

低碳能源技术
Low Carbon Energy Technology

页岩气 及其勘探开发

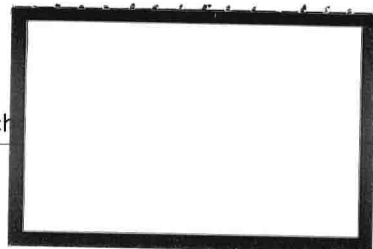
肖钢 唐颖 编著

**Shale Gas and Its
Exploration and
Development**



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

低碳能源技术
Low Carbon Energy Tech



Shale Gas and Its Exploration and Development

页岩气 及其勘探开发

肖 钢 唐 颖 编著

YEYANQI JIQI KANTAN KAIFA

 高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书系统地总结了国内外页岩气研究的理论成果,介绍了世界上页岩气资源及勘探开发的概况、页岩气及其富集机理、勘探评价及开发的主要技术、中国页岩气地质特点及勘探开发情况,并总结了国外页岩气产业发展的经验。全书内容囊括页岩气的资源、地质、机理、勘探、开发和政策等多个方面,对国内页岩气的理论研究和勘探开发工作具有一定的指导意义。

本书可供从事页岩气理论研究和勘探开发的科研人员阅读,也可供从事新能源研究的人员及石油院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

页岩气及其勘探开发/肖钢,唐颖编著. —北京:
高等教育出版社,2012.6
ISBN 978-7-04-034069-3

I. ①页… II. ①肖…②唐… III. ①油页岩-油气
勘探②油页岩-油田开发 IV. ①P618.130.8②TE3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 074044 号

策划编辑 刘占伟 责任编辑 刘占伟 封面设计 王凌波 版式设计 杜微言
责任校对 杨凤玲 责任印制 田甜

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印 刷 秦皇岛市昌黎文苑印刷有限公司
开 本 787 mm × 1092 mm 1/16
印 张 15
字 数 290 千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
版 次 2012年6月第1版
印 次 2012年6月第1次印刷
定 价 45.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 34069-00

审图号:GS(2012)60号

清洁能源对当今世界的重要性正得到人们的普遍认同。作为世界工业催化行业的领军企业,哈尔杜·托普索公司也认为我们的世界正面临一个清晰而紧迫的需求——能源的新型、清洁和高效的利用方式。

我已经 98 岁,比肖钢博士年长 48 岁,我们一直是难得的忘年交。大约 20 年前,年轻的肖钢博士在托普索公司开始他的职业生涯时,托普索家族就了解他并彼此成为好朋友了。从一开始结识,他的才干以及他对多学科知识的驾驭能力便给我留下了深刻的印象。我非常享受与他见面的时光,每次与他见面都是一个让我了解更多能源系统与大千世界的绝妙机会。时光飞逝,从我们结识以来,肖钢博士已经成长为一名世界级的领军科学家。他的科学技术知识面很宽,横跨无机化学、有机化学、电化学、物理化学和地球科学。他的热情,包括做事时巨大的激情以及他独特的人格魅力给人以深刻的印象。

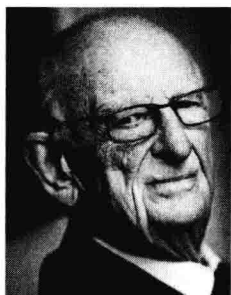
上次见到他的时候,他向我介绍了他正在为中国读者编写的一套清洁能源方面的科技丛书。我非常高兴为这套丛书作序,并借此机会向所有对清洁能源的发展感兴趣的同仁推荐肖钢博士的作品。

哈尔杜·托普索



董事局主席、公司创始人

哈尔杜·托普索 先生简介



Haldor Frederik Axel Topsoe(哈尔杜·托普索),1936年毕业于丹麦技术大学(DTU),1940年创立哈尔杜·托普索公司。公司成立70多年来,一直秉持只有通过应用基础研究才能建立和保持独一无二的催化市场地位的经营理念,现在是世界工业催化领域家喻户晓的领军企业。由于成绩斐然、对社会的贡献巨大,哈尔杜·托普索先生曾被授予诸多国际荣誉,包括丹麦皇室授予的皇家大爵士勋章。

(原文)



It is widely recognized that clean energy is an area of increasing importance to our world. As one of the leading companies in the catalysis industry, Haldor Topsoe fully shares the view that this world has a clear and compelling need to use our energy resources in new, clean and efficient ways.

