页岩气资源潜力与勘探开发前景

董大忠,邹才能,李建忠,王社教,李新景,王玉满,李登华,黄金亮
DONG Da-zhong, ZOU Cai-neng, LI Jian-zhong, WANG She-jiao,
LI Xin-jing, WANG Yu-man, LI Deng-hua, HUANG Jin-liang

中国石油勘探开发研究院,北京 100083
Petrochina Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Beijing 100083, *China*

摘要:页岩气为近年来在北美地区广泛勘探开发的天然气新目标,在全球非常规油气勘探开发中异军突起,成为突破最晚、近期发展最快的非常规天然气资源。依据北美地区页岩气勘探开发的历程和全球页岩气勘探开发的进展,阐述了全球页岩气勘探开发的基本态势和页岩气 5 个方面的典型特征,分析了全球页岩气的资源潜力与分布特征,预测中国页岩气资源潜力约 $100\times10^{12}m^3$,指出页岩气的成功勘探开发是近 10 年来油气地质理论与工程技术取得的最激动人心的重大成就,页岩气资源潜力丰富,实现全面开发将带来一场全球的能源革命。最后,提出了 4 点加快中国页岩气发展的建议。

关键词:页岩气;资源潜力;发展前景;纳米孔;体积压裂
中图分类号:P618.1　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1671-2552(2011)02/03-0324-13

Dong D Z, Zou C N, Li J Z, Wang S J, Li X J, Wang Y M, Li D H, Huang J L. Resource potential, exploration and development prospect of shale gas in the whole world. *Geological Bulletin of China,* 2011, 30(2/3):324–336

Abstract: Shale gas which has been widely explored and developed in North America in recent years is a new nature gas source target. It has made a tremendous progress in unconventional nature gas exploration and development all over the world, and has become a typical unconventional nature gas resource which is the latest explored and the fastest development in the last year. Based on the course in North America and progresses in the world of shale gas exploration and development, this paper made an exposition of the main situation of shale gas exploration and development in the world and 5 typical geological characteristics of shale gas, and analyzed resource potential and distribution features of global shale gas, and forecasted $100\times10^{12}m^3$ of shale gas resource potential in China. Furthermore in the paper we also pointed out that the success of shale gas exploration and development in recent 10 years is the most stirring great achievement in oil-gas geological theories and engineering technologies. Shale gas resource is very abundant in the world. Its overall development would bring about a world-wide energy revolution. Finally the paper put forward four suggestions on speeding up shale gas development in China.

Key words: shale gas; resource potential; development prospect; nanometer-scale pores; hydraulic fracturing

页岩气为产自极低孔渗、富有机质暗色页岩地层系统中的天然气,是近期可实现经济规模勘探开发、资源丰富的非常规天然气资源。页岩气的形成与分布独具特征,往往分布在盆地内厚度较大、分布较广的有效烃源岩层中,具资源潜力大、开采寿命长的优势[1-2]。

按成因机制,页岩气为典型的自生自储、大面积连续聚集型的天然气藏。富有机质暗色页岩既是气源岩,又是储层和封盖层。富有机质暗色页岩生成的油气除部分排出、运移至砂岩或碳酸盐岩等渗透性

收稿日期:2010-11-16;**修订日期**:2010-12-27
资助项目:国家发改委、科技部、财政部国家重大专项《大型油气田及煤层气开发》(编号:2008ZX05018-001)
作者简介:董大忠(1962-),男,博士,教授级高级工程师,从事油气资源评价、油气资源战略调查与选区、页岩气等非常规油气形成与分布基础理论和核心技术研究。E-mail:ddz@petrochina.com.cn

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

岩石中形成常规油气藏外,余者大量(高达总生烃量的 50%以上)在“原地”滞留、富集,以游离气和吸附气为主赋存于纳米级孔隙及微裂缝中。页岩气可生成于有机质演化的各个阶段,形成生物成因气、热成因气、热裂解气、混合成因气等,其化学成分以甲烷为主,占 90%或更多,是典型的干气,仅极少部分为湿气[1-2]。

页岩气储层复杂,包括富有机质暗色页岩及夹层状的粉砂质页岩、泥质粉砂岩、粉砂岩或砂岩。不同的页岩气储层特征差异明显。脆性与天然微裂缝发育较好的富有机质暗色页岩(区)是有利的页岩气开发目标。页岩储层孔隙度、渗透率极低,页岩气开发一般无自然产能或低产,单井生产周期长,经济开采需要大型多级水力体积压裂和水平井技术[3]。

传统油气地质理论中,富有机质暗色页岩主要是烃源岩,以生成油气为主,而非油气储层,使富有机质暗色页岩一直为油气勘探开发的禁区。近年来,富有机质暗色页岩发育丰富的微—纳米级孔隙、页岩气开采非达西渗流等地质理论创新和页岩气开发水平井钻完井、多级水力、体积压裂等技术突破[4],使页岩气工业化开采得以实现,富有机质暗色页岩成为全球天然气勘探开发的重要新目标,并正在引起世界油气勘探开发的重大变革,全方位地影响了世界能源供需格局的演变。页岩气是自石油发现以来最重要的能源开发。

本文将依据近年来页岩气勘探开发的新进展,简明阐述全球页岩气勘探开发的基本态势和页岩气的形成、分布及主要特征,旨在借鉴国际页岩气勘探开发的成功经验,分析中国页岩气的形成条件,预测中国页岩气的勘探开发前景,以推动中国页岩气的发展。

1　全球页岩气勘探开发纵览

页岩气的勘探开发历史悠久,已有近 200 年的历史,目前正迈入快速发展期(图 1)[4-5]。北美页岩气的发展尤其迅速,实现了高效经济、规模开发,成为北美天然气供应的重要来源,并引起全球天然气供应格局的重大变化。欧洲的德国、法国、英国、波兰、奥地利、瑞典,亚洲的中国、印度,大洋洲的澳大利亚、新西兰,南美的阿根廷、智利等国家或地区都已充分认识到页岩气资源的价值和前景,开始了广泛的页岩气基础理论研究、资源潜力评价、工业化开采试验等页岩气的研究和勘探开发。

1.1　北美页岩气勘探开发态势

北美产气页岩主要分布在北美陆台的古生代和中生代地层中。北美地区是全球发现页岩气最早的地区,世界第一口页岩气井位于美国东部,由此拉开了世界天然气工业发展的序幕,与世界石油的发现相比,页岩气的发现要早于石油近 40 年。目前,北美地区也是世界页岩气勘探开发最成功的地区,页岩气成为北美最重要的非常规天然气勘探开发领域,页岩气已占到北美天然气总产量的 12%左右,北美已进入了天然气富裕新时代[5]。

1821~1975 年为页岩气早期勘探开发阶段。1821 年在美国东部阿巴拉契亚盆地泥盆系 Dunkirk 页岩中完钻的、井深仅 21m 的一口井,在井深 8.23m 的泥盆系 Perrysbury 组 Dunkirk 页岩中获得天然气。该井成为北美陆台上的第一口页岩气井,也是全球第一口商业性页岩气井[3],生产的天然气满足了 Fredonia 城市的照明和部分生活的需要,一直供气到 1858 年,长达 37 年。随着美国天然气需求的不断增加,以页岩气为目标的勘探开发一度升温,在泥盆纪黑色页岩层进行了大量的浅层钻探,此后于 1863 年在美国东部的伊利诺伊盆地泥盆系和密西西比系页岩中发现低产气流。1870~1900 年的勘探开发范围涉及到了美国东部的纽约、宾夕法尼亚、俄亥俄、肯塔基、弗吉尼亚等州或地区。1914 年在阿巴拉契亚盆地泥盆系 Ohio 页岩的钻探中获得日产气 $2.83\times10^4m^3$ 的高产气流,由此发现了世界第一个页岩气田——Big Sandy 气田,1926 年 Big Sandy 气田的含气范围由阿巴拉契亚盆地的东部扩展到西部,成为当时世界已知的最大气田[5-6]。目前,Big Sandy 气田已累计钻井约 10000 口,单井平均日产气最高为 $2831.2m^3$,2008 年年产气量为 $15.2\times10^8m^3$,处于美国第 20 大气田的位置[5]。Big Sandy 气田为页岩气早期勘探开发的重大成果。

