

页岩气地质与勘探开发实践丛书·之二

中国页岩气 地质研究进展

《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会 编

石油工业出版社

页岩气地质与勘探开发实践丛书·之二

中国页岩气地质研究进展

《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会 编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了世界页岩气分布与勘探开发现状及勘探开发技术,论述了我国四川威远地区页岩气地球化学特征、成藏分布规律,并对页岩气工业的未来发展做了展望,对我国页岩气研究具有一定的指导意义。

本书可供从事页岩气研究的勘探开发人员及其他从事新能源研究的人员和高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国页岩气地质研究进展/《页岩气地质与勘探开发实践丛书》编委会编. —北京:石油工业出版社,2011.3

(页岩气地质与勘探开发实践丛书)

ISBN 978-7-5021-8030-0

I. 中…

II. 页…

III. 油页岩-石油天然气地质-研究-中国

IV. P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 180759 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址:www. petropub. com. cn

编辑部:(010)64523544 发行部:(010)64523620

经 销:全国新华书店

排 版:北京乘设伟业科技有限公司

印 刷:北京市前进印刷厂

2011 年 3 月第 1 版 2011 年 3 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本:1/16 印张:18.5

字数:372 千字

定价:120.00 元

(如出现印装质量问题,我社发行部负责调换)

版权所有,翻印必究

《页岩气地质与勘探开发实践丛书》

编 委 会

主 任：阎存章

副主任：李鹭光 王炳芳 邹才能 丁 生

编 委：陈更生 黄玉珍 李建忠 董大忠 葛春梅

王世谦 王兰生 李新景 Craig Davis Jim Eisterhold

《中国页岩气地质研究进展》

编 写 组

Anping Yang Craig Davis 陈更生 董大忠 葛春梅

Gary Hill 黄金亮 黄勇斌 黄玉珍 Jim Eisterhold

Jack Breig 李登华 李建忠 李新景 吕维宁 吕宗刚

马 洪 Steve Johnson 王定饶 王兰生 王社教

王世谦 王玉满 徐云浩 蔚远江 张 铭 郑 杰

前 言

随着国民经济的持续快速发展,我国能源供应不足的矛盾日益凸显。2007年,我国原油供给的对外依存度已接近 50%。据中国工程院预测,到 2020 年我国原油供给的对外依存度将增至 55% 以上,天然气进口将达 $800 \times 10^8 \text{m}^3$ 左右。经过近半个世纪的油气勘探,尽管我国目前仍处于油气储量及产量稳定增长阶段,但在油气消费需求与日俱增情况下,为进一步缓解我国油气可持续发展,积极寻找新的接替能源势在必行。

从全球不可再生能源的勘探开发现状分析发现,页岩气是最现实的常规油气资源的重要接替资源之一。页岩气是指以吸附和(或)游离状态为主赋存于富有机质页岩地层中,具有商业开发价值的生物成因和(或)热成因及混合成因的天然气。世界页岩气资源丰富,据美国天然气技术委员会公布的资料,仅密歇根盆地 Antrim 页岩、阿巴拉契亚盆地 Ohio 页岩、沃斯堡盆地 Barnett 页岩、伊里诺依盆地 New Albany 页岩和圣胡安盆地 Lewis 页岩等五大页岩系统的页岩气资源量已达 $12.85 \times 10^{12} \sim 25.14 \times 10^{12} \text{m}^3$,加拿大仅不列颠哥伦比亚省泥盆系的页岩气资源量约为 $7.08 \times 10^{12} \text{m}^3$,占该省天然气总资源的 34%。截至 2007 年,美国是全球唯一商业化生产页岩气的国家,2007 年页岩气产量接近 $500 \times 10^8 \text{m}^3$ (占美国天然气总产量 8% 以上)。

我国各地质历史时期富有机质页岩地层十分发育,海相页岩如扬子地台下寒武统筇竹寺组页岩、下志留统龙马溪组页岩;陆相页岩如鄂尔多斯盆地上三叠统延长组的李家畔、张家滩页岩,吐哈盆地中、下侏罗统的碳质页岩,准噶尔盆地中、下侏罗统的碳质页岩及上二叠统妖魔山组油页岩等。据最新研究成果,我国仅四川盆地川南地区下寒武统筇竹寺组和下志留统龙马溪组两套海相页岩中的天然气资源量就达 $6.8 \times 10^{12} \sim 8.5 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。由此看来,页岩气在我国的勘探开发前景十分广阔,中国的页岩气勘探开发将会迅速发展。

自 2005 年起,中国石油天然气股份有限公司对外合作经理部组织中国石油勘探开发研究院和西南油气田分公司等单位,与美国页岩气专家就美国主要页岩气富集盆地的页岩气藏形成机理、储层特征、开采工艺技术和页岩气资源的经济性进行了多轮研讨。在此基础上,开展了两项工作,一是调研和剖析了美国页岩