I am now 98 years old. With an age difference of 48 years, I have enjoyed a friendship with Dr. Gang Xiao between generations. The Topsoe family has known Dr. Gang Xiao for almost 20 years, since he as a young man began his career with the company many years ago. Right from the beginning I was impressed by his talents and multidiscipline approach and I have always enjoyed his presence, and every time we are together I use the opportunity to learn more about energy systems and the wider world. Since our early encounters Dr. Xiao has developed into a world leading scientist with active knowledge across a broad spectrum of science and technology, including inorganic and organic chemistry, electrochemistry, physical chemistry, and geosciences. His enthusiasm, tremendous passion, and his unique appealing personality have always impressed me very much.

The last time I met him, Gang told me that he had finished writing a series of books on clean energy technologies to the Chinese readers. I am delighted to recommend Dr. Gang Xiao's books to all those interested in the progress and possibilities in the field of clean energy.

Haldor Topsoe

A handwritten signature in black ink, reading "Haldor Topsoe".

Chairman and Founder



油气作为一种重要的战略资源,在国民经济、社会发展及国家能源战略安全方面所起的作用是毋庸置疑的。伴随着国民经济的高速发展,油气资源短缺已经成为制约经济发展的一个重要瓶颈。近年来,国际上在页岩气、天然气水合物等非常规气资源勘探与开发方面取得了长足的进展。美国在页岩气勘探开发领域取得了至关重要的突破,成功地实现了页岩气的商业性开采。以加拿大、日本等国为首进行的天然气水合物勘探和开发实验也取得历史性突破,在高寒冻土区域进行了试验性生产。日本有望在近几年实现海域天然气水合物的试验开采。这越来越表明,非常规气资源有望很好地缓解油气资源紧张的局势。

我国有着丰富的非常规气资源,据初步估算,我国页岩气资源量和美国相当,具有很好的勘探开发前景。我国在南海海域、青藏高原永久冻土带成功地钻探到天然气水合物样品,初步证实了我国具有丰富的天然气水合物资源。近些年,我国已经进行了非常规气资源的勘探和开发,并取得了很好的进展。但整体而言,我国在该领域尚处于起步阶段,与国际先进水平相比仍有很大的差距,仍需广大科研人员坚持不懈地努力。为尽早实现非常规气资源的商业性开发,我国政府已持续加大投入力度。恰逢此时,我很高兴地看到肖钢博士及其合作者正在编写关于天然气水合物和页岩气勘探开发研究进展方面的书籍,他们系统地介绍了非常规气资源的勘探开发技术的最新进展,这对科研人员掌握国际发展现状大有裨益。

肖钢博士是国家和中海油引进的海外高级人才,在清洁能源领域成果丰硕,已经出版了数本学术专著,希望其在非常规气领域的书籍也会被读者关注和喜欢。

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized Chinese characters.

中国工程院院士

前 言



能源是现代社会发展的动脉。纵观人类社会进步的历程,人类利用能源经历了高碳、中碳到低碳的过程,并将发展到无碳的时代。煤炭、石油的大规模利用已经成为现实;氢气资源从技术和成本上来说目前还不具有优势;随着低碳能源时代的到来,天然气的利用是实现低碳能源的最佳选择。随着石油资源的大量消耗及可采资源量的减少,能源供给已进入了后石油时代,全球能源供给将由以煤炭和石油为主转变为更清洁、更环保的天然气,从而进入人类利用能源的天然气时代。

