

世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示

李世臻^{1,2}, 乔德武², 冯志刚², 刘丽君², 王 倩², 聂海宽¹

LI Shi-zhen^{1,2}, QIAO De-wu², FENG Zhi-gang², LIU Li-jun², WANG Qian², NIE Hai-kuan¹

1. 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083;

2. 国土资源部油气资源战略研究中心, 北京 100034

1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Strategic Research Center for Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources, Beijing 100034, China

摘要:页岩气是一种潜在资源量巨大的非常规天然气资源,具有开采技术要求高、开采寿命长、稳产周期长的特点。近些年来,严峻的能源紧张形势和能源价格的快速增长,使页岩气资源在全世界受到了广泛的重视。回顾了美国页岩气勘探开发的历史,总结了美国的页岩气发育情况,跟踪了世界其他地区(加拿大、欧洲)包括中国页岩气研究的最新进展情况。根据前人的资料,认为中国南方海相页岩和北方盆地的湖相页岩具有巨大的页岩气资源潜力。鉴于页岩气是一种非常规能源,对其研究具有重要的现实意义,建议中国相关部门加大研究投入力度,尽快开展页岩气资源战略调查和选区研究工作,加强技术攻关创新、引进和国际合作,探讨中国现实国情下的页岩气相关政策,以早日实现页岩气在中国的商业性开发,促进经济快速发展。

关键词:页岩气;现状;美国;加拿大;对中国的启示

中图分类号:P618.13

文献标志码:A

文章编号:1671-2552(2010)06-0918-07

LI S Z, Qiao D W, Feng Z G, Liu L J, Wang Q, Nie H K. The status of worldwide shale gas exploration and its suggestion for China. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(6):918-924

Abstract: Shale gas is a potentially huge amount of unconventional gas resources, with high exaction requirement, long development life and stable production cycle. In recent years, with severe energy shortage situation and energy prices, increasing shale gas has received more attention worldwide. The history of shale gas exploration and development, current production situation in America are reviewed. The latest research of shale gas in the rest of the world, including Canada, Europe and China is also studied. According to the existing research, it is predicted that the marine shale in Southern China and lacustrine shale in Northern China basins have huge shale gas resource potential. Because shale gas is unconventional resource and the research is of great significance, it is suggested that research efforts should be enhanced; strategic survey and optimization should be carried out as soon as possible; the technology transfer, research and international cooperation should be strengthened; related policies should be enacted in advance. All these measures are in order to realize shale gas commercial development in China and to promote economic development rapidly.

Key words: shale gas; status; America; Canada; suggestions for China

页岩是极细粒碎屑充填的沉积岩,岩石成分、结构、构造因地区和成因各不相同。传统观点认为,页岩是烃源岩或油气藏的盖层;近些年来,科研工作者通过应用研究和试验,认为页岩自身能形成复杂的页岩气藏。但长期以来,页岩气的商业勘探并未受到

重视。直到最近,尤其以近 10 年来世界的高油价和美国页岩气大规模开发并在天然气产量中所占比例迅速增长为标志,页岩气逐渐成为全球非常规油气研究的热点领域。

页岩气属于非常规天然气,现代概念被定义为:

收稿日期:2009-12-01;修订日期:2009-12-21

科技项目:国家油气专项《全国油气资源战略选区调查与评价》资助

作者简介:李世臻(1982-),男,硕士,从事石油地质、油气资源战略选区研究。E-mail:lishz2006@sina.com

主体上以吸附和游离状态同时赋存于具有生烃能力的泥岩、页岩等地层中的天然气,具有自生自储、吸附成藏、隐蔽聚集等特点^[1]。页岩气藏具有独立的油气系统,烃源岩、储集层、盖层都为其本身,生成后的运移也发生在页岩内部。地质、工程技术的进步,包括水平井技术、压裂技术、有效的完井技术,使低渗透率的含气页岩开发成为可能^[2]。页岩气的评价一般应包括以下内容:页岩的深度、厚度和边界,有机质类型和含量、有机质的热成熟度和吸附能力,成因类型(生物成因、热成因、混合成因)、数量、天然气成分(CH_4 、 CO_2 、 N_2),孔隙结构和分布,岩石矿物成分^[3]。

