

页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源 *

闫存章¹ 黄玉珍¹ 葛春梅¹ 董大忠² 程克明²

1. 中国石油天然气股份有限公司对外合作经理部 2. 中国石油勘探开发研究院

闫存章等. 页岩气是潜力巨大的非常规天然气资源. 天然气工业, 2009, 29(5): 1-6.

摘 要 通过对北美页岩气藏的深入研究并系统总结其勘探开发历史与成功经验, 指出页岩气藏是典型的非常规天然气藏。探讨了页岩气藏在地质特征、开发特征上与常规天然气藏的明显差异。北美油气生产商把页岩气藏作为重要天然气开发目标, 其有效勘探开发的关键在于有政策引导和水平井、水力压裂等先进钻、完井技术的成功应用。借鉴其经验, 认为我国对页岩气的研究与勘探开发尚处于探索阶段, 存在古生界海相与中、新生界陆相两大页岩气勘探开发领域, 页岩气资源潜力巨大, 在地质理论和钻、完井等生产技术发展的推动下, 将成为中国现实的天然气资源。建议加快我国页岩气资源战略调查, 制定优惠政策, 加强对外合作, 推动我国页岩气勘探开发技术和产业化发展。

关键词 页岩气 非常规天然气 资源 地质特征 勘探开发 领域 北美 中国

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2009.05.001

0 引言

随着钻、完井等生产技术的发展, 非常规油气资源(见图 1)越来越多地得到有效利用, 在全球能源供应中的地位日益提升, 预计将会超过常规油气资源。

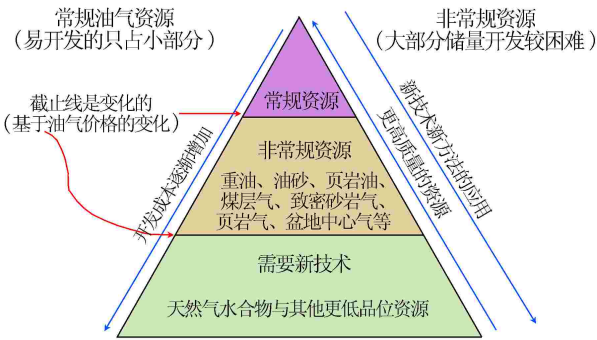


图 1 油气资源分类的金字塔示意图

20 世纪 90 年代以前的相当长时期, 人们对非常规天然气资源的关注重点在煤层气与致密砂岩气。近十几年来, 北美在天然气价格高涨、水平井与水力压裂等生产技术进步等的推动下, 把页岩气作为勘探开发的重要目标, 并获得了巨大的成功, 使得人们将目光转向了资源潜力更大的页岩气资源^[1]。目

前, 在北美地区页岩气产量的增长速度非常惊人, 已接近或超过了煤层气产量。页岩气藏的勘探开发正由北美向全球迅速扩展, 有可能成为全球油气勘探开发的新亮点。

为推动我国页岩气资源勘探开发快速发展, 笔者从页岩气藏勘探开发特征入手, 探讨了页岩气藏在地质特征、开发特征上与常规天然气藏的明显差异, 系统总结了北美页岩气勘探开发现状及成功经验, 初步分析了我国页岩气资源潜力与重点领域, 提出了加快我国页岩气资源调查、勘探开发技术发展以及页岩气产业化等方面的建议。

1 页岩气藏地质特征

1) 页岩气产自富有机质的页岩中, 因此, 页岩气藏为典型的自生自储型天然气藏 (self-sourced reservoirs)。在含气页岩中, 页岩兼具烃源岩、储层, 甚至盖层的角色。

2) 页岩气主要由吸附气和游离气两部分组成。其中基质孔隙和裂缝中的游离气的储集方式与常规天然气储层相似; 有机质与黏土颗粒表面的吸附气的储集方式与煤层气相似。不同地质条件下游离气

* 本文为中国石油天然气股份公司对外合作非常规天然气技术攻关项目 (编号: 06-03-01) 成果。

作者简介: 闫存章, 1958 年生, 教授级高级工程师, 博士; 毕业于中国石油大学 (北京), 主要从事油气田开发与对外合作研究, 现任中国石油天然气股份有限公司对外合作经理部总经理。地址: (100007) 北京市东城区东直门北大街 9 号。电话: (010) 59986289。E-mail: ycz@petrochina.com.cn