页岩气是从黑色泥页岩或者碳质泥岩地层中开采出来的天然气,与致密气、煤层气、天然气水合物等一道属非常规天然气范畴,其资源潜力巨大。美国已经率先实现页岩气的工业开采,并在世界范围内掀起一场页岩气的革命。页岩气作为油气勘探的一个新领域越来越得到世界各国的重视。中国页岩气资源潜力巨大,政府部门、科研机构、石油公司已纷纷开始页岩气的理论研究及开发试验。页岩气开发已成为国内非常规天然气研究的热点,我国的页岩气的勘探开发方兴未艾。本书是页岩气研究的综述性著作,内容囊括页岩气的资源、机理、地质、开发和政策等多方面的内容,系统地总结了世界页岩气资源及其开发现状、国内外页岩气机理研究的理论成果,并全面介绍了页岩气勘探开发的主要技术,对国外页岩气开发的经验进行了总结,可供国内研究人员及工程技术人员参考。

全书共分为七章,主要包括世界非常规天然气勘探开发概况、页岩气及其富集机理、页岩气勘探及评价技术、页岩气开发技术综述、美国页岩气及其勘探开发、中国页岩气地质及勘探开发、国外页岩气勘探开发对中国的启示等内容。世界非常规天然气勘探开发概况介绍了页岩气、煤层气、致密气、天然气水合物的资源情况和开发现状,并对世界各国页岩气资源情况和开发现状进行了详细的介绍,为读者展现了一个全局的资源特点。页岩气及其富集机理部分介绍了页岩的成因、页岩气的形成条件及页岩气的富集机理,概述了目前国内外页岩气研究的理论成果。页岩气勘探及评价技术部分介绍了国内外页岩气勘探及评价时常用的技术,包括地震勘探、测井录井、实验分析、资源评价及地质评价技术等,勘探评价是页岩气开发的基础。页岩气开发技术综述部分详细地介绍了国外页岩气开发过程中的钻、完井技术,压裂增产技术以及压裂监测技术,其中,水平钻井、水力压裂、微地震监测是页岩气开发的核心技术。美国页岩气及其勘探开发部分介绍了美国页岩气勘探开发的历史、现状及资源情况,对代表性页岩的地质特征、资源情况、开发情况进行了详细的介

绍,并论述了页岩气开发所带来的环境问题。中国页岩气地质及勘探开发部分介绍了中国页岩气的研究历史、地质基础、资源特点以及分区,并介绍了中国页岩气开发的最新进展。国外页岩气勘探开发对中国的启示部分介绍了国外页岩气开发的产业特点、财税政策、成功经验等,以供国内读者参考和借鉴,并总结了我国页岩气开发所面临的问题,提出了我国页岩气勘探开发的策略。

本书在编著过程中得到了中海石油气电集团技术研发中心邢云地质总师、中国地质大学(北京)张金川教授的指导与帮助,他们为本书的编著提出了很好的思路和建议。同时,该书也得到中国工程院院士、著名海洋石油工程专家曾恒一的关怀,并在百忙之中为本书作序,在此特别致谢。编者在学习研究、资料收集、野外工作的过程中,得到了国土资源部油气资源战略研究中心的领导、专家以及中国地质大学(北京)能源学院页岩气研究团队的指导与帮助,在此致谢。另外,本书引用了大量的国内外页岩气方面的研究成果和文献,由于资料众多,难以一一列举出来,在此一并致谢!

本书的部分成果得到国家自然科学基金项目《页岩气聚集机理和成藏条件》(批准号:40672087)和国土资源部全国油气资源战略选区调查与评价国家专项《中国重点地区页岩气资源潜力及有利区优选》(编号:2009GYXQ15)的联合资助,在此表示感谢!

本书是编者从事页岩气学习和研究过程中的一个初步成果,加之编者水平有限,书中难免有错误和不足之处,敬请读者批评指正。



2012年4月19日

常用名词缩 略语对照表



-
- EIA 美国能源信息署
IEA 国际能源署
USGS 美国地质调查局
CSUG 加拿大非常规天然气协会
GTI 美国天然气技术研究所
ARI 高级资源国际公司
NEB 加拿大国家能源局
RRC 得克萨斯州铁路委员会
DOE 美国能源部
USBM 美国矿业局
BP 英国石油公司
AAPG 美国石油地质师协会
SPE 美国石油工程师协会
CAPP 加拿大石油生产者协会