与常规天然气相比,页岩气开发虽然产能低,但具有开采寿命长和生产周期长的优点,大部分产气页岩由于分布范围广、厚度大,且普遍含气,页岩气资源量巨大,因而页岩气井能够长期地以稳定的速率产气,一般开采寿命为 30~50 年,美国地质调查局(USGS)2008 年最新数据显示, Fort Worth 盆地 Barnett 页岩气田开采寿命甚至能达 80 年。

随着世界能源消费的不断攀升,包括页岩气在内的非常规能源受到越来越多的重视。美国和加拿大已实现页岩气商业性开发,中国和其他国家也正在加紧相关的研究工作。

1 美国页岩气勘探开发

1.1 美国页岩气勘探开发简史

美国第一口页岩气井可追溯到 1821 年^[4],钻遇层位为泥盆系 Dunkirk 页岩,井深仅 8.2m,当时产出的气体用于纽约 Fredonia 地区附近村庄居民的照明。19 世纪 80 年代,美国东部地区的泥盆系页岩因临近天然气市场,在当时已经有相当大的产能规模。但此后产业一直不甚活跃^[5]。直到 20 世纪 70 年代末,因为国际市场的高油价和非常规油气概念的兴起,页岩气研究受到高度重视,当时主要是针对 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩的深入研究。早些时候, Mitchell 公司曾在该地区的浅层打井,泥浆录井显示了大量的天然气显示,但却产出了少量的气体,且产能下降很快,当时并没有多少经济效益,于是公司为了寻找新的储量,将注意力逐渐转移到较深层的 Barnett 页岩。Mitchell 能源公司于 1981 年在该地区完钻了第一口取心评价井^[6],大胆地对 Barnett 页岩段进行了氮气泡沫压裂改造,从而发现了 Barnett 页岩

气田。1986 年 Mitchell 公司完成了下 Barnett 组的地层剖面,并对其孔隙度、渗透率、有机质含量和裂缝方向进行了详细的研究。2001 年 Devon 能源公司并购了 Mitchell 能源公司^[7],成为该地区最大的公司作业者。

2000 年以来,页岩气勘探开发技术不断提高,并得到了广泛应用。同时加密的井网部署,使页岩气的采收率提高了 20%,年生产量迅速攀升^[8]。2000 年,美国页岩气年产量为 $122 \times 10^8 \text{m}^3$,生产井约有 28000 口^[9];2004 年美国页岩气年产量为 $200 \times 10^8 \text{m}^3$,约占天然气总产量的 4%;2006 年,美国有页岩气井 40000 余口,页岩气年生产量为 $311 \times 10^8 \text{m}^3$,占天然气总产量的 6%;2007 年美国页岩气生产井近 42000 口,页岩气年产量 $450 \times 10^8 \text{m}^3$,约占美国年天然气总产量的 9%。参与页岩气开发的石油企业从 2005 年的 23 家发展到 2007 年的 64 家。美国相关专家预测,2010 年美国页岩气产量将占天然气总产量的 13%^[10-13]。

1.2 美国页岩气的发育条件

页岩气商业性的开发主要是在美国。美国的页岩主要发育在 20 个州的 21 个大小不等的盆地里。根据最近的估算,美国页岩气资源量为 $42 \times 10^{12} \sim 52.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ (数据来自 IFP——法国石油研究院)。但目前商业性开采的页岩气主要产自 5 个盆地的页岩层,分别是 Fort Worth 盆地的 Barnett 页岩、San Juan 盆地的 Lewis 页岩、Michigan 盆地的 Antrim 页岩、Appalachian 盆地的 Ohio 页岩和 Illinois 盆地的 New Albany 页岩(表 1)。

Barnett 页岩是当前美国页岩气产出的主力层位^[15-16],据 USGS 最新的统计资料,Barnett 页岩资源量约 $0.74 \times 10^{12} \text{m}^3$,产量在 2005 年已经超过美国页岩气产量的一半^[9],现在所占比例更高。Barnett 页岩是下石炭统的一套黑色富有机质页岩,有些含钙质、磷质或白云石,沉积于富营养、较深水的内陆湖盆边缘环境^[17],有机碳含量高,厚度大,且具有较高的镜质体反射率^[18],生气类型主要属于热成因^[19]。Barnett 页岩主要分布在德克萨斯州中北部的 Fort Worth 盆地,在盆地的不同位置厚度不等,最厚可达 305m,整套页岩发育面积约有 5000km^2 ,主要被上覆灰岩所覆盖^[20]。Barnett 页岩现在的生产井已超过 8000 口,既有直井,也有水平井,日产量超过 $1.05 \times 10^8 \text{m}^3$,预计到 2014 年日产量将达到 $1.84 \times 10^8 \sim$

