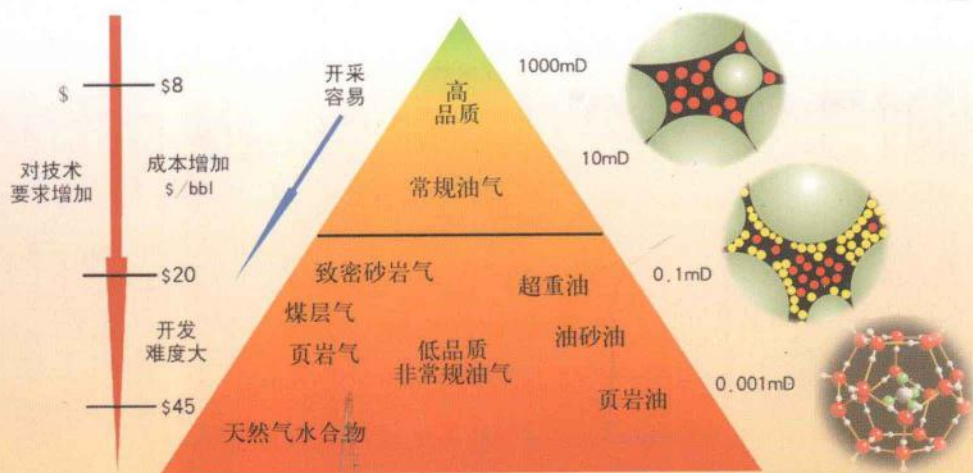


Unconventional Oil & Gas
Exploration and Development

非常规油气勘探与开发

(上册)

■ 孙赞东 贾承造 李相方 等编著



石油工业出版社

非常规油气勘探与开发

(上册)

孙赞东 贾承造 李相方 等编著

石油工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

非常规油气勘探与开发 (上、下册)/孙赞东等编著.
北京:石油工业出版社,2011.7
ISBN 978-7-5021-8569-5

- I. 非…
- II. 孙…
- III. ①油气勘探-研究
②油田开发-研究
- IV. TE 34

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 137368 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:北京晨旭印刷厂

2011 年 7 月第 1 版 2011 年 7 月第 1 次印刷
787×1092 毫米 开本:1/16 印张:82.25 插页:26
字数:2200 千字 印数:1—2000 册

定价:398.00 元 (上、下册)
(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

序

当今世界工业基础设施和我们日常生活所依赖的主要能源是石油与天然气。油气资源是战略物资，又是有限资源。我们都知道，也承认，地球上的油气不是无穷无尽的。早在 20 世纪中叶就有人预测石油资源即将耗尽，如 1949 年美国著名的石油地质学家 M. K. Hubbert 就在《Science》上发表文章预测美国将在 1971 年达到石油产量峰值。后来，还有一些机构和专家预测石油生产的峰值将会在 2000 年、2004 年、2010 年达到峰值，如此等等。虽然实际的情况并没有如此悲观，但是不管怎么说，油气产量峰值在 21 世纪上半叶出现将是很有可能的。根据最新的预测数据，全球常规石油产量将会在 2015 年前后达到峰值，常规天然气产量将会在 2040 年前后达到峰值。因此，全球的能源消费结构必将会发生改变，进而直接影响到工业生产和我们的日常生活。常规油气能源产量的下降，必然推动人们对非常规油气的勘探与开发。

非常规油气包括重油、致密砂岩气、煤层气、页岩气、天然气水合物等。由于非常规油气巨大的资源量和随着技术发展而变得越来越低的开发成本，及持续处于高位的国际油价，使非常规油气资源存在着极大的商业开发价值。但是非常规油气无论是在勘探方法还是开采技术上，都要比常规油气困难得多，因此加强针对非常规油气勘探开发技术的研究，是保证 21 世纪油气生产可持续发展的必然选择。在非常规油气资源的开发上，西方发达国家尤其是美国，起步较早，勘探开发技术也最成熟。例如，据国际能源署 2009 年度报告，在占全球总天然气产量的 12% 的致密砂岩气、煤层气和页岩气非常规天然气资源中，绝大部分来自于北美，其中美国占据了 75% 以上；加拿大和委内瑞拉的重油日均开采量占全球重油开采量的一半以上还多。在我国，五大非常规能源的储量都是非常可观的，但是除了重油和致密砂岩气之外，其他非常规油气的勘探开发技术仍基本处于起步阶段。因此，通过借鉴国外先进技术，把握全球常规非常规油气资源的未来发展趋势，并结合我国实际的情况合理利用这些技术，对我国非常规能源事业的快速发展将是非常必要的。