目 录



第 1 章 概述	1
1.1 世界非常规天然气资源及勘探开发概况	1
1.2 世界页岩气资源及勘探开发概况	8
参考文献	17
第 2 章 页岩气及其富集机理	19
2.1 页岩气及其特征	19
2.2 页岩气形成条件	25
2.2.1 页岩气成因	25
2.2.2 页岩气形成条件	27
2.3 页岩气富集机理	42
参考文献	52
第 3 章 页岩气勘探及评价技术	55
3.1 页岩气地质勘探技术	55
3.1.1 页岩气地震勘探技术	55
3.1.2 页岩气井测井录井技术	57
3.1.3 页岩实验分析技术	64
3.2 页岩气综合评价技术	76
3.2.1 页岩气资源评价方法	76
3.2.2 页岩气地质评价技术	79
参考文献	84
第 4 章 页岩气开发技术综述	87
4.1 页岩气井钻完井技术	87
4.1.1 钻井与取心技术	87
4.1.2 固井与完井技术	97
4.2 页岩气井压裂增产技术	102
4.2.1 压裂设计	102

4.2.2	压裂设备及工具	106
4.2.3	压裂液及水资源管理技术	112
4.2.4	水平井多级压裂工艺	115
4.3	页岩气井压裂监测技术	116
4.3.1	示踪剂压裂监测	118
4.3.2	微地震裂缝监测	120
	参考文献	127
第5章	美国页岩气及其勘探开发	129
5.1	美国页岩气勘探开发历程	129
5.2	美国典型含气页岩系统	131
5.2.1	北美含气页岩区域地质背景	131
5.2.2	美国含气页岩分布特征	135
5.2.3	美国典型含气页岩概况	137
5.3	美国页岩气开发的相关问题	161
5.3.1	美国页岩气之父	161
5.3.2	页岩气带来的革命	163
5.3.3	页岩气开发的环境问题	164
	参考文献	166
第6章	中国页岩气地质及勘探开发	169
6.1	中国页岩气发育地质背景	169
6.1.1	区域沉积演变	169
6.1.2	页岩发育和分布	171
6.1.3	中国页岩气富集模式	175
6.2	中国页岩气资源	178
6.2.1	中国页岩气资源潜力	178
6.2.2	中国页岩气资源前景	180
6.2.3	中国页岩气资源量	191
6.3	中国页岩气研究历程及勘探开发	194
6.3.1	中国页岩气研究历程	194
6.3.2	中国页岩气勘探开发进展	196
	参考文献	200
第7章	国外页岩气勘探开发对中国的启示	203
7.1	世界非常规天然气产业政策	203
7.1.1	国外非常规天然气产业政策	203

7.1.2 中国煤层气产业政策	210
7.1.3 中国页岩气产业发展建议	212
7.2 美国页岩气开发的成功经验	213
7.2.1 美国页岩气产业的特点	213
7.2.2 美国页岩气成功开发的启示	215
7.3 中国页岩气勘探开发策略	217
7.3.1 中国页岩气勘探开发的当前问题	218
7.3.2 中国页岩气资源的战略选区与勘探开发	219
参考文献	223

广义上天然气是指自然界中天然存在的一切气体,包括大气圈、水圈、生物圈和岩石圈中各种自然过程形成的气体,狭义的天然气是指天然蕴藏于地层中的烃类和非烃类气体的混合物。通常人们所说的天然气即为狭义的天然气。天然气是世界公认的清洁能源,随着石油储量的减少和环保问题的严重,近年来,世界天然气的产量和消费量都逐年递增,据专家估计,数年后人类对天然气的消费将超过石油。

1.1 世界非常规天然气资源及勘探开发概况

翻开人类社会的发展史,人类社会的进步与能源早已结下了不解之缘。人类利用能源方式的每一次进步,都会引起生产和社会的重大变革。早在远古时期,钻木取火为人类带来了温暖和光明,使人类结束了茹毛饮血的原始生活,创造了最初的文明;18世纪,煤的开发和使用促成了蒸汽机的发明及应用,从此开启了人类文明史上第一次工业革命,人类开始走出刀耕火种的时期,进入工业化大生产时代。随着社会的发展,煤炭、石油、天然气等一次能源得到大量的开发,在此期间,电力作为二次能源出现了,进一步推进了人类文明,并以其不可思议的力量彻底改变了人类的生活。步入现代社会以后,能源开发的视野更为广阔,核能、氢能等新型能源陆续得到开发,为人类社会的进步提供了源源不断的动力。可以说,人类社会发展史在一定意义上就是一部能源开发和利用的历史。