表 1 美国含气页岩的主要特征^[7,14]
Table 1 Main characteristics of shale gas in America

盆地	Fort Worth	San Juan	Michigan	Appalachian	Illinois
页岩名称	Barnett	Lewis	Antrim	Ohio	New Albany
时代	早石炭世	早白垩世	晚泥盆世	晚泥盆世	晚泥盆世
气体成因	热解气	热解气	生物气	热解气	热解气、生物气
埋藏深度/m	1981~2591	914~1829	183~730	610~1524	183~1494
厚度/m	61~152	152~579	49	91~610	31~140
干酪根类型	II	III为主, 少量II	I	II	II
有机碳含量/%	1.0~13.0	0.5~2.5	0.3~24.0	0.5~23.0	1.0~25.0
镜质体反射率	1.0~2.1	1.6~1.9	0.4~1.6	0.4~1.3	0.4~1.3
含气量/m ³ ·t ⁻¹	8.49~9.91	0.37~1.27	1.13~2.83	1.70~2.83	1.13~2.64
吸附气含量/%	40~60	60~80	70	50	40~60
甲烷含量/%	77~93			80~95	72~76
总孔隙度/%	1.0~6.0	0.5~5.5	2.0~10.0	2.0~11.0	5.0~15.0
渗透率/10 ⁻³ μm ²	0.01	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1
地层压力系数	0.99~1.02	0.46~0.58	0.81	0.35~0.92	0.99
压力梯度/kPa·m ⁻¹	12.21	4.97			4.84
资源量/10 ¹² m ³	0.74	2.8	0.3~0.6	6.4~7.1	0.05~0.55

2.75×10⁸m³。

2 其他国家和地区页岩气开发最新动向

2.1 加拿大

与美国相比,加拿大的页岩气商业开采还处于起步阶段,但与世界其他国家和地区相比,已步入了前列。尤其近两年,加拿大面对传统天然气开发利用的紧张局势,加大了对本国页岩气的研究投入和勘探开发力度。

加拿大页岩气资源分布广、层位多,预测页岩气资源量超过 42.5×10¹²m³[21]。主要的页岩气资源分布在不列颠哥伦比亚(British Columbia)、阿尔博塔(Alberta)和萨斯喀彻温(Saskatchewan)、南安大略(Ontario)、魁北克(Quebec)低地、滨海诸省(Mar-itimes)5 个地区(表 2)。其中,西部不列颠哥伦比亚地区的下白垩统、侏罗系、三叠系和泥盆系的页岩气资源量丰富。目前,已有多家油气生产商在加拿大西部地区进行页岩气开发试验,2007 年该地区页岩气产量约 8.5×10⁸m³[22]。

受美国页岩气大规模商业化开采的启发,加拿大地质学者和公司加拿大西部的沉积盆地进行了广泛研究[23~26]。当前,加拿大的页岩气开采热点地区为不列颠哥伦比亚的 Horn 河盆地泥盆系 Muskwa

组页岩和位于不列颠哥伦比亚与阿尔博塔交界地区的三叠系 Montney 地层。公司通过水平井和多级压裂对 2 个地区进行开采,目前均有超过 0.07×10⁸m³/d 的产气量。魁北克地区在 2008 年进行了试井测试,表现了良好的生产潜力,有望成为下一个开采热点地区。

2.2 欧洲

欧洲天然气大多从俄罗斯进口,并且市场价格昂贵,最近受美国页岩气勘探开发成功案例的启发,欧洲的许多国家开始着手页岩气的研究。希望通过欧洲大陆地质资料的收集和勘探,实现较大的勘探突破和发现页岩气。

