

中国非常规油气地质学

康玉柱 张大伟 赵先良 车长波 等 编著

地质出版社

中国非常规油气地质学

康玉柱 张大伟 赵先良 车长波 乔德武
吴裕根 李玉喜 康志宏 康志江 凌文虎 编著

地质出版社
· 北 京 ·

内 容 简 介

本书阐述了非常规油气勘探开发形势,六类非常规油气的基本概念及形成条件,油气分布规律,油气资源评价技术,勘探开发关键技术和方法,油气资源潜力及发展战略。全书共分11章,包括:非常规油气勘探开发形势,非常规油气的基本概念,致密岩油气,泥页岩油气,煤层气,油页岩,油砂,天然气水合物,非常规油气资源评价方法,非常规油气勘探开发技术,以及非常规油气开发战略。本书注重理论体系、技术和方法体系的有机结合,以及普遍性、特殊性及典型性的结合,充分体现了科学性和实用性的结合。

本书可供从事常规和非常规油气资源勘探开发的科技人员,以及高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

中国非常规油气地质学 / 康玉柱等编著. —北京:地质出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-116-09174-0

I. ①中… II. ①康… III. ①石油天然气地质 IV.
①P618.130.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 040354 号

Zhongguo Feichanggui Youqi Dizhixue

责任编辑: 祁向雷 周乐耘

责任校对: 王 瑛

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 66554642 (邮购部); (010) 66554692 (编辑室)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

传 真: (010) 66554686

印 刷: 北京地大天成印务有限公司

开 本: 889 mm×1194 mm¹/₁₆

印 张: 15

字 数: 460 千字

版 次: 2015 年 2 月北京第 1 版

印 次: 2015 年 2 月北京第 1 次印刷

审 图 号: GS (2014) 1410 号

定 价: 68.00 元

书 号: ISBN 978-7-116-09174-0

(如对本书有建议或意见, 敬请致电本社; 如本书有印装问题, 本社负责调换)

前 言

非常规油气资源，是指非常规油气成藏形成的油气，在成藏条件、赋存状态、分布规律及开发技术等方面，与常规油气有所区别。

目前，非常规油气主要包括：致密岩油气、泥页岩油气、煤层气、油砂、油页岩及天然气水合物等。

目前，全球非常规油气勘探应处于起步阶段。从战略上讲，非常规油气资源潜力巨大，可成为常规油气的接替领域。进入 21 世纪以来，非常规油气勘探开发技术的不断进步，使非常规油气勘探开发成本降低，经济上趋于可行，非常规油气资源的勘探开发进入全球化时代。从长远发展看，开发非常规油气资源是未来世界油气工业发展的方向，也是人类利用资源的必然选择，非常规油气资源在世界能源资源结构中的地位将越来越重要。

中国非常规油气资源丰富，潜力巨大。当前，中国常规油气资源储量产量已进入世界油气生产大国行列，但油气产量远远不能满足经济调整增长的需要，油气进口量持续增加，尤其是原油的对外依存度逐年攀升，2013 年已经超过 59%。面对日益加剧的能源供需矛盾和高涨的国际石油价格，非常规油气必将成为我国油气资源开发的重要接替领域。

中国非常规油气勘探开发已经走过一段历程。油页岩于 1928 年开始冶炼；致密岩油于 1907 年在鄂尔多斯盆地三叠系打出第一口井——延长 1 井；20 世纪 70 年代初，在渤海湾盆地济阳拗陷古近系沙河街组泥页岩中试获油流；同期，在四川盆地西部上三叠统须家河组获致密砂岩气流；1979 年在鄂尔多斯盆地石炭系试获高产工业气流，近年来在该盆地快速发展，形成大规模开发。泥页岩气资源调查评价始于 2004 年，国土资源部组织有关石油公司、大学、科研单位和地方地勘单位开始调查研究、资源评价和优选有利靶区等工作，并于 2009 年 11 月在四川盆地东南隆起区七曜山背斜带郭厂坝背斜核部设计实施第一口泥页岩气调查参数井，并获泥页岩气发现。近几年来，在中国四川盆地、鄂尔多斯盆地、湘鄂西等地区都获得了页岩气气流。特别是中石化在重庆涪陵礁石坝地区下志留统龙马溪组泥页岩中实施多口探井获得高产工业气流，实现了中国泥页岩气的重大突破，开始建设中国首个页岩气开发区，预计到 2015 年建设产能达 $50 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2017 年产能达 $100 \times 10^8 \text{m}^3$ 。中石油在四川长宁-威远地区寒武系泥页岩中获得高产工业气流，实现了新突破。总之，中国非常规油气勘探开发已进入加速发展的新时期。

本书重点论述了国内外非常规油气勘探形势和致密岩油气、泥页岩油气、煤层气、油页岩、油砂、天然气水合物等六种非常规油气的概念及内涵，非常规油气勘探开发技术及发展前景，指出了当前和今后一个时期的勘探方向等。

本书序言、第一章、第二章由康玉柱、张大伟、赵先良、车长波、吴裕根、乔德武、李玉喜执笔，康志宏、康志江、凌文虎参加；第三章由康玉柱、车长波、赵先良、吴裕根、李玉喜、康志宏、康志江、凌文虎执笔；第四章由康玉柱、张大伟、乔德武、李玉喜、康志宏执笔；第五章由康玉柱、康志

