

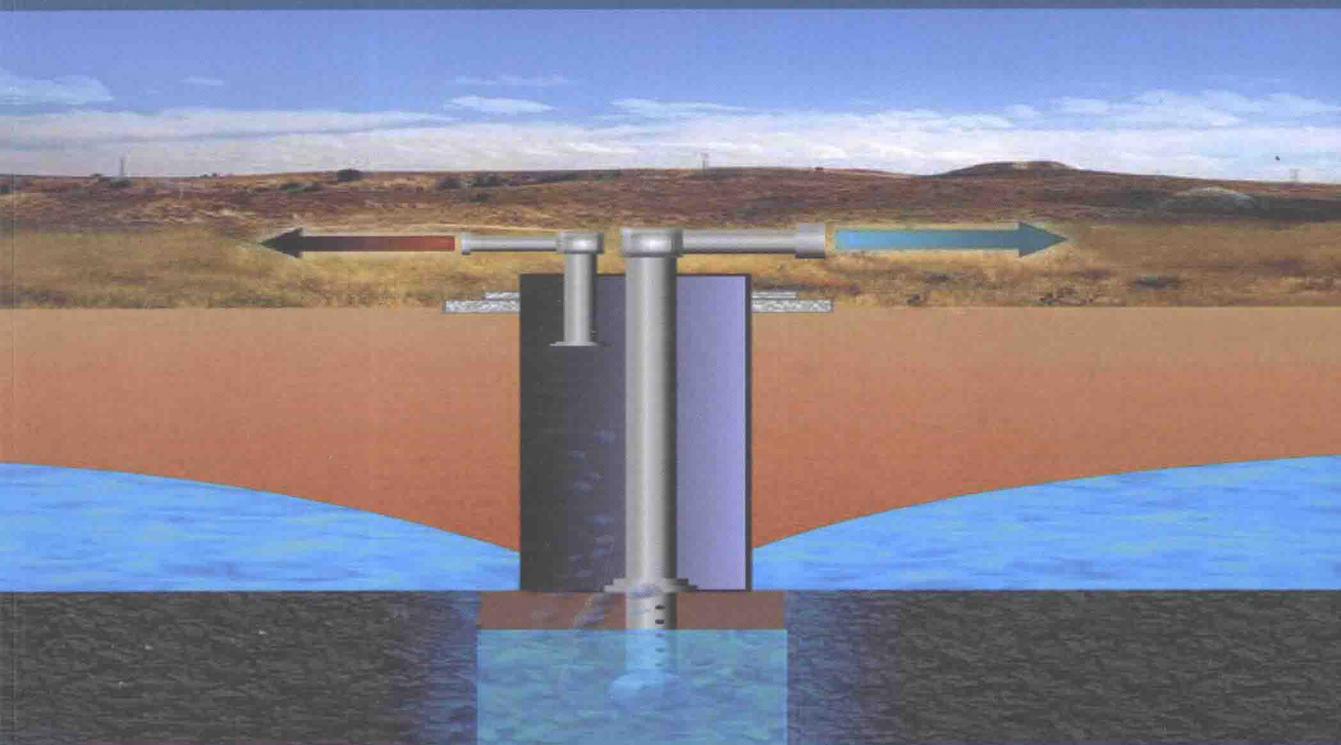


中国石油勘探开发研究院出版物

澳大利亚煤层气 地质特征及勘探技术

——以博文和苏拉特盆地为例

杨福忠 祝厚勤 等著



Australia's Coal-Bed Methane Geological
Characteristics and Exploration Technology

—— Bowen and Surat Basin as an Example

石油工业出版社

澳大利亚煤层气地质特征及勘探技术

——以博文和苏拉特盆地为例

杨福忠 祝厚勤 赵文光 夏明军
夏朝辉 孔祥文 张春雷 尉晓玮 著
李 铭 王 晖 马玉霞 王 芹

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了全球煤层气资源与勘探开发现状、煤层气地质评价基础、煤层气勘探技术、煤层气资源量或储量评估方法、煤层气项目经济评价等方面的内容。在吸收国外煤层气勘探及储量评估的成功经验和先进成果基础上,结合开展澳大利亚箭牌能源项目技术支持的体会,重点阐述了澳大利亚博文和苏拉特盆地煤层气地质特征与勘探技术。对海外煤层气项目并购、勘探开发运作具有一定的参考借鉴价值。

全书条理清晰、逻辑性强、资料内容丰富详实,指导性较强。可供从事海外煤层气勘探开发人员、海外煤层气业务并购的相关人员及石油院校师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

澳大利亚煤层气地质特征及勘探技术/杨福忠等著.
北京:石油工业出版社,2013.4
ISBN 978-7-5021-9556-4

- I. 澳…
- II. 杨…
- III. ①煤层-地下气化煤气-地质特征-澳大利亚
②煤层-地下气化煤气-地质勘探-澳大利亚
- IV. P618.11

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第064965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
发行部:(010) 64523620

经 销:全国新华书店
印 刷:保定彩虹印刷有限公司

2013年4月第1版 2013年4月第1次印刷
787×1092毫米 开本:1/16 印张:13.75
字数:350千字 印数:1—1000册

定价:58.00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

前 言

随着全球经济的快速发展，各国对能源的需求急剧增长，常规油气供给与需求之间的缺口越来越大，油价持续走高，极大地激发了各大油公司对煤层气等非常规油气资源勘探开发的热情。目前煤层气产业发展很快，世界各国都把煤层气当做一种宝贵的资源进行开发和利用。煤层气在应对煤矿安全生产、气候变化和节能减排、供应安全等方面同样扮演着重要角色，在低碳经济时代是“全能型”化石燃料。

全球煤层气资源丰富，煤层气资源量可能超过 $260 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，绝大部分分布在 12 个主要产煤国和地区，其中美国煤层气资源量为 $21.2 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，加拿大煤层气资源量为 $(17.9 \sim 76) \times 10^{12} \text{m}^3$ ，澳大利亚煤层气资源量为 $(8 \sim 14) \times 10^{12} \text{m}^3$ 。美国煤层气年产量在 2008 年达到 $556.71 \times 10^8 \text{m}^3$ ，加拿大煤层气年产量于 2009 年达到 $84 \times 10^8 \text{m}^3$ ，澳大利亚煤层气年产量于 2010 年达到 $76 \times 10^8 \text{m}^3$ 。