2009 年初,“欧洲页岩项目”在德国国家地学实验室启动[27],这项跨学科工程由政府地质调查部门、咨询机构、研究所和高等院校的专家组成工作团队,通过 6 年时间共同推动完成。工作目标是通过收集欧洲各个地区的页岩样品、测井试井和地震资料数据,建立欧洲的黑色页岩数据库,与美国的含气页岩进行对比,分析盆地、有机质类型、岩石矿物学成分等内容,在此基础上寻找和发现页岩气以满足当地和区域的需求。目前,为此工作提供数据支持的有 Marathon、StatoilHydro、埃克森美孚、Gaz de France Suez、Vermillion、德国地学实验室等 13 家公司和机

表 2 加拿大页岩气主要产地及资源量(资料来源于 CSUG,2009,经整理)

Table 2 Main producing area of shale gas in Canada and their resource amounts

地区	盆地/地层	资源量/ 10^{12}m^3	生产情况
不列颠哥伦比亚 (British Columbia)	Horn 河盆地	14.16	商业开采中
	Cordova 湾	5.66	
	Montney 地层	11.33	商业开采中
阿尔博塔 (Alberta) 和萨斯喀彻温 (Saskatchewan) 平原	Colorado 组	8.50	
	Michigan 盆地	0.06	
南安大略 (Ontario)			
魁北克 (Quebec) 低地	Utica 和 Marcellus 页岩	1.13	试井阶段
滨海诸省 (Maritimes)	Windsor 盆地		试井阶段
	Frederick Brook 地层		试井阶段

注:CSUG 为加拿大非常规天然气协会

构,商业合作机构每年将以 160000 欧元的持续投入支持此计划。

研究人员认为,仅西欧潜在的页岩气资源量将有 $14.4\times 10^{12}\text{m}^3$ ^[29]。欧洲的沉积盆地主要发育热成因类型的页岩气,如北欧的寒武—奥陶系 Alum 页岩或德国的石炭系海相页岩。近年来,多个跨国公司开始在欧洲地区展开行动。2007 年 10 月,波兰能源公司被授权勘查波兰的志留系黑色页岩,壳牌公司声称对瑞典的 Skane 地区感兴趣。今年以来,埃克森美孚公司已在匈牙利 Makó 地区部署了第一口页岩气探井^[29],并计划今年在德国 Lower Saxony 盆地完成 10 口页岩气探井^[29]。Devon 能源公司与法国道达尔石油公司建立合作关系,获得在法国钻探的许可。康菲石油公司最近宣布,它已经与 BP(英国石油公司)的子公司签署了在波罗的海盆地寻找页岩的协议。

3 中国页岩气研究现状

3.1 页岩气研究在中国受到前所未有的重视

中国页岩气研究尚处于探索研究阶段,至今尚未进行商业性勘探开采。但国内石油、地质高校和石油企业研究机构的学者已做过相关研究。中国地质大学(北京)张金川教授在 2003、2004 年通过对美国页岩气的调研,研究了页岩气的特征和成藏机理^[1-31]。中国石油勘探开发研究院的学者对美国页岩气的情况进行了调研,并对中国的页岩气资源

前景进行了讨论^[32-34]。

2006 年年初,中国石油勘探开发研究院油气资源规划所组织专家在四川盆地西南地区进行了页岩气资源调查研究。2007 年 10 月,中国石油与美国新田石油公司签署了《威远地区页岩气联合研究》协议,研究内容是四川威远地区页岩气资源勘探开发前景综合评价,这是中国页岩气开发对外合作签署的第一个协议。2008 年 11 月,由中国石油勘探开发研究院设计实施的中国首口页岩气取心浅井在四川宜宾完钻,通过对此井的取心取样,以期对该地区页岩气前景进行判断。2009 年 5 月,中国页岩气技术国际研讨会在湖北召开,来自美国、挪威和中国该领域的专家、学者就页岩气开发的意义、中国页岩气资源分布特征及潜力分析、页岩气聚集带的筛选与评价标准、页岩气勘探的地化指标、地球物理方法探讨等专题进行了学术交流。2009 年 8 月,国土资源部在重庆市綦江县启动了中国首个页岩气资源勘查项目,2010 年 4 月,在重庆市永川区举办了页岩气战略调查培训班和页岩气资源战略调查、勘探开发学术研讨会,这标志着中国页岩气资源的勘探开发已提上日程。

在即将实施的《全国油气资源战略调查实施方案》中,页岩气已经被摆在了非常规油气调查的战略首选地位。工作目标为在今后 10 年内对中国的页岩气进行全面系统的调查和评价、技术创新攻关、优

