

文章编号: 1673-064X(2011)02-0001-07

由北美页岩气勘探开发看我国页岩气选区评价

赵靖舟^{1,2}, 方朝强¹, 张洁¹, 王力¹, 张新新¹

(1. 西安石油大学 油气资源学院, 陕西 西安 710065;

2. 西安石油大学 陕西省油气成藏地质学重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 美国是世界上最早对页岩气进行商业性勘探开发的国家. 2009 年, 美国页岩气勘探开发更是取得了惊人成就, 页岩气产量接近 $900 \times 10^8 \text{ m}^3$. 页岩气快速勘探开发使得美国天然气储量增加了 40%. 加拿大是继美国之后世界上第二个对页岩气投入勘探开发的国家, 勘探开发的地区主要集中在不列颠哥伦比亚省东北部中泥盆统 Horn River 盆地与三叠纪 Montney 页岩, 近年来又逐渐扩展到了其他省份. 分析北美地区页岩气勘探开发特点与成功经验, 对比我国页岩气形成的地质条件, 可以得出以下几点启示: (1) 页岩气是一种潜力巨大、近期可实现经济勘探开发的现实资源, 应引起勘探开发决策的高度重视; (2) 页岩气是一种广分布、低丰度、易发现、难开采的自生自储连续型非常规低效气藏, 其勘探开发需要先进的技术、严格的成本控制、优惠的税收扶持政策以及考虑必要的环境保护; (3) 我国页岩气形成的地质背景比北美地区复杂, 页岩气的选区评价需要建立适合我国页岩气形成地质条件特点的标准.

关键词: 页岩气; 勘探开发; 评价; 北美; 中国

中图分类号: TE122.1⁺16 **文献标识码:** A

1 北美页岩气勘探开发历史与研究现状

目前, 世界上页岩气勘探开发时间最长、程度最高、研究工作开展最多的国家为美国, 其次为加拿大, 其他国家页岩气的勘探开发和研究普遍还处于刚起步阶段. 因此, 了解北美地区特别是美国页岩气的勘探开发和研究现状, 对于我国页岩气勘探开发与研究工作具有重要借鉴意义.

1.1 美国

美国是世界上最早从事页岩气勘探开发的国家. 尽管页岩气引起广泛关注只是在最近几年, 但早在 19 世纪晚期已在美国阿帕拉契亚山区开始生

产^[1]. 1821 年, 在纽约州 Fredonia 附近泥盆纪富含有机质的 Dunkirk 页岩完钻的页岩气井是美国第一口商业生产的页岩气井^[2], 比 Drake 上校在宾夕法尼亚州所钻的著名的油井早了将近 40 年. 1859 年 Drake 油井之后, 因常规天然气储层产出了更多量的天然气, 页岩气的生产不再受到关注. 尽管如此, 1926 年, 阿帕拉契亚盆地泥盆纪页岩气已投入商业性开发, 并且成为当时最大的气田. 但美国页岩气广泛的商业性开采直到 1980 年实施了非常规燃料税收优惠政策以后, 特别是 1981 年 Mitchell 能源公司在得克萨斯州北部 Fort Worth 盆地 Barnett 页岩钻探了第一口页岩气井后, 页岩气的商业性开采才再一次引起了人们的兴趣. 然而, 由于技术等原因, 1989 年美国仅产页岩气 $42 \times 10^8 \text{ m}^3$; 1998 年, 美国

收稿日期: 2010-12-30

基金项目: 国家科技重大专项课题“鄂尔多斯盆地大型天然气田富集规律、目标评价与勘探配套技术”(编号: 2008ZX05007-005)

作者简介: 赵靖舟(1962-), 教授, 主要从事油气成藏地质学、非常规天然气地质与勘探研究. E-mail: jzzhao@xsyu.edu.cn

页岩气产量达到 $85 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占其天然气产量的 1.6%; 页岩气储量 $1\,104 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国天然气探明总储量的 2.3%。到了 1999 年, 美国页岩气产量突破百亿方, 达到 $108 \times 10^8 \text{ m}^3$ [3]。

2000 年以来, 由于高气价、页岩储层描述以及钻井完井技术的进步, 页岩气成了有经济价值的勘探开采对象 [4]。到 2005 年, 美国有页岩气井 14 990 口, 页岩气产量达到 $198 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2006 年, 美国页岩气井增至 40 000 余口, 页岩气产量达到 $311 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占全国天然气总产量的 5.9%。2007 年, 美国页岩气产量接近 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占其干气总产量 ($5\,519 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 6%, 其中 Barnett/Newark East 气田和 Antrim 气田的产量分列美国第 2 和第 3 位。2008 年, 美国页岩气产量达到 $572 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比上年增长了 71%, 页岩气产量占到美国干气总产量 ($5\,800 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 10%。其中 70% 的页岩气产量来自德克萨斯州的 Barnett 页岩。

由于页岩气产量的快速增长, 在过去的 10 多年中, 美国非常规天然气的产量增加了 65%, 由 1998 年 $1\,528 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至 2007 年的 $2\,519 \times 10^8 \text{ m}^3$, 非常规天然气产量占美国天然气总产量的比例已由 1998 年的 28% 上升到 2008 年的 46% [5]。由图 1 可以看出, 尽管在过去 10 多年中, 煤层气特别是致密砂岩气一直是美国非常规天然气产量的主要部分, 但页岩气的产量增加很快。