地质、地球物理、油藏工程的相互融合对于非常规油气资源的有效勘探开发是至关重要的。《非常规油气勘探与开发》就是目前国内少见将五大非常规油气资源的关键地质问题、先进勘探手段和开发工程工艺前沿高度融合在一起的专业图书。该书的主要作者是具有几十年油气勘探开发丰富研究和实践经验的专家学者和业界领导，并对非常规能源领域的发展有着开拓的视野和深入

的思考。通过融合多年来在非常规能源领域的理论研究和实践经验，对国内外最新的重要文献和数据的归纳分析，应该能够使读者获得当代世界非常规油气勘探开发理论与技术的最新认识，在未来的研究、实践中具有较大的参考价值。

相信此书的出版将为我国非常规油气勘探开发事业的快速发展起到积极的推动作用！

A handwritten signature in black ink, consisting of the characters '王' and '俊' in a cursive style.

原中国石油工业部部长
俄罗斯自然科学院外籍院士
世界石油理事会中国国家委员会主席
2011年7月于北京

前 言

本书是由中国石油天然气集团公司科技管理部支持编写的《能源可持续发展研究》系列丛书之一，其编写历时近一年的时间。笔者在调研了 SEG、EAGE、SPE、AAPG 等多个能源领域数据库 2000 余篇代表科技前沿的重要和经典文章的基础上，融入了多年在非常规能源领域尤其是重油、煤层气、页岩气、致密砂岩气、天然气水合物等方面的勘探开发研究成果和实践经验。

从目前的能源消费结构看，化石能源大约占世界能源消费量的 88%，其中石油占 35%，煤占 29%，天然气占 24%。世界经济和工业体系对化石能源仍具有很强的依赖性。然而，统计结果显示，常规石油产量已进入下降趋势，勘探新发现越来越少。在这种情况下，非常规油气资源是接替常规能源的最佳选择。

现今，非常规资源的资源量巨大，存在很大的商业开发价值。并且随着认识的深入和勘探开发技术的进步，相当一部分的非常规油气能够转变为可利用的消费能源。同时，油价居高不下，在很大程度上刺激了非常规油气资源的开发和研究进展。重油在加拿大和委内瑞拉的分布最为丰富，并已成为这些国家主要的原油供给来源；其他国家如中国、印尼，重油也成为其原油消费的重要补给。在重油生产增长的同时，世界范围对非常规天然气的开发利用也在紧锣密鼓地展开。致密砂岩气的储量是巨大的，也是勘探开发最成熟的非常规气藏，尤其在美国、加拿大和中国，取得了巨大的经济效益，目前其全球总产量占到了所有非常规气总产量的首位。对于煤层气的开发，在税收优惠政策的支持下，美国成为世界上商业化开采煤层气最早和最成功的国家，并在全世界产生了积极的示范作用，从而推动了世界上其他国家（特别是在澳大利亚、中国和印度）煤层气工业化的迅速发展。页岩气的大规模商业开发起源于美国，并在短短几年内其页岩气产量大幅度增长，2010 年页岩气产量占到美国天然气总产量的 13%，而这个数字在 2008 年才是 8%（EIA，2010）。这促使页岩气勘探开发技术成为近两年非常规能源领域研究的热点。当然，也有一种非常规天然气至今还一直安静地蕴藏在海底和北极冻土里，那就是天然气水合物。对于天然气水合物的开发，目前还处于探索阶段，如在美国、加拿大、日本、中国等开展过一些专门的勘探活动，虽然离大规模商业开发还有很长一段距离，但是由于其惊人的地质储量，在未来的某一天它将有可能成为全球能源供给的重要源泉。那么，针对这些非常规油气资源勘探开发的研究现状如何？前沿技术是什么？本书将努力回答这些问题。

本书共分6部分,分别是总论(世界常规非常规能源评价和展望)、重油、致密砂岩气、煤层气、页岩气和天然气水合物。内容涵盖各类非常规油气资源的重要地质问题、前沿地球物理技术、先进的开发技术和工程措施,以及全球资源量和分布、经济评价和环境问题等。相对于常规油气,非常规油气资源的勘探开发更要求地质、地球物理、油藏工程等多学科的综合。因此,本书在编排时始终按照从阐述重要地质问题出发,介绍典型岩石物理特征,到深入探讨地球物理技术在非常规油气勘探开发中的作用,最终落脚于有哪些先进的开发技术和工程手段能最大化地提高开采效率。