选目标区和勘探基地、制定技术规范标准^[35],力争在2015年左右实现商业性的开发。

目前,中国已经进入页岩气研究的热点阶段。

3.2 中国页岩气的发育条件

到目前为止,尚无任何一家机构对中国的页岩气资源进行整体系统的调查评价。有些学者对中国部分地区的页岩估算后认为中国页岩气资源量巨大。张金川等^[36]通过各种方法的估算,认为中国主要盆地和地区的页岩气资源量约为 $(15\sim30)\times10^{12}\text{m}^3$ 。有国外专家估算,认为中国的页岩气地质资源量将达到 $100\times10^{12}\text{m}^3$ 。李建忠等^[32]通过对四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩气的研究,初步认为该地区的页岩气的资源量已经超过整个四川盆地的现有常规天然气资源量。

中国的页岩地层在各地质历史时期十分发育,既有有机质丰度达很好—极好标准的南方海相页岩地层,也有得天独厚的北方湖相页岩地层^[32]。因此,中国的页岩地层具有形成页岩气藏的基本地质条件。

在南方地区,主要有海相地层上震旦统(陡山沱组)、下寒武统、上奥陶统(五峰组)—下志留统(龙马溪组)、中泥盆统(罗富组)、下石炭统、下二叠统(栖霞组)、上二叠统(龙潭和大隆组)、下三叠统(青龙组)8套以黑色页岩为主体的烃源岩层^[36],具有分布面积广、埋藏深度浅、厚度大、有机质丰度高和成熟度高的特点,具备了优越的页岩气成藏地质条件。最近,部分学者对南方海相页岩气成藏的有利区带做了一些相关的研究工作。李建忠等^[32]认为,中国南方古生界盆地内部、向斜区、隆起的低部位等有利于页岩气藏的形成与富集。聂海宽等^[14]运用类比参数模型,预测中国南方古生界海相页岩层中的寒武系和志留系是页岩气发育的最有利层系。寒武系页岩气藏发育最有利区位于四川盆地和米仓山—大巴山前陆,以及渝东、黔北、湘西—江南隆起北缘一线;志留系页岩气藏发育最有利区位于上杨子的四川盆地、米仓山—大巴山前陆、渝东—鄂西一带、中扬子鄂北、下扬子苏南等地。南方海相页岩气藏的勘探开发层系多、分布范围广、资源量丰富,有望成为中国页岩气勘探开发的热点领域。

在中国北方地区,中、新生代发育众多陆相湖盆,为泥页岩地层的广泛发育创造了条件。东北地区松辽盆地发育的下白垩统青山口组黑色泥岩^[37]、华

北地区渤海湾盆地发育的古近系沙河街组沙三上亚段和沙四下亚段泥页岩^[38]、鄂尔多斯盆地发育的上三叠统延长组页岩^[39]、西北地区吐哈盆地吐鲁番坳陷发育的水西沟群地层暗色泥岩和炭质泥页岩。

在原来的常规油气勘探中,上述多数地区已被勘探实践证实为优质烃源岩,有些页岩在油田的形成中起到了最根本的作用。积累的这些数据资料和以往的勘探经历将为中国页岩气的调查和评价指明方向。

4 启示

4.1 页岩气研究具有重大的现实意义

中国页岩气资源量巨大,但对页岩气的研究还处于起步阶段,加强页岩气的研究对中国具有重大的现实意义。作为非常规能源,页岩气是能源资源的重要补充,大规模的开发一旦实现,将在保障中国能源安全、降低对外依存度方面起到积极作用;作为新类型能源,页岩气在中国的研究程度还很低,通过研究可摸清中国各地区特有的页岩气地质条件和规律、提高地质理论认识水平、推动关键技术进步、培养该领域的创新性人才;作为商业性能源,页岩气的勘探开发必将拉动整个行业及相关产业的发展、增加就业机会、促进当地经济快速发展。加大页岩气研究力度势在必行,可以预言,开展页岩气研究必将为中国带来重要的经济效益和社会效益。