国外开展煤层气勘探开发的国家主要有美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、法国、比利时、保加利亚、意大利、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、西班牙、南非和印度等，目前美国、加拿大和澳大利亚已实现煤层气产业化生产，其中美国是全球煤层气开发程度最高、技术最成熟、产业化规模最大的国家，这主要得益于煤层气盆地发育、联邦税的激励、煤矿安全、天然气需求、天然气价格上涨，以及有效的科研投入和发达的天然气管网。

我国能源消费居世界第 2 位，随着 20 世纪 80 年代以来国民经济的快速增长，能源消费量逐年增加，而同期国内原油供应的增长速度远低于需求的增长速度。这种石油供需矛盾使我国自 1993 年始成为石油净进口国，目前已成为居美国之后的世界第二大石油进口国，原油对外依存度逐年攀升，2009 年已经超过 50%，因此，油气资源短缺已成为制约我国国民经济发展的“瓶颈”。从世界平均水平看，目前天然气在一次能源消费结构中的比例达到了 23%。随着市场经济水平的提高、开放程度的加强，以及低碳经济的贯彻和落实，我国对清洁能源—天然气的需求将与日俱增，预计至 2015 年需求量将达到 $2260 \times 10^8 \text{m}^3$ ，缺口达 $660 \times 10^8 \text{m}^3$ 。因此，积极实施“走出去”战略，开展跨国非常规天然气勘探开发，努力开拓国外油气资源合资合作勘探开发领域，不断扩大我国在国外的油气资源份额，将成为解决这一矛盾的必要途径之一。2010 年中国石油天然气股份有限公司联合壳牌成功收购了澳大利亚箭牌能源公司，拉开了中国石油进军海外煤层气勘探开发的序幕。

作为中国石油海外煤层气的技术支持单位，本书编写组成员自澳大利亚箭牌能源煤层气项目启动伊始就参与了相关的地质研究、资源量和储量评估、勘探开发等方面的研究。

两年多来，笔者系统调研、分析了国内外大量文献、著作及科研成果，并与国外从事储量评估的相关公司开展技术交流，在吸收国外煤层气勘探及储量评估的成功经验和先进成果基础上，重点开展了澳大利亚煤层气资源的调研分析，结合开展澳大利亚箭牌能源项目技术支持的体会，以博文和苏拉特盆地为解剖对象，系统总结澳大利亚煤层气地质特征及勘探技术，汇编成此书，期望能对澳大利亚箭牌能源项目的勘探开发，以及海外其他煤层气项目并购、勘探开发运作提供一些借鉴与参考。

本书由杨福忠、祝厚勤编写前言；杨福忠、赵文光、张春雷、孔祥文编写第一章；祝厚勤、杨福忠、夏朝辉、赵文光、王晖、王芹、尉晓玮和李铭编写第二章；杨福忠、祝厚勤、夏明军编写第三章和第四章；祝厚勤、杨福忠、夏明军、张春雷、赵文光编写第五章；最后由杨福忠、祝厚勤统一定稿。

在本书编写过程中，得到了单位领导、同事的大力支持，尤其是穆龙新副院长的多次指导；澳大利亚箭牌能源公司及 NSAI、RISC 和 MHA 等国际煤层气储量评估公司的专家们提供了大量的资料，并对煤层气勘探及储量评估中的一些核心问题给予了指导。对他们热情、无私的支持和帮助，在此表示衷心的感谢。同时，在编写过程中参阅了大量国内外煤层气专家的研究成果，也在此一并表示感谢。

由于编者水平和经验有限，书中错误和不足之处在所难免，恳请专家不吝赐教、斧正。

编 者

2013 年 1 月

目 录

第一章 煤层气资源与勘探开发现状	(1)
第一节 全球煤层气资源及勘探开发现状	(1)
第二节 澳大利亚煤层气资源及勘探开发现状	(17)
第二章 煤层气地质评价	(25)
第一节 煤层的形成及特征	(25)
第二节 煤储层特征	(33)
第三节 煤层气选区评价	(72)
第四节 煤层气勘探技术	(75)
第三章 博文和苏拉特盆地地质特征	(101)
第一节 盆地概况	(101)
第二节 盆地演化	(106)
第三节 盆地构造特征	(109)
第四节 煤沉积环境与分布	(113)
第五节 煤层对比	(116)
第四章 博文和苏拉特盆地煤层气富集条件	(119)
第一节 煤层气储层特征	(119)
第二节 煤层含气特征	(123)
第三节 煤层气富集条件	(125)
第五章 博文和苏拉特盆地煤层气资源评价及勘探技术	(134)
第一节 煤层气资源量和储量评估方法	(134)
第二节 煤层气项目经济评价	(167)
第三节 博文和苏拉特盆地煤层气资源量评估	(186)
第四节 博文和苏拉特盆地煤层气勘探技术	(187)
参考文献	(199)

第一章 煤层气资源与勘探开发现状

第一节 全球煤层气资源及勘探开发现状

一、全球煤层气资源

煤层气是赋存在煤层中，原始赋存状态以吸附在煤基质颗粒表面为主，以游离于煤割理、裂缝和孔隙中或溶解于煤层水中为辅，并以甲烷为主要成分的烃类气体（DZ/T 0216—2010）（国土资源部，2011）。煤层气又称煤层甲烷，是形成于煤化作用、目前仍储集在煤层中的一种自生自储的非常规天然气。煤层气与瓦斯明显不同，煤层气是赋存在煤层中， CH_4 浓度通常大于 90% 的天然气；瓦斯则是赋存在煤层与采动影响带中的煤成气、采空区的煤型气，以及采煤过程中新生成的各种体积的总称，其 CH_4 浓度在 5% ~ 80% 之间。在没有严格的区分时，人们常常将瓦斯等同于煤层气。