宏、赵先良、车长波、李玉喜执笔，乔德武、康志江、凌文虎参加；第六章由康玉柱、车长波、乔德武、康志宏、李玉喜执笔；第七章由康玉柱、赵先良、车长波、康志宏、康志江、凌文虎执笔；第八章由康玉柱、张大伟、赵先良、吴裕根、乔德武执笔，李玉喜、康志江参加；第九章和第十章由康玉柱、张大伟、乔德武、李玉喜、康志宏执笔，凌文虎、康志江参加；第十一章和结论由康玉柱、张大伟、赵先良、车长波、吴裕根执笔。最后，由康玉柱、张大伟统编定稿。

本书在编著过程中，得到了国土资源部有关部门、国土资源部油气资源战略研究中心、中国地质调查局、中国石化、中国石油、中国地质大学、中国石油大学等有关单位领导、院士、专家的大力支持。同时，贵州省国土资源厅在“贵州省页岩气资源调查评价”项目中给与了帮助，在此一并表示衷心感谢！

由于时间和水平所限，书中不足之处，请批评、指正。

作者

2014年4月

目 录

前 言

1 非常规油气勘探开发形势	1
1.1 非常规油气资源开发意义重大	1
1.2 国外非常规油气勘探开发现状	1
1.2.1 泥页岩气	1
1.2.2 其他非常规油气	6
1.3 中国非常规油气勘探开发概况	9
2 非常规油气基本概念	11
2.1 非常规油气的内涵	11
2.2 非常规油气地质特征	11
2.3 非常规油气类型	12
2.3 非常规油气分布简况	13
3 致密岩油气	14
3.1 致密岩油气储层特征	15
3.1.1 致密砂岩储层	15
3.1.2 致密碳酸盐岩储层	20
3.2 致密砂岩气	21
3.2.1 致密砂岩气地质特征	21
3.2.2 致密砂岩气特征	22
3.2.3 中国与国外致密岩气主要差别	22
3.2.4 致密砂岩储层特征及影响因素	23
3.2.5 致密砂岩形成过程	31
3.2.6 致密砂岩气藏类型	33
3.2.7 致密砂岩气形成与分布	33
3.2.8 致密砂岩气地质评价方法	34
3.3 致密岩油	34
3.3.1 致密岩油赋存状态	34
3.3.2 致密岩油地质特征	35
3.3.3 中国陆相致密岩油与国外海相致密岩油的主要差异	35
3.3.4 致密岩油形成与分布	37
3.3.5 致密岩油与致密岩气区别	37
3.4 典型致密岩油田	38

3.4.1	鄂尔多斯盆地上三叠统长6段致密砂岩油	38
3.4.2	准噶尔盆地中二叠统芦草沟组	41
3.5	典型致密岩气田	42
3.5.1	鄂尔多斯盆地苏里格石炭-二叠系致密砂岩气	42
3.5.2	四川西部上三叠统致密砂岩气	47
3.5.3	塔里木盆地库车坳陷侏罗系致密砂岩气	48
4	泥页岩油气	49
4.1	泥页岩气	49
4.1.1	概述	49
4.1.2	泥页岩地质特征	53
4.1.3	泥页岩地球化学特征	57
4.1.4	泥页岩储层特征	60
4.2	泥页岩油	79
4.2.1	泥页岩油的基本特征	79
4.3	贵州省泥页岩气地质特征	88
4.3.1	贵州省主要含气泥页岩层系地质特征	88
4.3.2	有利区综合评价	95
4.3.3	泥页岩气开发前景分析	105
4.4	典型实例	110
4.4.1	四川盆地南部下志留统泥页岩气	110
4.4.2	渤海湾盆地渤南凹陷泥页岩油	117
4.4.3	南华北泌阳坳陷泥页岩油	121
5	煤层气	129
5.1	概述	129
5.2	煤层气的组成	130
5.3	煤层气的生成和运移	131
5.4	煤储层和煤层气的储存	133
5.4.1	煤储层的特征	133
5.4.2	煤层气的储存特征	137
5.5	煤中气体的流动	138
5.6	煤储层箱和含气影响因素	139
5.7	煤层气保存和圈闭	140
5.7.1	煤层气保存	140
5.8	典型实例	143
6	油页岩	147
6.1	油页岩概况	147
6.2	油页岩形成	150
6.3	油页岩成因类型	151