与吸附气的相对比例有很大差别^[2]。影响游离气量大小的主要因素是页岩基质孔隙的大小和天然裂缝的发育程度,二者为正相关关系;影响吸附气多寡的关键因素是有机碳含量的高低,二者同样具正相关性(见图2)。

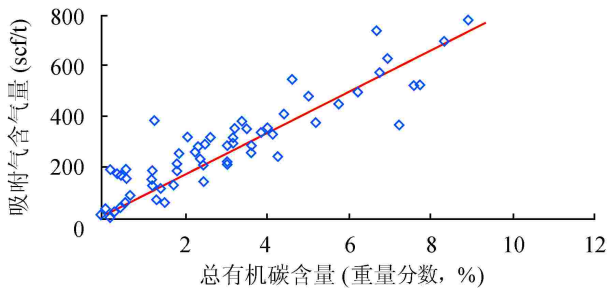


图2 全美页岩气产气盆地页岩有机碳含量与吸附气含量关系图(1 scf=0.028 3 m³)

3)与常规油气藏不同,页岩气成藏不需要在构造的高部位,为连续型富集气藏(continuous gas accumulations)。页岩气藏的分布与有效烃源岩分布范围相当,呈区域性分布。含气盆地中处于生气窗范围内的富有机质页岩展布范围基本上就是页岩气藏的展布范围。同时,缺少明显的盖层,无圈闭,无明显的气水界面(不含水或极少含水),与相当大比例的常规油气储量具有成因关系。

4)页岩气藏储层具典型的低孔低渗物性特征,页岩产层厚度一般为15~100 m,孔隙度一般为4%~6%,渗透率小于 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (见图3)。处于断裂带或裂缝发育带的页岩储层渗透率可以增加,孔隙度最高可达11%,渗透率可达 $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右^[1]。据美国主要页岩气产层储层物性统计,孔隙度为4.22%~6.51%,渗透率为 $40.9 \times 10^{-6} \mu\text{m}^2$ 。

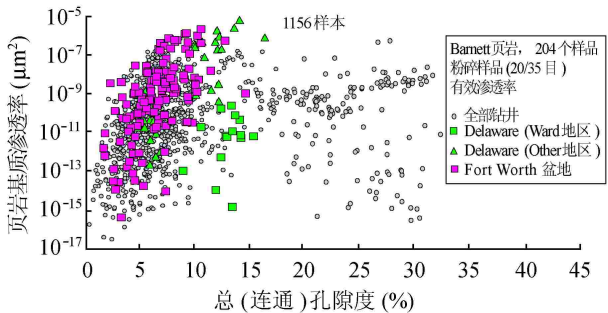


图3 美国沃斯堡盆地Barnett页岩基质孔隙度—渗透率关系图(据GRI,2006年)

2 页岩气藏开发特征

页岩气产自渗透率极低的沉积岩中,估算的采收率通常低于常规气藏,其经济产量依赖于天然裂

缝发育程度、页岩脆性以及钻、完井技术。从开发角度来看,页岩气藏具有如下典型的开发特征:

2.1 低产或无自然产能

据美国东部早期的页岩气井完井数据统计,40%的页岩气井初期裸眼测试时无天然气流,55%的页岩气井初始无阻流量没有工业价值,所有的页岩气井都要实施储层压裂改造。直井压裂改造后的产能平均为 $8\ 063 \text{ m}^3/\text{d}$,水平井压裂改造后的产能最高可超过 $10 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。页岩气井在生产过程中适宜于多次改造,美国早期的页岩气直井在生产过程中普遍实施过2次以上的增产改造。

2.2 生产周期长

页岩气藏在投入生产后,页岩中的天然裂缝引起的渗透性在一定程度上弥补了基质渗透率低的缺陷。因此,页岩气藏生产中首先排出的是裂缝中的游离气,随即是与裂缝沟通或自然连通的孔隙中的游离气。随着地层压力的降低,赋存于有机质颗粒与黏土颗粒表面的天然气开始解吸,并在基质中通过扩散作用进入裂缝系统,裂缝中的天然气则以渗流方式进入井底,采至地面。游离气的渗流速度较快,可以形成可采初期的相对高产期,但产量下降快;吸附气解析、扩散速度慢,主要为页岩气井的稳产期,但产量相对较低。页岩气井在进入稳产期后的递减速度较慢,使得生产周期比较长。根据估算,认为一般页岩气井生产寿命可在30~50 a。美国地质调查局(USGS)2008年最新数据显示,沃斯堡盆地Barnett页岩气田开采寿命可超过80 a^[3]。