本书在中国石油大学(北京)孙赞东教授多年酝酿积累的基础上,历时近一年的时间组织编写完成。中国石油学会理事长贾承造院士对本书的编写工作给予了大力支持,并亲自承担该书的审阅定稿工作;同时,中国石油大学(北京)李相方教授的大力协作也使本书内容更加完整、丰富。孙赞东教授负责拟定全书体系结构、制定编著大纲、分工起草框架,同时执笔前言、第1部分、第2部分的第2.5节、第2.6节,指导编著第2部分的前4节、第3部分的前3节、第4部分的前4节、第5部分的前3节和整个第6部分,并组织起博士生、硕士生编写了各工程部分的初稿;李相方教授执笔第2部分第2.7节的第2.7.2小节、第3部分第3.5节、第4部分第4.5节的第4.5.1小节、4.5.2小节、4.5.5小节、第5部分第5.4节的第5.4.1小节、5.4.4小节、5.4.5小节,并对所有开发工程部分的结构进行了梳理,同时中国石油煤层气公司的胡爱梅、张冬玲和中联煤层气国家工程研究中心的陈东参与了部分章节编写。孙赞东的17名博士生、硕士生开展了前期历时近一年的在地质、地球物理、开发工程、资源评价、环境等领域的大量国内外文献调研和研究工作,并参与了全书各章节的编写,他们分别是王海洋、刘致水、张新超、唐志远、张剑、王丹、杨沛、江姗、王迪、赵俊省、肖曦、王康宁、李颖薇、狄贵东、蔡露露、刘立丰、张远银、朱兴卉。李相方教授的13名博士生、硕士生参与了部分开发工程章节的编写,他们是胡素明、李骞、王钊潦、卢小娟、石军太、杜希瑶、张磊、徐兵祥、王威、龚崛、李元生、羊新州、张庆辉。此外,由于此项编写工作浩大繁重,有许多中国石油大学(北京)研究生、博士生通过志愿的方式积极参与其中,承担了许多原始翻译、校对、图件清绘等工作,他们中的代表是温银宇、卢言霞、李振华、高文磊、曾行、武彦、林本卿、张文珠、杨玥、曹力元、姚学辉等,还有许多志愿者参与其中,由于篇幅所限,不能一一列出,在此笔者一并表示感谢。全书由孙赞东教授统稿,并由贾承造院士对全书进行审阅后定稿。

由于笔者水平所限,且非常规能源勘探开发技术的快速发展,错误或不当之处在所难免,恳请专家批评、指正。同时,由于编写时间紧,加上专业跨度大,书中文字粗糙之处,敬请读者谅解。

目 录

1 世界常规非常规能源评价和展望

1.1 总览	(3)
1.1.1 石油——世界新秩序的指挥棒	(3)
1.1.2 对油气资源未来的认识	(3)
1.1.3 非常规能源勘探开发技术的发展	(4)
1.2 油气资源预测模型	(6)
1.2.1 油气预测研究现状	(6)
1.2.2 生命轮回模型分析	(13)
1.2.3 储量—产量平衡模型	(19)
1.2.4 数据模型	(20)
1.2.5 综合预测法	(21)
1.3 常规油气资源分析及评价	(23)
1.3.1 引言	(23)
1.3.2 影响因素分析	(23)
1.3.3 石油产量综合预测	(35)
1.3.4 天然气产量综合预测	(41)
1.3.5 风险—机会—储量分析框架及评价	(46)
1.4 非常规油气资源技术分析及评价	(52)
1.4.1 非常规油气资源特征	(53)
1.4.2 重油	(54)
1.4.3 致密砂岩气	(58)
1.4.4 煤层气	(64)
1.4.5 页岩气	(69)
1.4.6 天然气水合物	(75)
1.4.7 非常规资源量、储量重新统计	(79)
1.4.8 成本—技术—资源量分析框架及评价	(83)
1.5 世界油气能源峰值预测及分析	(86)
1.5.1 油气资源峰值预测	(86)
1.5.2 预测结果分析及对峰值的认识	(89)
1.5.3 技术因素分析及峰值研究意义	(90)
1.6 全球能源认识与展望	(96)
1.6.1 能源供需预测要素及分析	(96)
1.6.2 不同情形能源消费与未来需求预测	(103)
1.6.3 能源发展与前景	(107)