6.4	油页岩特征	152
6.5	中国油页岩成矿模式	153
6.6	油页岩油开发关键技术	155
6.6.1	油页岩油原位开采技术	155
6.6.2	油页岩地面干馏工艺技术	156
6.6.3	油页岩干馏产物利用技术	158
6.6.4	油页岩开发环境保护与检测技术	159
6.7	中国典型油页岩：抚顺盆地油页岩	160
6.7.1	抚顺盆地油页岩特征	161
6.7.2	抚顺盆地油页岩成矿主控因素	163
6.7.3	勘查开发简况	164
7	油砂	166
7.1	油砂概况	166
7.2	油砂的性质	166
7.3	油砂的形成	169
7.4	中国油砂成矿模式	171
7.5	典型矿床	174
7.5.1	加拿大阿尔伯达盆地阿萨巴斯卡油砂矿	174
7.5.2	准噶尔盆地乌尔禾油砂矿	175
7.6	油砂资源分布	178
8	天然气水合物	183
8.1	概况	183
8.2	天然气水合物结构	184
8.3	天然气水合物形成的地质条件	187
8.4	储集岩特征	189
8.5	天然气水合物的运移	192
8.6	天然气水合物的形成模式	193
8.7	天然气水合物评价	194
8.8	天然气水合物预测技术	194
8.9	天然气水合物评价指标	196
8.10	天然气水合物资源潜力	198
8.11	天然气水合物的勘探开发技术	200
8.12	天然气水合物环境及工程响应	203
9	非常规油气资源评价方法	207
9.1	体积法	207
9.2	类比法	210
9.3	非常规油气资源评价方法对比	210

10 非常规油气勘探开发技术	215
10.1 地震勘探技术	215
10.2 测井技术	215
10.3 微地震监测技术	218
10.4 水平井技术	221
10.5 压裂技术	222
11 非常规油气发展战略	225
结 论	226
主要参考文献	228

1 非常规油气勘探开发形势

1.1 非常规油气资源开发意义重大

由于我国人均油气资源水平低、能源结构不合理的基本国情和“软肋”，因此，推动能源生产和消费方式的变革，提高能源绿色、低碳、智能发展水平，走一条清洁、高效、安全、可持续的能源发展道路势在必行。为此，国务院领导高度重视非常规油气勘探开发，指出要加强非常规天然气开发的科技攻关，要制定规划，首先要搞好资源调查。未来一个时期我国能源需求还会增长，因此，要立足国内，着力增强能源供应能力，在加大陆上、海洋油气勘探开发力度的同时，要创新体制机制，促进泥页岩气、泥页岩油、煤层气、致密岩气等非常规油气资源的开发。促进非常规油气资源勘探开发，对于带动相关技术的发展，加快能源资源接替，延长油气资源使用寿命，提高我国能源保障水平，在开放格局中维护能源安全，掌握发展的主动权，提高能源利用效率，促进经济社会更好的发展具有重要意义。

1.2 国外非常规油气勘探开发现状

1.2.1 泥页岩气

泥页岩气是一种非常规天然气资源，是常规油气能源的重要战略接替。近年来，美国泥页岩气勘探开发取得了重要突破，产量快速增加，引起了世界各国的广泛关注。

2011年4月5日，美国能源信息署（EIA）公布了其对全球泥页岩气资源的初步评估结果。结果显示，全球14个地理区域（美国除外）、48个泥页岩气盆地、70个泥页岩气储层、32个国家的泥页岩气技术可采资源量为 $163 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，加上美国本土的 $24 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，全球总的泥页岩气技术可采资源量升至 $187 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。其中，中国的泥页岩气技术可采资源量为 $36 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，排名世界第一（约占20%），其后依次是美国（约占13%）、阿根廷、墨西哥和南非（表1.1）。

表 1.1 2011 年 EIA 泥页岩气资源评估部分结果

国家	技术可采资源量/ 10^8m^3
中国	360825
美国	243946
阿根廷	219042
墨西哥	192723
南非	137255
澳大利亚	112068
加拿大	109804
利比亚	82070
阿尔及利亚	65373

续表

国家	技术可采资源量/ 10^8m^3
巴西	63958
波兰	52921
法国	50940
挪威	23489
智利	18112
印度	17829

(1) 美国

美国页岩气开发能够取得成功，与美国政府开展的前瞻性研究密不可分。1976年至1992年，美国能源部及其前身启动实施了“东部含气页岩项目”（Eastern Gas Shale Program (1976~1992)）。该项目主要针对美国东部厚层泥盆纪黑色含气页岩进行。美国东部泥盆纪含气页岩广泛分布。在约160,000平方英里的西阿巴拉契亚盆地中，其中大约40%面积内的泥盆系页岩埋深小于4000英尺，46%面积内的泥盆系页岩埋深介于4000~8000英尺之间（1英尺=0.305m）。

自1800年以来就已经认识到阿巴拉契亚盆地页岩沉积，以及密歇根盆地和伊利诺伊盆地的部分页岩沉积具有产气能力。到1970年代，这几个盆地的浅层页岩已经生产了大约3Tcf天然气。然而，由于泥盆系页岩的气井产量低，与美国能源部在“非常规天然气资源研究项目”中确定研究的其他类型非常规天然气一样，与产自高孔渗砂岩和灰岩的常规天然气相比，一直被认为无关紧要。

对泥盆系页岩原地资源量和可采资源量的认识差别很大，原地资源量从少于1000Tcf到300000Tcf，差300倍；可采资源量从25Tcf到285Tcf不等。这说明工业界对泥盆系页岩储层和生产特性了解较少。

1968年，美国国内天然气储量开始下降，美国采矿局（USBM）开始调查确定有哪些技术方法可以用来开采边际天然气资源。美国采矿局（USBM）之后成为了能源研究和发展委员会（ERDA）的一部分。