2.3 气藏采收率变化较大

据美国5个主要页岩气产气盆地的统计,页岩气藏的采收率变化范围为5%~60%(见图4)。如埋藏较浅、地层压力较低、有机质丰度较高、吸附气含量较高的Antrim页岩气藏的采收率可达60%;而埋藏较深、地层压力较高、吸附气所占比例相对较低的Barnett页岩气藏的采收率早期为7%

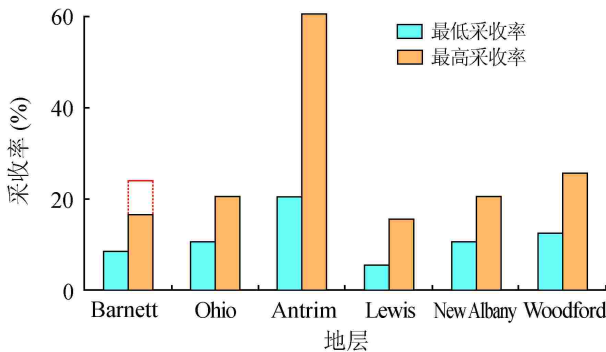


图4 美国不同盆地页岩气采收率图

~8%,随着水平井和压裂技术的进步,目前的采收率达到16%,预计最终可达25%左右。

3 北美页岩气勘探开发进展

3.1 北美页岩气藏勘探开发历史

2001年,美国学者 Rogner(1997)、Kawata 和 Fujita(2001)认为世界页岩气资源量约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于煤层气($256 \times 10^{12} \text{ m}^3$)与致密砂岩气($209 \times 10^{12} \text{ m}^3$)的总和。ARI 公司(Advanced Resources International, Inc.)估算的美国页岩气技术可采资源量由1996年的 $1.47 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增加到2006年的 $3.62 \times 10^{12} \text{ m}^3$,并相信随着开发生产技术的进步,该值还会发生很大变化。据 USGS 发布的数据,1996年估算的 Barnett 页岩技术可采储量为 $850 \times 10^8 \text{ m}^3$,2004年为 $7\,419 \times 10^8 \text{ m}^3$,2006年为 $1.16 \times 10^{12} \text{ m}^3$,2008年为 $2.66 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

1821年,北美最早的页岩气井钻于美国东部纽约州泥盆系页岩中^[3],1926年在阿帕拉契亚盆地成功实现了页岩气商业开发。20世纪90年代以来,在国家政策、天然气价格、开发技术进步等因素的推动下,页岩气成为重要的天然气开发目标。目前,全球对页岩气的勘探开发并不普遍,仅美国和加拿大做了大量工作,美国是目前页岩气商业生产的唯一国家,并步入了页岩气开发快速发展阶段。

据统计,20世纪70年代中期美国页岩气步入规模化发展阶段,70年代末期页岩气年产量约 $19.6 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2000年,美国页岩气产气盆地有5个:密歇根盆地 Antrim 页岩、阿帕拉契亚盆地 Ohio 页岩、伊利诺伊盆地 New Albany 页岩、沃斯堡盆地 Barnett 页岩和圣胡安盆地 Lewis 页岩,页岩气生产井约28 000口,页岩气年产量约 $122 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2007年页岩气生产井增加到近42 000口,页岩气年产量为 $450 \times 10^8 \text{ m}^3$,约占美国天然气年总产量($5\,596.57 \times 10^8 \text{ m}^3$)的8%。其中,沃斯堡盆地 Barnett 页岩成为美国最大的页岩气产区,2007年约有8 500口(其中水平井4 982口)页岩气生产井,页岩气年产量达 $305.8 \times 10^8 \text{ m}^3$,占美国页岩气产量的71%。1981年在沃斯堡盆地发现的 Newark East 页岩气田成为目前美国第二大气田,2007年页岩气产量达 $217 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