气资源有利区域评价方法和特殊的钻、完井工艺技术;二是对中国页岩气资源有利领域与方向进行广泛的筛选与评价,并与美国页岩气生产商开展了四川盆地页岩气勘探开发前景联合研究。《页岩气地质与勘探开发实践丛书》就是在此研究成果的基础上编写的。

本书是页岩气研究的一个阶段性成果,书中的错误及不足之处,敬请读者批评指正。

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 世界天然气工业发展现状与趋势	(1)
第二节 世界页岩气藏勘探开发历程与现状	(6)
第三节 中国页岩气藏勘探开发历程与现状	(32)
第二章 页岩气(藏)地质特征	(37)
第一节 页岩气(藏)基本概念	(37)
第二节 页岩气(藏)形成条件	(47)
第三节 页岩气(藏)成藏机理	(63)
第三章 页岩气综合地质评价与开发关键技术	(69)
第一节 页岩气综合地质评价	(69)
第二节 页岩气开发技术	(89)
第四章 页岩气资源与分布	(105)
第一节 世界页岩气资源与分布	(105)
第二节 美国页岩气资源与分布	(106)
第三节 加拿大页岩气资源与分布	(110)
第四节 中国页岩气资源潜力	(110)
第五章 四川盆地页岩气藏研究与实践	(121)
第一节 区域地质与地层	(121)
第二节 古生界海相页岩地球化学特征	(138)
第三节 古生界海相页岩储层特征	(150)
第四节 页岩气藏储层评价	(161)
第五节 页岩气资源评价	(171)
第六章 威远地区页岩气勘探实践	(184)
第一节 概述	(184)
第二节 构造演化与裂缝特征	(189)
第三节 沉积地层特征	(201)
第四节 烃源岩有机地球化学	(217)
第五节 威远地区页岩气资源估算	(237)
第六节 生产作业	(257)
第七章 非常规天然气资源经济政策	(268)
第一节 全球能源发展动向	(268)
第二节 世界非常规油气资源发展政策	(277)
第三节 中国非常规油气资源发展政策	(283)
参考文献	(288)

第一章 概 述

第一节 世界天然气工业发展现状与趋势

随着经济社会的不断发展,人类的环保意识的不断提高,世界需求洁净能源的呼声日益高涨,加上世界石油多次危机的严重影响,以及主要石油消耗大国天然气工业的快速发展,天然气已被公认为最重要的洁净能源,受到全世界的青睐。随着世界天然气工业的快速发展,天然气消费量高速增长,需求量不断扩大。目前,作为一种高效、优质的洁净能源和化工原料,天然气已成为仅次于石油和煤炭的世界第三大能源,应用领域日益广泛,世界天然气工业正处于“黄金”发展阶段。世界能源发展史表明,能源发展可分为6个阶段,即木柴阶段、煤炭阶段、石油阶段、天然气阶段、核能阶段和太阳能阶段。木柴、煤炭、石油三个阶段已成现实,核能和太阳能将是未来重点发展的能源,唯有天然气目前正处于迅速发展阶段。天然气在世界一次能源中的比重一直在不断提高(图1-1),据BP(2008)世界能源统计(表1-1—表1-3),近20年来,世界天然气探明储量快速增长,2007年世界天然气探明储量达到 $177.4 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较1987年的探明储量增长了70%,年均增长量达到3.5%;与此同时,天然气消费量与产量也大幅度增长。2007年世界天然气产量达到 $2.94 \times 10^{12} \text{ m}^3$,比1987年的 $1.8 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增长 $1.14 \times 10^{12} \text{ m}^3$,增长幅度达63%以上,年均增长幅度约3.2%;世界天然气消费量2007年约 $2.922 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较1987年的 $1.767 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增长了 $1.155 \times 10^{12} \text{ m}^3$,增长幅度达65%,年均增长3.3%。

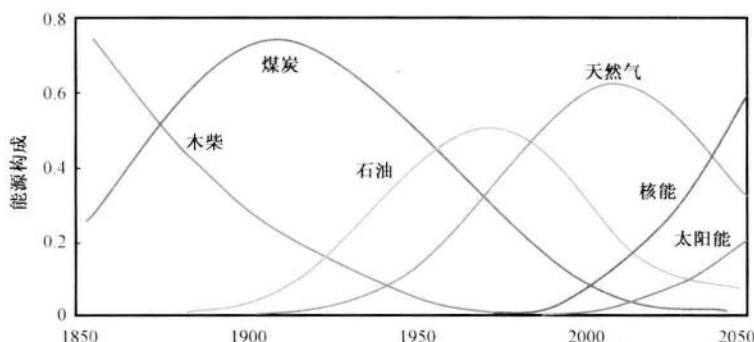


图 1-1 世界能源发展阶段划分示意图

表 1-1 世界天然气探明储量统计表(单位: $\times 10^{12} \text{m}^3$)