东部含气页岩工程（EGSP）于1976年在能源研究和发展委员会的摩根通能源研究中心（METC）正式启动，之后，该部门并入了新成立的美国能源部（DOE）。EGSP的资金投入持续到1992年。16年的总预算略高于9200万美元。第一个5年（1976~1981年）的主要研究内容为东部页岩的地质、地化、地球物理和储层特征的描述，并指导与油气生产商成本共担的储层改造（水力压裂、化学爆炸压裂、定向钻井）试验。这项研究共获取了近38,000英尺岩心、出版了300多项相关研究技术成果。

80年代开始，研究重点转为储层性能的细节研究和裂缝性页岩储层数值模拟。1982~1983年，在俄亥俄州进行了相邻井试验。这个试验由小间距的3口井组成（<150英尺）并实施了一系列复杂的生产试验，包括压力脉冲干扰试验，来改变页岩基质和裂缝流体流动性状等。在这项工作基础上，开发了一个裂缝性页岩储层模拟器（SUGAR-MD），来定量模拟各项参数的相互作用。在东部含气页岩工程（EGSP）的后期，研究主要集中在验证定量模拟的可信性。验证工作主要集中在10口单井以及其中一口井开展的邻井多井试验装置。

另一个原创性进展是在页岩中钻探横穿裂缝的定向控制水平井，业已证明，水平井流量是标准直井的6~8倍。

在东部含气页岩工程实施期间，与大学和私人研发机构签了多个研究合同，重点研究吸附与解析、数据库开发、储层性能预测等。

在 1976 年东部含气泥页岩启动时，泥盆纪泥页岩气年产量 65Bcf，几乎全部产于阿巴拉契亚盆地。到 1992 年东部含气泥页岩工程结束时，泥盆纪页岩气产量达到每年 200Bcf，产量来自阿巴拉契亚盆地、密歇根盆地（Antrim 页岩）、Fort Worth 盆地（Barnnet 页岩）以及其他含页岩盆地。

在美国国会 1980 年通过的《意外获利法》第二十九节（对非常规天然气给与税收优惠）的鼓励下；Antrim 页岩的页岩气钻井自 1978 年到 1992 年点数达到了 10700 口，高峰期 1992 年一年新钻 1709 口。

1992 年之后，泥页岩气产量持续增加，2004 年，阿巴拉契亚盆地泥页岩气产量达到 137Bcf，Antrim 页岩气产量达到 149Bcf，Barnnet 页岩气产量达到 379Bcf，新起步的 Williston 盆地 Niobrara 页岩、San Juan 盆地的 Lewis 页岩的页岩气也达到了 23Bcf，全国产量达到了 689Bcf，是东部含气页岩工程起步时的 10 倍。

2005 年以来，理论和技术发展推动美国泥页岩气迅猛发展，泥页岩气探明储量和产量迅速增加。也是从 2005 年开始，泥页岩气发挥了革命性作用。美国泥页岩气的成功开发，大大提高了本国能源自给率，降低了能源对外依赖度。

近年来，美国泥页岩气探明储量在不断增加，2007 年美国本土 48 州的泥页岩气探明可采储量为 $6151 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2008 年为 $9290 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加了 $3139 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加 51%。其中得克萨斯增加最多，由 2007 年的 $4623 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 $6112 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；其次为俄克拉荷马州，由 2007 年的 $240 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2008 年的 $979 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加 $739 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；阿肯色州、路易斯安那州的泥页岩气探明可采储量也有明显增加（表 1.2）。探明可采储量处于快速增长阶段。

表 1.2 2007~2008 年美国本土泥页岩气探明可采储量对比表（据 EIA） 单位： 10^8 m^3

序号	州	2007 年	2008 年
1	阿拉巴马	0.28	0.57
2	阿肯色	412.33	1084.17
3	肯塔基	5.66	5.38
4	路易斯安那	1.42	235.46
5	密歇根	781.36	792.68
6	蒙大拿	35.09	31.13
7	新墨西哥	2.83	0.0
8	北达科他	5.09	6.23
9	俄亥俄	0.00	0.00
10	俄克拉荷马	240.27	978.61
11	宾夕法尼亚	25.19	23.49
12	得克萨斯	4622.81	6111.39
13	西弗吉尼亚	0.00	3.96
	总储量	6151.005	9289.475

自 2000 年以来，美国泥页岩气开发进展加快，目前已完钻泥页岩气井约 5 万多口。泥页岩气产量在 1998 年占天然气年产量的 1.6%；2004 年产量 $227 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，占天然气年产的 4.5%；2007 年产量 $335 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增至 7.7%。2008 年美国能源署（EIA）泥页岩气产量为 $572 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增至 10% 左右。

对比 2007 和 2008 年各州产量，2007 年美国本土 48 州的泥页岩气产量为 $335.07 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，2008 年为 $572.23 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加 $237.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加 71%。其中得克萨斯增加最多，由 2007 年的 $258.95 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2008 年的 $405.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；其次为阿肯色州，由 2007 年的 $26.32 \times 10^8 \text{ m}^3$ 增加到 2008 年的 $78.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，增加 $52.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ ；俄克拉荷马州产量增加 $32.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ （表 1.3）。泥页岩气产量处于快速增长阶段。

表 1.3 2007~2008 年美国本土泥页岩气产量对比表 (据 EIA)