至2007年,美国页岩气产气盆地已有密歇根盆地(Antrim 页岩)、阿帕拉契亚盆地(Ohio、Marcellus 页岩)、伊利诺伊盆地(New Albany 页岩)、沃斯堡盆地(Barnett 页岩)和圣胡安盆地(Lewis 页岩)、俄克拉河玛盆地(Woodford 页岩)、阿科马盆地(Fay-

etteville 页岩)、威利斯顿盆地(Bakken 页岩)等20余个盆地。同时,随着页岩气勘探开发的巨大成功,越来越多的美国油气生产商投身页岩气勘探开发中。2005年美国页岩气生产商只有23家,2006年增至39家,到2007年已有64家油气生产商在北美从事页岩气勘探开发。

加拿大页岩气资源分布广、层位多,预测页岩气资源量超过 $28.3 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中加拿大西部不列颠哥伦比亚地区的白垩系、侏罗系、三叠系和泥盆系的页岩气资源量约 $7.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。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年该区页岩气产量约 $8.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中3口水平井日产量较高($9.9 \times 10^4 \sim 14.2 \times 10^4 \text{ m}^3$)。

3.2 北美页岩气藏开发成功经验

北美页岩气藏的成功开发,除受天然气价格大幅上涨的刺激外,主要得益于国家优惠的非常规资源开发政策和页岩气资源开发技术的长足进步。

3.2.1 政策方面

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,后几经延期,使这一政策优惠期长达23 a。得克萨斯州自20世纪90年代初以来,对致密气、页岩气的开发不收生产税(该税一般占全年总税收的7.5%)。此外,美国还建立了独立的、固定的非常规油气资源研究基金。

3.2.2 技术方面

1)水平井+多段压裂技术的大规模成功应用^[4-6]。水平井的成本一般是垂直井的1~1.5倍,800~1 000 m水平段的常规水平井钻井及完井投资约为700万美元,而产量是垂直井的3倍左右(图5)。目前85%的页岩气开发井为水平井+多段压裂,如美国新田公司在Woodford页岩中的部分开发井采用5~7段式压裂,页岩气增产效果显著(见表1)。

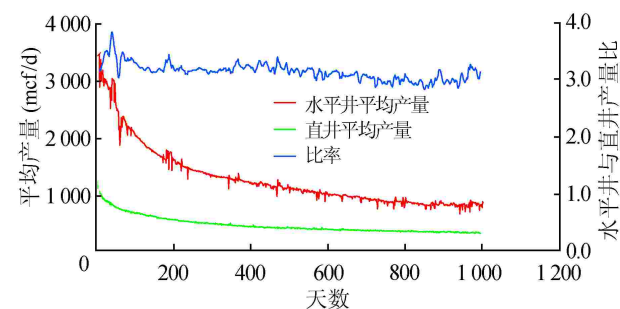


图5 北美页岩气井产量对比图
(1 mcf/d = $28.32 \text{ m}^3/\text{d}$)

表1 阿科马盆地 Woodford 页岩气井产量表

井 名	压裂段	最大初始产量 (10 ⁴ m ³ /d)	最大最终产量 (10 ⁴ m ³ /d)
Tollett—1H-22	5	28.32	16.99
Tipton—1H-23	7	19.82	14.16
Bullock—1H-15	5	14.16	11.61

注:据 John White 等修改,2007 年。

2)清水压裂技术(water fracs)。该技术是用清水添加适当的减阻剂作为压裂液来替代通常使用的凝胶压裂液,可以在不减产的前提下节约 30% 的成本,在低渗透油气藏储层改造中取得很好的效果。清水压裂是利用含有减阻剂、黏土稳定剂和必要的表面活性剂的水为压裂液,以这种压裂液作为前置液来提供支撑剂输送。清水压裂技术提高岩石渗透率的依据是:①天然的缝面不吻合和产生粗糙缝面,剪切应力使缝面偏移,同时,在裂缝扩展时,水力裂缝将开启早已存在的天然裂缝,提高岩层的渗透率;②若用其他压裂液进行压裂处理,往往不能对进入气层中的压裂液进行彻底清洗,而水压裂采用的压裂液主要为清水,是一种清洁压裂技术,这也是提高岩层渗透率的重要因素之一。