在早期煤层气是煤矿业的副产品，主要目的是保证采矿的安全，因此在很长的时间内没有油公司从事煤层气开发。随着常规油气勘探难度的增加，以及美国煤层气的成功开发，促使国际大型油公司介入煤层气领域。煤层气洁净、热值高、优质、安全，开发利用前景广阔，在全世界范围内有着巨大的发展潜力，可替代其他正在减少的常规能源（孙赞东、贾承造等，2011）。煤层气属于连续型油气聚集，后者是美国地质调查局（USGS）（1995）提出的，突出强调连续气藏是受水柱影响不强烈的气藏，气体富集与水对气体的浮力无直接关系，并且不是由下倾方向气水界面圈定的离散的、可数的气田群组成（邹才能、陶士振等，2009）。USGS（2006）认为，深盆气、页岩气、致密砂岩气、煤层气、浅层砂岩生物气和天然气水合物为非常规天然气，统称为连续型气。煤层气在开采过程中会产生大量的水，随着各国对环保要求的增高，水处理的方式和费用增加了煤层气的开发风险。

煤层气主要成分为甲烷（ CH_4 ），大部分以单分子层形式吸附在煤岩基质孔隙内表面，以游离态分布在煤层割理、裂缝和部分孔隙内，以溶解态分布在煤层水内的煤层气所占比例较少。煤层气的形成过程与煤同步，生物成因和热成因都可以生成煤层气（Walter, 1992；吴佩芳，2000；Ayers, 2002）。一般情况下，煤化作用过程中生成的甲烷，首先满足吸附，然后是溶解和游离析出（郭国政、陆明心等，2006）。煤层气在储集方式、成藏等方面与常规天然气有本质的区别（Kuuskraa & Brandenburg, 1989；张新民、庄军等，

2002) (表 1-1)。煤层气仅指煤层中的天然气, 既不包括煤层附近其他岩性地层中的天然气, 也不涵盖在其他岩性聚集成藏的煤成因气。

表 1-1 煤层气与常规天然气基本特征对比表

特征	煤层气	常规天然气
主要成分	有机质	矿物质
生气能力	有	无
气源	自生	外源
气藏类型	煤层	圈闭
储层岩性	煤岩	砾岩、砂岩、粉砂岩及碳酸盐岩
内表面积	1g 煤的内表面积可达 10~40m ²	一般砂岩小于 0.2m ² /g
双重孔隙结构	基质孔隙和裂缝组成双孔隙结构	主要在碳酸盐岩发育双孔隙结构
储层性质	易被压缩, 渗透率对应力敏感	压缩性小, 孔隙度、渗透率对应力变化不明显
气体存贮方式	绝大部分气体吸附在煤层内表面, 煤层所能容纳的原始含气量是同体积常规砂岩储层的 2~3 倍	气体以游离态储集在岩石孔隙内
相对储气能力	较高	较低
开采范围	沿煤储层较大范围连片开采	圈闭内
气产出机理	解吸—扩散—渗流	渗流
气井生产状况	煤层气产量随时间而增加, 直至最大值, 然后下降, 开采期长。起初主要产水, 产气水的比例随时间而增大	气产量开始最大, 然后随时间而降低, 开采期短。起初很少产水甚至不产水, 产气水的比例随时间而减少
井距 (相对)	小	大
井壁稳定性	差, 易坍塌	好

全球煤层气资源丰富, 根据国际能源署 (IEA)、Kuuskraa (2009)、Tonnsen 和 Miskimins (2010) 及我国新一轮油气资源评价结果 (2003—2007) 可知, 全球煤层气资源量可能超过 $260 \times 10^{12} \text{m}^3$, 绝大多数分布在 12 个主要产煤国和地区 (图 1-1、表 1-2)。在这些主要产煤国和地区, 煤层气的可采资源量达 $21.81 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。俄罗斯煤层气资源量为 $(17 \sim 113) \times 10^{12} \text{m}^3$, 可采资源量为 $5.67 \times 10^{12} \text{m}^3$, 均居世界首位, 该国煤层气相对集中分布在通古斯、库兹涅茨克、勒拿、泰梅尔、伯朝拉、南雅库特、济良齐和东顿涅茨盆地 (Promaz, 2005; 吕玉民、王红岩等, 2012)。这些盆地具有煤炭资源丰富、煤系地层发育、煤层多且煤层厚度大、煤层含气量高 (最高达到 $30 \text{m}^3/\text{t}$)、煤层气丰度高的特点。加拿大煤层气资源量居世界第 2 位, 该国 17 个盆地和含煤区煤层气资源量为 $(17.9 \sim 76) \times 10^{12} \text{m}^3$, 其中阿尔伯达省是该国最主要的煤层气富集区。美国煤层气资源量为 $21.2 \times 10^{12} \text{m}^3$, 约



图 1-1 世界非常规油气资源分布图 (Fryklund, 2010)

85% 分布在落基山中、新生界含煤盆地群，其余分布在东部阿巴拉契亚和中部石炭系含煤盆地（表 1-3）。

表 1-2 世界主要产煤大国煤炭、煤层气资源统计表

国 家	煤炭资源量 ($\times 10^{12}t$)	煤层气资源量 ($\times 10^{12}m^3$)	煤层气可采资源量 ($\times 10^{12}m^3$)
俄罗斯	6.50	17.0 ~ 113.0	5.67
加拿大	7.00	17.9 ~ 76.0	2.55
中国	5.95	36.8	2.83
美国	3.97	21.2	3.96
澳大利亚	1.70	8.0 ~ 14.0	3.40
西欧 (以德国和英国为主)	0.51	5.67	0.57
土耳其	—	1.42 ~ 3.11	0.28
波兰	0.16	0.57 ~ 1.42	0.14
乌克兰	0.12	4.8	0.71
哈萨克斯坦	0.17	1.13 ~ 1.70	0.28
印度	0.16	1.98 ~ 2.55	0.57
南非 (包括南非、津巴布韦和博茨瓦纳)	0.15	0.8	0.85
合 计	26.39	117.27 ~ 281.05	21.81

数据来源: IEA, 有修改; 新一轮全国油气资源评价; Kuuskraa, 2009; Tonnsen & Miskimins, 2010。

表 1-3 美国主要含煤盆地煤层气资源统计表 (GRI, 2001; 杨立雄, 2003)