1975~1989 年为页岩气地质理论与勘探开发技术攻关阶段。20 世纪中叶以前,美国页岩气勘探开发主要集中在东部地区的阿巴拉契亚、密执安、伊利诺伊等盆地,以泥盆系和密西西比系黑色页岩为目的层系,除阿巴拉契亚盆地 Ohio 页岩的 Big Sandy 气田、密歇根盆地 Antrim 页岩气进行了商业开发外,其余大量钻井无商业性气流或仅见低产气流,而未能进行大规模的商业开发。针对上述困境,并为应

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

对已经出现的石油危机，自 20 世纪 70 年代末以来，美国能源部等政府机构与相关企业投入大量资金，启动了针对美国东部页岩气的地质理论与勘探开发技术攻关项目(ESGP)，开展了从地质、地球化学到气藏工程等一系列的理论研究与技术攻关，证实了以阿巴拉契亚盆地泥盆系和密西西比系为代表的东部地区黑色页岩的产气能力和巨大资源潜力，使页岩气资源正式成为新的天然气资源和勘探开发目标。同期(20 世纪 80~90 年代初)，美国天然气技术协会(GTI)集中研究了美国页岩气的资源潜力与提高采收率技术等问题；1980 年美国政府颁布实施的《能源以外获利法》第 29 条税收补贴政策也为美国页岩气的发展起到了重要的推动作用。这期间实现了阿巴拉契亚、密执安等盆地页岩气的大规模开发



图 1 全球页岩气勘探开发形势示意图[1-5]

Fig. 1 Global situation of shale gas exploration and development

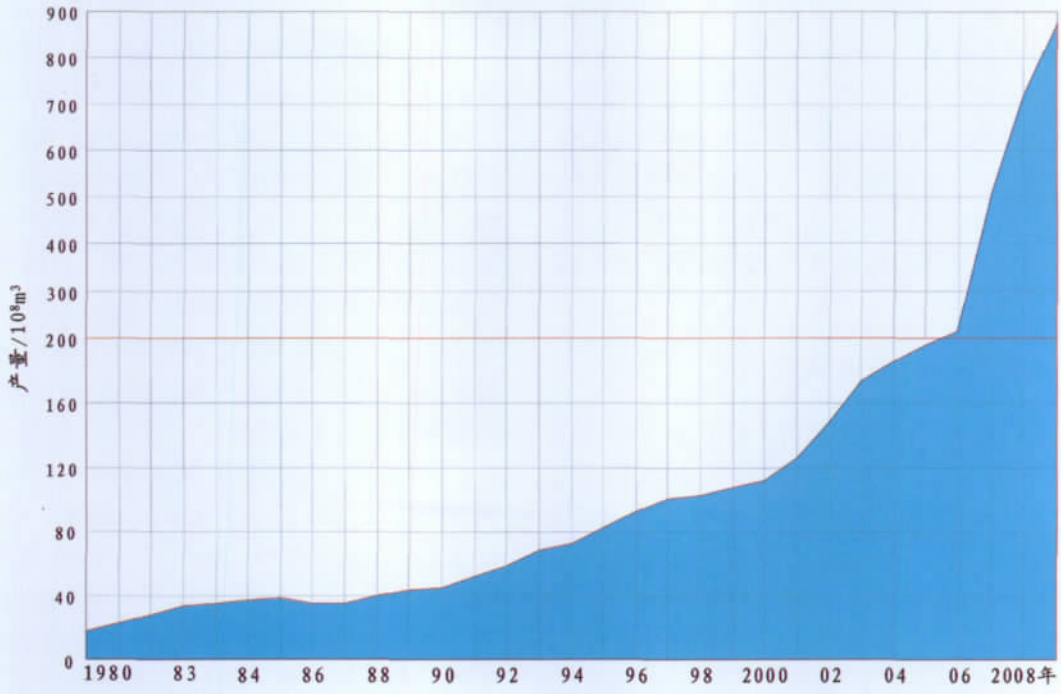


图 2 美国页岩气年产量变化图[4]

Fig. 2 Annual variation of shale gas production in U.S.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

和产量的稳定增长(图 2)。尤其值得关注的是页岩气革命之父——George P. Mitchell,基于 18 年的页岩气开采技术攻关与勘探开发实践[6],于 1981 年在美国中南部沃斯堡盆地密西西比系 Barnett 页岩中钻探的 MEC1C.W.Slay 井,通过氮气泡沫压裂,成功地实现了 Barnett 页岩气的工业化开采,发现了 Newark East 页岩气田(1982),由此将页岩气产区从美国东部迅速推向了中南部地区。MEC1C.W.Slay 井从 1981~1993 年的 12 年间累计产气 600×10^4m^3,1995 年再次实施大型凝胶二次压裂,2 年半时间内再产气 82×10^4m^3,1998 年又一次关井并实施第三次加砂压裂,近 10 年累计产气 2850×10^4m^3,目前仍日产气约 0.9×10^4m^3。目前,Newark East 页岩气田为美国第一大气田,探明可采天然气储量 7400×10^8m^3,2008 年年产气 460.2×10^8m^3[7]。1979 年到 1990 年美国页岩气产量增加了 2.5 倍。

1990~2000 年为页岩气大发展阶段。这 10 年,美国页岩气成为最活跃的天然气开发目标。随着钻完井技术的进步、大型水力压裂技术的突破和输气管道的规模化建设,借鉴 Antrim 页岩气的成功开发经验,实现了阿巴拉契亚盆地 Ohio、伊里诺伊盆地 New Albany、沃斯堡盆地 Barnett 和圣胡安盆地 Lewis 页岩气的规模开采,美国页岩气产量大幅度增长,至 2000 年页岩气井达 28000 口,页岩气年产量突破 100×10^8m^3(Hill 和 Nelson,2000)。

2000~2006 年为页岩气快速发展阶段。水平井钻完井、大型水力压裂、重复压裂等技术的推广应用,沃斯堡盆地 Barnett 页岩气的规模开发,使美国页岩气的发展进入了一个快速发展阶段。2001 年沃斯堡盆地 Barnett 页岩气区钻井数突破 1000 口,年产气量达 38.2×10^8m^3,2004 年西南能源公司在阿科马盆地发现 Fayetteville 页岩气区,沃斯堡盆地 Barnett 页岩气年产量突破 100×10^8m^3(108×10^8m^3),跃居美国第 2 大气田。2000 年到 2006 年的 5 年时间里美国页岩气产量再次翻番,年产量突破 200×10^8m^3。