3)同步压裂技术(simo-fracturing)。这项技术是近几年在沃斯堡盆地 Barnett 页岩气开发中成功应用的最新压裂技术。该技术的理论依据是:同时对配对井(offset wells)进行压裂,即同时对两口(或两口以上)的井进行压裂。在同步压裂中,采用使压力液及支撑剂在高压下从 1 口井向另 1 口井运移距离最短的方法,来增加压裂缝网络的密度及表面积,该技术可以快速提高页岩气井的产量。同步压裂最初是两口互相接近且深度大致相同水平井间的同时压裂,目前已发展到 3 口、甚至 4 口井间同时压裂。

4 中国页岩气研究现状及资源状况

中国对页岩气的研究与勘探开发还处于探索阶段。20 世纪 60~90 年代,在页岩油藏有所发现的基础上,有些学者对页岩气藏做过一定的研究^[7-9]。近几年,中国地质大学、中国石油勘探开发研究院的学者对页岩气成藏条件进行了探讨。本着引进国外先进技术,为我国天然气工业发展服务的方针,2006 年中国石油对外合作经理部与美国页岩气开发专家在北京举办了“页岩气研讨会”,国内 50 多位专家及代表参加了会议。同时,组织开展了“中国页岩气资源评价与有利勘探领域优选”研究,并在 2007~2008

年与美国新田石油公司开展了四川盆地页岩气潜力评价联合研究。虽然未对我国页岩气资源进行全面估算,但对四川盆地寒武系筇竹寺组、志留系龙马溪组页岩气资源做了初步估算:四川盆地寒武系页岩气资源量为 $(7.14\sim14.6)\times10^{12}\text{ m}^3$,志留系页岩气资源量为 $(2\sim4)\times10^{12}\text{ m}^3$ 。与四川盆地常规天然气资源量 $(7.2\times10^{12}\text{ m}^3)$ 比较,认为我国页岩气资源潜力巨大,勘探开发前景很好,具有加快勘探开发的巨大资源基础。

中国地质历史时期富有机质页岩十分发育,既有有机质含量高的古生界海相页岩,也有有机质丰富的中、新生界陆相页岩(图 6),已在多处发现油、气藏或油气显示。

4.1 古生界海相页岩气勘探开发前景

我国在南方扬子、华北和塔里木 3 个地台区存在多套古生界海相页岩,都具备页岩气资源形成的基本地质条件,其中南方扬子地台区古生界页岩最为现实。我国南方扬子地台区古生界发育震旦系—三叠系海相沉积^[10],沉积岩厚度为 4 000~7 000 m。其中古生界发育了二叠系龙潭组、泥盆系罗富组、志留系龙马溪组、奥陶系五峰组、寒武系筇竹寺组和震旦系陡山沱组等 6 套黑色富有机质页岩,整体区域分布稳定,埋藏深度浅,有机质丰富。其中下寒武统筇竹寺组黑色页岩遍布整个扬子地台区,现今残留面积约 $90\times10^4\text{ km}^2$;厚度平均为 120 m,最大厚度 423 m;有机碳含量多在 2.0% 以上,最高可达 13.64%,平均为 2.88%;热演化程度均在成气阶段,部分达到高—过成熟阶段。下志留统龙马溪组分布于整个扬子地区,厚度平均在 100 m 以上,最大厚度 538 m;有机碳含量 0.5%~8.14%,平均 2.6%; R_o 一般为 2.0%~3.0%,局部达 4.0%。

以往的钻井普遍钻遇古生界多套页岩,老井复查中,在 100 余口井中见良好气显示,个别获工业气流。其中四川盆地地下寒武统筇竹寺组页岩 36 口井统计中,30 口井发现丰富气显示;志留系龙马溪组页岩 13 口井统计中,10 口见良好气显示。尤其是威远地区的威 5 井在下寒武统筇竹寺组页岩 2 795~2 798 m 井段中途测试获日产 $2.46\times10^4\text{ m}^3$ 的工业气流;阳高寺构造带的阳 63 井在下志留统龙马溪组页岩 3 505~3 518.5 m 井段获日产 3 500 m³ 的低产气流;隆 32 井在下志留统龙马溪组页岩 3 164.2~3 175.2 m 井段获日产 1 948 m³ 的低产气流。

