够的实验测试,才可能较为准确地确定出中国的页岩气资源前景。

更为重要的是每一个成功的页岩气田从发现到工业化规模开发都需要经历“点上发现、面上评价、落实核心区、拓展规模开发”4 个阶段。与常规油气资源勘探开发不同,页岩气首先是在远景区带评选的基础上,

通过 1~2 口或更多一点的钻井工作,验证页岩气的存在,实现点上发现;再以数口至数 10 口评价井钻探,对整个页岩气区带开展面上评价,落实资源规模,分析资源分布规律,划分不同资源丰度富集区;随后进行富集区综合评价,开展先导试验井钻探,评价单井产能,总结高产富集规律,确定核心区;最后以核心区为重点,实现工业化规模开发,以此为基础逐渐拓展,最终实现页岩气区带整体开发。页岩气形成与富集机理特殊,一般大面积连续分布,资源富集程度总体较低,核心区为资源相对富集区。一个页岩气区带中,核心区范围不大,但所拥有的资源可占整个页岩气区带的 60% 以上^[6-7](表 3),单井最终可采储量(EUR)高,核心区内的页岩气井中的干井、低产井比例不足 4%。因此,核心区的确定成为一个页岩气区带成功的关键。中国页岩气勘探开发处于起步阶段,资源潜力尚未完全落实,远景页岩气区带尚未确定,核心区的确定目前更无从谈起。

表 3 美国沃斯堡盆地 Barnett 页岩气区带不同富集区特征简表

关键参数	核心区(C1)	扩展区(C2)	外围区(C3)
面积/km ²	4 162	5 838	10 700
EUR/(10 ⁸ m ³ ·井 ⁻¹)	2.26~0.40/0.71	1.50~0.25/0.42	0.70~0.14/0.23
资源比例	>60%	0~20%	0~20%

注:EUR 数值表示最小值~最大值/期望值

2.3 页岩气勘探开发关键技术的挑战

除了雄厚的资源基础外,页岩气成功规模化发展的关键还包括实现勘探开发关键技术的突破。页岩气开采中,一般单井产量低、单井控制储量少、高产时间短。为提高页岩气单井产量、增加单井控制储量,常采用大位移长水平井生产、多级水力压裂储层改造、微地震压裂缝网络监测。为实现页岩气田规模化生产,控制生产成本,还常采取集中批量钻井、“工厂化”作业。页岩气开采中涉及的关键技术包括数据收集、地层评价、气藏模拟、大位移水平井钻井、多级水力压裂、地质导向钻井、微地震监测、生产管理等。尽管这些技术大多属于成熟技术,但多被国际大公司“把控”^[11]。中国涉足页岩气时间短,相关页岩气勘探开发技术还不成熟,关键核心技术在国内尚为空白。中国页岩气与国外页岩气储层品质的差异,使得即便直接引进国外成熟技术,短时间内也难对这些进行技术消化、实现本土化。中国页岩气也存在开发条件上的技术难关,突出的是特殊的地表条件和较大的埋藏深度。中国南方海相页岩发育区是迄今评价认为最有前景的页岩气区,但中国南方地表沟壑纵横、高山峡谷相连、人口密集、

耕地较少。这一复杂的地形地表条件将严重限制大规模的交通运输,严重制约频繁的、多井次的大规模施工。井场范围受限会给大规模施工带来制约,不能集中、连续部署集群化(Pad 平台)钻井井场,“工厂化”作业就难以施展。中国页岩埋藏深度普遍偏深,概略统计有 65% 以上的页岩埋深超过 3 500 m,而美国页岩埋深主体上介于 1 500~3 500 m。埋深加大不仅直接增加生产成本,也较大地增加了技术难度。目前中国已钻的页岩气水平井在钻井过程中无一例外地遇到了井壁垮塌、卡钻等频发事故,水平井段 40% 的钻井进尺要花费总钻井时间的 70% 以上。因此,中国页岩气勘探开发不可完全移植国外的成熟方法和技术,技术突破是中国页岩气规模化发展的重要前提。

2.4 页岩气开发成本偏高的挑战

页岩气井生产具有单井产量低、递减快等显著特征,需要大量钻井才能实现页岩气规模产量与稳产(表 4)。因此,页岩气勘探开发投资巨大,成本高,一般企业承担不了如此巨大的投入风险。美国的页岩气勘探开发是在较为完善的天然气管网和发育的消费市场基础上,不断改善技术、优化作业流程、降低成本,才使其