2009 年, 美国页岩气勘探开发更是取得了惊人的发展速度, 页岩气生产井增至 98 590 口, 产量达 $878 \times 10^8 \text{ m}^3$ [6], 超过我国常规天然气的年产量。其中, 仅 Barnett 页岩的产量就达到了 $560 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。页岩

气快速勘探使得美国天然气储量增加了 40%。预计 2010 年页岩气产量将占全美天然气产量的 15% 以上。

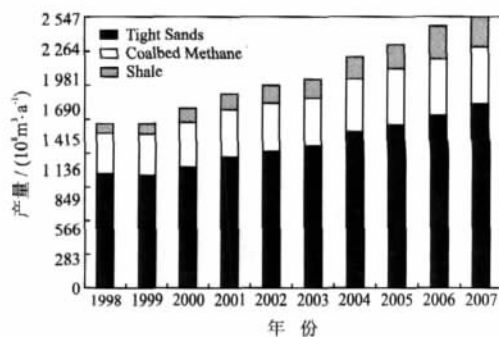


图1 美国非常规天然气产量(据 NCI, 2008) [5]
Fig.1 The yield of non-conventional natural gas of U. S.

据美国能源信息署 EIA [7] 预测, 到 2030 年, 非常规天然气在美国天然气总产量中的比例将由 2007 年的 47% 增加至 56%, 其中致密砂岩气是非常规天然气产量的最主要部分, 将占到 2030 年美国天然气总产量的 30%, 而页岩气产量增长最快; 由于页岩气探明可采储量达 $7.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 预计美国页岩气的产量将会由 2007 年的约 $340 \times 10^8 \text{ m}^3$ 升至 2030 年的 $1\,189 \times 10^8 \text{ m}^3$, 届时页岩气产量将占美国天然气总产量的 18%。按照 EIA [8] 预测, 到 2035 年, 美国国内天然气总产量将由 2008 年的 $5\,830 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增至 $6\,590 \times 10^8 \text{ m}^3$; 随着技术进步, 预计 2035 年页岩气的产量将接近 $1\,700 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占届时美国天然气总消费量的 24% (图 2)。然而, 根据高级资源国际(ARI)的预测, 随着 Haynesville 和 Marcellus 页岩气开发的快速发展, 美国页岩气产量预计到 2020 年就将达到 $2\,066 \times 10^8 \text{ m}^3$ [6]。

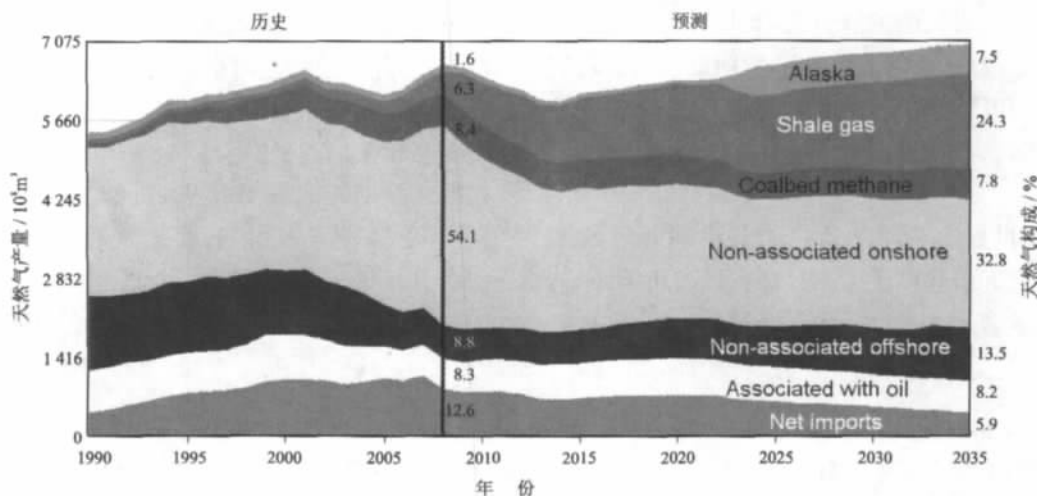


图2 美国天然气产量组成变化及预测(据 EIA, 2010) [8]

Fig.2 The variation and prediction of the composition of the natural gas yields in U. S.

自 2000 年以来特别是近几年美国页岩气的开发在经济上取得的巨大成功,已经导致页岩气的勘探开发在加拿大得到快速发展,并激发了欧洲、亚洲和澳洲勘探开发页岩气的极大兴趣。目前,除美国和加拿大外,澳大利亚、德国、法国、瑞典、波兰以及我国等多个国家已开始了对页岩气的研究和勘探开发。

1.2 加拿大

加拿大是继美国之后世界上第二个对页岩气进行勘探开发的国家,源自页岩的天然气生产也已有数十年的历史。早期的页岩气生产来自阿尔伯达省东南部和萨斯喀彻温省西南部白垩系科罗拉多群的 Second White Speckled Shale^[1]。但 2000—2001 年才在不列颠哥伦比亚省(BC 省)三叠系的 Upper Montney 页岩开始商业性的页岩气生产^[5],2005 年产量仅约 $73.58 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (相当于年产 $2.7 \times 10^8 \text{ m}^3$),而 2007 年超过 $226.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (相当于年产 $8.3 \times 10^8 \text{ m}^3$)。近年来,加拿大页岩气勘探开发的兴趣大大增强,勘探开发的地区主要集中在 BC 省东北部的中泥盆统 Horn River 盆地与三叠纪 Montney 页岩。随着新技术的应用,许多公司对页岩气勘探开发的兴趣除阿尔伯达省和 BC 省外,还扩展到了萨斯喀彻温省、安大略省、魁北克省、新布列斯威克省以及新斯科舍省。2009 年,加拿大页岩气产量(仅限于 Montney 和 Horn River)达到 $1\,981 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[6],相当于年产 $72.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中 Montney 页岩气产量为 $1\,698 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,相当于年产 $62 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