初步评价认为,扬子地台区古生界下寒武统筇竹寺组、下志留统龙马溪组页岩气成藏条件优越,在

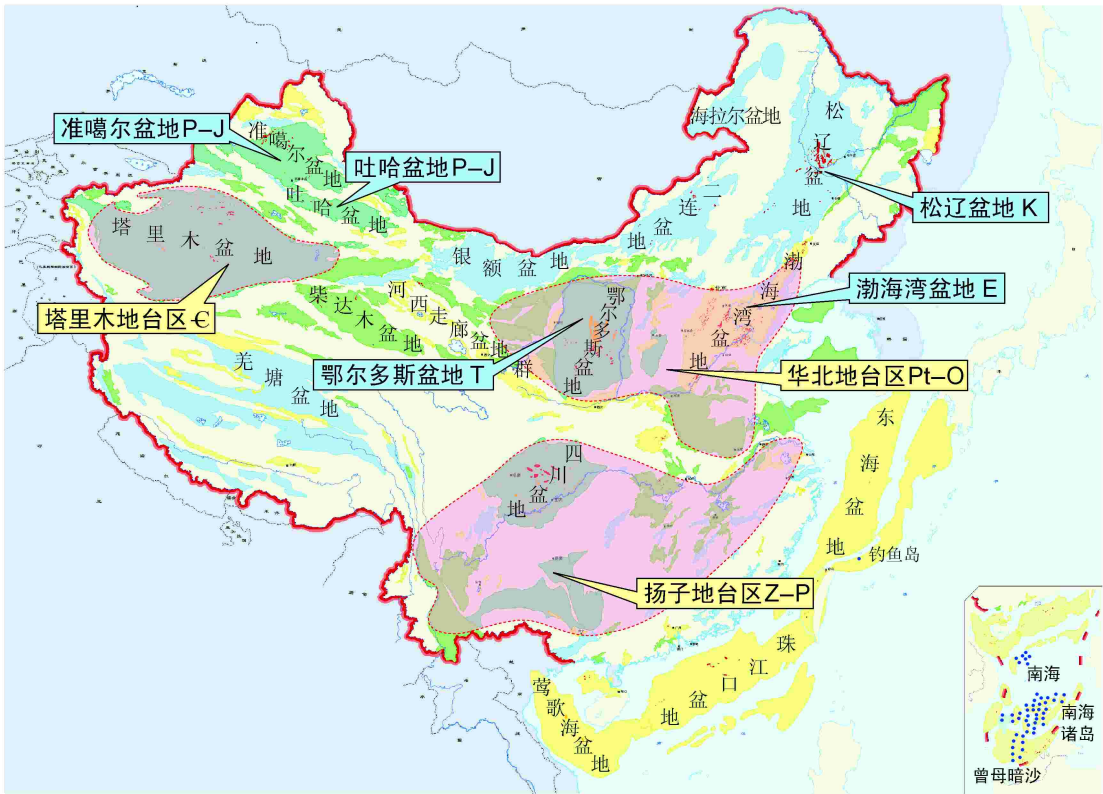


图 6 中国页岩气有利勘探领域示意图

盆地内部、向斜区以及隆起的低部位等场所是有利的页岩气藏形成与富集区带。

4.2 中、新生界陆相页岩气勘探开发前景

我国中、新生界陆相沉积尤其发育,并已被勘探开发实践证实其中的绝大部分富有机质泥页岩为含油气盆地中的优质烃源岩,如松辽盆地下白垩统的青山口组黑色泥页岩、渤海湾盆地古近系沙河街组的泥页岩、鄂尔多斯盆地上三叠统延长组的张家滩(T_3yc_3)、李家畔(T_3yc_2)页岩等。前人研究表明,中国北方陆相泥页岩烃源岩母质来源以浮游生物、细菌、高等植物为主,具有多种干酪根类型, TOC 平均为 2%~3%,最高可达 8%,埋深 2 000~3 000 m, R_o 为 0.8%~1.2%,处于液态烃与气态烃并重阶段。其中在我国中西部地区的晚石炭世—二叠纪、晚三叠世—早中侏罗世还发育两期煤系沉积,分布广泛,天然气资源丰富,煤层气资源量约 $16.5\times 10^{12} m^3$ 。对中—下侏罗统煤系沉积进行研究,发现中—下侏罗统煤系中广泛发育高碳泥页岩,厚度为 40~100 m, TOC 为 20%~30%, R_o 为 0.8%~1.2%,母质类型为腐殖型,是一套页岩气藏形成的有利目的层系。综合多种地质条件,认为松辽盆地白垩系页