表 4 美国主要页岩气区带生产 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$ 天然气所需钻井数表

页岩气区带	单井最终可采储量/ ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{井}^{-1}$)	所需井数/ 口	钻井成本/ 万美元
Mancos	0.142	706	450~470
New Albany	0.156	642	80~100
Lewis	0.184	543	80~100
Barnett	0.396	252	160~370
Fayetteville	0.535	187	175~305/290 ¹⁾
Marcellus	0.658	152	450~470
Woodford	0.707	141	460~800
Eagle Ford	0.837	119	400~650
Haynesville	1.130	88	950~1 000/900 ¹⁾

注 1): 数值表示最低值~最高值/平均值

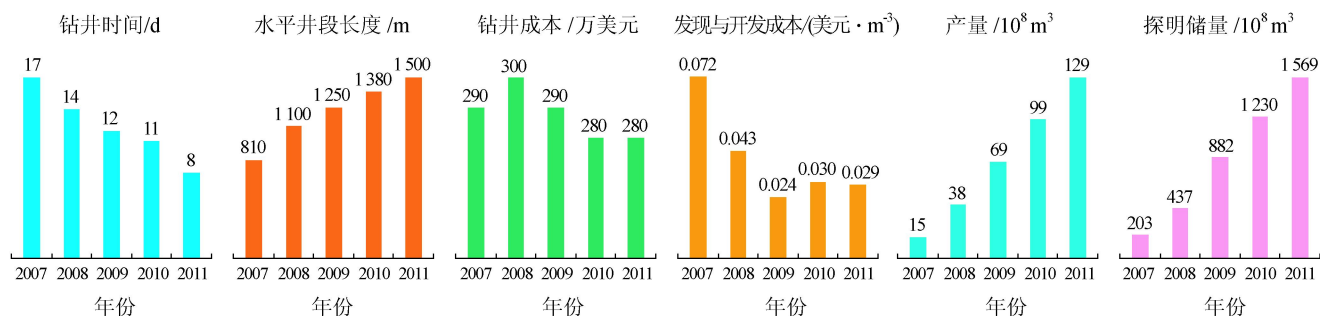


图 10 美国西南能源公司 Fayetteville 页岩气田开发关键参数变化直方图

勘探开发成本明显偏高,短期内根本无利可图。四川盆地页岩气勘探开发试验区统计结果表明,目前该试验区页岩气水平井所需费用均超过 4 000 万元(人民币),有的甚至达到 7 000 万元(人民币),单井页岩气产量仅 $1.0 \times 10^4 \sim 15.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,单井可采储量为 $0.2 \times 10^8 \sim 0.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,其亏损明显。况且中国页岩的赋存地质条件比美国复杂,页岩气勘探开发成本本身就可能会高于美国。

2.5 页岩气勘探开发中环保的挑战

页岩气本身是洁净能源,毋庸置疑,但页岩气在勘探开发中会引发严重的环境污染问题也不应回避。美国有舆论指出页岩气开采已产生了明显的环境污染,在美国的一些地方,已爆发多起抗议由页岩气勘探开发导致的水源污染、房屋损害等事件。欧洲因担心页岩气勘探开发存在环境隐患而叫停了多个页岩气项目,越来越多的国家正在由于对环境的担忧而不鼓励页岩气发展^[13]。页岩气勘探开发可能造成的环境污染包括勘探开发中大量占有土地对地表的破坏、大量钻井液与压裂液的用水与排放对水资源的过度使用与污染(表 5)、烃类气体逸散及其他有害物质的排放对大气及土地等的污染。大量占有土地、钻井液与压裂

成功实现了页岩气大规模商业性开采。据美国西南能源公司 2007—2011 年对 Fayetteville 页岩气区带的开发统计,通过不断的技术进步和优化作业流程,钻井时间减少了 52% 以上,水平井段长度增加了 84% 以上,产量、储量均提高了 7 倍以上,但钻井成本基本保持不变,发现和开发成本大幅度降低(图 10)^[2],尽管如此,该区带所有页岩气井,仍有 80% 处于亏损或无利可盈状态,只有 20% 的井有盈利状态。中国页岩气勘探开发刚驶入工业化试验发展道路,以地质评价、资源落实、技术积累为主,页岩气钻井、储层改造技术还不成熟,工具、工艺不配套,特别是施工工具、裂缝监测等工具与技术尚需进口,同时,尽管中国的天然气市场需求旺盛,但管网建设还不成熟且分布不均,使中国页岩气

