

普通高等院校资源勘查类教材

FEICHANGGUI YOUQI ZIYUAN

非常规油气资源

刘成林◎主编

地质出版社

普通高等院校资源勘查类教材

非常规油气资源

主 编 刘成林
副主编 刘人和 门相勇 朱 杰
编写者 葛 岩 公王斌 周 刚 徐丽丽
 王少清 王志强 赵 伟

地质出版社

·北 京·

内 容 提 要

本书系统阐述了油页岩、油砂、煤层气、盆地中心气、页岩气和天然气水合物等非常规油气资源的基本性质、成因、聚集机制、典型实例、资源潜力和分布。本书力求在系统阐述非常规油气地质学基本原理的基础上,充分反映非常规油气地质学理论和方法的最新进展。

本书可作为高等院校资源勘查工程(能源地质)和地质工程专业的教材,也可供勘查技术与工程(物探和测井)和石油工程等相关专业的师生以及从事油气田勘探和开发工作的生产和科研人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气资源 / 刘成林主编. —北京: 地质出版社, 2011. 8

ISBN 978 - 7 - 116 - 07309 - 8

I. ①非… II. ①刘… III. ①油气资源—基本知识
IV. ①TE155

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 162221 号

责任编辑: 郑长胜 李 颖 陈 磊

责任校对: 李 玫

出版发行: 地质出版社

社址邮编: 北京市海淀区学院路 31 号, 100083

电 话: (010) 82324508 (邮购部); (010) 82329120 (编辑部)

网 址: <http://www.gph.com.cn>

电子邮箱: zbs@gph.com.cn

传 真: (010) 82310759

印 刷: 北京纪元彩艺印刷有限公司

开 本: 787mm × 1092mm 1/16

印 张: 18.5

字 数: 410 千字

版 次: 2011 年 8 月北京第 1 版

印 次: 2011 年 8 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—500 册

定 价: 50.00 元

书 号: ISBN 978 - 7 - 116 - 07309 - 8

(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)

序

非常规油气资源是相对于常规油气资源而言的，指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发方式等方面有别于常规油气藏的烃类或非烃类资源，分为非常规石油和非常规天然气。其中非常规石油主要包括油页岩、油砂；非常规天然气主要包括煤层气、盆地中心气、页岩气、天然气水合物等。

进入 21 世纪以来，由于常规油气资源分布不均的矛盾进一步加剧、国际原油价格的持续振荡走高、非常规油气勘探开发技术的不断进步和经济发展对油气资源的需求逐步增加等因素的交织作用和影响，使得非常规油气资源的勘探开发逐步进入全球的能源视野。同时，随着加拿大油砂、美国煤层气和页岩气的成功开发，令拥有巨大潜力的非常规油气资源开启了能源革命的新篇章。2001 年世界非常规石油交易额 20 亿美元，2005 年增加到 45 亿美元。开发非常规油气资源，关键在于采用先进而实用的技术，在高油价的作用下，各国纷纷出台了大量扶持政策，跨国石油公司不断攻克技术难关，使非常规油气勘探开发成本降低，经济上逐步可行。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，也是人类充分利用资源的必然选择。

当前，尽管我国常规油气资源储量产量持续增长并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高速增长的需要，油气进口量持续增加，尤其是原油的对外依存度逐年攀升，2009 年已经超过 50%。面对日益加剧的能源供需矛盾和高涨的国际石油价格，在其他可替代能源尚未进入实质性开发阶段之时，作为常规油气资源的重要补充，非常规油气资源的开发利用越来越被看好，正在逐步走向产业化。

根据新一轮油气资源评价，获得我国非常规油气的资源量：其中煤层气地质资源量为 $37 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ，可采资源量为 $11 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ；油砂油地质资源量

为 $60 \times 10^8 \text{t}$ ，可采资源量为 $23 \times 10^8 \text{t}$ ；油页岩地质资源量为 $7199 \times 10^8 \text{t}$ ，技术可采资源量为 $2432 \times 10^8 \text{t}$ ，可回收页岩油为 $120 \times 10^8 \text{t}$ 。评价结果表明，煤层气是常规天然气的重要补充；油页岩、油砂是常规石油的重要补充。

中国石油大学（北京）刘成林老师在开展常规油气资源教学科研的基础上，十分关注对非常规油气资源的教学科研、探索与创新，其率领的团队在常规和非常规油气科研中相继取得省部级一等奖一项、二等奖两项，在国内外期刊上发表学术论文数十篇。《非常规油气资源》一书是刘成林老师在广泛查阅国内外文献、专著及科研成果，通过参加新一轮全国石油、天然气、煤层气、油砂、油页岩资源评价，经过3年多非常规油气资源课程讲授的教学实践，并通过承担常规油气、煤层气、油页岩等国家油气专项科研的经验积累的基础上完成的。