2007 年至目前为页岩气高速发展阶段。近年来,随着对页岩气地质认识的创新,水平井钻完井、大型水力压裂、分级压裂、多井同步压裂等技术的不断突破,“工厂式”批量生产作业模式的规模推广应用,北美页岩气跨入了高速发展阶段,超过了致密砂岩气和煤层气。目前已在美国东部、中南部、西南部、西北部和西加拿大地区的 50 余个盆地 46 套页岩层中确定有页岩气存在,几乎包括北美地区所有的海相烃源岩(图 3)。页岩气年产量超过 50×10^8m^3的页岩有 Woodford(52×10^8m^3)、Montney(62×10^8m^3)、Haynesaville (93×10^8m^3)、Fayettville (145×10^8m^3) 和 Barnett(475×10^8m^3)(图 4)[4]。页岩气开发深度由早期的 180~2000m 加深至 2500~4500m,个别盆地达 6000 m;生产井数年增 3500~4500 口(增幅 10%~15%),2009 年累计达 50000 口以上,尤其是水平井数量大幅增加,占当年井数的 75%以上;水力压裂等技术的突破减少了储层改造费用 65%,最终采收率提高了 20%。在过去 10 年里,美国页岩气产量增加了近 10 倍,近年来实现了年年翻番;加拿大自 2000 年进行西加拿大盆地群的页岩气研究和勘探开发先导试验以来,2007 年实现了页岩气产量突破。2009 年北美页岩气上表产量达 950×10^8m^3(其中美国为 878×10^8m^3,加拿大为 72×10^8m^3),还有大量中小公司的产量未计入其中[4],页岩气产量已占到北美天然气总产量的 12%,成为影响北美地区乃至全球天然气格局的重要战略资源。

1.2　中国页岩气勘探开发态势

页岩气在中国并不新鲜,自 1667 年第一次在四川盆地的邛 1 井发现天然气以来,就不断有页岩气的发现,尤其是 20 世纪 60 年代以来,已在松辽、渤海湾、四川、鄂尔多斯、柴达木等几乎所有陆上含油气盆地中发现了页岩气或泥页岩裂缝油气藏(图 5)。1966 年在四川盆地威远构造钻探的威 5 井,在 2795~2798m 井深寒武系筇竹寺组页岩中获日产气 2.46×10^4m^3,成为中国早期发现的典型的页岩产气井[1]。2000 年以来,中国政府及相关企业就已高度重视页岩气的勘探开发,密切注视北美页岩气的发展动态。近年来,更是将页岩气的勘探开发提到重要日程。2006 年中国石油与美国新田石油公司进行了首次页岩气国际研讨,2007 年进一步开展了威远地区页岩气潜力与开发可行性联合研究;2008 年国土资源部在全国油气资源战略选区调查与评价专项中确立了中国重点地区页岩气资源潜力和有利区带优选项目。中国石油等国内石油企业开始与丹文、埃克森美孚、康菲、壳牌等公司进行广泛的交流与选区评价。中国石油勘探开发研究院在上扬子地区古生代海相页岩地层广泛露头区地质调查与老井资料复查的基础上,在四川盆地南部钻探了中国第一口页岩

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

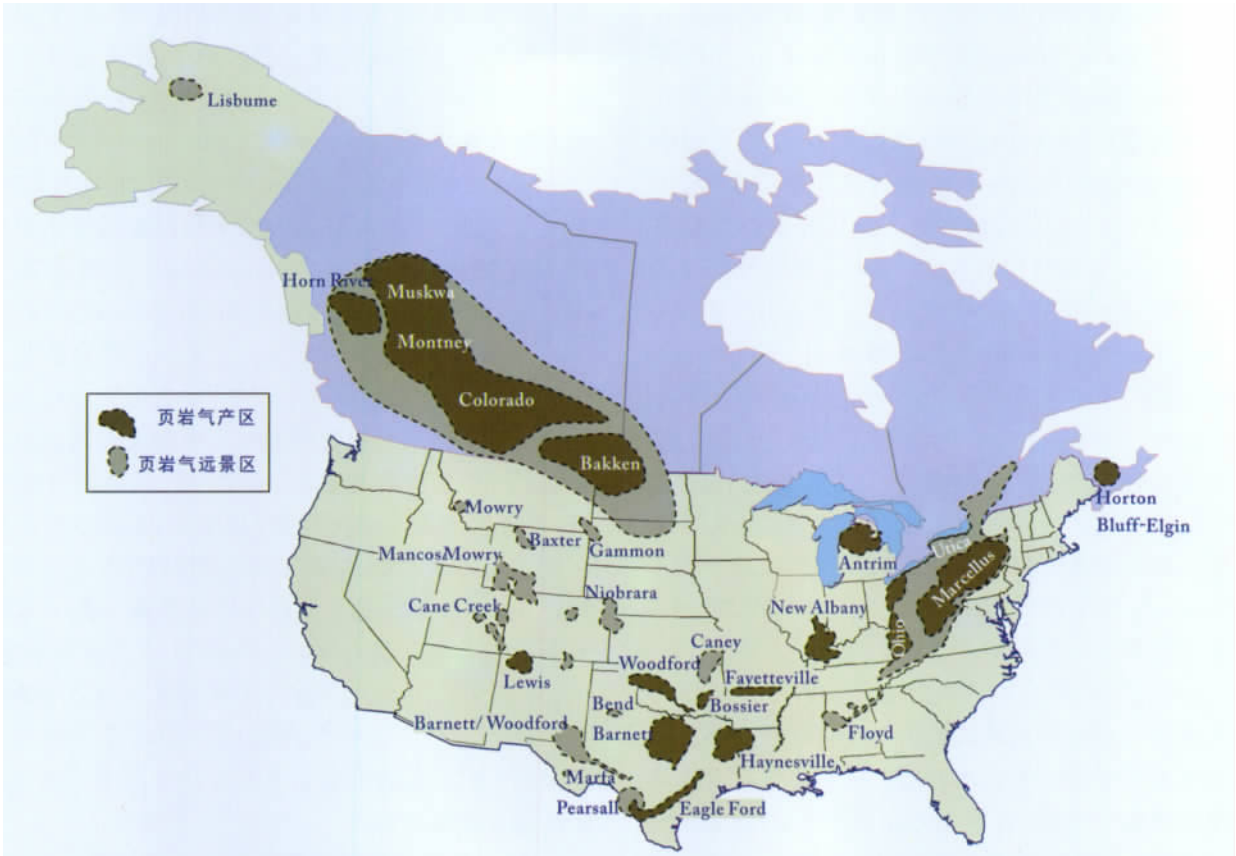


图 3 北美主要含气页岩分布示意图(据 Fred P Wang,2010)

Fig. 3 Distribution map of the major shale gas in North America

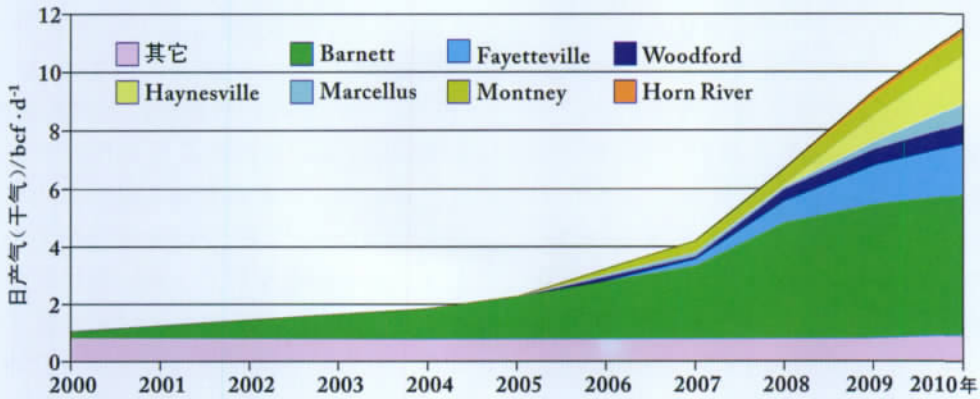


图 4 北美主要页岩产气量统计(据 Schlumberger,2010)

Fig. 4 Statistics of major shale gas production in North America

气地质井——长芯 1 井，获取了大量页岩气地质信息，对四川盆地南部和上扬子地区页岩气的前景做了明确判断;2009 年中国石油与美国、挪威等国专家组织召开了页岩气国际研讨会,与壳牌(Shell)公司在四川盆地富顺-永川区块启动了中国第一个页岩气国际合作勘探开发项目，在四川盆地威远—长宁、云南昭通等地区率先开展了中国页岩气工业生产先导试验区建设。国土资源部与中国地质大学在四川盆地东部钻探了地质调查井——渝页 1 井,探索了页岩地层广泛出露区和高陡构造复杂区的页岩