表 5 页岩气勘探开发用水量统计表

用途	页岩区带	每口井用水量/ m^3	公司
压	Barnett 页岩	14 000~17 000	Chesapeake
	Barnett 页岩	4 500~2 2500	Duncan
	Horn River 页岩	40 000	PTAC
裂	Marcellus 页岩	15 000~34 000	NYCDEP
	龙马溪组页岩	11 945~23 565	中国石油
液	筇竹寺组页岩	10 323	中国石油
	东岳庙组页岩	12 038~16 200	中国石化
	延长组-7 页岩	17 350	延长集团

液的用水在中国将是更为严峻的环保挑战。在中国南方地少人多,地貌以丘陵、山地为主,页岩气井场往往会临近村舍,人口密集,且取水、排液主要以灌溉及饮用水源为主,这将使得页岩气在钻井、储层改造中面临严峻的噪音消除、钻井液与压裂液处理及交通设施协调的压力。大量土地占有,会造成地表植被破坏,大规模水力压裂会破坏岩层稳定性,二者并存将会增加山体滑坡发生的可能性。在中国北方,尤其是西北地区,干旱缺水现象较为突出,在较短的时间内消耗大量的水,会给当地人畜用水和工业用水带来影响。另外,水力压裂中大量消耗的陶粒、石英砂及 KCl 等也是宝贵

的天然资源。

2.6 非油气企业从事页岩气开发面临的挑战

尽管中国将页岩气定义为一个新的独立矿种,但就其根源和本质来说,页岩气还是油气资源中的一种类型,只不过与其他油气资源相比有其独特性而已。因此,非油气企业贸然从事页岩气勘探开发,将会面临以下诸多挑战。

2.6.1 对油气资源认识的能力

非油气企业较少从事油气资源的勘探开发,对该领域所需知识、技术熟悉程度一般都不会高,可能造成对油气资源、包括页岩气资源把握不准的风险。

2.6.2 预测风险、抗风险能力

油气行业有高投入、高回报的特点,但也有高投入、无回报的高风险,实际是高投入、高风险行业。只有事前资源落实到位、风险预测准确、资金雄厚、技术实力强,才具有相应的抗风险能力。能否盈利是非油气企业投身页岩气勘探开发的核心,如能保障盈利,则非油气企业可承担较小风险,否则,一般的非油气企业承受不起这样的亏损。

2.6.3 实现资源充分有效开采的能力

页岩气资源为低品位的非常规油气资源,以“瘦”和“骨”为主,“肥”的很少。对这种资源的开发实际上是在“骨头上剔肉”为主,需要避免“挑肥拣瘦”,否则就会使大量有效资源被浪费。

2.6.4 保护环境的能力

前文已对页岩气开采可能造成的环境影响有了明确的论述,作为非油气企业是否对此有足够的认识,抑或认识到了但是否有足够的实现环保开采,其中的能力包括资金上的、技术上的和经验上的等多个层面。实际上,在油气开采过程中造成环境影响的事例屡见不鲜,即使像BP公司这样的国际石油巨头也难以避免,非油气企业在页岩气开采中的环保工作就更为重要,否则将会面临难以预料的困难和挑战。

2.7 政府管理工作面临的挑战

实际上,自页岩气被设立为新矿种起,管理工作的挑战就产生了。目前已进行了两轮页岩气矿权招标,应充分总结招标成果,正确评估招标区块效果,充分发挥市场机制,加强对投资者在技术、经济等层面的管理,避免招标潮后投资人的失望。加强基础设施建设,一旦招标区页岩气取得突破,页岩气外送、销售和利用的问题将接踵而至。

3 结论与建议

页岩气资源的勘探开发具有非常重要的战略意

义,全球很多公司都在争先恐后地寻找页岩气资源。世界页岩气革命已“蔓延”到中国,中国页岩气勘探开发已见良好苗头,资源丰富,具有美好的发展前景。但是,页岩气勘探开发不仅仅是发现富含有机质页岩和实施水平井与水力压裂,地质条件和国情上的差异,使中国无法完全复制美国页岩气的成功。