地区 年份	北美	中南美	欧洲和 欧亚大陆	中东	非洲	亚太	世界合计
1987	10.1	4.7	45.1	31.2	7.4	8.5	107
1988	9.5	4.8	45.7	34.3	7.7	8.9	110.9
1989	9.5	4.8	54.5	37.8	8.5	9.6	124.7
1990	9.6	5.2	56.9	38.0	8.6	9.9	128.2
1991	9.5	5.3	57.8	42.7	9.5	9.4	134.2
1992	9.3	5.4	59.3	44.0	9.9	9.4	137.3
1993	8.8	5.4	60.7	44.4	10.0	9.8	139.1
1994	8.5	5.8	61.1	45.6	9.1	10.1	140.2
1995	8.5	5.9	60.5	45.4	9.9	10.5	140.7
1996	8.5	6.0	59.7	49.3	10.2	10.4	144.1
1997	8.3	6.2	61.0	49.5	10.6	10.7	146.3
1998	7.2	6.4	60.7	53.2	10.8	11.4	149.7
1999	7.3	6.8	60.4	54.7	11.4	12.2	152.9
2000	7.5	6.9	60.2	59.2	12.5	12.3	158.6
2001	7.7	7.0	60.1	70.8	13.1	13.1	171.8
2002	7.4	7.0	60.0	71.6	13.8	12.9	172.7
2003	7.4	6.8	60.2	72.2	13.9	13.2	173.7
2004	7.5	7.0	59.8	72.1	14.1	13.4	173.9
2005	7.8	6.9	59.7	72.4	14.1	13.5	174.4
2006	8.0	7.6	59.4	73.0	14.5	13.8	176.3
2007	8.0	7.7	59.4	73.2	14.6	14.5	177.4

表 1-2 世界天然气产量统计表(单位: $\times 10^9 \text{m}^3$)

地区 年份	北美	中南美	欧洲和 欧亚大陆	中东	非洲	亚太	世界合计
1987	582.9	49.7	903.2	82	54.8	128.4	1801.2
1988	609.7	54.5	931.8	93.3	58.5	137.5	1885.3
1989	621.8	56.6	957.1	102.3	64.3	143.7	1945.8
1990	639.7	58.8	973.5	101.2	66.9	153	1993.1
1991	642	60.9	978.6	104.5	71.9	165.6	2023.5
1992	657.3	61.2	950.6	114	75.3	177	2035.4
1993	676.5	64.9	942.7	122.9	79.4	187.5	2073.9
1994	708.9	67.8	905.4	134.8	75.3	203.9	2096.1
1995	713	73.7	902	148.9	83.3	214.4	2135.3
1996	727.6	81.8	943.5	158	88.9	230.3	2230.1
1997	735.5	82.8	897.5	175.4	99.4	245	2235.6

续表

地区 年份	北美	中南美	欧洲和 欧亚大陆	中东	非洲	亚太	世界合计
1998	747	88.6	913.8	184	104.8	248.1	2286.3
1999	746.8	91.1	933.3	193.8	117.1	264.7	2346.8
2000	761.6	99.2	958.5	206.8	126.8	274.1	2427
2001	776.8	104	966.4	224.8	126.9	284.7	2483.6
2002	759.2	105.8	987.9	244.7	130.3	300	2527.9
2003	761.7	116.9	1023.6	259.9	139.9	316.8	2618.8
2004	747.9	131.7	1055.2	290.7	145.8	332.5	2703.8
2005	737.4	138.6	1060.6	317.5	165.6	355.8	2775.5
2006	754.4	147.2	1076.3	339	181.6	373.7	2872.2
2007	775.8	150.8	1075.7	355.8	190.4	391.5	2940

表 1-3 世界天然气消费量统计表(单位: $\times 10^9 \text{m}^3$)

地区 年份	北美	中南美	欧洲和 欧亚大陆	中东	非洲	亚太	世界合计
1987	572.4	49.7	907.4	76.6	32	128.6	1766.7
1988	600.9	54.5	935.6	87.4	35.6	138	1852
1989	637	56.5	961.1	95.3	36.9	147.1	1933.9
1990	637.3	58.4	994.1	95.5	38.1	157.2	1980.6
1991	649.8	59	1004.9	98	38.2	170.1	2020
1992	673.4	61	966	110.6	40.3	180.2	2031.5
1993	691.1	64.5	963.3	119	39.9	190.2	2068
1994	707.1	67.1	921.7	130.6	41.9	207.1	2075.5
1995	739.4	73.2	929.4	141.8	44.8	216.6	2145.2
1996	755.4	81.3	976.4	150.7	47.2	238	2249
1997	763.3	82.7	936.3	164.9	46.1	251.8	2245.1
1998	749.4	89.4	960.3	173.7	47.7	258.1	2278.6
1999	758.6	88.8	982.9	180.1	51.2	274.1	2335.7
2000	791.8	95.1	1013.5	185.4	55.5	296.1	2437.4
2001	755.6	99.8	1025.5	198.4	59.5	316.1	2454.9
2002	783.1	101.2	1045.6	215.1	60.8	327.8	2533.6
2003	773	106	1070.7	226.1	66.4	348.8	2591
2004	776.2	117.3	1104.3	252.8	70.8	367.9	2689.3
2005	767.6	124.3	1128.3	276.8	73.3	395	2765.3
2006	761.4	131.3	1151.5	291.4	77.9	420.9	2834.4
2007	801	134.5	1155.7	299.4	83.5	447.8	2921.9