1.7 启示	(110)
1.7.1 世界常规非常规油气资源量及峰值的总体估计	(110)
1.7.2 非常规油气资源勘探开发建议	(110)
1.7.3 结束语	(111)
附录 1.A 单位及换算关系	(112)
附录 1.B 其他主要一次能源数据	(113)
附录 1.C 人口与能源消费历史数据	(119)
附录 1.D 储量—产量平衡模型推导	(126)
参考文献	(130)

2 重 油

2.1 重油基础知识和资源量	(141)
2.1.1 定义和分类	(141)
2.1.2 重油组分和品质	(141)
2.1.3 资源量分布	(146)
2.2 重油的形成与富集	(148)
2.2.1 重油成因	(148)
2.2.2 重油分布盆地类型	(155)
2.3 重油典型区域地质	(159)
2.3.1 加拿大	(159)
2.3.2 委内瑞拉	(170)
2.3.3 美国	(181)
2.3.4 中国	(185)
2.4 重油储层岩石物理	(188)
2.4.1 黏度、弹性和相性质	(188)
2.4.2 频散和衰减	(194)
2.4.3 流体替代	(200)
2.5 储层识别与描述	(205)
2.5.1 重油储层特征	(205)
2.5.2 重油储层识别方法	(213)
2.6 储层监测技术和应用	(226)
2.6.1 热采时移地震储层监测	(226)
2.6.2 冷采重油监测	(251)
2.6.3 重油储层参数监测	(255)
2.6.4 开采过程环境灾害监测	(262)
2.7 重油开采技术	(274)
2.7.1 露天开采及携砂冷采技术	(274)
2.7.2 蒸汽吞吐和蒸汽驱技术	(283)
2.7.3 蒸汽辅助重力泄油技术 (SAGD)	(299)
2.7.4 火烧油层 (In-situ Combustion) 及其新工艺	(321)

2.7.5	水平井注气溶剂萃取法 (VAPEX)	(332)
2.7.6	电磁加热技术	(342)
2.8	防砂完井与地面改质技术	(348)
2.8.1	防砂完井技术	(348)
2.8.2	地面改质技术	(353)
2.9	重油开发经济评价及环境问题	(358)
2.9.1	重油开发经济成本评价	(358)
2.9.2	环境问题及对策	(370)
附录 2.A	单位换算	(380)
附录 2.B	重油基本物理和化学性质	(381)
附录 2.C	重油资源量及分布	(383)
附录 2.D	重油岩石物理性质	(387)
附录 2.E	重油储层识别和监测中的地球物理方法评价	(390)
附录 2.F	开采技术	(393)
参考文献		(394)

3 致密砂岩气

3.1	致密气的资源分布	(407)
3.1.1	美国致密气藏资源现状	(407)
3.1.2	加拿大致密气藏资源现状	(409)
3.1.3	中国致密气藏资源现状	(409)
3.2	致密砂岩储层地质特征及成藏机理	(411)
3.2.1	致密砂岩储层特征	(411)
3.2.2	致密砂岩形成过程	(427)
3.2.3	致密砂岩气藏类型	(430)
3.2.4	小结	(440)
3.3	致密砂岩气藏地球物理方法应用	(442)
3.3.1	岩石物理	(442)
3.3.2	测井技术应用	(459)
3.3.3	综合地层评价	(481)
3.3.4	地震技术应用	(489)
3.3.5	开发阶段中地球物理方法应用	(499)
3.4	致密砂岩气藏钻完井技术	(510)
3.4.1	钻井技术	(510)
3.4.2	压裂技术	(518)
3.4.3	气层保护技术	(527)
3.5	致密气藏开发技术	(539)
3.5.1	致密砂岩气藏开发机理研究	(539)
3.5.2	致密砂岩气藏气井试井技术	(558)
3.5.3	致密砂岩气藏动态分析方法	(577)

3.5.4 致密气藏数值模拟技术	(590)
附录 3.A “连续型”油气藏国内外研究进展	(594)
附录 3.B 致密砂气藏对比及实例特征	(595)
附录 3.C 测井识别手段对比	(598)
附录 3.D 工程措施对比	(599)
参考文献	(603)