随着人类社会的不断发展以及人类环保意识的不断提高,能源与环境的可持续发展成为当今社会发展的主题。纵观人类能源的发展史,人类能源利用可以分为木材、煤炭、石油、天然气、核能和太阳能六个阶段。人类社会的进步,就是逐步由使用高碳(煤炭)、中碳(石油)和低碳(天然气)资源,再到无碳(氢气)资源的过程。木材、煤炭和石油这三个阶段目前已经成为现实,核能和太阳能是新能源发展的重点方向,而天然气目前正处于高速的发展阶段。天然气作为一种高效、优质的清洁能源和化工原料,已经成为仅次于石油和煤炭的世界第三大能源,是实现低碳能源消费的最佳选择。

据BP(2011)统计,2010年,世界一次能源消费量增加了5.6%,是自1973年以来最强劲的增长。石油、天然气、煤炭、核能、水电以及用于发电的可再生能源增速均高于平均值。石油仍然是主导性能源(占全球总消费量的33.6%),但其所占份额

连续 11 年下降;煤炭在总能源消费中占比继续上升;天然气的占比达到历史最高纪录(图 1-1)。2010 年,全球天然气产量增加 7.3%,其中俄罗斯天然气产量快速增长,增幅为 11.6%,为全球之最,美国和卡塔尔的增幅分别为 4.7%和 30.7%。美国仍然是世界上最大的天然气生产国。全球天然气消费增长 7.4%,为 1984 年以来的最大增幅。除了中东地区,所有地区的消费增幅都高于平均水平。美国天然气消费增长居世界之首,增幅为 5.6%,达到历史新高。俄罗斯和中国的天然气消费也有大幅的增加,分别达到各自的历史最大增幅。

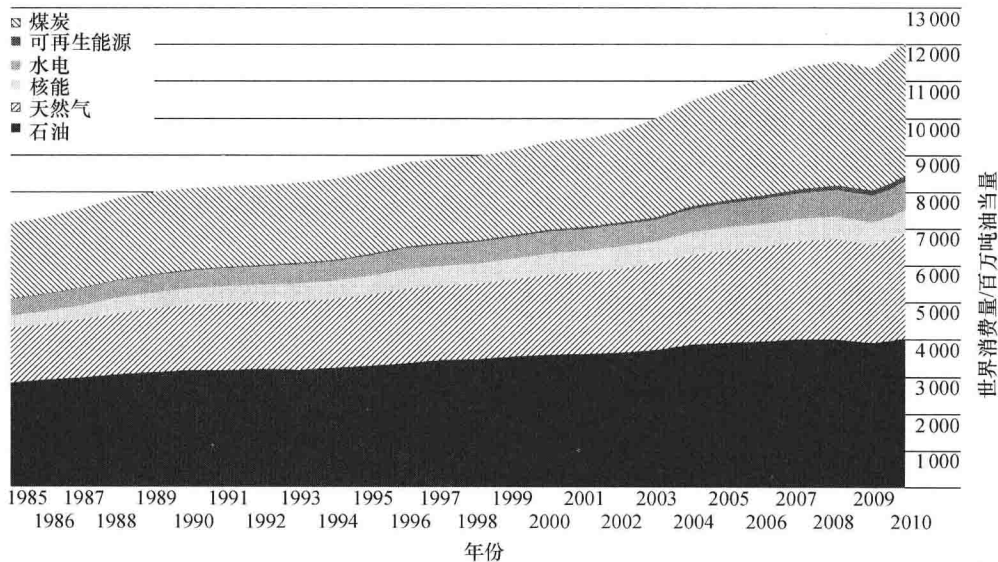


图 1-1 世界能源消费增长图(BP,2011)