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

气勘探前景。2009 年 11 月美国总统奥巴马访问中国期间,与中国签署了《中美源于在页岩气领域开展合作的谅解备忘录》;2010 年中国石化与英国石油公司(BP)在贵州凯里、苏北黄桥等地着手合作开采页岩气。中国石油与康菲、挪威国家石油合作开展四川盆地中南部页岩气前景评价和勘探开发。中国石油勘探开发研究院、中国石油西南油气田公司综合运用伽马能谱仪、元素捕获仪、探地雷达、陆地激光三维全信息扫描仪等新技术,开展了中国南方古生界页岩露头地质调查与实测,在四川盆地长宁地区建立了中国第一个海相页岩地层数字化标准剖面——长宁双河上奥陶统五峰组—下志留统龙马溪组页岩地层剖面。国土资源部、石油企业和相关科研院校开展了中国扬子地区页岩气资源调查与选区评价示范区建设,其目标为今后 10 年内对中国页岩气资源展开全面系统的调查与评价,到2020 年在中国优选出 20~30 个有利的勘探开发区,实现页岩气年产量(150~300)×10^8m^3,使中国页岩气占天然气消费量的 5%~10%,成为影响中国未来天然气工业发展,乃至整个能源格局和国家战略的重要资源之一[8]。总之,借鉴北美页岩气勘探开发经验、广泛的国际交流与合作,目前中国已在南方多个地区开展针对古生界海相页岩地层的页岩气工业化勘探开发试验区建设,正在进行扬子、鄂尔多斯、塔里木、渤海湾、松辽等盆地或地区的页岩气基础研究和前期评价。利用地质类比,预测了中国页岩气资源潜力。但中国的页岩气勘探开发和相关研究起步较晚,目前总体仍处于起步阶段。

1.3　世界其它地区页岩气勘探开发动态

页岩气的勘探开发自 2005 年以来,逐渐由北美扩展到了全球,目前世界各国均在着手进行页岩气研究、页岩气资源潜力评价和勘探开发先导试验。2007 年欧洲启动了由行业资助、德国国家地质实验室协助的为期 6 年的欧洲页岩气项目(GASH),期望通过该项目的实施,收集有关欧洲地区的页岩样品、钻井测试和地震资料,建立欧洲黑色页岩数据库,对欧洲页岩气资源潜力进行评价与有利盆地优选。目前,在 5 个盆地发现了富有机质黑色页岩,初步估算页岩气资源量至少在 30×$10^{12}m^3$ 以上[4]。埃克森美孚、丹文、道达尔、康菲、壳牌等至少 40 家企业在欧洲寻找页岩气。挪威石油(Statoil)、切萨皮克(Chesapeake)、萨索尔(Sasol)等公司对南非的页岩气前景进行了联合评价,并取得了 Karoo 盆地页岩气资源探矿权。澳大利亚 Beach 石油公司在大洋洲 7 个盆地发现了富有机质页岩,前期评价资源潜力大,计划对 Cooper 盆地的页岩气进行开发,已在新西兰获得单井工业性突破。亚洲多个国家开展了页岩气资源调查和先导性试验,中国已在页岩气勘探开发方面取得了明显的成效[9]。

2　页岩气基本特征

页岩气为完全的、独立的、自生自储的含油气系统,富有机质黑色页岩本身就是源岩、储层和封盖层,为源储一体、原位持续聚集、早成藏的典型源岩气藏。关于页岩气的基本特征,已有不少学者做过论述。本文通过对北美典型产气页岩的解剖、相关统计分析等研究,认为页岩气确实独具特征,既不同于常规天然气,也有别于致密岩性气、煤层气等非常规天然气,具有 5 个重要的地质与开发特征[1-2,10-18]。

(1)页岩气可形成于有机质沉积、演化的各个阶段,包括生物气、干酪根热降解气和原油热裂解气。根据北美页岩气发展史和对各产气页岩天然气成因的分析(表 1),页岩气以热成因为主,热成因气来源于干酪根热降解和液态烃热裂解,在特殊条件下可存在生物成因页岩气。研究表明,页岩产气能力与热成熟度密切相关,一般生物成因页岩气产量低,热成因页岩气产量高。进一步研究发现,高产富集页岩气的成熟度 R_o 分布于 1.0%~3.2%之间,以 R_o>2.0%为主体[7]。

(2)页岩气储层致密,以纳米级孔隙为主。页岩气储层为富有机质页岩及与其薄互层存在的粉砂-极细砂岩、泥灰岩等致密岩类,据 Robert 等[18]的研究,页岩气储层主要发育孔隙直径小于等于 0.75μm 的微孔—纳米孔隙(图版Ⅰ),尤以纳米级孔隙为主要孔隙类型,具有极低的孔隙度和超低渗透率。孔隙度小于 4%~6.5%,未压裂页岩的基质渗透率小于 100nD,在断裂或裂缝发育区孔隙度会提高到 10%、渗透率提高到 200nD。据对 Barnett 页岩的研究[10],其孔隙大小比常规砂岩的孔隙小 400 倍,约为 40 个甲烷分子直径大小(甲烷分子直径为 0.38nm),孔隙度 4%~10%,渗透率 50~1000nD。

(3)页岩气在成藏、开采机理上与其它类型天然气有明显的不同。页岩气气体主要以吸附、游离 2 种

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

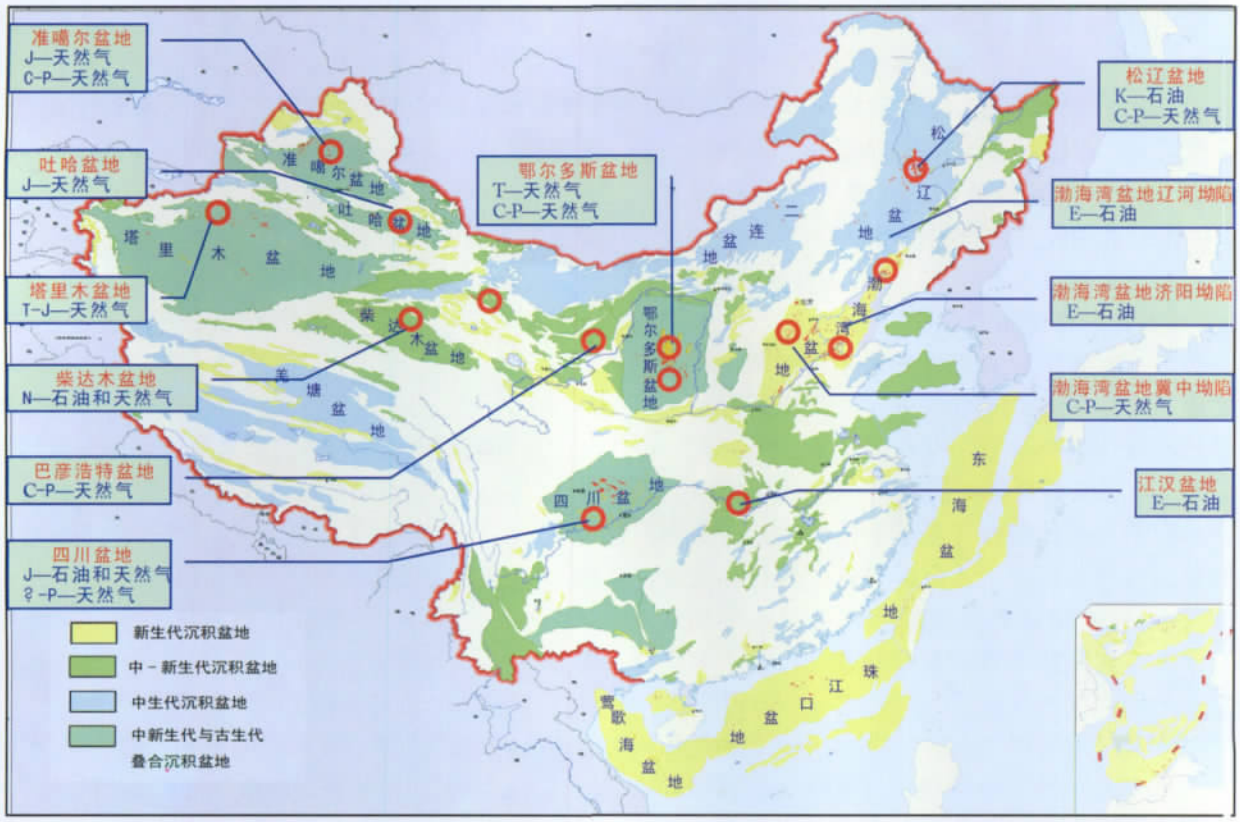
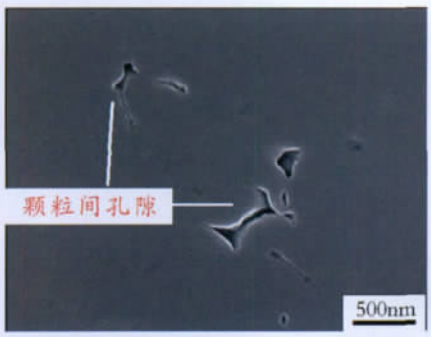