单位: $10^8 m^3$

序号	州	2007 年	2008 年
1	阿肯色	26.32	78.96
2	肯塔基	0.57	0.57
3	路易斯安那	0.28	6.23
4	密歇根	33.68	33.39
5	蒙大拿	3.11	3.11
6	新墨西哥	0.57	0.00
7	北达科他	0.57	0.85
8	俄克拉荷马	10.19	42.73
9	宾夕法尼亚	0.28	0.28
10	得克萨斯	258.95	405.54
11	东部其它州	0.57	0.57
		335.07	572.23

2010 年美国泥页岩气产量约占天然气总量的 23%，2011 年页岩气产量达到 $1700 \times 10^8 m^3$ ，超过我国天然气 2011 年总产量 $1011 \times 10^8 m^3$ 。预计 2030 年页岩气年产量将占其天然气总产量的 49%。

目前，美国已经在 20 多个盆地开展了页岩气勘探开发工作，并对其它盆地进行了资源前景调查，目前已经确定 50 多个盆地有页岩气资源前景，重点开发区域主要包括 Fort Worth 盆地的 Barrett 页岩，密歇根盆地的 Antrim 页岩、Arkoma 盆地的 Fayetteville 页岩，伊利诺伊盆地的 New Albany 页岩、俄克拉荷马州中南部的 Woodford，North Louisiana Salt 盆地的 Haynesville 页岩，跨越美国东北六个州的 Marcellus 页岩，德克萨斯州南部的 Eagle Ford 页岩等（图 1.1），但各套页岩地质勘探和开发参数差别较大（表 1.4）。



图 1.1 美国本土 48 州泥页岩气远景区分布

表 1.4 美国主要产气泥页岩基本特点

泥页岩层系	Barnett	Marcellus	Fayetteville	Haynesville	Woodford	Antrim	NewAlbany	Liwis
年代地层	密西西比系	中泥盆统	密西西比系	上侏罗统	上泥盆统	上泥盆统	上泥盆统	白垩系
页岩气富集面积/km ²	13000	240000	23000	23000	28500	31000	113000	10000
深度/m	1981~2591	1219~2590	305~2134	3200~4115	1829~3353	183~671	152~610	914~1829
净厚度/m	20~183	15~61	6~61	61~91	37~67	21~37	15~30	61~91
TOC/%	4.5	3~12	4.0~9.8	0.5~4.0	1~14	1~20	1~25	0.45~2.5
总孔隙度/%	4~5	10	2~8	8~9	3~9	9	10~14	3.0~5.5
R ₀ /%	1.0~2.1	1.5~3.0	1~>4	0.4~0.6	1.1~3.0	0.4~0.6	0.4~0.8	1.6~1.9
含气量/(m ³ /t)	8.5~9.9	1.7~2.8	1.7~6.2	2.8~9.3	5.6~8.5	1.1~2.8	1.1~2.3	0.4~1.3
日产水量/(桶/天)	0	0	0	0		5~5000	5~5000	0
井控面积/10 ⁴ m ²	24.28~64.75	16.19~64.75	32.37~64.75	16.19~226.62	259	16.19~64.75	32.37	32.37~129.50
天然气地质储量/10 ⁸ m ³	92606.4	424800	14726.4	203054.4	14726.4	21523.2	45312	17388.5
技术可采储量/10 ⁸ m ³	12460.8	74340	11781.12	71083.2	3228.48	5664	5437.44	5664

美国泥页岩气主要产于泥盆系、石炭系、侏罗系和白垩系。开发深度范围为 152~4115m，其中，生物成因泥页岩气开发深度范围为 152~671m，热成因泥页岩气开发深度范围为 914~4115m。富有机质泥页岩净厚度范围为 6~183m，多数在 30~90m 之间，成熟度为 0.4%~4.0%。有机碳含量变化范围为 0.45%~25.0%，其中低热演化泥页岩有机碳含量范围为 0.5%~25.0%，中高演化泥页岩有机碳含量为 0.45%~14.0%。低演化泥页岩孔隙度为 9.0%~14.0%，高演化页岩孔隙度为 1.0%~10.0%。泥页岩含气量变化范围为 0.4~9.9m³/t，Barnett 页岩含气量最高，在 8.5~9.9m³/t 之间，Lewis 含气量最低，在 0.4~1.3m³/t 之间。在开发过程中，Antrim 和 New Albany 两套低演化泥页岩产一定量的水，其余几套页岩不产水（表 1.4）。

泥页岩气井生产周期长，一般 30~50 年，根据对 Barnett 的测算，泥页岩气开采周期最长可达到 80~100 年，且多数不产水，这与煤层气、致密气有显著区别。

泥页岩气的成功开发，也带来了页岩油产量的增长。2008 年以来，美国陆续在多套泥页岩层系中产出了页岩油，例如 Monterey 页岩、Bakken 页岩、Barnett 页岩、Woodford 页岩、Eagle Ford 页岩及 Marcellus 页岩等，相关理论研究正在展开。

经过多年的探索实践，美国已形成了先进有效的泥页岩气开发相关技术，包括水平井导向钻进、储层压裂改造、微地震监测、CO₂ 驱气及节水减污等技术。在良好的市场和政策条件下，这些先进技术的大规模推广应用降低了开发成本，大幅提高了产量。