目前,世界天然气工业发展趋势显示,未来相当长一段时间内世界天然气的消费量、产量、探明储量、投入和贸易量都具有进一步持续增长的态势和巨大的潜力,并将在世界能源多元化的进程中起到非常重要的作用。据国际能源机构(IEA,2006)预计,2007—2020年间世界天然气的需求还将增长45%,其发展速度将进一步超过石油、煤炭和其他任何一种能源,特别是在亚洲等发展中国家的增长速度会更快。

天然气工业日益受到人们的关注和快速发展,究其主要原因:首先是天然气有比石油更丰富的资源前景。AAPG地质研究54(2005)的统计表明,在当前技术条件下全球常规天然气可开采资源为 $436.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,目前探明程度仅为50%;非常规天然气(包括致密砂岩气、页岩气、煤层气等,图1-2)的资源量估计达 $3423 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 以上,并有理由相信随着天然气勘探开发理论与技术的发展,这些资源都将成为天然气的重要来源,逐步进入消费领域。其次是天然气的热能利用率非常高。几年以前,燃气电站的天然气热效率尚不足40%,随着相关技术的进步,今天这些燃气电站的天然气热效率已达到60%以上。在一些同时供电和供热的燃气电站中,天然气的热能利用率甚至达到了90%以上。因此,天然气是一种相当经济的高效能源。第三,天然气的污染程度非常低。研究表明生产等量的电能或提供等量的热能,天然气在燃烧过程中排放的二氧化碳在所有矿物能源中是最少的,其比石油低25%、比煤炭低40%;在燃烧过程中排放的二氧化硫和氮氧化物也要比燃油和燃煤所排放的量少得多。因此,以天然气为能源不仅有利于缓和大气温室效应,也有助于减少酸雨的形成。第四,随着天然气地质勘探与开发理论不断深化、开发技术的发展和利用手段的进步,越来越多的常规天然气勘探新领域被发现、越来越多的非常规天然气资源被开发和利用。

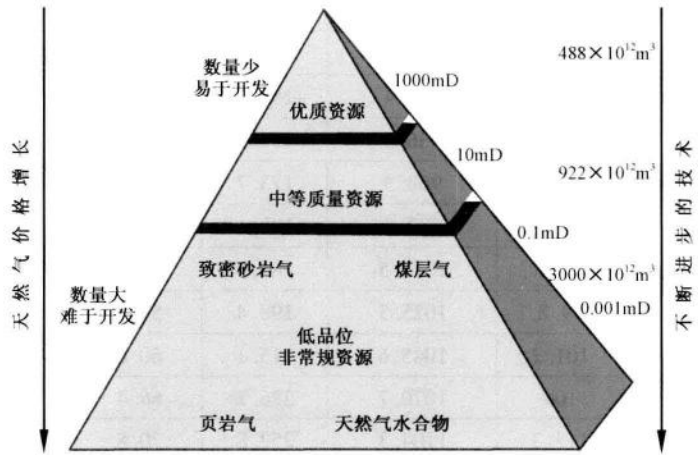


图1-2 天然气资源构成示意图(据霍迪克,1990)

非常规天然气是指储集在地质条件复杂的非常规储层中的天然气。非常规储层包括煤层、页岩、致密岩性(砂岩、碳酸盐岩)等。实际上,从长远观点看,天然

气水合物、生物甲烷气、水溶气等也是非常规天然气。非常规天然气的主要特征是① 资源量大,甚至是巨大;② 通常为低丰度,但在局部地区高度富集,形成“甜点”;③ 要有效地开发,必须改进勘探开发技术,如天然裂缝的检测技术、储层评价技术、低成本钻井和完井技术等。目前,在全球常规油气勘探领域整体不断深入、勘探开发难度不断增加、优质资源不断减少,煤层气、致密砂岩气、页岩气等非常规天然气资源能够有效开发的背景下,积极探索、寻找更多非常规天然气资源开发领域,进一步实现规模、高效开发,已成为世界各国共同发展的目标。据统计,2007 年全球非常规天然气产量已接近或超过 $5000 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 1-3),其中北美是煤层气、致密砂岩气、页岩气等非常规天然气资源综合开发最成功的地区之一(图 1-4)。较高的天然气价格和非常规天然气开发技术上取得的重要进展,已使得近年来北美地区的非常规天然气产量大幅度增长,预计这一趋势将继续扩大。据 Calgary(2007)预测,北美地区非常规天然气产量从 2007 年到 2020 年将进一步增加,在天然气总生产量中的比例从 2007 年的 46% 增加到 2020 年的 53%。到 2020 年,美国天然气生产总量的 69% 将来自于非常规天然气,其中页岩气产量预计将从 2007 年的 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2020 年的 $1359 \times 10^8 \text{ m}^3$,致密砂岩气产量预计将从 2007 年的 $1642 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2020 年的 $2605 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