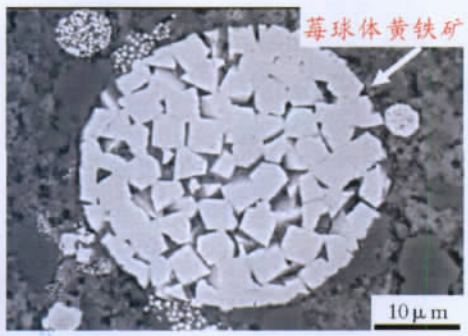
图 5 中国陆上部分沉积盆地泥页岩中气(油)显示分布图

Fig. 5 Distribution of oil and gas in mud shale of continental basins in China

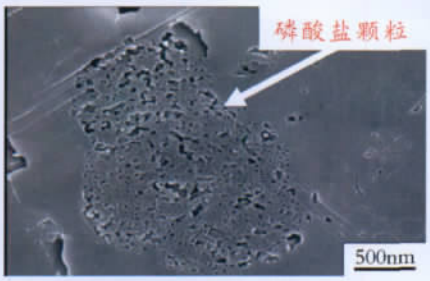
图版 I [21] Plate I



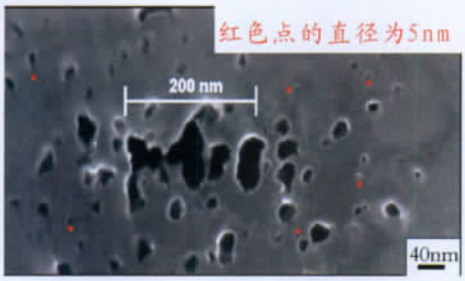
颗粒间孔隙:宾夕法尼亚页岩,3188.2m



黄铁矿莓状体晶粒间孔隙:Barnett 页岩



磷酸盐颗粒内孔:Pearsall 页岩,2697.2m



有机质孔隙:Barnett 页岩,2167.4m

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 1　美国主要产气页岩的基本特征[5-7,10,19-20]

Table 1　Basic characteristics of major shale gas production in U.S.

页岩名称	时代	含气面积 /km²	深度 /m	净厚度 /m	TOC /%	有机质类型	R_o /%	页岩气成因	总孔隙度 /%	含气量 /m³·t⁻¹岩石
Barnett	C_1	15500	1981~2926	31~183	2.0~7.0	Ⅱ	1.1~2.0	热成因	4.0~5.0	8.50~9.91
Fayetteville	C_1	23310	305~2287	6~76	2.0~9.8	Ⅱ	1.2~4.0	热成因	2.0~8.0	1.70~6.23
Woodford	D_3	28490	1829~3353	37~67	1.0~14.0	Ⅱ	1.1~3.0	热成因	3.0~9.0	5.66~8.50
Haynesville	J_3	23310	3048~4115	61~91	0.5~4.0	Ⅱ	2.2~3.0	热成因	8.0~9.0	2.83~9.34
Marcellus	D_2	246050	475~2591	15~304	3.0~12.0	Ⅱ	1.5~3.0	热成因	约 10.0	1.70~2.83
Antrim	D_3	31080	183~732	21~37	1.0~20.0	Ⅰ	0.4~0.6	生物成因	约 9.0	1.13~2.83
New Albany	D_3	112665	152~1494	15~122	1.0~25.0	Ⅱ	0.4~0.8	生物、热成因	10.0~14.0	1.13~2.27
Lewis	K2	10000	914~1829	61~91	0.45~2.5	Ⅲ	1.6~1.9	热成因	3.0~5.5	0.4~1.3

状态赋存。吸附气含量一般为 20%~85%,并随深度不同有较大的变化，这一赋存形式类似于煤层吸附气,但其吸附气量小于煤层吸附气(85%以上)。游离气含量一般为 80%~20%,和常规天然气相似,储层物性愈好,游离气含量愈高。开采机理上,页岩气早期产出以游离气为主,类似常规天然气;后期产出以吸附气的解吸、扩散为主,类似煤层气。与二者的差异在于页岩气开采一般不产水，不需要排水降压采气,煤层气、致密岩性气和多数常规天然气的开采均有水的产出。

(4)页岩气大面积连续分布,资源规模大。产气页岩是含油气盆地中的主力烃源岩，大面积连续分布于盆地中心、沉积坳陷和区域构造背景斜坡区。一般地,烃源岩形成的油气 10%~20%赋存到常规储层中,80%左右储存在非常规储层中,这部分油气资源在烃源岩内的可占 50%以上。如沃斯堡盆地下石炭统 Barnett 富有机质页岩发育面积 18000km²，已证实的页岩气面积 12950~15500km²，页岩气资源量 $9.26\times10^{12}m^3$。2009 年底探明常规天然气储量 $133.1\times10^8m^3$,探明页岩气储量 $1.25\times10^{12}m^3$[5]。四川盆地古生界下志留统龙马溪组、下寒武统筇竹寺组富有机质页岩发育面积 4.5×10^4~$13.7\times10^4km^2$，估算的埋深小于 4000m 的页岩气资源为$(4.12\sim10.3)\times10^{12}m^3$[1-2,11-16],与四川盆地常规天然气资源量相当。值得一提的是，页岩气源储一体，含气范围与有效气源岩相当,没有明显的圈闭界线,分布不受构造的控制。但资源丰度偏低,一般小于 $2\times10^8m^3/km^2$(可采资源丰度小于 $0.6\times10^8m^3/km^2$),在勘探开发中应寻找高产富集核心区。

(5)单井产量低,生产周期长,采收率变化较大[22]。据北美页岩气开发成果,所有页岩气井初期裸眼测试无天然产能或初始无阻流量没有工业价值,都要实施储层压裂改造才可获得工业气流。目前,北美页岩气开发为“地毯式”钻井、“工厂化”生产,至 2009 年,累计页岩气开发井约 50000 口,为“多井低产”、“多井低成本”开发的典范。单井初期产量直井一般 2800~8000m³、水平井一般 15000~33000m³[1,10]。但是,页岩气田开采寿命长,一般可达 30~50 年,美国联邦地质调查局(2008)最新数据显示 Barnett 页岩气田的开采寿命可达 80~100 年。另外,统计表明页岩气的采收率变化大,变化范围为 12%~80%。页岩气采收率受埋藏深度、地层压力、有机质丰度、吸附气含量等因素的影响。随着水平井、多级水力体积压裂等钻完井、储层增产改造等技术的进步,页岩气采收率正在逐步提高。