在国家政策、天然气价格和技术进步等因素的推动下，泥页岩气已成为美国最重要的非常规天然气资源。美国地质调查局（USGS）完成了大量区域性和基础性泥页岩气资源的调查评价和研究工作，特别是对重点盆地和重点地区开展的泥页岩气资源评价，极大地促进了泥页岩气资源的勘探开发。目前，美国已经掌握了从地层评价、气藏分析、钻完井和生产的系统集成技术，也产生了一批国际领先的专业技术服务公司，如哈里伯顿、斯伦贝谢、贝克休斯等公司。围绕泥页岩气开采，美国已形成一个技术不断创新的新兴产业，并开始向全球进行技术和装备输出。

近两年，由于美国泥页岩气产量的快速增长，其国内天然气价格并没有受到国际油价大幅度上升的影响，是世界三大天然气消费市场（北美、欧洲、亚太）中价格最低的地区。

(2) 加拿大

加拿大是继美国之后，取得页岩气商业开发成功的第二个国家，2007 年，位于不列颠哥伦比亚省东北部的区块已开始投入商业开发，其后加大了泥页岩气的研究投入和勘探开发力度。泥页岩

岩气资源主要分布于不列颠哥伦比亚省、艾塔省、萨斯喀彻温省、南安大略地区、魁北克低地以及滨海诸省，其中不列颠哥伦比亚西部地区的白垩系、侏罗系、三叠系和泥盆系的泥页岩气资源最为丰富。

目前，加拿大天然气供应量已占据了北美市场近 50% 的份额，不列颠哥伦比亚省东北部地区是其天然气主要产区。过去 10 年中，该省天然气产量的增长主要来自于非常规天然气，即泥页岩气和致密砂岩气。2011 年，加拿大国家能源局和不列颠哥伦比亚省能源和矿业厅联合发表的一份报告表明，不列颠哥伦比亚省东北部的霍恩河盆地可能成为北美第三大泥页岩气产区，仅次于美国的 Marcellus 和 Haynesville 页岩气藏。虽然霍恩河盆地页岩气资源非常丰富，但加拿大国家能源局局长戴维森表示，目前还不确定现有的经济状况能否允许全面开发，而且也不能确定什么样的开采方式是可以采用的。这也就意味着这里的泥页岩气开发还面临着诸多挑战。

(3) 欧洲

“欧洲泥页岩气研究计划”（GASH）于 2009 年在德国国家地学研究中心（GFZ）启动。此项计划由政府地质调查部门、咨询机构、研究所和高等院校的专家组成工作团队，拟通过 6 年时间共同推动完成。工作目标是通过收集欧洲各个地区的泥页岩样品、测井试井和地震资料数据，建立欧洲的泥页岩数据库，与美国的含气泥页岩进行对比研究，在此基础上寻找和发现泥页岩气以满足当地和区域的需求。计划的资助方包括挪威国家石油公司（Statoil）、埃克森美孚（Exxon Mobile）、法国天然气苏伊士集团（GDF Suez）、道达尔（Total）、斯伦贝谢（Schlumberger）、Wintershall、Vermillion、Marathon Oil、Repsol 和 Bayemgas 等 10 家大型油气公司。参与机构主要有德国国家地学研究中心（GFZ）、法国石油研究院（IFP）、荷兰应用科学研究组织（TNO）等 3 家大型研究机构，英国、德国、荷兰的多所高等院校，以及超过 20 个国家和地方地质调查局。

欧洲的非常规天然气勘探开发主要集中在波兰、奥地利、瑞典、德国和英国。据预测，欧洲的非常规天然气产量 2030 年最高可达 $600 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，其中波兰的产量最高，其他的则来自瑞典、德国、法国、奥地利和英国等国家。目前，波兰已钻 11 口泥页岩气探井，预计 2014 年实现商业化开采，并逐步实现燃气自给，随着技术的进步，开发成本有望大幅度降低。

(4) 其他国家和地区

印度主要评估了坎贝、克里希纳戈达瓦里、高韦里和达莫德尔等盆地的泥页岩气资源量，并在西孟加拉邦东部达莫德尔盆地实施了一口泥页岩气探井，在 1700m 左右地层中发现了泥页岩气，初步估算泥页岩气的分布范围超过 12000 km^2 。

澳大利亚泥页岩气技术可采资源量约 $11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，主要分布在中南部、西部和东部的 Cooper, Perth, Amadeus, Georgina 和 Canning 等盆地中，其中在 Perth, Cooper, Canning 盆地泥页岩气的勘探开发已经取得了一定的进展。

阿根廷积极开展泥页岩气勘探开发。美国能源信息署的一份报告显示，阿根廷泥页岩气技术可采资源量约为 $21.9 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，居世界第三位，占拉丁美洲泥页岩气储量的 1/3。阿根廷在 Neuquen 地区泥页岩气勘探获得重大进展，该区页岩气可采资源量约为 $7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

南非泥页岩气资源主要分布在 Karoo 盆地南部，目前已开展页岩气勘探开发工作。该地区二叠系的 Whitehill 地层是泥页岩气有利目地层，Shell 公司正在该区进行页岩气勘探开发。