然而,与美国页岩气勘探开发情况相比,加拿大页岩气的勘探开发目前尚处于初期阶段。按照加拿大非常规天然气协会(CSUG)主席 Michael Dawson 在 2009 年 9 月一次报告的观点,加拿大的页岩气区带中只有 Montney 达到了他所称的商业开发阶段, Horn River 盆地则部分处于先导生产试验阶段,部分还处于先导勘探阶段;魁北克低地、新布列斯威克省以及新斯科舍省的页岩则还处于他所称的早期评价阶段^[9]。而美国处于商业开发阶段的页岩气区带有 Marcellus、Barnett、Haynesville、Fayetteville 和 Woodford 页岩。

据预测,到 2020 年,加拿大页岩气的产量将达到 $0.48 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{d}$ (相当于年产 $176 \times 10^8 \text{ m}^3$),届时非常规天然气将占到加拿大天然气产量的 50%^[10]。而据高级资源国际(ARI)预测,在潜力巨大的 Horn River 页岩气带动下,加拿大页岩气产量

预计到 2020 年将超过 $620 \times 10^8 \text{ m}^3$ ^[6]。

在页岩气产量大幅度增加的带动下,非常规天然气产量在北美(美国和加拿大)天然气产量中所占的比例迅速上升,由 2000 年的 30% 预计上升到 2020 年的 53%^[11]。

2 页岩气资源潜力

2.1 世界页岩气资源潜力

按照国际能源机构^[7]发表的《2009 年世界能源展望》,截止 2008 年底,全球天然气探明储量超过 $180 \times 10^{12} \text{ m}^3$,以目前的产量可以生产约 60 a。其中半数以上的探明储量位于 3 个国家:俄罗斯、伊朗、卡塔尔。预计剩余天然气可采资源量更大,估计全球天然气长远可采资源量在 $850 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上(仅包括目前已证实进行商业生产的那些资源种类),其中非常规天然气资源(主要是煤层气、致密砂岩气和页岩气)约占 45%。

近些年的研究表明,在目前可开采的非常规天然气资源中,页岩气的资源尤为丰富。据 Rogner^[12]估计,世界页岩气原地资源量为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。按照 IEA《2009 年世界能源展望》^[13],Rogner 估计的原地资源量中有约 40% 会成为可采量,即世界页岩气可采资源量为 $180 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。按 2008 年世界天然气产量计算,仅全球页岩气资源就可以生产 60 a。

然而,根据北美和欧洲的经验,Rogner^[12]对全球页岩气资源量的估计可能将会被证明是保守的。

以北美(美国和加拿大)为例,Rogner^[12]估计北美页岩气原地资源量为 $109 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。但 Tristone Capital 2008 年对美国 Barnett、Deep Bossier、Haynesville、Fayetteville、Woodford 和 Marcellus 与加拿大 Montney、Horn River(Muskwa)、Utica Gothic 等 9 个页岩气区带的评价认为,如果不考虑风险因素,仅这 9 个区带的可采资源潜力就达到 $21 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[14]。最近,高级资源国际^[15]对北美“7 大”页岩气盆地(Barnett, Fayetteville, Woodford, Marcellus, Haynesville, Montney 与 Horn River)进行了盆地一级的资源评价,结果得到其原地页岩气资源量高达 $145 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中可采资源量估计为 $20 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 1)。这一结果大大超出了 Rogner^[12]对北美页岩气总资源量的估计。

2.2 美国页岩气资源潜力

美国的页岩气资源十分丰富,但对其规模的评价尚无定论。

表 1 北美页岩气资源潜力
Tab.1 The potential of shale gas in North America

年	评价范围	原地资源量 /10 ¹² m ³	可采资源量 /10 ¹² m ³	来源
1997	美国和加拿大	109		Rogner ^[12]
2008	美国和加拿大		14.6	ICF ^[16]
2008	美、加 9 个区带 ^①		21	Tristone Capital (据 Anonymous, 2008) ^[14]
2009	北美“7 大” 页岩气盆地 ^②	145	20	ARI ^[15]

①9 个页岩气区带指美国的 Barnett、Deep Bossier、Haynesville、Fayetteville、Woodford 和 Marcellus 与加拿大的 Montney、Horn River (Muskwa)、Utica Gothic。

②北美 7 大“页岩气盆地”指美国的 Barnett、Fayetteville、Woodford、Marcellus、Haynesville 与加拿大的 Montney 和 Horn River。

ICF^[16] 在为美国州际天然气协会(INGAA)准备的报告《北美非常规天然气供给的来源、经济和生产潜力》中指出,美国和加拿大剩余可采天然气资源总量为 $66.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$,包括美国 $51.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$,加拿大 $14.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中页岩气可采资源量为 $14.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,包括美国本土 48 个州 $10.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$,加拿大 $3.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