盆地名称	面积 ($\times 10^4 \text{ km}^2$)	煤层最大埋深 (m)	单井主要煤层层数	单井最大煤层总厚度 (m)	单井最大单煤层厚度 (m)	最高煤级	最大含气量 (取样深度) (m^3/t)	煤层气资源量 ($\times 10^{12} \text{ m}^3$)
圣胡安	1.94	1200	14	30	12	低挥发分烟煤	17 (1070m)	2.38
黑勇士	1.55	1220	5	7.6	2.4	低挥发分烟煤	20 (850m)	0.57
皮申思	1.74	3660	20	30	6.7	半无烟煤	12 (2320m)	>2.38
大绿河	5.46	1830	30	29	6	高挥发分烟煤 A	15.4 (1070m)	8.89
粉河	6.68	1220	24	91	60	亚烟煤	2.0 (370m)	0.84
拉顿	0.57	920	40	27	3	低挥发分烟煤	14 (370m)	0.28
西华盛顿	1.69	—	—	—	12	高挥发分烟煤 B	2.1 (180m)	0.68
北阿巴拉契亚	1.14	610	6	6	3.7	高挥发分烟煤 A	12.5 (240m)	1.73
伊利诺斯	13	920	3	5	4.6	高挥发分烟煤 A	4.2 (210m)	0.55

我国煤层气资源量居世界第 3 位 (表 1-2), 以石炭系、二叠系、三叠系、侏罗系和白垩系煤层气为主。1999 年中国石油勘探开发研究院廊坊分院计算的煤层气资源量为 $22.49 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (贾承造等, 2007)。煤炭科学研究总院西安分院评价 2000m 以浅煤层气资源量为 $31.46 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (张新民、庄军等, 2002)。新一轮 (2003—2007) 全国油气资源评价涵盖了 5 个大区、42 个含气盆地、121 个含气区带, 认为 2000m 以浅煤层气评价面积为 $37.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 、煤层气资源量为 $36.81 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、煤层气资源丰度为 $0.98 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (表 1-4), 主要富集于鄂尔多斯、沁水、准噶尔、二连、吐哈和滇东黔西盆地 (群), 资源量超过 $2.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占全国总量的 70.12%; 在深度上, 1000m 以浅的浅层煤层气资源量及可采资源量分别为 $14.27 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $6.27 \times 10^{12} \text{ m}^3$ (表 1-5) (国土资源部油气资源战略研究中心等, 2009)。

表 1-4 全国煤层气资源分布表 (国土资源部油气资源战略研究中心等, 2009)

大区名称	评价面积 (km ²)	地质资源量 (×10 ⁸ m ³)	资源丰度 (×10 ⁸ m ³ /km ²)	可采资源量 (×10 ⁸ m ³)
东部	100434.93	113183.70	1.13	43176.69
中部	128530.41	104676.36	0.81	19981.32
西部	101334.21	103592.06	1.02	28583.20
南方	44052.89	46621.85	1.06	16963.68
青藏	601.00	44.34	0.07	0.00
合计	374953.44	368118.31	0.98	108704.88

表 1-5 全国煤层气资源深度分布表

大区名称	深度 (m)	煤炭资源量 (×10 ⁸ t)	地质资源量 (×10 ⁸ m ³)	地质资源量所占比例 (%)
东部	风化带下限~1000	9383.22	54207.62	47.89
	1000~1500	3791.00	29861.06	26.38
	1500~2000	3528.65	29115.01	25.72
中部	风化带下限~1000	7339.07	31116.13	29.73
	1000~1500	5579.05	30188.54	28.84
	1500~2000	7709.83	43371.69	41.43
西部	风化带下限~1000	6175.53	28887.19	27.89
	1000~1500	6074.54	35102.99	33.89
	1500~2000	6372.26	39601.88	38.23
南方	风化带下限~1000	2341.37	28452.71	61.03
	1000~1500	737.19	10959.14	23.51
	1500~2000	489.61	7210.00	15.46
青藏	风化带下限~1000	2.26	44.34	100.00
合计	风化带下限~1000	25241.44	142707.99	38.77
	1000~1500	16181.79	106111.73	28.83
	1500~2000	18100.35	119298.60	32.41

二、煤层气勘探开发现状

煤层气是一种清洁、优质、高效能源,已经受到越来越多的油气公司青睐。作为一种低品位非常规天然气资源,煤层气位于能源分类三角图下部(图1-2)。目前国外开展煤层气勘探开发的国家主要有美国、加拿大、澳大利亚、俄罗斯、法国、比利时、土耳其、保加利亚、意大利、波兰、罗马尼亚、斯洛伐克、西班牙、南非、智利、巴西、委内瑞拉和印度等,其中美国、加拿大和澳大利亚已实现煤层气产业化,智利、巴西和委内瑞拉等

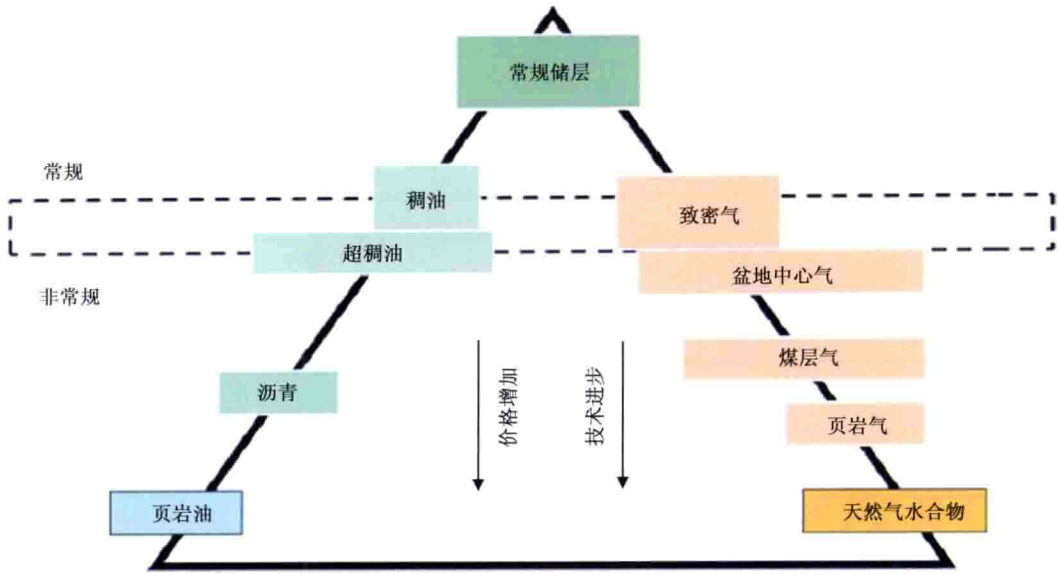


图 1-2 能源三角图 (据 SPE, *et al.*, 2007, 修改)