该书融入了大量国内外先进理论、技术、方法，是国内目前探索非常规油气资源的最新成果。该书系统阐述了油页岩、油砂、煤层气、盆地中心气、页岩气和天然气水合物等非常规油气资源的基本性质、成因、聚集机制、资源潜力和分布，填补了非常规油气资源教学讲义的空白，既为拓展常规油气资源潜力提供理论基础，又开拓了高等院校学生的非常规油气资源视野。相信一定会对我国非常规油气资源领域的人才培养、勘探开发工作起到积极的促进作用。

车长波

2010年11月于北京

前 言

随着世界油气勘探开发工作的不断深入，地质、地理条件较好的常规油气资源愈来愈少，勘探难度日益增大，世界剩余石油可采储量呈下降趋势，同时，世界经济的发展对油气资源的需求又不断增加，常规油气供给与需求之间的缺口将越来越大。非常规油气资源以其巨大的资源潜力逐步引起人们的关注，而非常规油气资源的勘探开发需要大量的专业技术人才。因此，培养掌握非常规油气资源地质理论和勘探技术的人才就显得极为重要。

在这种形势下，我校2010年首次为地质工程专业本科生开设非常规油气资源这门专业技术课。非常规油气资源是在石油地质学、油气地球化学、沉积学、煤岩学等理论上发展起来的，系统阐述油页岩、油砂、煤层气、盆地中心气、页岩气和天然气水合物等非常规油气的基本性质、成因、聚集机制、资源潜力和分布的一门边缘学科。

2009年5月起，我们开始着手本书的编写工作。在编写过程中，我们广泛开展了国内外文献、专著及科研成果的调查收集，尽可能地吸收国内外非常规油气资源的理论、方法和技术，力求使本书内容能反映非常规油气资源研究的最新成果。

本书由刘成林主编。刘成林、周刚编写第一章；刘人和、朱杰、王志强编写第二章、第三章；刘成林、公王斌、徐丽丽、王少清、赵伟编写第四章、第五章；葛岩、门相勇、刘成林编写第六章；刘成林、周刚、于川淇编写第七章。在编写过程中，赵伟、王少清、徐丽丽和范柏江承担了大量的图件清绘和校对工作。

在本书编写过程中，得到了中国石油大学（北京）地球科学学院领

导和教师们的重视和支持；国土资源部油气资源战略研究中心的领导和专家们自始至终给予了大力支持，车长波副主任为本教材作序，是对我们编者的肯定与鼓励；美国地质调查局（U. S. Geological Survey）的地质专家们提供了大量资料，并给予了悉心指导。对他们们的热情支持和帮助，我们表示衷心的感谢。

由于编者水平和经验有限，书中难免有错误和不足之处，敬请读者批评指正。

中国石油大学（北京）

刘成林

2010年11月

目 录

第一章 概 述	(1)
第一节 定 义	(1)
一、非常规油气资源	(1)
二、油气资源金字塔	(1)
三、连续油气藏与非常规油气藏	(2)
第二节 非常规油气资源研究与开发现状	(4)
一、非常规石油资源	(4)
二、非常规天然气资源	(5)
第三节 非常规油气资源潜力	(6)
思考题	(7)
第二章 油页岩	(8)
第一节 概 述	(8)
一、油页岩定义	(8)
二、油页岩与页岩油	(9)
三、油页岩与煤、页岩的区别	(9)
四、页岩油与原油、稠油、油砂的区别	(9)
第二节 油页岩的组成和特征	(10)
一、油页岩的物理性质	(10)
二、油页岩的组成和结构	(11)
三、油页岩成熟度和生烃能力	(19)
四、油页岩的划分	(21)
第三节 油页岩的形成	(23)
一、油页岩的原始物质	(23)
二、油页岩形成的过程	(24)
三、油页岩形成的时代	(25)
四、油页岩形成的条件	(26)
五、油页岩成矿特征	(28)