3　页岩气资源潜力与发展前景

3.1　全球页岩气资源潜力

据预测[7],全球页岩气资源量为 $456\times10^{12}m^3$(图 6、表 2),与全球常规天然气($471\times10^{12}m^3$)、煤层气、致密气的总和相当,主要分布在北美、中亚、中国、中东、北非、南美、前苏联等地区。从全球看,除撒哈拉以南的非洲地区与欧洲的页岩气资源可能较少,目前只有北美地区进行了页岩气商业性勘探开发、有较为可靠的储量结论外,AEI(2009)认为 Rogner[7]对全球页岩气资源量的估算较为保守。以北美为例,2008 年 Tristone Capital 对美国 Barnett、Deep Bossier、Haynesville、Fayetteville、Woodford、Marcellus

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

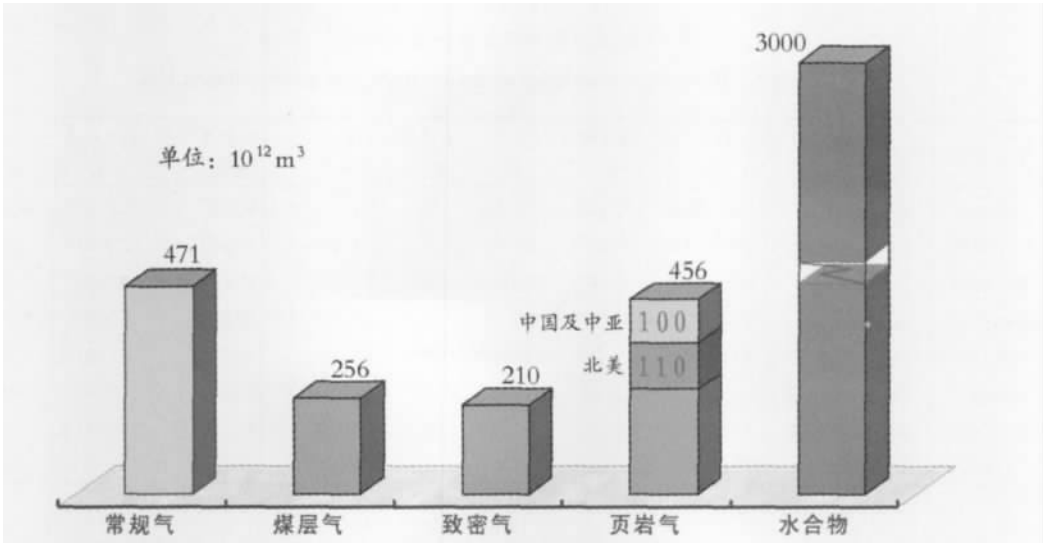


图 6 全球天然气资源预测直方图[8,10]

Fig. 6 Histogram of the global natural gas forecast

和加拿大 Montney、Horn River (Muskwa)、Utica Gothic[5]9 个页岩气区带进行了页岩气资源估算，在不考虑风险因素的情况下，9 个区带的可采资源量为 $21\times10^{12}m^3$(Anonymous，2008)。2009 年 ARI (Advanced Resources International Inc.)对北美 Barnett、Fayetteville、Woodford、Marcellus、Haynesville、Montney 与 Horn River 7 套页岩气进行资源评价，其原地页岩气资源量约 $146\times10^{12}m^3$、可采资源量约为 $20\times10^{12}m^3$。加拿大非常规天然气协会(CSUG)认为加拿大的页岩气原地资源量在 $42.5\times10^{12}m^3$[4]以上，超过了加拿大常规天然气资源量 $12\times10^{12}m^3$，其中加拿大 BC 省页岩气资源量达 $28\times10^{12}m^3$ 以上。Kuuskraa(2009)估算 Montney 和 Horn River 两个盆地的页岩气原地资源量为 $39\times10^{12}m^3$(可采资源量 $7\times10^{12}m^3$)。ARI(2009)对欧洲页岩气资源进行估算，认为欧洲页岩气资源量在 $30\times10^{12}m^3$(可采资源量约 $4\times10^{12}m^3$)以上[4]，未来 10 年，欧洲页岩气的开采将使欧洲的天然气实现自给自足，摆脱俄罗斯的制约。ARI(2009)对非洲南部 Botswana 页岩估算的页岩气资源量约为 $3.9\times10^{12}m^3$(可采资源量大于 $1\times10^{12}m^3$)。同时，发现澳大利亚、新西兰许多盆地也具有页岩气勘探远景，如 Amadeus、Cooper、Georgina 盆地和新西兰东部沿海盆地 Whangai 页岩等。

3.2 中国页岩气资源潜力

3.2.1 中国陆上富有机质页岩发育特征

中国陆上广泛发育海相、海陆过渡相和陆相 3 种富有机质页岩，图 7 是中国陆上富有机质泥页岩的发育与分布略图[1]。在地质时代上，中国陆上发育的富有机质泥页岩地层划为两大地质时期：古生代海相沉积形成的富有机质泥页岩和中新生代陆相沉积形成的富有机质泥页岩。古生代海相泥页岩主要发育在中国南方地区的古生界、华北

表 2 全球页岩气资源分布

Table 2 Global shale gas distribution

地区	北美	南美	西欧	中欧和东欧	前苏联	中东和北非
页岩气 /$10^{12}m^3$	108.7	59.9	14.4	1.1	17.7	72.1
地区	撒哈拉以南非洲	中亚和中国	太平洋地区(经合组织)	其它亚太地区	南亚	全球
页岩气 /$10^{12}m^3$	7.8	99.8	65.5	8.9	/	456

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

地区的古生界和塔里木盆地的寒武系—奥陶系中,为一套有机质丰度高(TOC 为 0.5%~25.7%)、高—过成熟演化(R_o=2%~5%)、富含气(总含气量 0.52~6.02$m^3/t_{岩石}$)的深水陆棚相沉积的硅质页岩、炭质页岩、黑色页岩及粉砂—砂质页岩,分布面积(63~90)×10^4km^2;中新生代陆相富有机质页岩主要发育在中国东部地区松辽盆地白垩系、渤海湾盆地古近系、中部地区的鄂尔多斯盆地三叠系、四川盆地三叠系—侏罗系、西部地区准噶尔盆地侏罗系、柴达木盆地古近系—新近系、吐哈盆地侏罗系和塔里木盆地三叠系—侏罗系中,为一套高有机质含量(0.5%~40%)、低熟—成熟演化(R_o=0.6%~1.5%)、含油含气的半深—深湖相泥页岩,分布面积近(23~33)×10^4km^2。同时,石炭纪—二叠纪还广泛发育一套区域分布的海—陆过渡相煤系泥页岩及高炭质页岩。从岩石类型上,中国陆上的富有机质页岩可分为三大类:第一类为通常意义上的富有机质黑色页岩,主要分布于中国的南方、华北、塔里木三大区域,以海相沉积为主。渤海湾、松辽、鄂尔多斯、准噶尔等主要含油气盆地也有较好的页岩地层。第二类为与煤系地层相关、发育在煤层上下的高炭质页岩,以石炭系—二叠系、三叠系—侏罗系为主,在南方扬子地区、北方广大地区均有分布;第三类为泥岩,以陆相湖泊沉积为主,广泛存在于松辽、渤海湾、鄂尔多斯、塔里木、准噶尔、吐哈、柴达木等盆地和河西走廊等地区的石炭系—新近系中[1]。