国家已经开展小规模煤层气勘探试验或者积极准备参与煤层气开发。美国是全球煤层气开发程度最高、技术最成熟、产业化规模最大的国家，这主要得益于煤层气盆地发育、联邦税收政策激励、煤矿安全、天然气需求、天然气价格上涨、有效的科研投入及发达的天然气管网。

(一) 美国

美国在非常规油气勘探开发领域起步较早，产量较高 (图 1-3)。美国煤层气较为丰富，资源量为 $21.2 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，居世界第 4 位 (表 1-2)。

早在 20 世纪 30 年代，美国阿巴拉契亚盆地已经开始煤层气开采，20 世纪 50 年代圣胡安盆地开始煤层气开发 (Ayers, 2002)。这些煤层气田规模小、效益低，未引起重视。1971 年，美国矿务局 (USBM) 开始在 11 个地区进行煤层气试验 (Schraufnagel & Schaffer, 1996)。美国能源部 (DOE) 自 1978 年开始对其国内 16 个盆地开展了长达 8 年的煤层气研究。1983 年美国天然气研究所 (GRI) 开始煤层气研究，并在 20 世纪 80 年代末研究圣胡安 (San Juan)、黑勇士 (Black Warrior) 和阿巴拉契亚 (Appalachian) 盆地北部煤层气的主控因素。20 世纪 80 年代评价了 13 个含煤层气盆地，这些盆地具有东部盆地煤层埋深浅、厚度薄，西部盆地煤层埋深大、厚度大的特点 (Craig, *et al.*, 1984)。在 1500m 以浅煤层中，大部分煤层气分布在西部落基山盆地群 (图 1-4)。

20 世纪 70 年代，欧佩克石油禁运催生了美国在 1980 年颁布《能源意外获得法》，其中的第 29 条非常规能源开发税收补贴政策激发了企业开发煤层气的积极性。

20 世纪 80 年代中后期，煤层气勘探开发已由圣胡安、黑勇士、皮申思 (Picence) 盆地扩展到粉河 (Powder River)、拉顿 (Raton)、尤因塔 (Uinta) 及阿巴拉契亚等盆地，

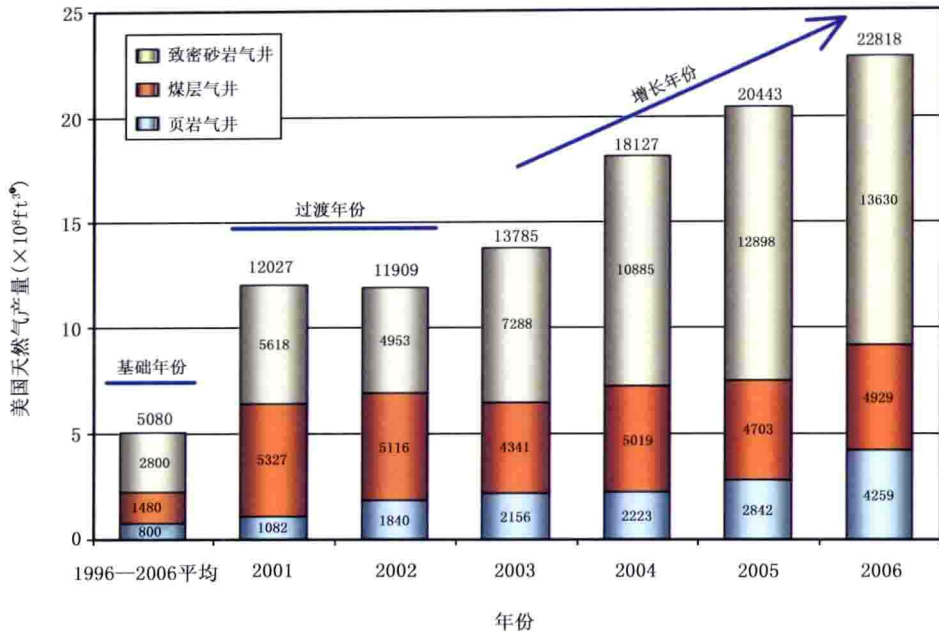


图 1-3 美国煤层气、致密气和页岩气年产量对比图 (Kuuskraa, 2007)

其中圣胡安、黑勇士和粉河盆地是美国煤层气的重要产地 (表 1-3、图 1-5)。

根据美国 EIA 统计, 2007 年美国煤层气证实储量为 $0.62 \times 10^{12} \text{m}^3$, 1989—2009 年煤层气累计产量为 $0.72 \times 10^{12} \text{m}^3$, 年产量在 2008 年达到 $5.58 \times 10^{10} \text{m}^3$ (图 1-6)。煤层气证实储量从 2008 年开始下降、年产量从 2009 年开始下降, 可能是受天然气价格影响所致。

圣胡安盆地位于美国科罗拉多州西南部和墨西哥州西北部, 盆地形状近似圆形, 南北长约 161km、东西宽约 145km, 面积为 $1.94 \times 10^4 \text{km}^2$ (表 1-3)。圣胡安盆地是一个著名的含气盆地, 油气开发时间长, 发育世界上唯一的一个巨型煤层气田。圣胡安盆地白垩系的 Fruitland 煤组和 Menefee 组均蕴含大量的煤层气, 目前煤层气主要产自 Fruitland 煤组。圣胡安盆地白垩系 Fruitland 煤组煤层气资源量为 $(1.22 \sim 1.42) \times 10^{12} \text{m}^3$, 1998 年初煤层气储量为 $0.22 \times 10^{12} \text{m}^3$ (Kelso, *et al.*, 1988; Ayers & Ambrose, 1990; Ayers & Kaiser, 1994; Kuuskraa, 1999)。Fruitland 煤组煤层具有中—高煤阶、煤层厚、埋藏深、中—高气含量、较高渗透率 (一般大于 20mD) 等特点。Fruitland 煤组为上白垩统海岸沼泽沉积, 在盆地南部一般为亚烟煤, 到北部可达中挥发分烟煤。Fruitland 煤组煤层气组分变化大, 含气量自南向北逐渐增加。由于 Fruitland 煤组煤层分布稳定、构造简单、构造裂缝发育, 适合煤层气开发。20 世纪 50 年代在盆地北部的 Ignacio 背斜有小规模的煤层气开采。1953 年, 圣胡安 32-7 单元中由菲利普斯公司钻探的 6-17 井被认为是该盆地中第一口煤层气井 (杨立雄, 2003)。1979 年 Amoco 公司在 Ceder Hill 气田钻探的 Cahn-1