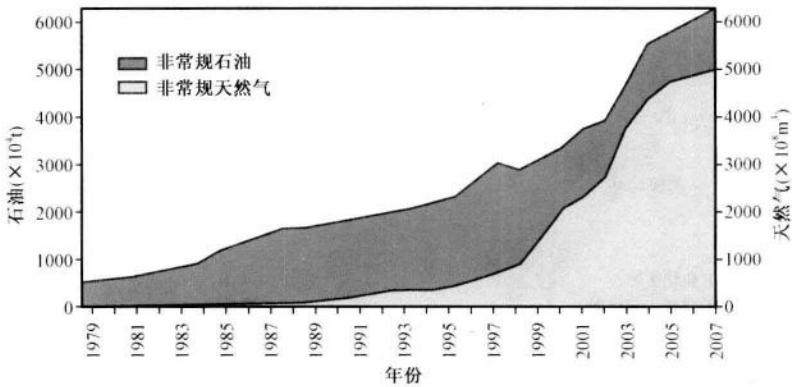


图 1-3 全球非常规油气年产量统计图

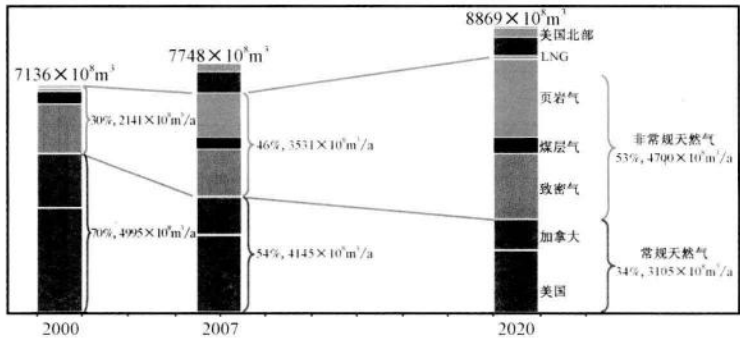


图 1-4 北美地区非常规天然气增长趋势预测图(据 Calgary 修改,2009)

第二节 世界页岩气藏勘探开发历程与现状

页岩气是一种典型的非常规天然气,在页岩气藏中,页岩地层既是气源岩也是储层及盖层。页岩气主要以吸附状态和游离状态两种形式存在于页岩地层中。具脆性的页岩地层与天然微裂缝发育(区)是有利页岩气藏的开发目标。页岩储层孔隙度、渗透率极低,只有采用先进的增产措施才能实现页岩气的商业性开发。

世界页岩气资源非常丰富,主要分布在北美、中亚和中国。图 1-5 为全球页岩气发展状况图。全球第一口页岩气井 1821 年钻成于美国东部的阿巴拉契亚盆地的泥盆系,20 世纪 70 年代以后进入商业性开发,至今已有近 200 年的发展历史。美国是世界实现页岩气商业性勘探开发最早的国家,在阿巴拉契亚、密歇根等多个盆地成功地实现了页岩气商业性开采,2007 年美国页岩气生产井达 41700 多口,页岩气年产量接近 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 1-6)。2005 年以来,加拿大在其西部地区开始进行大规模页岩气资源潜力评价及开发先导性试验,2007 年页岩气产量约 $10 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。中国对页岩气的研究始于 2005 年,页岩气的勘探开发仅处于探索阶段。



图 1-5 全球页岩气发展国家或地区分布示意图

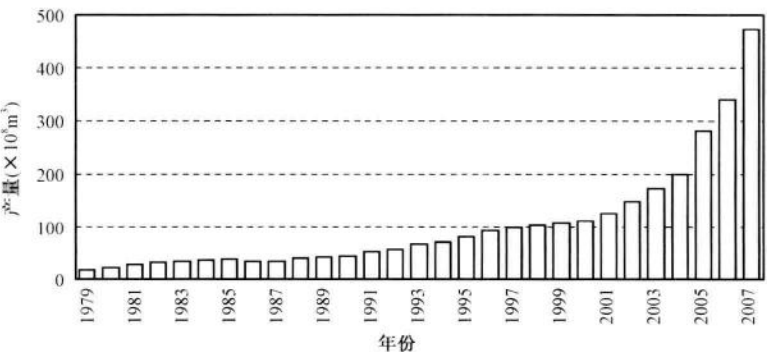


图 1-6 美国页岩气产量统计(据 J. B. Curtis, 2007)

一、美国页岩气藏勘探开发历程及现状

美国产气页岩主要分布在陆上古生界和中生界,最初(1821年)的商业性天然气产量来源于阿巴拉契亚盆地富含有机质的泥盆系页岩中。早在1627—1669年,法国的勘测人员和传教士就对阿巴拉契亚盆地富含有机质的黑色页岩进行过描述。他们所提到的石油和天然气现在被认为来源于纽约西部的泥盆系页岩。1821年被公认为是美国年轻的天然气工业的开端。第一口气井是在纽约 Chautauga 县泥盆系 Dunkirk 页岩中完井的。天然气用于 Fredonia 城市的照明。这种发现比在宾夕法尼亚石油小溪发现著名的德雷克油井早 35 年。Peebles(1980)对这段历史事件提供了如下资料:

在靠近 Canadaway 河流的地方,一群小孩意外的引燃了天然气气苗,从而使当地市民发现了这种“燃烧泉”的潜在价值。市民们钻了一口 8.22m 深的井并用小空心圆木管把天然气输送到附近的房子中用于照明。这些原始圆木管后来被 1.905cm 的铅管所替代,这种铅管是由当地的军械工人 William Hart 制造出来的。William Hart 把 7.62m 深处的天然气注入到一个倒置的装满水的大水槽中(称之为“贮气罐”),并从天然气发现处到 Abel House(当地的一个小旅馆)铺设了管线,从而使天然气在当地用于照明。1825 年 12 月, Fredonia 市的新闻人物宣称:“我们在 12 月 31 日晚上亲眼看到了由贮气罐供给的天然气点燃的 66 个漂亮的煤气灯和 150 个照明灯。现在有充足的天然气供应给其他的贮气罐。”Fredonia 的供气被称为“在世界上是前所未有的”。到 1863 年,在伊利诺伊盆地肯塔基西部泥盆系和密西西比系页岩中也发现了天然气。到 20 世纪 20 年代,页岩气已发展到弗吉尼亚西部、肯塔基和印第安纳。到 1926 年,肯塔基东部和弗吉尼亚西部的泥盆系页岩气田已成为世界上最大的已知气田。

20 世纪 70 年代中期,美国能源部在美国东部启动了页岩气研究项目。作为地质、地球化学和石油工程等一系列研究的重点在于研究增产措施。20 世纪 80 年代和 90 年代初期,美国天然气研究所(GRI,现在称为天然气技术研究所(GTI))基于这项研究,对美国泥盆系和密西西比系页岩中天然气潜力进行了比较完整的评价并提高了天然气产量。由于上述突出工作,将人们的目光引向了页岩气,实现了北美页岩气的成功开发利用,且其发展速度非常之快。目前,北美页岩气的发展已超过了煤层气,尤其是美国,页岩气的大规模商业性开发已进入高速发展阶段。据统计,自 20 世纪早期—2000 年,美国只在密歇根盆地(Antrim 页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio 页岩)、伊里诺依盆地(New Albany 页岩)、沃斯堡盆地(Barnett 页岩)和圣胡安盆地(Lewis 页岩)等 5 个盆地生产页岩气,页岩气井约 28000 口(Hill 和 Nelson, 2000),页岩气年产量仅 $112 \times 10^8 \text{ m}^3$,从事页岩气生产的公司只有几家。到 2007 年,美国已在密歇根盆地(Antrim 页岩)、阿巴拉契亚盆地(Ohio 页岩)、伊里诺依盆地(New Albany 页岩)、沃斯堡盆地(Barnett 页岩)、圣胡安盆地(Lewis 页岩)、阿科马盆地(Woodford 页岩、Fayetteville 页岩)等 20 余个盆

地发现了页岩气藏并成功开发,页岩气生产井增加到 41726 口 (Curtis, 2007),页岩气年产量已接近 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 1-6), 约占美国天然气年产量的 8% (Exxon-Mobil, 2008), 从事页岩气生产的公司已达 60 ~ 70 家。尤其是沃斯堡盆地的 Barnett 页岩是目前美国最大的页岩气产区, Devon 公司 1981 年在沃斯堡盆地发现的 Newark East 页岩气田, 其年产量自 2000 年起成为得克萨斯州最大的气田及全美第二大气田, 2007 年页岩气产量 $217 \times 10^8 \text{ m}^3$, 单井最高日产量达 $9.99 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。目前, 参与沃斯堡盆地 Barnett 页岩气开发的公司有 Devon、Chesapeake、XTO、EOG、Burlington 以及西南能源公司等, 页岩气生产井 8500 口, 2000—2007 年所钻页岩气生产井 8588 口 (图 1-7), 其中水平井 5237 口, 年产页岩气约 $315 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国页岩气年产量的 70% 左右。

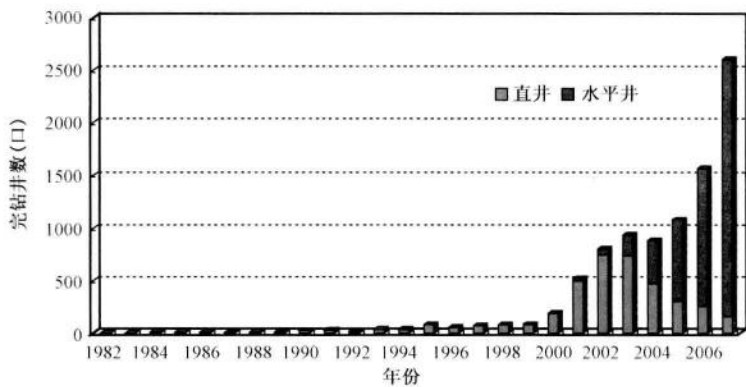


图 1-7 沃斯堡盆地 Barnett 页岩气钻井数量统计图 (据 J. B. Curtis, 2007 修改)