1 世界常规非常规能源评价和展望

能源是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。纵观人类社会发展的历史，人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。能源的开发利用极大地推进了世界经济和人类社会的发展。而这些能源中主要是石油、天然气、煤炭、水电以及核能，其中，石油、天然气和煤炭占世界初级能源消费量的 89%，油气资源所占比例达到 60%（EIA，2010；BP，2010）。石油自从被发现以来，就被当做一种战略资源，成为大国争夺的焦点。因为油气资源不仅是人民日常生活的必需品，作为一种战略资源，还是涉及国家军事，国防安全。其重要性可想而知。

统计结果表明，目前常规石油产量已开始显示出下降趋势。根据预测，石油和天然气峰值将会分别在 2020 年前后和 2050 年前后出现。那么，随着常规油气资源的衰竭，非常规油气资源在未来的能源消费结构中必将占据着重要的位置。

这里站在宏观的角度全面分析和评价世界主要常规和非常规油气资源的勘探开发状况、技术发展和经济风险等。首先，以现有常规油气资源的信息和数据为基础，应用多因素综合预测法对世界及主要油气区的常规油气产量峰值进行预测。全面分析常规油气资源的影响因素，建立适合常规油气评价的风险—机会—储量三元半定量分析框架，并运用该框架分析对世界主要产油国家和地区的常规油气勘探开发状况、风险、前景进行评价。通过对非常规油气资源全面分析，建立适合非常规油气评价的成本—技术—资源量三元半定量分析框架，对各种非常规油气资源做出战略评价。同时，通过对全球非常规油气资源的储量和勘探开发现状进行介绍，分析其在未来能源消费结构中的重要地位和对国民经济的重要意义，进而引出在重油、致密砂岩气、煤层气、页岩气（包含页岩油）和天然气水合物等非常规能源各领域的勘探开发技术的新进展。最后，综合前述油气数据、人口历史数据以及其他主要能源数据信息，对 21 世纪能源消费总量和构成比例做出预测：化石能源仍将是能源供应的主体，常规油气资源在 21 世纪上半叶是核心能源，下半叶非常规油气能源协同煤炭、核能和可再生能源将会占据未来能源消费结构的核心。

1.1 总 览

1.1.1 石油——世界新秩序的指挥棒

最早提出石油地缘政治是源于 19 世纪的英国经济大萧条（石油战争，2008）。英国精英分子就如何在迅速变化的世界中维持帝国的统治与权力展开争论，遂引入石油地缘政治。而这种经济萧条恰与欧洲大陆工业经济的蒸蒸日上形成强烈反差，尤其与德意志帝国的对比更加明显。石油已经成为矛盾和冲突的焦点，虽然此时只有少数人对此有所认识。这也是一战爆发的背景。为围剿德国，英国精心策划了一系列地缘政治行动，石油则是部署这些行动的重要因素。与此同时，英国人不动声色地把军队投向石油储量丰富的阿拉伯地区。

一战之后，美国的政治与经济势力明显增强，英帝国的三大权力支柱受到全面威胁。为了确保在经济与政治角逐中的主导地位，英国进一步加紧对石油控制权的争夺。而面对苏联巨大的石油储备，英美各自打起了自己的如意算盘。英美联手组建了石油卡特尔——“七姐妹公司”。

二战之后，世界各国都意识到了石油的战略地位，纷纷采用国有模式经营石油产业，加强对石油生产和销售的控制。

20 世纪中叶，英美两国都遭受了经济衰退和政治动荡的困扰。即便如此，它们仍然千方百计阻挠欧洲走独立自主的经济复兴之路。为避免金融上的毁灭性打击，美国不惜人为地制造石油禁运，操纵大规模反核运动，制造经济增长极限的恐怖气氛，为的是控制石油流通，获得石油涨价的巨额利益。围绕着控制与反控制，欧洲共同体、不结盟运动，以及其他国家与英美金融集团之间展开了一场持久、血腥而不见硝烟的战争。英美政府这种以邻为壑的金融和外交政策不仅没有解决国内的经济问题，反而使第三世界陷入全面债务危机。为了应对国际国内日益恶化的经济局面，美国又一次把赌注押向了石油——入侵伊拉克。所谓的反恐战争，其实就是一场石油的控制权之战。美国试图建立世界新秩序。为维持霸权地位，美国继续四面出击，压制和瓦解各种可能出现的新生力量，日本，亚洲四虎，俄罗斯，巴尔干各国，一切新崛起的潜在力量都是它的敌人。这个国家已经是趋“油”若鹜，极力重新布局石油版图。