① $1 \text{ft}^3 = 0.0283 \text{m}^3$, 下同。

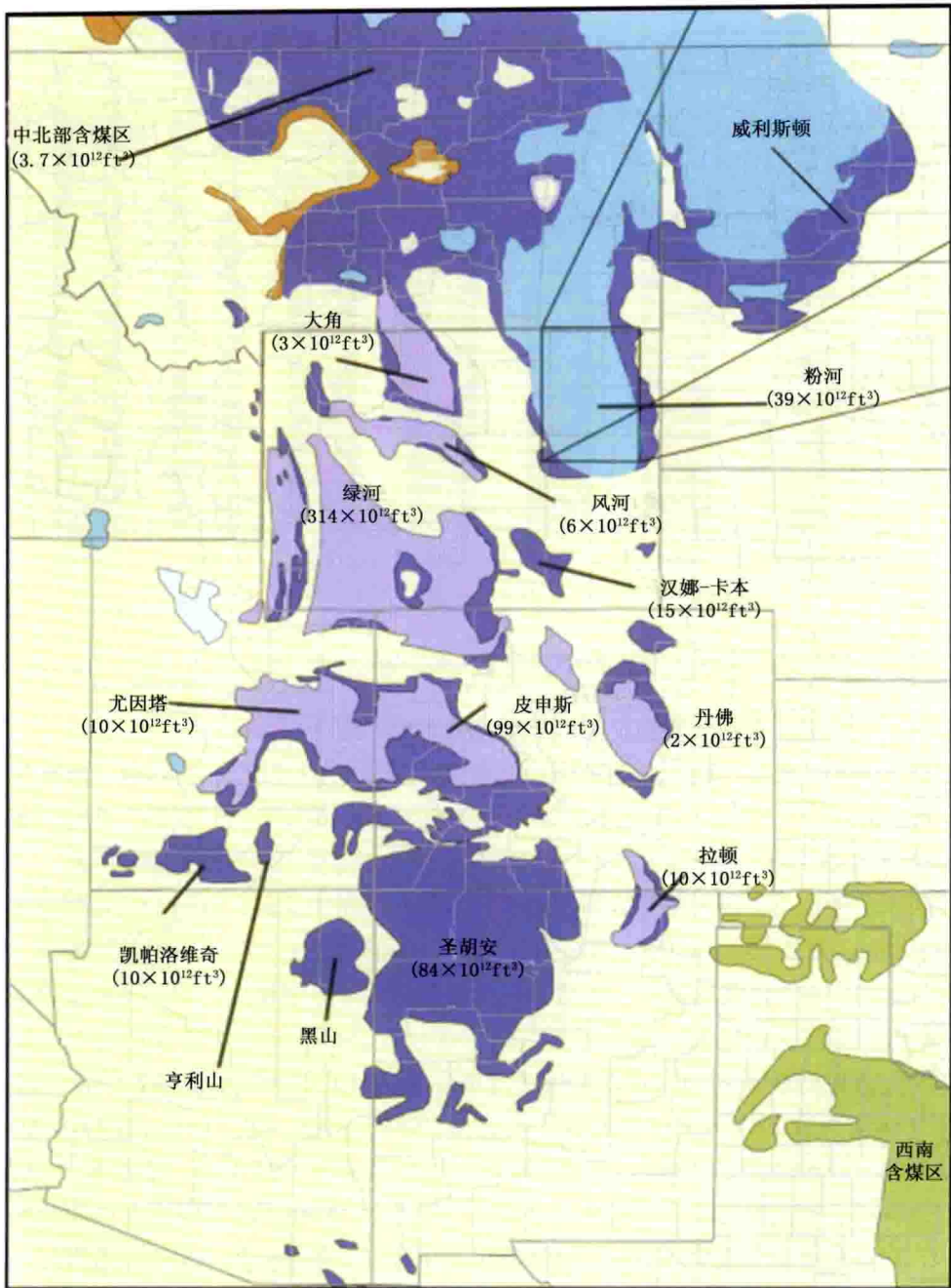


图 1-4 美国落基山盆地群煤层气盆地分布图 (Silverman, 2002)

井是第一口以煤层气为目标的井 (Waller, 1992; Ayers, 2002), 该井证实了圣胡安盆地具有煤层气勘探开发潜力。受 Amoco 公司的成功和税法 29 条激励, 大型公司及个体经营者纷纷申请该盆地的煤层气勘探和测试许可证。钻井数量从 1985 年的不足 100 口, 增加