3.2.2　中国陆上页岩气资源潜力

中国页岩气的形成和富集地质条件与北美相比,在富有机质页岩发育的广泛性、页岩质量等方面具有许多相似性。但是,由于中国地质条件复杂,尤其是构造体制、沉积环境、热演化过程等方面的差别,中国页岩气的形成、富集存在许多差异。中国古生界海相富有机质页岩分布范围广、连续厚度大、有机质丰度高,但演化程度高、构造变动多;中新生界陆相富有机质页岩横向变化大,以厚层泥岩或砂泥岩互层为主,有机质丰度中等,热成熟度低。针对上述异同,对中国可能的页岩气资源估算难度很大。中国沉积岩面积约 670×10^4km^2,其中海相沉积岩面积近 300×10^4km^2。据类比法预测(表 3),中国陆上富有机质泥页岩有利勘探开发面积约 (100~150)×10^4km^2,厚度20~300m,有机碳含量 0.5%~25.71%,R_o=0.8%~4.5%,页岩气资源潜力为 (86~166)×$10^{12}m^3$。其中古生界海相页岩气资源潜力为(75~147)×$10^{12}m^3$,占页岩气总资源量的 88%,中新生界页岩气资源潜力为(11~19)×$10^{12}m^3$,为页岩气总资源量的 12%。中国页岩气资源勘探开发总体处于探索和突破阶段。鉴于目前北美是世界页岩气唯一成功勘探开发的地区、为海相页岩气的现实,初步评价认为,南方地区古生界海相页岩分布面积广、厚度大、有机质丰富、成熟度高,有利于页岩气的形成与富集,资源潜力大,是中国页岩气勘探开发的现实领域。其中奥陶系五峰组—志留系龙马溪组富有机质页岩面积 42×10^4km^2,厚度 20~700m,平均厚度大于

表 3　中国页岩气资源预测

Table 3　Shale gas resource forecast in China

地区或盆地	时代	面积 /10^4km^2	厚度 /m	有机碳含量 /%	成熟度 (R_o)/%	资源量 /$10^{12}m^3$	气显示情况
扬子地区	Z— J	30~50	200~300	1.0~23.49	2.0~4.0	33~76	气显示与工业气
华北地区	O、C—P	20~25	50~180	1.0~7.0	1.5~2.5	22~38	气显示
塔里木盆地	€—O	13~15	50~100	2.0~3.0	O: 0.9~2.4	14~22.8	气显示
松辽盆地	C—P、K	7~10	180~200	0.5~4.57	0.9~2.0	5.9~10.5	油气显示
渤海湾盆地	E*k–s*	5~7	30~50	1.5~5.0	1.0~2.6	4.3~7.4	油气显示
鄂尔多斯盆地	C—P、T_3	4~5	20~50	2.0~22.21	0.8~1.3	3.4~5.3	气显示
准噶尔盆地	C—J	3~5	150~250	0.47~18.47	1.2~2.3	2.6~5.3	气显示与低产气流
吐哈盆地	C—J	0.8~1.0	150~200	1.58~25.73	0.8~2.0	0.7~1.1	气显示与低产气流
中国页岩气远景资源量期望值: 100×$10^{12}m^3$							

注:E*k–s* 为古近系孔店组–沙河街组时期

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

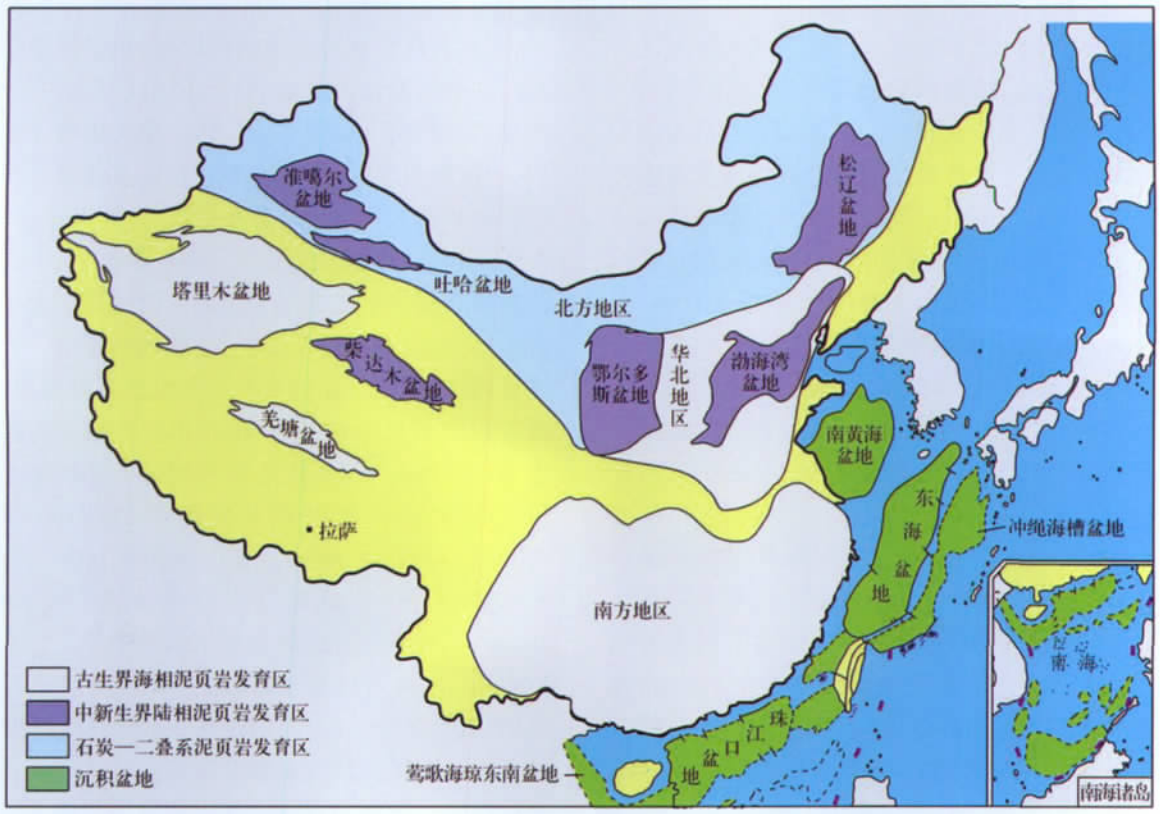


图 7 中国富有机质页岩类型与分布图[1]

Fig. 7 Types of organic-rich shale in China and distribution

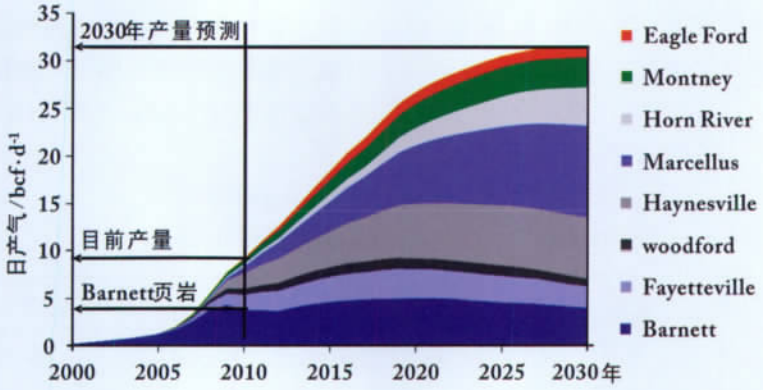


图 8 北美页岩气发展趋势预测图(据斯伦贝谢 乔治.沃特,2010)

Fig. 8 Development trends of shale gas in North America

100m,有机碳含量 1.88%~4.36%,最高约 9.84%,R_o= 2.4%~3.3%;寒武系筇竹寺组富有机质页岩面积 50×10^4km^2,厚度 50~300m,平均厚度大于 120m,有机碳含量 1.5%~5.7%,最高 22.15%,R_o 2.3%~4.1%。以往钻井过程中 2 套页岩气显示普遍,显示率(获气显示井与中钻井数之比)高达 34%,尤其是部分井已获得低产气流和工业气流,将会成为中国页岩气勘探开发率先突破的领域。