美国的页岩气主要发现于古—中生界 (D—K) 海相地层中, 目前勘探开发正由东北部地区的阿巴拉契亚、密歇根、伊利诺伊等盆地, 中南部地区的沃斯堡、阿科马盆地向中西部地区的威利斯頓、丹佛、阿纳达科等盆地扩展。美国天然气研究所和 Curtis 等近年发布的资料表明, 美国落基山地区盆地中的页岩气资源量为 $1120 \times 10^8 \text{ m}^3$, 逐渐形成了区域性页岩气勘探开发的良好局面。

(一) 美国页岩气钻、完井快速发展

不断攀升的天然气价格和快速发展的页岩气藏勘探开发技术极大地刺激了全美页岩气藏的勘探开发热潮。近年来, 除沃斯堡盆地 Barnett 页岩的生产井数有大幅度增加并将继续增加外, 美国其他盆地的页岩地层正在被证实具有较好的页岩气生产前景。美国页岩气钻、完井数 2004 年为 2900 余口/年, 2005 年增加到 3400 多口/年, 2006 年超过了 3600 口/年, 2007 年进一步增加到 4185 口/年, 至 2007 年全美已累计完钻页岩气井 41726 口。据不完全统计, 2000 年以来, 全美页岩气钻井数量年增 10% 以上, 累计增加了 75% 以上, 2005 年以来, 页岩气钻井数量年增 15% 以上, 目前没有任何减缓的迹象。

(二) 美国页岩气产量大幅度增长

图 1-8 为美国主要页岩气产气盆地页岩气藏发现时间简图。自 1821 年在阿巴拉契亚盆地发现第一口页岩气井,到 1981 年美国中南部地区沃斯堡盆地 Barnett 页岩气田的成功开发,以及 Barnett、Woodford、Caney、Fayetteville 和 Floyd 等一批新兴的页岩气聚集带勘探开发前景的证实,与 Antrim、New Albany、Huron、Rhinstreet 和 Marcellus 页岩气层一样,美国地质、工程专家们给予了极大关注。页岩气产量自 2000 年以来快速增长。美国页岩气产量 1991 年近 $44 \times 10^8 \text{ m}^3$, 1997 年增长至约 $100 \times 10^8 \text{ m}^3$, 这一时期的页岩气主要来自阿巴拉契亚和密歇根两个盆地中。1999 年,密歇根盆地泥盆系的 Antrim 生物成因页岩气和阿巴拉契亚盆地泥盆系的 Ohio 热成因页岩产气量约占页岩总产气量 ($107 \times 10^8 \text{ m}^3$) 的 84%, 伊利诺伊盆地、沃斯堡盆地(得克萨斯)和圣胡安盆地(科罗拉多和新墨西哥州)的产量相对较少。但是自 2005 年以来,美国页岩气开发最活跃的盆地主要有沃斯堡盆地(Barnett 页岩)、阿科马盆地(Fayetteville 页岩)、圣胡安盆地与犹他盆地(Lewis 和 Mancos 页岩)以及美国东部盆地群(Devonian 和 Antrim 页岩),其中 2004 年以来沃斯堡盆地的 Barnett 页岩业已成为美国最大的页岩气产区,页岩气产量由此快速发展,2007 年全美页岩气产量接近 $500 \times 10^8 \text{ m}^3$, 是美国天然气总产量的 8% 左右(图 1-9)。