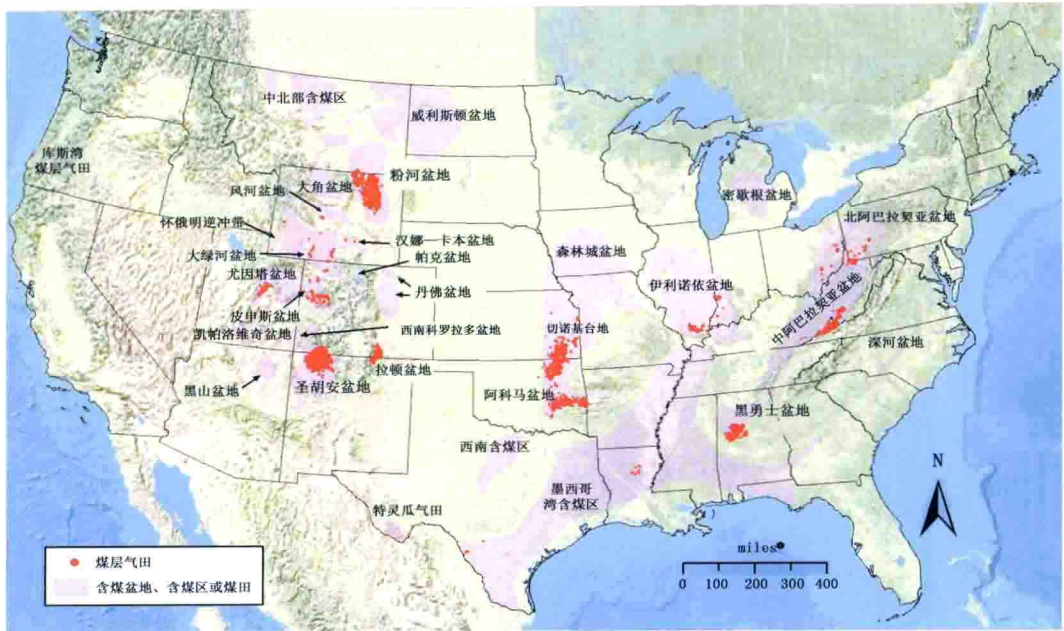


图 1-5 美国煤层气盆地及煤层气田分布图 (据美国 EIA, 2009)

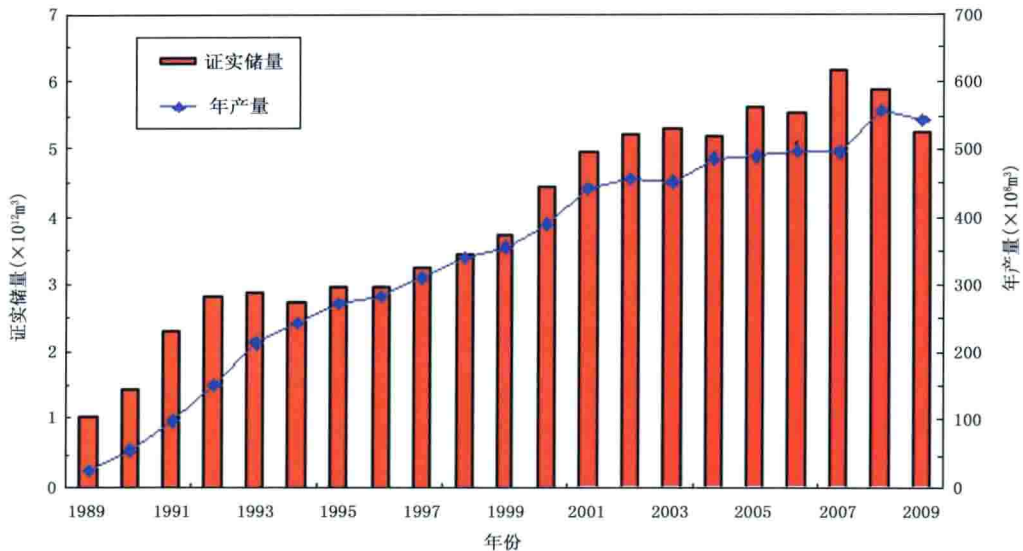


图 1-6 美国煤层气证实储量与产量变化趋势图 (据美国 EIA, 2010)

至 1991 年的 1660 口。1997 年, 圣胡安盆地的煤层气产量达到 $212.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国当年煤层气产量的 74.8%; 1999 年煤层气产量超过 $200 \times 10^8 \text{ m}^3$, 占美国当年煤层气产量的份额超过 80% (Ayers, 2002)。截至 2006 年年底, 圣胡安盆地的煤层气累计产量达到

① 1mile = 1.609km, 下同。

$0.37 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，占美国煤层气累计产量的 65.72%（美国 EIA，2007）（图 1-7）。