3.3 页岩气资源发展前景

据统计,泥页岩约占沉积岩总体积的 55%,从这类分布最为广泛的沉积岩石中成功地商业开采出天然气资源,被认为是过去近 100 年来油气地质理论

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

与工程技术取得的最激动人心的重大成就。目前,页岩气已成为全球高效清洁能源的重大战略接替资源,是天然气勘探开发的重要新目标,其发展速度超过了致密气、煤层气等,究其主要原因:一是北美页岩气资源潜力大、地质认识创新、水平井多级压裂与重复压裂技术进步、天然气价格上升等因素,使页岩气实现了规模、有效的商业开发;二是美国减少了天然气与 LNG 的进口,改变了北美天然气供应格局并引起了全球天然气价格的变化;三是页岩气的快速发展助推了天然气成为全球发展低碳经济的重要能源类型。页岩油气资源是含油气盆地中最后走上勘探开发舞台的一类非常规油气资源,其蕴藏量最丰富。页岩气的商业开发使天然气工业生产结构发生了重大的改变,不可避免地带来了一场能源革命。

有关专家(Fred P Wang,2010)认为 2007~2009 年是北美页岩气年,2010 年是中国和欧洲页岩气起步年。也有专家(乔治.沃特,2010)预测未来 10~20 年,北美地区仍是页岩气快速发展的地区(图 8)。从图 8 可看到北美页岩气产量 2009 年达到 $900\times10^8m^3$ 以上,到 2015 年可能达到 $2000\times10^8m^3$ 左右,2030 年可能上升至 $3200\times10^8m^3$ 左右。国土资源部提出,到 2020 年中国将在全国优选出 50~80 个页岩气有利远景区、20~30 个有利勘探开发区,落实页岩气储量 $10000\times10^8m^3$,实现(150~300)$\times10^8m^3$ 年产能,页岩气产量占中国天然气产量的 8%~12%[8]。中国石油预测(周吉平,2010)到 2020 年中国天然气消费量将达 $3000\times10^8m^3$,届时页岩气的产能将占消费量的 5%~10%。页岩气开发影响着未来中国天然气和非常规天然气的开采,乃至影响整个能源格局和国家战略。

4　结论与建议

4.1　结　论

(1)富有机质页岩含气具有普遍性,含气范围广、资源丰富,地质、开发特征独特。近年来,北美页岩气已成为天然气勘探开发的重要新目标,发展速度惊人,产量快速增长,正在改变全球能源供应的格局。

(2)全球广泛发育富有机质黑色泥页岩,页岩气资源潜力大。页岩气的商业开发不可避免地带来一场能源革命,未来具有非常好的发展前景。

(3)中国陆上发育海相、海陆过渡相、陆相 3 种类型的页岩,古生界海相页岩气具有现实性,煤系高炭泥页岩是值得重点研究的领域,陆相泥页岩可能页岩油与页岩气并存。页岩气资源调查已经起步,有望快速获得突破。中国页岩气有特殊性,搞好资源与选区评价是经济有效开采的关键之一。

4.2　建　议

与北美地台页岩气地质条件相比,中国页岩气的成藏条件与勘探开发前景需进一步评价和证实。为此,建议加快中国页岩气资源潜力评价和勘探开发技术创新。

(1)根据中国富有机质泥页岩发育与分布特征,开展中国富有机质泥页岩全国范围内的地质大调查,摸清中国富有机质泥页岩发育的地质背景和形成条件,预测富含有机质泥页岩的发育与分布,评价中国富有机质泥页岩的成气地质条件,优选有利的富有机质泥页岩。

(2)依据对有利富有机质泥页岩的评价优选,开展中国页岩气形成、富集条件的研究,建立中国页岩气地质理论和资源潜力评价技术,开展系统的中国页岩气资源潜力评价,指导中国页岩气地质选区与勘探开发部署,形成页岩气资源技术标准和规范。

(3)加快中国页岩气勘探开发技术创新,包括页岩气地质、地球物理、地球化学、钻探完井和压裂等技术方法。针对页岩气的基本地质特点和勘探开发的技术难点,自主研发与引进创新相结合,尽快形成页岩气储层评价、水平井钻完井、储层增产压裂等关键技术,逐步形成一批适合中国页岩气地质特点的关键技术。

(4)页岩气勘探开发应“两条腿走路”和分层次进行,以先导试验区的形式推进。“两条腿走路”即对外合作与自主经营 2 条勘探开发途径。按照 3 个层次展开,即:第一层次为现实突破上扬子区(四川盆地及邻区)寒武系、志留系海相页岩,尽快形成产能和勘探开发技术规范;第二层次为开展扬子区古生界海相和北方煤系高炭质页岩(C—P、T—J)资源调查,摸清家底;第三层次是侦察中、新生代湖相泥页岩,为未来准备接替领域。

致谢:本文在编写过程中,得到中国石油勘探开发研究院程克明、李小地,国土资源部油气战略研究中心李玉喜、姜文利,中国地质大学(北京)张金

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

川、丁文龙,中国石油西南油气田公司王世谦、王兰生等专家的指导和支持,在此一并表示真诚的感谢。

参考文献

[1]邹才能,董大忠,王社教,等.中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J].石油勘探与开发,2010,37(6):641-653.

[2]董大忠,程克明,王玉满,等.中国上扬子地区下古生界页岩气形成条件及特征[J].石油与天然气地质,2010,31(3):288-299.

[3]John B Curtis. Fractured Shale-Gas Systems[J]. AAPG Bulletin, 2002,86(11):1921-1938.

[4]Vello A Kuuskraa,Scott H Stevens. Worldwide Gas Shales and Unconvintional Gas:a Status Report. http://www.rpsea.org/attachments/articles/239/KuuskraaHandoutPaperExpandedPresent WorldwideGas ShalesPresentation.pdf.,2009,12.

[5]US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory. Modern Shale Gas Development in the United States:a Primer. http://www.netl.doe.gov/technologies/oil-gas/publications/EPreports/Shale Gas Primer 2009.pdf.2009,4.

[6]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,AAPG Bulletin,2008,92(8): 1164-1180.

[7]《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].石油工业出版社,2009: 1-271.

[8]张大伟.加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想[J].石油与天然气地质,2010,31(2):135-139,150.

[9]李时臻,乔德武,冯志刚,等.世界页岩气勘探开发现状及对中国的启示[J].地质通报,2010,29(6):918-924.

[10]邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(2): 129-145.

[11]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.

[12]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.

[13]王社教,王兰生,黄金亮,等.上扬子地区志留系页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):45-50.

[14]王世谦,陈更生,董大忠,等.四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J].天然气工业,2009,29(5):51-58.

[15]程克明,王世谦,董大忠,等.上扬子区下寒武统筇竹寺组页岩气成藏条件[J].天然气工业,2009,29(5):40-44.

[16]张金川,聂海宽,徐 波,等.四川盆地页岩气成藏地质条件[J].天然气工业,2008,28(2):151-156.

[17]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.

[18]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.

[19]Boyer C. Producing Gas from Its Source. Oilfield Review,2006. 18(3):36-49.

[20]Kondo S, Ishikawa T, Abe I. Adsorption Science. Beijing: Chemical Industry Press, 2001: 31-111.

[21]Robert G Loucks,Robert M Reed,Stephen C Ruppel,et al. Morphology,Genesis,and Distribution of Nanometer-Scale Pores in Siliceous Mudstones of the Mississippian Barnett Shale,Journal of Sedimentary Research,2009,79: 848-861.

[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.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net