其他国家，如墨西哥、哥伦比亚、委内瑞拉、土耳其、巴基斯坦等国家开展了不同程度的泥页岩气勘探开发工作。

1.2.2 其他非常规油气

(1) 美国

1976 年至 1995 年，美国能源部及其前身启动实施了多个非常规天然气资源研究项目，除“东部含气泥页岩项目”（1976~1992）外，还有西部含气砂岩项目（Western Gas Sands Program（1978~

1992))，煤层甲烷项目 (Methane Recovery from Coalbeds Program (1978~1982))，深源气工程 (Deep Source Gas Project (1982~1992))，水合甲烷项目 (Methane Hydrates Program ((1982~1992)))，天然气二次开发项目 (Secondary Gas Recovery (1987~1995))。

1) 西部含气砂岩项目 (1978~1992)。在 1970 年代后期，当西部含气砂岩研究与开发项目启动时，对西部落基山前陆盆地致密岩气的认识很肤浅，且绝大多数为不经济资源。油气勘探开发工业对从这种不连续的、低渗透性砂岩中形成广泛分布的巨大的产量的观点持怀疑态度。

根据较为中庸的估计，1976 年产自阿巴拉契亚、山绢和二叠纪盆地成熟致密砂岩气田的天然气为 1Tcf 左右。这一产量不到美国气田气产量的 6%，不到全部天然气产量的 5%。另外，墨西哥湾、东得克萨斯、中部内陆、威灵斯顿盆地等储层条件较前者略好的 near tight 气田年产 360Bcf 左右。然而，将被选作西部含气砂岩项目研究对象的 5 个落基山前陆盆地 (大绿河、风河、皮申斯、尤因塔和丹佛盆地) 年产天然气只有 162Bcf，储量只有 2Tcf，少于当时全国气田气储量的 1%。

1978 年到 1992 年，西部含气砂岩项目历经 16 年，在波折中结束。虽然历经曲折，但在盆地中心气基本认识方面、经济有效增产开发方面也取得了很大进展。

近 30 年，在致密储层发现和生产技术取得显著进展，很大程度上是在西部含气砂岩项目取得的基础理论认识和技术进展的基础上实现的。

2004 年，美国本土致密岩气产量超过 5Tcf，达到美国气田气产量的 28% 以上，全部天然气产量的 21% 以上。EIA 预计，落基山前陆盆地致密岩气将达到每年 2.3Tcf，2020 年美国本土致密岩气产量将达到每年 5.5Tcf，这充分显示了西部含气砂岩的长期效益。

2) 煤层甲烷开发项目 (1978~1982)。在煤炭形成的过程中，甲烷生成并储存于煤层及邻近地层中。所有煤炭沉积都含有甲烷，但不同层及层内部的聚集特征差别较大。美国煤炭相关甲烷资源总量在 100Tcf 到 800Tcf 之间，多数为 400Tcf，其中技术可采资源为 100~150Tcf。

美国 USGS 评价认为，2005 年，煤层甲烷产量为 1.732Tcf，大约为美国气田气产量的 10%。

然而，在本项目 1978 年实施前，这种资源要么没有被认识到，要么被工业界忽视。是 1970 年代的天然气短缺促使煤层与致密砂岩和泥盆纪泥页岩一样，被认为是可以成为满足天然气需求增长的潜在来源而引起重视。

煤矿开采安全要求促使美国矿产开发局开始发展甲烷排放技术，该项技术的使用使大约 250MMcfd 排放到大气。如何捕获这一资源，包括那些过深、过薄的不可采煤层的煤层气资源是这个项目的主要目标。

1978 年的天然气政策给了煤层气商业勘探的经济激励措施，但其大规模开发和商业利用仍有许多障碍。在技术、经营、生产的经济可行性等方面还没有充分得到展示来吸引私人领域的投资。在抽排前，煤层相关天然气本质上为纯甲烷，采区气体为甲烷与空气的混合物，通风设备内为进一步稀释的甲烷。

资源往往距需求区较远，且单井产量很低。同时，煤炭生产者在采矿过程中可以依法排放甲烷，并担心开采甲烷所面临的法律问题，因为通常天然气矿权属于他人。由于亿吨煤炭的市场价值是其中所含甲烷气体价格的上百倍，与主相比，煤炭开采公司对甲烷衍生收入的兴趣不大。

美国矿业开发局在煤层气方面的早期工作主要集中于阿巴拉契亚和黑勇士盆地的抽排前和开采过程。矿业开发局项目在 1978 年被能源部接续进行 5 年的资金支持。之后的煤层气研发主要由天然气研究所 (GRI) 及工业界支持。

煤层甲烷开发项目的目的是确定资源基础的规模和可开发性以及采煤过程中所采出煤层气的利用方面。实施了几个前沿领域项目，包括深层不可采煤层直井试验，多煤层直井试验，与采矿结合的、复合水平井试验以及以煤层气为燃料的煤矿燃气轮机电站等。矿产开发局及之后的能源部实施的水力压裂试验展示了这项技术在煤层气开发上的应用。

煤层气项目从 1978 年到 1982 年的投资约为 30 亿美元，主要在 1979~1981 年投入。在黑勇士盆地

开展的先导项目还得到了工业界的投资。

税收优惠、基础和应用研究帮助建立了目前繁荣的煤层气产业（已无经济刺激），并且在经历了（1988~1989年和1991~1992年）低价天然气阶段后仍具有竞争性。其中能源部在认识煤层气商业开发价值方面起到了关键作用，特别是对煤层气资源潜力和初期野外试验方面。