而据潜在天然气委员会(PGC)^[17]对美国天然气资源两年一度评价的最新结果,截止 2008 年底,美国天然气潜在资源总量为 $52.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较该委

员会 2006 年的评价结果 $37.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加了 39.0%。其中传统天然气资源量为 $47.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较 2006 年评价结果 $32.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加了 44.9%;煤层气资源量 $4.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较 2006 年评价结果 $4.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 减少了 $0.09 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (1.9%)。该结果加上美国能源部最新确认的 2007 年底天然气的探明储量 $6.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,美国拥有的未来天然气总供给量达到 $58.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较 2006 年的评价结果 $43.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加了 $15.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (35.4%)。这是该委员会 44 年评价历史上最高的资源评价结果,其中大多数增加来自对阿帕拉契亚盆地、中部大陆区、海湾沿岸区以及落基山地区页岩气的重新评价。重新评价结果,美国页岩气资源量为 $17.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占其天然气总潜在资源量 33% 和未来天然气总供给量的约 30%。这一结果较该委员会 2006 年页岩气资源评价结果增加了 370%。

根据加拿大非常规天然气协会(CSUG)主席 Michael Dawson 在 2009 年 9 月 NBF 能源会议上的报告,美国东部 7 个主要页岩气区带(Antrim, Barnett, Fayetteville, Haynesville/Bossier, Marcellus, New Albany, Woodford)的页岩气原地资源量为 $81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (图 3)。

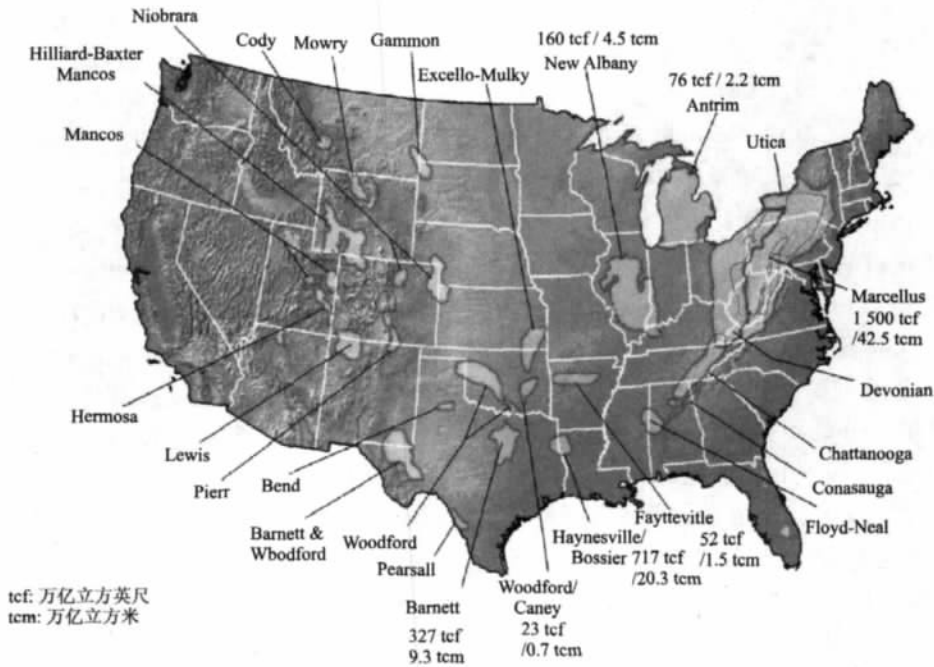


图 3 美国页岩气资源分布图(据 DOE, April 2009, 引自 Dawson, 2009)^[20]
Fig.3 The distribution of shale gas in U. S.

最近,高级资源国际^[15]对美国 5 个页岩气盆地 (Barnett, Fayetteville, Woodford, Marcellus, Haynes-

ville) 的评价认为,其原地资源量达 $106 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $13 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中 Marcellus 页岩气资源量

达 $59 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 可采资源量 $5.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

另据 NCI^[5] 对各页岩气区带“报道”的最大资源量的整理结果, 美国页岩气原地资源量“报道”的最大值达 $106.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 技术可采资源量“报道”的最大值为 $23.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

可见, 美国页岩气原地资源量(OGIP) 在 $85 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上^[18]. 但可采资源量的估计却变化较大, 由 $7.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 到 $23.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 不等. 其中 PGC^[17] 的估计为 $17.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 2).

表 2 美国页岩气资源潜力
Tab. 2 The potential of shale gas in U. S.

年份	评价范围	原地资源量 / 10^{12} m^3	可采资源量 / 10^{12} m^3	来源
2005	美国	14.0 ~ 17.0		Bustin ^[19]
2008	美国		7.8	NCI ^[5]
2008	美国	106.5	23.8	据 NCI ^[5] 整理
2008	美国本土 48 州		10.9	ICF ^[16]
2008	美国		17.4	PGC ^[17]
2009	美国		7.6	EIA ^[15]
2009	美国本土 48 州		22.6	Brathwaite ^[18]
2009	美东 7 个区带 ^①	81.0		Dawson ^[20]
2009	美国		21.0	[21]
2009	美国 5 个页岩气盆地 ^②	106.0	13.0	ARI ^[15]
2009	美国	>85.0		Brathwaite ^[18]

① 美国东部 7 个主要页岩气区带指 Antrim, Barnett, Fayetteville, Haynesville/Bossier, Marcellus, New Albany, Woodford.