2004 年，利比亚对国外开放石油投资，换取美国的认可，侥幸逃生。在石油危机日益严峻的今天，利比亚终究难逃此劫。2011 年 3 月 19 日，美军实施了“奥德赛黎明”（Operation Odyssey Dawn）行动，之后持续的冲突已经惊扰了全球石油市场。

在这场旷日持久的石油战争中，对于美国来说，唯一重要的考虑就是尽可能有保证地、无限制地得到便宜的石油。而今，“美国世纪”已经日渐式微，中国经济正在崛起，但这仍将受到严峻的考验。世界经济不确定性较高，再平衡难度加大。但石油天然气资源仍将是大国政治经济的焦点。所谓谁控制了石油，谁就控制了所有国家，油气资源仍将是世界新秩序的指挥棒。

1.1.2 对油气资源未来的认识

众所周知，油气资源作为非可再生资源，其资源量是有限的。而目前常规油气资源的勘探开发程度较高，预计在 2020 年左右达到产量的峰值，因此未来化石能源的走向成为大家

关注的热点问题。

常规油气资源将在未来 10 年内达到产量的峰值，之后产量将趋于平缓并缓慢下降。这就意味着我们必须尽快找到接替能源，非常规油气则成了当之无愧的首选。尽管目前非常规资源勘探开发程度较低，但是其潜力决定它将控制未来油气资源的脉搏。

1.1.2.1 世界主要地区常规油气资源的形势

尽管大部分地区常规油气资源的开发程度都已经很高，但是由于资源本身分布不均，各地区技术水平有差异，整个地球的油气勘探开发程度也是不均衡的。本书中选取主要地区进行论述（详见 1.3 节和 1.4 节）

中东是世界石油资源最丰富的地区。2009 年统计数据显示，其产量占世界石油产量的 32%，储量占世界总储量 60%（BP, 2010）。但是也有不利的一面，该地区形势动荡，或者合同条款苛刻，合作难度大。

前苏联地区油气主要集中在俄罗斯和中亚几个油气丰富的国家，与中国有很长的陆地边界，且与中国关系友好，中国应该考虑与其加强合作。

拉丁美洲油气产量和储量高于非洲，总体是个油气出口区。本区大多为发展中国家，需要引进外资，是进行跨国勘探的有利区域。

非洲地区已探明储量和油气产量的排序并不靠前，在全世界所占比例也不算大。但是其地质条件相对简单，勘探和开发程度较低，资源国的经济技术水平较低，与其合作可行性高。

1.1.2.2 非常规能源

非常规油气资源的勘探开发仅处于起步阶段，但是从一些出版物以及报告中得到的数据看，非常规油气资源量很大，开发潜力巨大。通过分析世界不同油气研究机构组织的数据，估算世界范围内非常规油气的证实储量，认为世界非常规石油证实储量为 $5000 \pm 1000 \times 10^8$ bbl，非常规天然气证实储量为 7000 ± 500 Tcf（见本书 1.5 节）。虽然最终可采出非常规油气资源仍是未知数，但随着技术的进步和对地下地质条件了解的加深，预计非常规油气将是未来石油天然气供应的一个巨大的潜在资源。

另外，非常规油气资源在世界各地分布也存在不均衡的问题，例如，页岩油主要分布在美国，油砂油主要分布在加拿大、超重油主要分布在委内瑞拉等。

无论是常规油气资源还是非常规油气资源，其勘探开发都存在技术、政治、经济和风险的问题。本书 1.3 节和 1.4 节将详细介绍按照这几个因素对世界各地油气资源的评价结果。总之，机遇与挑战并存，风险与机会同在。但是最核心的，还是技术。

1.1.3 非常规能源勘探开发技术的发展

所谓科技是第一生产力。非常规能源的开发仍处于起始阶段，目前研究的重点即非常规能源的勘探开发技术。与常规能源相比较，非常规能源的勘探开采难度更大。

非常规能源尽管分布较为集中，但其地下地质结构复杂，地质学家所掌握的关于常规石油天然气的规律不能完全适用于非常规油气。因此，非常规油气的勘探发现对地质理论的要求更高。