3) 深源气项目（1982~1992）。深源气研究是能源部于1976年启动非常规天然气资源项目的副产品。这项研究背后的基本概念是如果证实在大于30000英尺时有甲烷或甲烷源岩存在将从根本上影响用于勘探新的天然气供应的方法。

最初动力来至1982年5月METC的一个研讨会。会上讨论了一个研究项目的潜在效益，这个项目将调查三种类型的深源气资源，包括：①非有机成因气：原生于地球地幔的非有机成因碳氢化合物。②俯冲带有机成因气：板块俯冲将近地表的有机气源带入深部并形成碳氢化合物。③深沉积盆地气：沉积岩中发现的常规气源天然气因构造下凹埋深超过30000英尺。

最后将重点集中在俯冲带深源气方面。研究地区为北美地区，这里既有主动大陆边缘，也有被动大陆边缘。根据前期地球化学研究成果表明，美国西部、阿拉斯加和加拿大有150万平方英里远景区内的深源气生成能力达到了3000 Tcf。

能源部的投资主要集中于确定这种深气源带能够形成天然气、确定其运移路径、确定潜在天然气藏的存在、确定目标区并进行资源量估算。

地质特征描述开始于1984年，包括在加利福尼亚北部、俄勒冈和华盛顿州目标区的地球物理和地球化学野外研究（图1.2）。

4) 甲烷水合物项目（1982~1992）。对西西伯利亚Messoyakha天然气田甲烷水合物源的天然

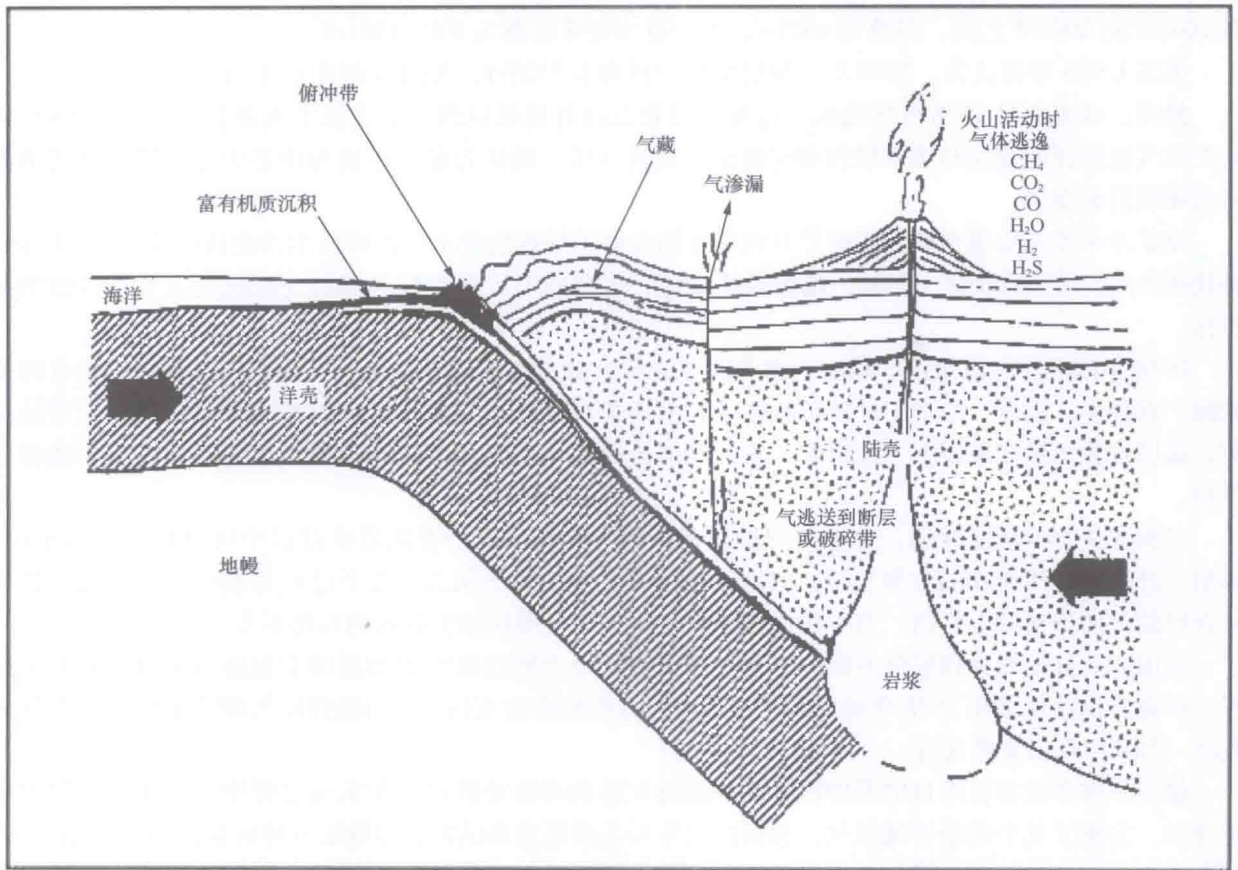


图 1.2 俯冲带深源气形成示意图