② 美国 5 个页岩气盆地指 Barnett, Fayetteville, Woodford, Marcellus, Haynesville.

就探明储量而言, 据 EIA 资料^[22], 2007 年美国剩余页岩气探明储量为 $6140 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占当年美国干气总储量 $6.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的 9.1%. 这比 2006 年的页岩气探明储量增加了 50%^[23]. 截止 2008 年底, 美国页岩气探明储量为 $9280 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比 2007 年增加了 51%, 占美国干气探明总储量 $6.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的 13.4%; 而煤层气探明储量 $5890 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国干气探明储量的 8.5%. 2008 年页岩气资源前 3 位分别是 Barnett 页岩 ($404 \times 10^8 \text{ m}^3$), Fayetteville 页岩 ($79 \times 10^8 \text{ m}^3$), Antrim 页岩 ($33 \times 10^8 \text{ m}^3$)^[24].

美国页岩气储量的快速增长使得一些人建议用低碳排放的天然气发电厂取代煤发电厂. 白宫新闻秘书办公室 2009 年 11 月 17 日在《美国 - 中国页岩气资源合作倡议》中指出“预期页岩气的开发将会大幅度提高美国的能源安全, 并有助于减少温室气体污染”.

2.3 加拿大页岩气资源潜力

加拿大的页岩气资源亦很丰富, 且主要分布于 5 个盆地: BC 省东北部中泥盆统的 Horn River 盆地和三叠系 Montney 页岩、阿尔伯达省与萨斯喀彻温省的白垩系 Colorado 群、魁北克省的奥陶系 Utica 页岩、新布列斯威克省与新斯科舍省的石炭系 Horton Bluff 页岩(图 4). 但其资源量目前同样没有比较一致的估计.

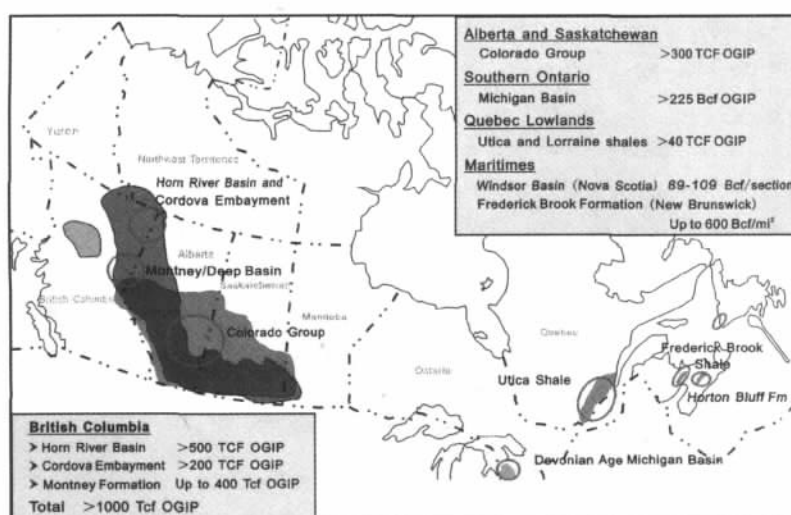


图 4 加拿大页岩气资源分布图(据 Dawson, 2009)^[20]

Fig. 4 The distribution of shale gas in Canada

据 Bustin^[18] 估计, 加拿大页岩气资源量大于 $28.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$.

B. Faraj 在 2005 年加拿大研究所首届页岩气年会上指出, 西加拿大盆地的页岩气资源量大于 $283 \times$

10^{12} m^3 ^[25].

Oilweek 则估计西加拿大盆地(不列颠哥伦比亚、阿尔伯达、萨斯喀彻温)的页岩气资源量在 $849 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 左右^[22]. 这是目前对西加拿大盆地页岩

岩气资源估计的最大数值,也大大超出了一般对整个加拿大页岩气资源量的估计值。

据加拿大能源理事会资料^[1],加拿大页岩气原地资源潜力估计约 $30 \times 10^{12} \text{ m}^3$,但该估计的准确性存在很大的不确定性.其中有多少可以采出尚有待验证,最初估计的采收率在 20% 左右。

根据加拿大非常规天然气协会(CSUG)最新资源评价结果,加拿大页岩气的原地资源量(GIP)估计大于 $42.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[20],远大于其常规天然气资源 $11.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (包括已发现和未发现的常规天然气资源 $10.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,加上已探明的 $1.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 常规天然气储量).而且,页岩气资源也远远超过其煤层气原地资源量 $14.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以及不低于 $8.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 致密砂岩气的原地资源量.其中 BC 省资源量最大,达 $28.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上(表 3)。

表 3 加拿大页岩气资源潜力
Tab. 3 The potential of shale gas in Canada

年	评价范围	原地资源量 / 10^{12} m^3	可采资源量 / 10^{12} m^3	来源
2002	西加拿大盆地 5 套页岩 ^①	2.4		GTI ^[26]
2005	加拿大	>28.3		Bustin ^[18]
2005	西加拿大盆地	>283		Faraj ^[25]
2006	西加拿大盆地	~850		Oilweek ^[21]
2008	加拿大		3.7	ICF ^[16]
2008	加拿大	>42.5		Dawson ^[20]
2009	加拿大	~30		NEB ^[1]
2009	加拿大 2 个 页岩气盆地 ^②	39	7	ARI ^[15]

①西加拿大盆地 5 套页岩指 Wilrich (K₂)、Duvernay (D)、Montney (T)、Doig (T) 及 Doig Phosphate (T)。