非常规石油和天然气性质比较特殊。和常规石油相比，其最主要特征是高黏度和高密度，这就造成了给开采开发带来很大的困难。因此，它们的开发利用需要额外的加工过程（加氢），使之变成可供常规炼制加工的原料。

非常规能源复杂的地质结构和特殊的物理化学性质也成就了其不易监测的难题。现有的地球物理手段不能满足非常规油气勘探开发的需要。非常规油气资源的特殊的物理响应要求我们采用全新的或者综合的地球物理监测手段来指导其勘探开发。

对于每一种非常规能源，本书将在后面章节中分别就地质手段、地球物理手段，以及开发开采工程方法对其进行详细论述。其主导思想方法就是将地质理论、地球物理手段、开采工艺三者融合，共同指导勘探开发过程。

1.2 油气资源预测模型

1.2.1 油气预测研究现状

油气预测的研究始于 20 世纪早期,一些学者对油气未来的发现状况和产量做出主观定性判断,这是油气资源预测的雏形。近 100 年来,随着人们对油气资源规律认识的提高,油田勘探开发程度的加大,油气预测的研究进展也很快。

1.2.1.1 国外油气预测研究现状

1.2.1.1.1 研究阶段

(1) 个人主观判断阶段(20 世纪 50 年代)。

这个阶段始于 20 世纪早期,主要是部分地质学家对美国或世界油气资源状况未来趋势的主观判断或估计。1906 年,美国石油地质学家协会(AAPG)第三届主席、著名油气专家 I. C. White 曾在白宫会议(White House Conference)上就美国油气资源做了发言,他预测美国石油最终可采储量为 10^{10} bbl~ 2.5×10^{10} bbl 之间,将在 1935—1943 年间用尽(Yergin, 1991)。1919 年,美国地质调查局(United States Geological Survey, USGS)总地质师 Dave White 认为:美国的石油将在 9 年内耗尽!(据 Yergin, 1991 和 Maugeri, 2004)在 1920 年,著名地质学家 Platt 对美国的石油最终可采储做出预测,他说:“美国产量的高峰期很快一掠而过,可能是 5 年,也可能只有 3 年”(Maugeri, 2004)。这些石油专家对油气资源及生产的悲观论断具有很大的主观性和局限性,被称为“石油末日论者”。反映了油气勘探开发早期人们受技术条件和经济条件的制约,对油气资源地质规律的认识较浅。

(2) 应用数学模型定量预测阶段(20 世纪 60—80 年代)。

从 20 世纪 50 年代开始,应用数学模型对油气资源趋势预测进行定量研究。Hubbert 是美国著名的石油地质学家,他开创了用模型研究石油峰值的历史。1949 年他在《Science》上发表了文章“Energy from fossil fuels”,提出了化石能源的“钟形曲线”(据 Hubbert, 1949)。1956 年,Hubbert 准确预测出美国将在 1971 年达到石油产量峰值,并且创建了预测累积产量(CP)和最终可采储量(URR)的模型,该模型得到广泛应用,被命名为 Hubbert 模型(据 Hubbert, 1967)。

Hubbert 将其模型发展应用于探明可采储量的发现规律和最终可采资源量的预测,在北美及其他地区可采资源量的预测中取得了较好的效果。此后,针对这个模型 Bartlett、Colin J. Campbell、Kenneth S. Deffeyes 等研究者又对 Hubbert 曲线进行分析,并用它预测世界油气资源储量和产量(Deffeyes, 2001; Campbell, Laherrere, 1998; Bartlett, 1999)。地质学家 Jean Laherrere 认为,除去政治和其他因素的影响,产量增长曲线应当和储量增长呈镜像关系,在这两条曲线的峰值之间,应该是“后相似”的关系(Laherrere, 2000)。另外,他还指出单旋回 Hubbert 曲线可能对美国这种高勘探程度情况适用,而大多数油气田受石油地质条件、勘探开发技术、经济因素和政策法规的影响,其油气储量和产量往往呈现“多峰”的特点,需要用多旋回 Hubbert 模型来拟合与预测。

Al-Jarri 和 Startzman 在 1999 年,将单旋回的 Hubbert 模型发展成为多旋回模型,并用该模型预测了 2000 年天然气的供应情况(Al-Fattal 和 Startzman, 1999; Al-Fattal 和