岩,准噶尔盆地南缘上二叠统、中—下侏罗统页岩,陕甘宁盆地上三叠统页岩以及吐哈盆地中—下侏罗统碳质页岩是有利的页岩气形成层系和地区。

5 建议

页岩气藏开发面临多种技术难点,应采取多种技术、经济措施对其进行开发,尤其是应统筹规划,制定针对性强的税收优惠政策,采用先进适宜的开发技术,加快产业化发展。

5.1 开展资源战略调查,指明有利页岩气勘探开发方向

我国沉积盆地中广泛发育富有机质页岩,厚度大、有机碳含量高、生气能力大、钻井气显示活跃,具有较好的勘探开发前景。但是,目前我国页岩气资源研究薄弱,资源潜力尚不明确。因此,应尽快开展我国页岩气资源战略调查。通过对早期资料(包括露头、钻井、测井、有机地球化学分析等数据)重新认识,筛查、预测富有机质页岩发育区,在综合地质研究基础上,预测页岩气资源潜力,优选页岩气富集有利区带,为进一步勘探开发明确方向,促进页岩气勘探开发的快速发展。

5.2 加强对外合作,促进页岩气勘探开发技术发展

加强与国外合作开发,引进先进理念与开发技术。页岩气资源开发难度大、产量低、经济性差,而美国页岩气开发走在世界前列,已经探索出一套先进的页岩气开采技术;国内在地震储集层预测、低渗透气藏储集层大型压裂改造、裂缝性油藏压裂井产能评价以及微地震监测技术等方面也积累了较为丰富的经验。因此,选择较成熟页岩区,通过与国外公司开展技术合作,开展先导试验,可以加快建立符合中国页岩气藏特点的勘探开发配套技术。重点是开展页岩气先导试验区优选与评价、试验区页岩气试采工艺设计、试验区页岩气试采方案设计、现场实施与技术服务、先导试验评估与分析等工作。

5.3 制定优惠政策,推进页岩气产业化快速发展

我国石油行业税收制度相对比较粗放,目前还没有针对页岩气资源开发的特殊财税政策。油公司、国家应统筹规划,系统管理,应将页岩气资源纳入中长期发展规划体系中,对其发展目标、发展阶段做出科学规划,明确发展地位。国家对页岩气等非常规油气资源应制定针对性强的税收优惠政策(如很多国家都有通过调整税收鼓励页岩气等产业发展的政策),对页岩气资源的勘探开发进行扶持。在税收政策改革过程中,有必要借鉴国外经验,降低页岩气资源产业运行各项税率,以鼓励该产业发展。

参 考 文 献

- [1]《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.
- [2]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.
- [3]CHARLES BOYER,JOHN KIESCHNICK, RIVER R S,等.页岩气藏的开采[G]//油田新技术.[出版地不详]:斯伦贝谢公司,2006(秋季刊):18-31.
- [4]BILL GRIESER, JIM BRAY.非常规气藏生产潜力评价[C].SPE 106623,2008.
- [5]SCOTT W TINKER.随着世界向天然气过渡,非常规资源将扮演重要角色[J].廉抗利译. The American Oil & Gas Reporter,2004(10):63-71.
- [6]KUUSKRAA V A. Unconventional natural gas industry: Savoir or bridge[C].EIA Energy Outlook and Modeling Conference,2006.
- [7]王德新,江裕彬,吕从容.在泥页岩中寻找裂缝性油、气藏的一些看法[J].西部探矿工程,1996,8(2):12-14.
- [8]赖生华,刘文碧,李德发,等.泥质岩裂缝油藏特征及控制裂缝发育的因素[J].矿物岩石,1998,18(2):47-51.
- [9]何家欢.北美非常规天然气开发的繁荣是否在中国再现[J].能源科学进展,2007,4(2):45-49.
- [10]梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等.中国南方海相生烃成藏研究的若干进展(一):南方四套区域性海相烃源岩的分布[J].海相油气地质,2008,13(3):1-16.

(修改回稿日期 2009-04-03 编辑 赵 勤)