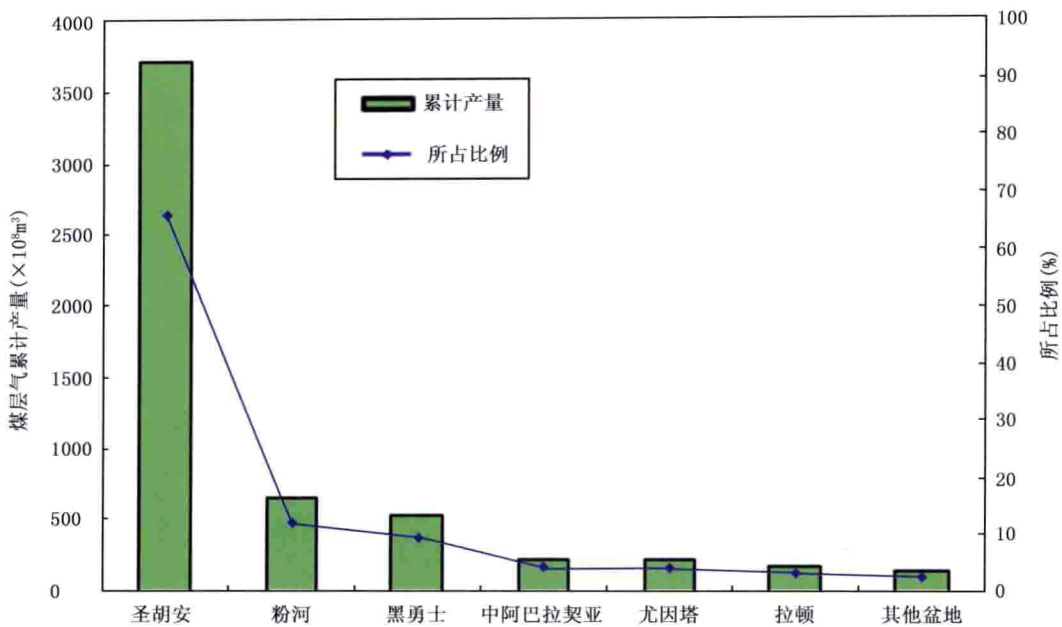


图 1-7 美国煤层气盆地截至 2006 年年底的累计产量直方图

黑勇士盆地主要位于美国东部阿拉巴马州中西部和密西西比州中东部，面积为 15500km^2 ，是世界煤层气工业的发源地（表 1-3）。黑勇士盆地煤层气主要分布在宾夕法尼亚系 Pottsville 煤组，煤岩为低挥发分烟煤。煤层埋藏浅，单煤层最大厚度为 2.4m，单井最大煤层总厚度为 7.6m，含气量为 $6 \sim 20 \text{m}^3/\text{t}$ 。1977 年，美国矿务局（USBM）和美国钢铁公司在黑勇士盆地开展煤层气研究和开发试验，后来美国能源部（DOE）加入并将研究扩展为 Oak Grove 煤矿区内一个由 23 口井组成的煤层气开发实验区。经研究发现：①煤层含气量可高达 $14 \sim 17 \text{m}^3/\text{t}$ ；②煤层割理和裂缝发育，直井控制面积大，可采用 60acre^① 甚至更大的开发井网。自 1980 年 Oak Grove 煤层气田投产，至 1990 年初黑勇士盆地共钻煤层气井 2750 口，累计采气 $5.66 \times 10^8 \text{m}^3$ ；1994 年的煤层气产量已达到 $26.6 \times 10^8 \text{m}^3$ 。截至 2006 年年底，黑勇士盆地的煤层气累计产量达到 $535.19 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占美国煤层气累计产量的 9.46%（美国 EIA，2007）（图 1-7）。尽管黑勇士盆地单井煤层气产量不如圣胡安盆地，一般只有数千立方米，但由于钻井成本低、市场条件好、矿区租赁方便及水处理简单，致使该盆地的煤层气勘探开发具有很大优势。

粉河盆地位于美国怀俄明州东北部和蒙大拿州东南部，为一东缓西陡的拗陷型含煤盆地，面积为 66800km^2 ，其中 75% 在怀俄明州境内。粉河盆地煤炭资源丰富，2007 年产煤量占美国的 37%。该盆地煤层主要分布在古新统 Fort Union 组和始新统 Wasatch 组，煤层

① 1acre = 4046.87m^2 ，下同。

气开采目的层以前者为主。粉河盆地煤层气资源量为 $(0.42 \sim 1.73) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，可采资源量为 $(0.71 \sim 1.10) \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，储量为 $(0.17 \sim 0.25) \times 10^{12} \text{ m}^3$ (Choate, *et al.*, 1984; Tyler, *et al.*, 1992; Montgomery, 1999; Shirley, 2000; PGC, 2000; GTI, 2001; Bruin, *et al.*, 2001; ARI, 2002)。古新统 Fort Union 组煤层具有煤阶低、厚度大、分布广、煤层多、含气量低、裂隙发育及渗透率高的特点。20 世纪 70 年代为了评价煤炭资源在盆地内钻了一些浅井，在煤层及其附近砂层有气体产出。20 世纪 80 年代中期，发现了以煤层附近砂体为目标的小气田。20 世纪 80 年代末期和 90 年代初期，一些小公司在盆地东缘开展煤层气勘探，并于 1986 年由 Wyatt 公司钻探了盆地内第一口煤层气井。早期煤层气勘探开发集中在煤矿附近和小构造高点，后来逐渐向盆地内部推进 (图 1-8)。目前粉河盆地煤层气勘探开发集中在盆地东部和西北部，煤层埋深 137 ~ 1981m。1991 年煤层气生产井 54 口，产量 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 1998 年年底，共钻煤层气井 550 口，日产煤层气为 $314.32 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。截至 2001 年年底，钻井近 12000 口，其中 8177 口井在产，日产煤层气 $0.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。截至 2006 年年底，粉河盆地的煤层气累计产量达到 $654.12 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占美国煤层气累计产量的 11.57% (美国 EIA, 2007) (图 1-7)。

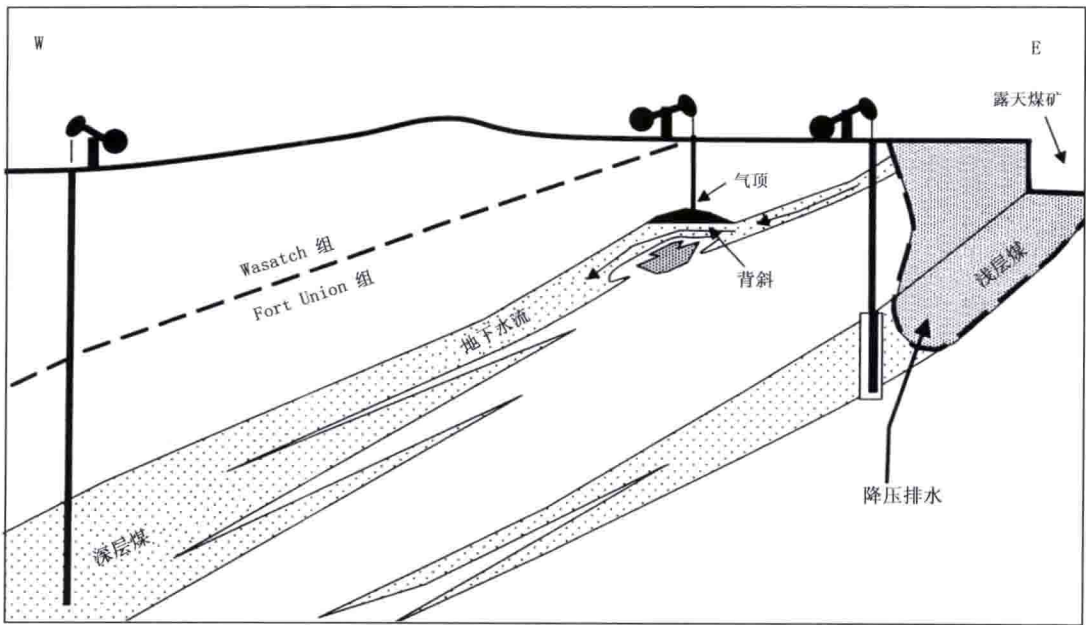


图 1-8 美国粉河盆地煤层气勘探策略示意图 (Ayers, 2002)

粉河盆地煤层渗透率高、煤层水质好，节省了压裂和水处理费用，从而大大降低了煤层气勘探开发成本。由于粉河盆地煤级低，该盆地煤层气的成功开发改变了过去只有热成因煤层气才能开发的观念，证实生物成因煤层气同样可以商业开采，该盆地煤层气年产量在 2000 年超过黑勇士盆地 (图 1-9)。粉河盆地低煤阶煤层气的成功开发及天然气价格上涨等因素，激发了新一轮煤层气勘探开发热潮。