近 20 年来,世界天然气探明储量快速增长(图 1-2)。2010 年,世界天然气探明储量为 $187.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,较 1990 年探明储量 $125.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 增长了 48.8%,年均增长率为 2.4%。与此同时,世界天然气产量和消费量也大幅度增长。2010 年,世界天然气产量达 $3193.3 \times 10^9 \text{ m}^3$,较 1990 年的 $1980.4 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增长了 61.2%,年均增长幅度为 3.1%。2010 年世界天然气消费量为 $3169.0 \times 10^9 \text{ m}^3$,较 1990 年的 $1960.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 增长了 61.7%,年均增长 3.1%。据国际能源署(IEA)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和地区,其增长速度会更快。

天然气包括常规天然气和非常规天然气。常规天然气是指采自气田的天然气和油田的伴生气;非常规天然气是指在成因来源、地质过程、赋存特征、化学特点、分布规律、开发方式以及地域分布等方面与常规天然不同的天然气,也包括由于多种原因而在特定的时期内还不能以盈利方式进行开发生产的其他特种油气藏。在成藏地质研究过程中,非常规天然气更多是指不以浮力作为主要成藏动力和主控因素的天然气聚集,通常意义上的圈闭不再是天然气聚集的主体。非常规天然气包括煤

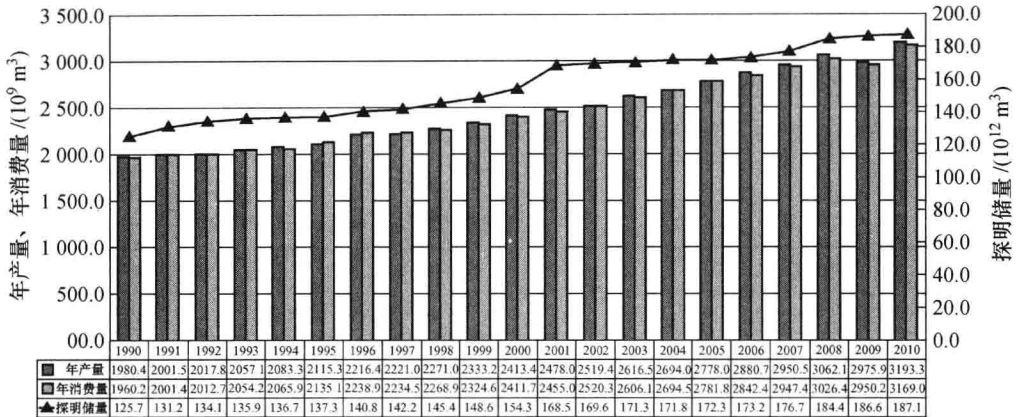


图 1-2 世界天然气生产和消费图

层气、致密砂岩气(深盆地或根缘气)、页岩气、水溶气、天然气水合物等。非常规天然气与常规天然气一样,是重要的能源矿产和战略性资源,关系到国家的经济建设和能源安全。

全球非常规天然气资源量巨大,约为常规石油天然气资源量的 1.65 倍,其中天然气水合物所占比例最大,达 37%。目前,已经商业开发的页岩气、煤层气、致密气三种非常规天然气资源总量就达 $921.7 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中页岩气资源量为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占非常规天然气总量的 49%,煤层气资源量为 $256.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占非常规天然气总量的 28%,致密砂岩气资源量为 $209.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$,占非常规天然气总量的 23%(Rogner,1997),如图 1-3 所示。另外,未计算在内的天然气水合物、水溶气等资源潜力也十分巨大。据 AAPG 地质研究 54 统计表明,在当前技术条件下全球常规天然气可采资源量为 $436.1 \times 10^{12} \text{ m}^3$,目前探明程度为 50%。随着天然气勘探理论与开发技术的进步,非常规天然气将成为天然气资源的重要来源。