中国页岩气勘探开发正处在起步阶段,有诸多基础工作尚未深入开展,仍有系列严峻挑战需要应对。既不能因噎而废食,也需做好扎实工作,未雨绸缪,应积极深化理论认识,实现技术突破,降低成本,有效保护环境。

参 考 文 献

- [1] 董大忠,邹才能,杨桦,等.中国页岩气勘探开发进展与发展前景[J].石油学报,2012,33(s1):107-114.
DONG Dazhong, ZOU Caineng, YANG Hua, et al. Progress and prospects of shale gas exploration and development in China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33(s1): 107-114.
- [2] ALEXANDER TOM, BAIHLY JASON, BOYER CHUCK, 等.页岩气革命[J].油田新技术,2011,23(3):40-55.
ALEXANDER TOM, BAIHLY JASON, BOYER CHUCK, et al. Shale gas revolution[J]. Oilfield Review, 2011, 23(3): 40-55.
- [3] 马晓微.中国能源消费结构演进特征[J].中国能源,2008,30(10):23-26.
MA Xiaowei. China's energy consumption structure evolution[J]. Energy of China, 2008, 30(10): 23-26.
- [4] BP Global. BP Statistical Review of World Energy 2012 [EB/OL]. (2012-12-03) http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/china/bpchina_chinese/STAGING/local_assets/downloads_pdfs/Chinese_BP_StatsReview2012.pdf
- [5] 邹才能,董大忠,杨桦,等.中国页岩气成藏条件及勘探实践[J].天然气工业,2011,31(12):26-39.
ZOU Caineng, DONG Dazhong, YANG Hua, et al. Conditions of shale gas accumulation and exploration practices [J]. Natural Gas Industry, 2011, 31(12): 26-39.
- [6] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会.北美地区页岩气勘探开发新进展[M].北京:石油工业出版社,2009.
Editorial Committee of the Book "Series of Shale Gas Geology and Its Exploration and Development Practice". New progress made in exploration and development of shale gas in North America[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009.
- [7] 《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会.中国页岩气地质研究进展[M].北京:石油工业出版社,2011.
Editorial Committee of the Book "Series of Shale Gas Geology and Its Exploration and Development Practice". Re-

- search progress of shale gas geology in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.
- [8] U.S. Energy Information Administration. World shale gas resources: An initial assessment of 14 regions outside the United States[M]. 2011, Washington, DC: 1-365.
- [9] 张大伟.《页岩气发展规划(2011—2015年)》解读[J]. 天然气工业, 2012, 32(4): 6-8.
- ZHANG Dawei. Important measures for promoting the shale gas exploration and development in China: An explanation of the Shale Gas Development Programming from 2011 to 2015[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(4): 6-8.
- [10] 刘德华, 肖佳林, 关富佳. 页岩气开发技术现状及研究方向[J]. 石油天然气学报: 江汉石油学院学报, 2011, 33(1): 119-123.
- LIU Dehua, XIAO Jialin, GUAN Fujia. The situation and research direction of technology of shale gas development [J]. Journal of Oil and Gas Technology; Journal of Jianghan Petroleum Institute, 2011, 33(1): 119-123.
- [11] 翟光明, 何文渊, 王世洪. 中国页岩气实现产业化发展需重视的几个问题[J]. 天然气工业, 2012, 32(2): 1-4.
- ZHAI Guangming, HE Wenyuan, WANG Shihong. A few issues to be highlighted in the industrialization of shale gas in China[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(2): 1-4.
- [12] 汪珺. 页岩气开发六制约待除[N]. 中国证券报, 2012-06-19(A11).
- WANG Jun. Six restrict of shale gas development [N]. China Securities Journal, 2012-06-19(A11).
- [13] 张财陆. 影响我国页岩气开发的因素简析[J]. 当代石油石化, 2012, 208(4): 17-19.
- ZHANG Cailu. A simple analysis of the factors influencing China's shale gas development [J]. Petroleum & Petrochemical Today, 2012, 208(4): 17-19.
- [14] U.S. Energy Information Administration. Annual Energy Outlook 2012 with Projections to 2035 [EB/OL]. [2012-06-30] (2012-12-01). <http://www.eia.gov/forecasts/arkive/2/aer/3/12/index.cfm> [4].

(收稿日期 2013-01-08 编辑 居维清)