4.2 页岩气资源战略调查和选区急需开展

中国对页岩气的高度关注是近几年的事,目前对中国的页岩气资源的认识程度还远远不够,有利勘探开发区域和层系尚不明晰。这一基础性、公益性、前瞻性的工作急需由政府部门牵头,整合优势力量,政、企、学、研密切结合,以提高对页岩气资源潜力的正确认识。应通过开展页岩气资源的战略调查和资源评价工作,查清中国的页岩气资源状况,建立中国页岩气调查与选区的技术标准,在此基础上评价优选勘探开发有利目标区和富集区,使中国的页岩气尽快实现商业性开发,以缓解天然气供需的紧张局面,促进地方经济快速发展。

4.3 技术攻关创新、引进和国际合作需加强

先进的技术和方法是页岩气勘探和开发的最可靠的途径。美国页岩气成功开发的关键原因之一就在于水平井技术、多段压裂技术、水力压裂技术、微地震技术、地震储层预测技术、有效的完井技术等一

系列技术的成功应用。2009年11月,美国总统奥巴马访问中国期间,作为《中美联合声明》关于推进清洁能源合作的内容,中美双方签署了《中美关于在页岩气领域开展合作的谅解备忘录》,为中国在页岩气资源评价、技术创新、政策管理等方面与美国的交流合作打下了良好的基础。另外,许多跨国石油公司和技术服务公司拥有先进的技术和成功的经验,可以采取与其合作的方式推动中国页岩气的研究进度。

4.4 现实国情下的页岩气开发政策及

相关问题仍需探讨

加强页岩气研究的最根本目的是用最低的开发成本为中国当前和未来社会最大程度地开采和获取能源资源。页岩气为新型能源资源,有关的各项政策法规目前在中国还未建立。美国的页岩气研究经历了起步、振兴、缓慢发展、大规模商业开采等几个阶段。20世纪70年代末,美国政府出台了《能源意外获利法》,其中第29条规定了非常规能源开发税收补贴政策,后来又被取消^[40];2005年在美国有超过100家的公司和个体经营者具有Newark East页岩气田(Barnett页岩)的探矿权,作业生产公司超过60家^[7],该地区的页岩气生产一片繁荣。对Barnett页岩开采地区的研究表明,钻井和压裂需要大量的水资源,2000年在Barnett页岩中开采页岩气需 $86.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 的地表水和地下水,2007年这一用量增长了10倍多,约60%~80%的水会返回地面,其中含有大量的化学物质或放射性元素,会造成水污染^[41]。美国近200年的技术研究和管理的成功经验值得我们学习,同样其失败和教训也值得我们吸取。中国的政策制定者尤其要保持理性,要根据中国的国情深入研究和探讨包括矿业权、页岩气价格、税收、专项研究基金、市场准入资格、环境等方面的各项政策,未雨绸缪,建立健全法律法规,引导和推动页岩气产业健康发展。