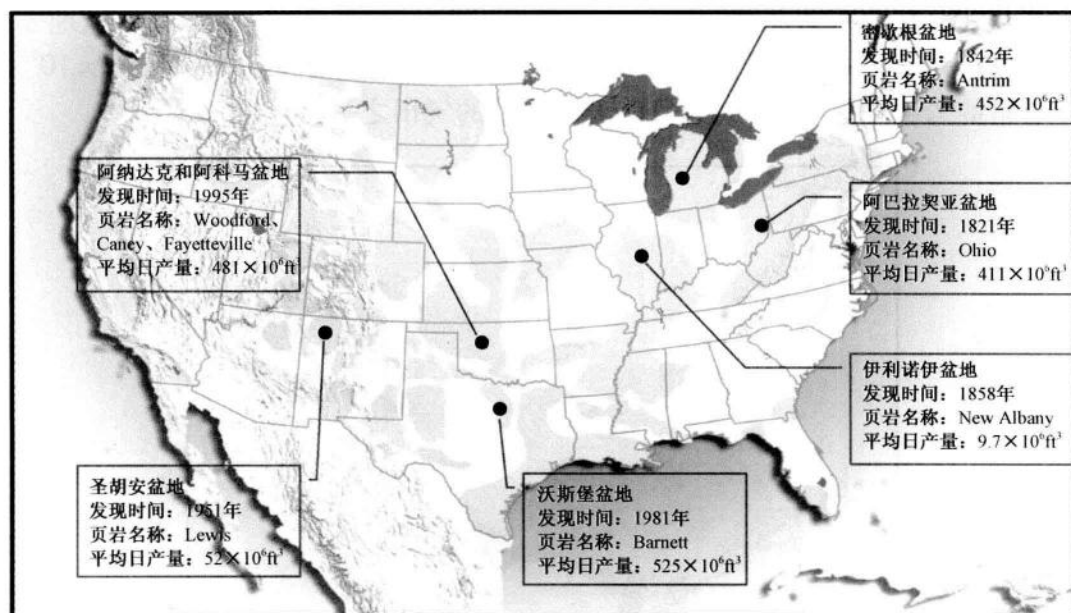


图 1-8 美国主要页岩气产气盆地页岩气藏发现时间图

(三) 美国页岩气发展趋势

自 2000—2007 年,美国发现页岩气藏的盆地由 5 个(密歇根、阿巴拉契亚、伊利诺伊、沃斯堡和圣胡安盆地)发展到以沃斯堡、阿科马、路易斯安那等为主的 30 个以上盆地(图 1-10),页岩气产层几乎包含了所有的海相页岩烃源岩,页岩气藏

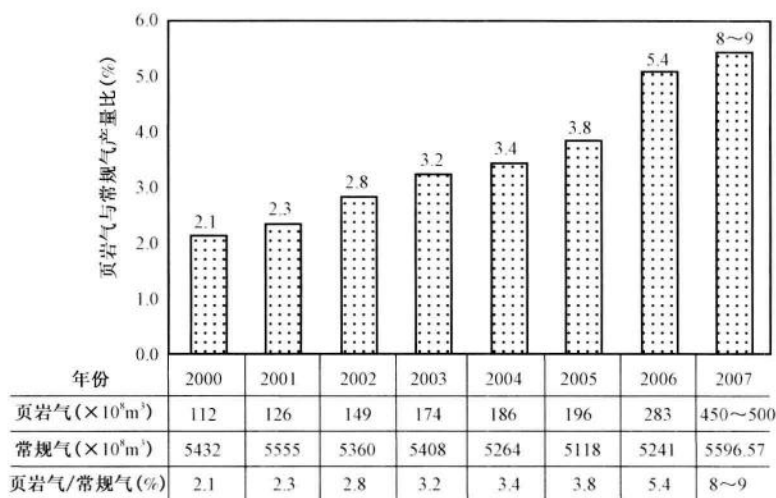


图 1-9 2000 年以来全美页岩气与常规天然气产量对比图

的钻探深度自发现初期的 600 ~ 2000m 加深到目前的 2500 ~ 4000m, 部分盆地的深度实际已达到约 6000m。2000 年以来, 页岩气开发钻井工作量年增 10% ~ 15%, 页岩气产量年增 $50 \times 10^8 \text{m}^3$ ~ $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 。2000 年, 北美页岩气生产井约 28000 口, 页岩气年产量不足 $100 \times 10^8 \text{m}^3$, 2008 年生产井约 42000 口, 页岩气年产量增至 $500 \times 10^8 \text{m}^3$, 占北美天然气总产量的 17%。2005 年, 阿巴拉契亚盆地发现的泥盆系 Marcellus 页岩气藏, 面积达 $24.605 \times 10^4 \text{km}^2$, 地质储量 $42.48 \times 10^{12} \text{m}^3$ (可采储量 $7.4 \times 10^{12} \text{m}^3$), 成为目前美国最大的气田之一。

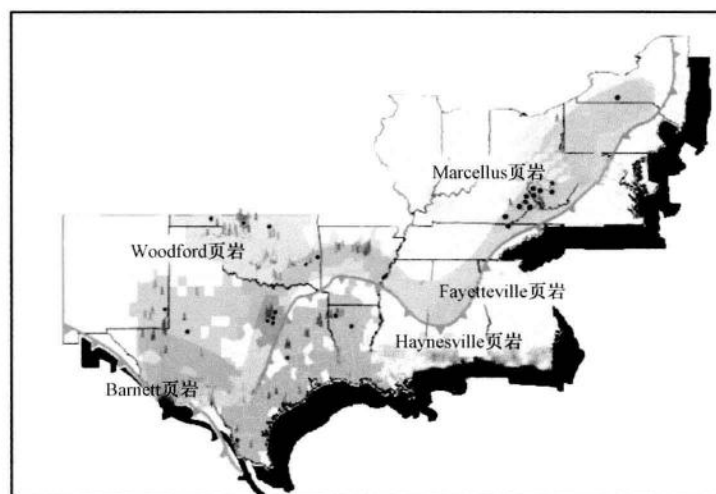


图 1-10 美国中陆区主要页岩气产气盆地分布图

美国页岩气开发的油气生产商早期以中小企业为主, 目前国际大油公司已全面参与, 主要页岩气生产商 2005 年只有 23 家, 而目前已达到 60 余家, BP、Shell、ExxonMobil、ConocoPhillips、挪威国家石油公司等全球大油公司把页岩气作为重要