②加拿大 2 个页岩气盆地指 Montney 与 Horn River。

最近,高级资源国际(ARI,2009)^[6]对加拿大 2 个页岩气盆地(Montney 与 Horn River)评价得出,两盆地页岩气的原地资源量为 $39 \times 10^{12} \text{ m}^3$,可采资源量 $7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

按照上述估计,加拿大的页岩气原地资源量估计有可能超过 $57 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

3 北美页岩气勘探开发对我国的启示

通过对北美页岩气勘探开发及资源潜力的调研以及我国页岩气形成条件的对比分析,可以得出以下几点启示:

(1) 页岩气是一种潜力巨大、近期可实现经济勘探开发的现实资源,应引起勘探开发决策的高度重视。

资源评价研究表明,页岩气是地球上一种十分

丰富的天然气资源,也是世界上潜力最大的剩余天然气资源之一.根据 Rogner^[12]估计,全球页岩气原地资源量为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全球非常规气(煤层气、致密砂岩气、页岩气)总资源量的近 50%.其中可采资源量若按 40%,即 $180 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 计,则页岩气可采资源量占全球天然气长远可采资源量($850 \times 10^{12} \text{ m}^3$)的 20% 以上.我国是世界上页岩气资源最丰富的国家之一.根据 Rogner^[12]估计,我国和中亚地区页岩气原地资源量约为 $100 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占全球的 22%,是仅次于北美地区的世界第二大页岩气资源大区.张金川等^[27]曾对我国页岩气资源潜力进行了估算,认为我国主要盆地和地区的页岩气资源总量约为 $(15 \sim 30) \times 10^{12} \text{ m}^3$,中值为 $23.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$.进一步研究认为,我国页岩气可采资源量约为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ^[27],这比美国页岩气的可采资源量还要大.其中,四川盆地页岩气资源较丰富,其西南部地区下寒武统筇竹寺组页岩气资源量在 $(4.13 \sim 8.48) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 之间^[28].而李建忠等^[29]研究认为,四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩气资源量在 $(7.14 \sim 14.6) \times 10^{12} \text{ m}^3$ 之间,比整个四川盆地现有常规天然气资源量($7.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$)还要大。

我国含油气盆地富有机质页岩在许多方面与北美地区具有一定的可比性,表明我国页岩气同样具有很大的勘探开发潜力.另一方面,北美特别是美国页岩气的发展表明,页岩气又是近期即可实现经济勘探开发的一种现实资源,且已在北美地区形成较成熟的评价方法和勘探开发技术,可供我国页岩气研究和勘探开发借鉴。

总之,建议进一步加大我国页岩气的早期评价研究力度,切实加快页岩气的勘探开发步伐。

(2) 页岩气是一种广分布、低丰度、易发现、难开采的自生自储连续型非常规低效气藏,其勘探开发需要先进的技术、严格的成本控制、优惠的税收扶持政策以及必要的环境保护考虑。

页岩气具有广分布、低丰度的特点,且储层条件差,渗透率很低,因此其勘探开发需要依靠大量的钻井来发现储量、提高产量.同时,由于储层条件极差,页岩气的开采难度较大,需要借助先进的钻、完井技术来提高单井产量.目前在北美得到广泛应用的技术包括水平井钻井技术、多段水力压裂技术以及微地震监测技术等.因此,页岩气的勘探开发必须采取低成本原则.为此,在勘探开发探索阶段,建议国家给予必要的税收扶持政策.另外,由于页岩气生产需

要大型水力压裂作业,后者需要大量的水源,因此页岩气勘探开发需要做好污水处理等环境保护工作。

总之,页岩气的勘探开发应当综合考虑4方面因素:资源形成条件、工艺技术适用性、经济可行性、环境友好性。

(3) 我国页岩气形成的地质背景比北美地区复杂,北美地区页岩气的选区评价标准和勘探经验可能不完全适用,需要研究和建立适合我国页岩气形成地质条件特点的选区评价标准。

我国页岩气形成的地质背景比北美地区复杂,特别是包括页岩气形成条件相对较好的四川盆地在内的我国中西部叠合盆地,大多经历了复杂的构造演化史、生烃史和成藏史。张金川等^[30]指出,中国含气页岩具有高有机质丰度、高有机质热演化程度及高后期改造程度等“三高”特点。因此,我国与北美地区在页岩气形成条件上既具相似之处,又具有明显差异。这就决定了北美地区页岩气的评价标准和勘探经验可能不完全适合我国页岩气的评价和勘探。为了切实提高我国页岩气勘探的成功率,当前迫切需要研究和建立适合我国地质实际的页岩气选区评价标准,切忌在选区评价时只是将我国页岩与北美页岩进行简单的地球化学参数和储层参数对比,要充分考虑到我国页岩气形成的特殊性和复杂性。具体对我国南方古生界等后期改造强烈的页岩气而言,除开展常规评价研究外,应加强对保存条件的研究。

参考文献:

- [1] National Energy Board. A primer for understanding canadian shale gas [R]. 2009: 23.
- [2] Curtis B J. Fractured shale-gas systems [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(11) : 1921-1938.
- [3] Shirley K. Tax break rekindled interest: shale gas exciting again [J]. AAPG Explorer, 2001, 22(3) : 24-25.
- [4] Cardott B J. Understanding gains on new reservoir: shales closing conventional gap [J]. AAPG Explorer, 2008, 29(11) : 75-78.
- [5] Navigant Consulting, Inc. North American natural gas supply assessment [R]. Prepared for American Clean Skies Foundation, 2008: 89.
- [6] Kuuskraa A V. Worldwide gas shales and unconventional gas: a status report, JAF29176 [R]. Advanced Resources International, Inc, 2009: 26.
- [7] EIA. Annual energy outlook 2009-with projections to 2030, DOE/EIA-0383 [R]. 2009: 221.
- [8] EIA. Annual energy outlook 2010-with projections to 2035, DOE/EIA-0383 [R]. 2010: 221.
- [9] Anonymous. Canada looks to shales for boost to gas supply [J]. Oil & Gas Journal, 2009, 107(46) : 18-22.
- [10] CGA. North American natural gas supply: increasingly unconventional [R]. 2009.
- [11] Ziff Energy. Shale gas outlook to 2020 [EB/OL] [2010-12-5]. <http://www.ziffenergy.com>.
- [12] Rogner H H. An assessment of world hydrocarbon resources [J]. Annual Review of Energy and the Environment, 1997, 22(22) : 217-262.
- [13] IEA. World energy outlook [R]. 2009: 14.
- [14] Anonymous. Study analyzes nine US, Canada shale gas plays [J]. Oil & Gas Journal, 2008, 106(42) : 45-52.
- [15] ARI(Advanced Resources International, Inc.). Gas shale basin studies [R]. 2009.
- [16] ICF International. Availability, economics and production potential of North American unconventional natural gas supplies [R]. The INGAA Foundation Inc, 2008: 167.
- [17] PGC. Potential supply of natural gas in the united states [R]. 2009: 11.
- [18] Brathwaite L D. Shale-deposited natural gas: a review of potential [R]. California: California Energy Commission, 2009: 33.
- [19] Bustin R M. Gas shale tapped for big pay [J]. AAPG Explorer, 2005, 26(2) : 5-7.
- [20] Dawson M. Shale gas resource plays in north America-opportunities and challenges [G]. [S. 1.]: NBF Energy Services Conference, 2009: 14.
- [21] Rokosh C D, Pawlowicz J G, Berhan E H, et al. What is shale gas? an introduction to shale-gas geology in alberta [G]. [S. 1.]: Energy Resources Conservation Board. ERCB/AGS Open File Report, 2008: 26.
- [22] EIA. U S Crude Oil, Natural Gas, and Natural Gas Liquids Proved Reserves, 2008 [EB/OL]. http://www.eia.doe.gov/natural_gas/data_publications/crude_oil_natural_gas_reserves/cr.html, 2009.
- [23] EIA. Advance summary: U. S. Crude Oil, Natural Gas, and Natural Gas Liquids Proved Reserves Annual report 2007, DOE/EIA-0216(2007) [R]. [S. 1.]: Advance Summary, 2008.
- [24] US Department of Energy. Modern shale gas development in the united states: a primer [R]. Oklahoma City: Ground Water Protection, 2009: 96.
- [25] Faraj B. Opening remarks from the chair: capturing opportunities in canadian shale gas [C]. The Canadian Institute's 1st Annual Shale Gas CONF. The Canadian Institute, 2005-01-31. Canadiar [s. n.], 2005.
- [26] Gas Technology Institute. Shale gas potential of selected upper cretaceous, jurassic, and devonian shale formations in the WCSB of western canada: implications for shale gas production, GRI Report 02/0233 [R]. 2002.

(下转第110页)

注意到 $\frac{1}{3}(10^M - 1) \leq x < \frac{1}{3}(10^{M+1} - 1)$ 时有估计式 $M = \frac{1}{\ln 10} \ln x + O(1)$ 以及 $\sum_{1 \leq k \leq M} \frac{1}{k} = \ln M + \gamma + O\left(\frac{1}{M}\right)$

$$\sum_{p \leq x} \frac{p}{a(3, p)} = \frac{3}{10 \cdot \ln 10} \cdot \ln \ln x + O(1).$$

参考文献:

- [1] F Smarandache. Sequences of Numbers Involved in Unsolved Problems [M]. Phoenix: Hexis, 2006: 106.
- [2] Nan W. On the Smarandache $3n$ -digital sequence and the Zhang Wenpeng's conjecture [J]. Scientia Magna, 2008, 4(4) : 120–122.
- [3] 苟素. Smarandache $3n$ 数字数列及其他的渐近性质 [J]. 内蒙古师范大学学报: 自然科学汉文版, 2010, 39(6) : 450-453.
GOU Su. The smarandache $3n$ -digital sequence and its some asymptotic properties [J]. Journal of Inner Mongolia Normal University: Natural Science Edition, 2010, 39(6) : 450-453.
- [4] 张文鹏. 初等数论 [M]. 西安: 陕西师范大学出版社, 2007: 12-14.
- [5] Tom M Apostol. Introduction to Analytical Number Theory [M]. New York: Spring-Verlag, 1976: 41-42.