致谢:在论文的完成过程中,中国地质大学(北京)张金川教授提供了许多建设性的意见和建议,给予笔者许多启发和灵感,在此表示衷心的感谢。

参考文献

- [1]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.
- [2]Joseph H, Frantz Jr, Valerie Jochen. Gas shale White paper [R]. Schlumberger Marketing Communications, 2005:1-9.
- [3]Cardott B J. Gas shales tricky to understand[J]. AAPG explorer, 2006, 26(11):48.
- [4]Curtis J B. Fractured shale-gas systems[J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11):1921-1938.
- [5]Bustin R M. Gas Shale Tapped for Big Pay[J]. AAPG explorer, 2005, 26(2):28,30.
- [6]Shirley K. Barnett Shale Living Up to Potential[J]. AAPG explorer, 2002, 23(7):19,27.
- [7]Bustin R M. Barnett Shale Play Going Strong[J]. AAPG explorer, 2005, 26(5):4,6.
- [8]National Petroleum Council. Unconventional Gas[R]. 2007:16-20.
- [9]Hill D G, Nelson C R. Gas productive fractured shales—an overview and update[J]. Gas TIPS, 2000, 6(2):4-13.
- [10]Kuuskraa V A. Unconventional Natural Gas, Industry Savior or Bridge? [C]//Washington D C: EIA Energy Outlook and Modeling Conference, 2006.
- [11]McCallister T. Unconventional Gas Production Projections in the Annual energy Outlook 2006: An Overview [C]//Washington D C: EIA Energy Outlook and Modeling Conference, 2006.
- [12]Shirley K. Shale Gas Exciting Again[J]. AAPG explorer, 2001, 22(3):24-25.
- [13]Pollastro R M. Total petroleum system assessment of undiscovered resources in the giant Barnett Shale continuous (unconventional) gas accumulation, Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):551-578.
- [14]聂海宽,唐玄,边瑞康.页岩气成藏控制因素及中国南方页岩气发育有利区预测[J].石油学报,2009,30(4):484-491.
- [15]Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential[J]. AAPG Bulletin, 2005, 89(2):155-175.
- [16]Bowker K A. Barnett Shale gas production, Fort Worth Basin: Issues and discussion[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):523-533.
- [17]Loucks R G, Ruppel S C. Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):579-601.
- [18]Montgomery S L, Jarvie D M, Bowker K A, et al. Mississippian Barnett Shale, Fort Worth basin, north-central Texas: Gas-shale play with multi-trillion cubic foot potential: Reply [J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(6):967-969.
- [19]Daniel M Jarvie, Ronald J Hill, Tim E Ruble, et al. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment[J]. AAPG Bulletin, 2007, 91(4):475-499.
- [20]Broadhead R F, Gillard L. The Barnett Shale in southeastern New Mexico: Distribution, thickness, and source rock characterization[R]. 2007:1-56.
- [21]Dawson F M. Shale Gas Resources of Canada: Opportunities and Challenges[R]. Canadian Society for Unconventional Gas Technical Luncheon, 2008.
- [22]闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气

- 资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [23]Ross D J K, Bustin R M. Shale gas potential of the Lower Jurassic Gordondale Member, northeastern British Columbia, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2007,55(1):51-75.
- [24]Chalmers G R L, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part I: geological controls on methane sorption capacity[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56 (1):1-21.
- [25]Ross D J K, Bustin R M. Characterizing the shale gas resource potential of Devonian-Mississippian strata in the Western Canada sedimentary basin: Application of an integrated formation evaluation[J]. AAPG Bulletin, 2008, 92(1): 87-125.
- [26]Chalmers G R L, Bustin R M. Lower Cretaceous gas shales in northeastern British Columbia, Part II: evaluation of regional potential gas resources[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2008, 56(1):22-26.
- [27]Milan K. Database Gathers Europe Shale Data[J]. AAPG explorer, 2009,30(11):10.
- [28]Schulz Hans Martin, Horsfield Brian. Shale gas in Europe—overview, potential and research[C]//AAPG Annual Convention and Exhibition, Colorado, 2009.
- [29]Jack Z Smith. Barnett Shale seen as model for drillers worldwide. Fort Worth Star-Telegram[EB/OL](2009-12-09): <http://www.isstockanalyst.com/article/viewiStockNews/articleid/3514962>.
- [30]Russell Gold. Exxon shale-gas find looks big. Wall Street Journal[EB/OL](2009-12-09)<http://online.wsj.com/article/SB124716768350519225.html>.
- [31]张金川,金之钧,袁明生.页岩气成藏机理和分布[J].天然气工业,2004,24(7):15-18.
- [32]李建忠,董大忠,陈更生,等.中国页岩气资源前景与战略地位[J].天然气工业,2009,29(5):11-16.
- [33]王社教,王兰生,黄金亮,等.上扬子区志留系页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):45-50.
- [34]李登华,李建忠,王社教,等.页岩气藏形成条件分析[J].天然气工业,2009,29(5):22-26.
- [35]国土资源部.全国油气资源战略调查实施方案[R].2009:59-69.
- [36]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.
- [37]侯读杰,冯子辉,黄清华.松辽盆地白垩纪缺氧地质事件的地质地球化学特征[J].现代地质,2003,17(3):311-317.
- [38]张林晔,李政,朱日房,等.济阳坳陷古近系存在页岩气资源的可能性[J].天然气工业,2008,28(12):26-29.
- [39]徐士林,包书景.鄂尔多斯盆地三叠系延长组页岩气形成条件及有利发育区预测[J].天然气地球科学,2009,20(3):460-465.
- [40]闫存章,黄玉珍,葛春梅,等.页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源[J].天然气工业,2009,29(5):1-6.
- [41]Andrews A, Folger P, Humphries M, et al. Unconventional Gas Shales: Development, Technology, and Policy Issues[R]. 2009:1-47.