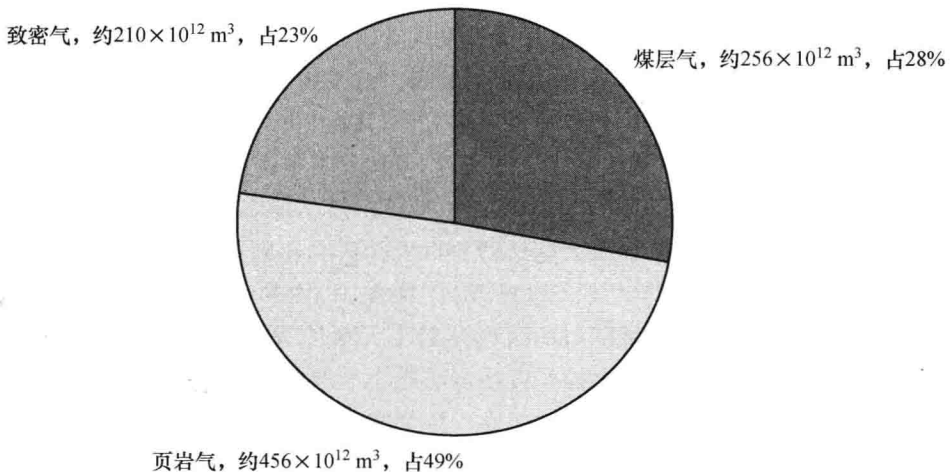


图 1-3 世界非常规天然气资源

全球非常规天然气资源主要分布在北美、中国和中亚、太平洋地区、拉丁美洲等国家和地区(表 1-1)。据统计,2007 年,全球非常规天然气产量约 $5\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。美国是全球非常规天然气开发利用的领军国家,2009 年,美国天然气产量首次超过俄罗斯,达到 $6\,240 \times 10^8 \text{ m}^3$,成为全球第一大产气国,其主要的贡献者就是非常规天然气,年产量已达到 $2\,917 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

表 1-1 全球非常规天然气资源储量表(Rogner,1997)

国家或地区	煤层气	页岩气	致密气	合计
北美	85.4	108.7	38.8	232.9
拉丁美洲	1.1	59.9	36.6	97.6
西欧	4.4	14.4	10.0	28.8
中欧和东欧	3.3	1.1	2.2	6.7
苏联	112.0	17.7	25.5	155.2
中东和北非	0.0	72.1	23.3	95.4
撒哈拉以南的非洲	1.1	7.8	22.2	31.0
中亚和中国	34.4	99.8	10.0	144.2
太平洋地区(经合组织)	13.3	65.5	20.0	98.7
亚太其他地区	0.0	8.9	15.5	24.4
南亚	1.1	—	5.5	6.7
全球	256.1	456.0	209.6	921.7

下面对各种类型非常规天然气分别加以介绍。

1. 页岩气

页岩气是从黑色泥页岩或者碳质泥岩地层中开采出来的天然气。全球页岩气资源量约为 $456 \times 10^{12} \text{ m}^3$,相当于煤层气和致密气资源量的总和,主要分布在北美、中亚和中国、中东和北非以及拉美等国家和地区,美国和加拿大是目前世界上已经实现页岩气商业开采的国家。美国的页岩气勘探开发具有较长的历史,但对于现代概念的页岩气来说,其勘探开发历史也仅有 30 多年的时间。由于技术的进步,美国的页岩气勘探开发取得了巨大的成功,页岩气年产量稳步上升,并在 2008 年超越煤层气而成为产量仅次于致密砂岩气的非常规天然气。2009 年,美国页岩气产量占同年美国天然气总产量的 14%,其总量超过了我国同期的天然气年总产量。加拿大的页岩气开发起步较美国晚,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,页岩气产量已达到 $72.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ (2009 年)。除美国、加拿大之外,中国、德国、波兰、澳大利亚、印度、南非等国家和地区也开始了大量的页岩气勘探开发及研究工作。有关世界页岩气资源及其勘探开发情况将在 1.2 节中详细介绍。

我国页岩气可采资源量为 $26 \times 10^{12} \text{ m}^3$,与美国的 $28 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 的可采资源量大致相当,资源储量十分巨大(张金川等,2009)。2004 年,国土资源部油气资源战略研究中心和中国地质大学(北京)开始了页岩气资源的研究工作,各大石油公司和高