责任编辑:董 瑾

(上接第7页)

- [27] 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,2008,176(6):136-140,159.
ZHANG Jin-chuan, XU Bo, NIE Hai-kuan, et al. Exploration potential of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2008, 176(6): 136-140, 159.
 - [28] 董大忠,程克明,王世谦,等.页岩气资源评价方法及其在四川盆地的应用[J].天然气工业,2009,29(5):33-39,136.
DONG Da-zhong, CHENG Ke-ming, WANG Shi-qian, et al. An evaluation method of shale gas resource and its application in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 33-39, 136.
 - [29] 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.
LI Jian-zhong, DONG Da-zhong, CHEN Geng-sheng, et al. Prospects and strategic position of shale gas resources in China [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(5): 11-16.
 - [30] 张金川,姜生玲,唐玄,等.我国页岩气富集类型及资源特点[J].天然气工业,2009,29(12):109-114.
ZHANG Jin-chuan, JIANG Sheng-ling, TANG Xuan, et al. Accumulation types and resources characteristics of shale gas in China [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(12): 109-114.

责任编辑:王 辉

ABSTRACTS OF THE PRESENT ISSUE (JXSYU ISSN 1673-064X)

Evaluation of China shale gas from the exploration and development of North America shale gas

Abstract: America is the first country for the commercial shale gas exploration and development in the world. The shale gas yield of America is close to $900 \times 10^8 \text{ m}^3$ in 2009. The high-speed exploration and development of shale gas makes the natural gas reserves of America increase by 40%. Canada is the second country for the commercial shale gas exploration and development in the world, and the exploration and development is mainly in Horn River Basin and Triassic Montney shale, the northeastern British Columbia. In recent years, the exploration and development is also in other provinces. According to the shale gas exploration and development characteristics and successful experience of North America and the geologic characteristics of shale gas forming of China, the revelation for the shale gas exploration and development of China is as follows: (1) shale gas is a kind of great potential resource, it can be explored and developed in the near future and good economic benefit can be obtained, and therefore it should be paid attention in oil and gas development decision; (2) shale gas reservoir is a widely distributed, easily found, low abundant, difficultly recovered unconventional self-generation self-storage gas reservoir, its exploration and development requires advanced techniques, strict cost control, favorable tax policy and environmental protection policy; (3) the geological background of shale gas forming in China is more complicated than that in North America, and therefore the evaluation of shale gas blocks should establish the standard suitable to the geological conditions of shale gas forming in China.

Key words: shale gas; exploration and development; evaluation; North America; China

ZHAO Jing-zhou^{1,2}, FANG Chao-qiang¹, ZHANG Jie¹, WANG Li¹, ZHANG Xin-xin¹ (1. College of Oil and Gas Resource, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China; 2. Key Laboratory of Shaanxi Province for Oil and Gas Accumulation Geology, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, Shaanxi, China) JXSYU 2011 V. 26 N. 2 p. 1-7, 110

Application of a new sedimentary system analysis method in Es₃ of Qikou Sag

Abstract: A new sedimentary system analysis method is proposed, which can be denominated "the multifactor superposition analysis". This approach begins with the overall structure of researched area, then plays emphasis on some important parts, finally returns back to the whole researched area. Since the role of sedimentary background in identifying macro-facies types is fully considered, this new method effectively overcomes the multiplicity in identifying macro-facies types based on core, logging and seismic data using the sedimentary system analysis method from parts to whole. The method is applied to the sedimentary analysis of Es₃ of Qikou Sag and effectively guides the determination of sedimentary facies types and sedimentary system of Es₃ in Qikou Sag.

Key words: sedimentary system; multifactor superposition analysis; Es₃; Qikou Sag; Huanghua Depression

PU Xiu-gang, CHEN Chang-wei, ZHOU Li-hong, XIAO Dun-qing, TANG Ge, DU Yu-mei, HUA Shuang-jun, LIN Chang-mei, LIU Lan (Research Institute of Exploration and Development, Dagang Oilfield Company, CNPC, Tianjin 300280, China) JXSYU 2011 V. 26 N. 2 p. 8-12, 19

Quantitative study on the vertical tectonic varying intensity in the basal boundary of Middle Ordovician in the platform area of Tarim Basin

Abstract: The vertical tectonic varying intensity in the basal boundary of Middle Ordovician in the platform area of Tarim Basin in three main tectonic varying periods(the end of Silurian to the end of Permian, the end of Permian to the end of Jurassic, the end of Jurassic to present) is quantitatively calculated using the quantitative calculation method of vertical tectonic varying intensity. It is shown that, in three tectonic varying periods, the basal boundary of Middle Ordovician presents the feature of "uplifting in east and subsiding in west, subsidence being dominated", "uplifting in east and west, subsiding in middle, uplift being dominated", and "subsiding as a whole" separately. The absolute varying intensity is $-8 \sim -20 \text{ m/Ma}$, $-36 \sim -8 \text{ m/Ma}$ and $-4 \sim -40 \text{ m/Ma}$ separately, and the relative varying intensity is $-0.2 \sim -0.9$, $-0.9 \sim -0.2$ and $-0.1 \sim 1$ separately. There is the tectonic varying in which subsidence is dominated in two main hydrocarbon accumulation periods(the end of Silurian to the end of Permian, the end of Jurassic to present), and the absolute varying intensity from the end of Jurassic to present is much more than that from the end of Silurian to the end of Permian. According to the relative tectonic varying intensity, it is held that the main oil-bearing areas in the platform area of Tarim Basin distribute mainly in the relative stable zones of the tectonic varying, where are in higher tectonic position than hydrocarbon generating depressions, there is less tectonic varying intensity, so where are the favorable objective area of hydrocarbon migration and accumulation.

Key words: Tarim Basin; the basal boundary of Middle Ordovician; vertical tectonic varying intensity; quantitative study