第四节 典型实例	(33)
一、美国绿河油页岩	(33)
二、中国抚顺和茂名油页岩	(37)
第五节 油页岩资源和分布	(42)
一、世界油页岩资源量	(42)
二、世界油页岩资源分布	(43)
三、中国油页岩资源分布	(45)
思考题	(46)
第三章 油 砂	(47)
第一节 概 述	(47)
一、油砂定义	(47)
二、油砂与油砂油	(47)
三、油砂油与稠油、重油及沥青	(47)
第二节 油砂的性质	(49)
一、油砂的组成、结构	(49)
二、油砂中的有机质	(52)
三、油砂中的矿物质	(53)
第三节 油砂的形成	(54)
一、油砂成矿条件	(54)
二、油砂成矿模式	(56)
三、油砂有利成矿区	(60)
第四节 典型实例	(60)
一、加拿大阿尔伯达盆地阿萨巴斯卡油砂	(60)
二、委内瑞拉奥里诺科油砂	(64)
三、中国准噶尔盆地乌尔禾油砂	(69)
第五节 油砂资源分布	(72)
一、世界油砂资源	(72)
二、世界油砂资源分布	(73)
三、中国油砂资源分布	(73)
思考题	(77)
第四章 煤层气	(78)
第一节 概 述	(78)
一、煤	(78)
二、煤层气	(80)
三、煤层气藏	(81)

第二节 煤层气的组成和特征	(82)
一、煤层气的组成	(82)
二、煤层气的特征	(83)
三、煤层气的鉴别标志	(90)
四、煤层气同位素的影响因素	(90)
第三节 煤层气系统	(93)
一、煤层气的生成和运移	(93)
二、煤储层和煤层气的储存	(96)
三、煤层气的保存和圈闭	(112)
第四节 典型实例	(118)
一、美国粉河盆地	(118)
二、美国圣胡安盆地	(122)
三、中国沁水盆地南部	(127)
第五节 煤层气资源和分布	(133)
一、煤层气资源量	(133)
二、世界煤层气资源分布	(133)
三、中国煤层气资源分布	(137)
思考题	(141)
第五章 盆地中心气	(142)
第一节 概 述	(142)
一、盆地中心气	(142)
二、定义的发展	(143)
第二节 盆地中心气的特征	(145)
一、气藏类型	(145)
二、气藏展布特征	(148)
三、储层特征	(149)
四、储层压力	(153)
五、圈闭机理	(155)
第三节 盆地中心气系统	(157)
一、盆地中心气系统的演化	(157)
二、盆地中心气系统的要素与过程	(160)
第四节 典型实例	(163)
一、加拿大阿尔伯达盆地深盆区	(163)
二、美国大绿河盆地	(167)
三、美国阿巴拉契亚盆地	(172)
四、中国鄂尔多斯盆地	(175)

第五节 盆地中心气资源和分布	(181)
一、盆地中心气资源量	(181)
二、盆地中心气资源分布	(182)
思考题	(186)
第六章 页岩气	(187)
第一节 基本概念	(187)
一、页岩气定义	(187)
二、页岩气与其他天然气的对比	(188)
第二节 页岩气特征	(189)
一、页岩气组分	(190)
二、页岩气性质	(192)
第三节 页岩气系统	(193)
一、烃源岩及烃运移	(193)
二、页岩气储层及储集	(201)
三、页岩气盖层及圈闭	(206)
第四节 典型实例	(212)
一、巴涅特页岩气	(212)
二、俄亥俄页岩气	(214)
三、安特里姆郡页岩气	(216)
第五节 页岩气资源潜力及分布	(220)
一、全球页岩气资源潜力及分布	(220)
二、中国页岩气资源潜力及分布	(221)
思考题	(222)
第七章 天然气水合物	(223)
第一节 概 述	(223)
一、天然气水合物的定义	(224)
二、天然气水合物研究概况	(224)
第二节 天然气水合物的特征	(225)
一、天然气水合物的物理特征	(225)
二、天然气水合物的化学特征	(226)
三、天然气水合物的形成特征	(230)
四、天然气水合物的分离和溶解特征	(235)
第三节 天然气水合物系统	(237)
一、天然气水合物系统要素	(237)
二、天然气水合物系统举例	(247)

第四节 典型实例	(249)
一、墨西哥湾天然气水合物	(249)
二、阿拉斯加北坡天然气水合物	(254)
三、中国南海北部天然气水合物	(257)
第五节 天然气水合物资源及分布	(260)
一、天然气水合物资源量	(260)
二、天然气水合物资源分布	(261)
三、我国天然气水合物资源前景	(265)
思考题	(269)
参考文献	(271)

第一章 概 述

第一节 定 义

一、非常规油气资源

非常规油气资源本书定义：在成藏机理、赋状状态、分布规律等方面有别于常规油气资源，不能完全用现有常规方法和技术进行勘探、开发与加工的油气资源，分为非常规石油资源和非常规天然气资源。非常规石油资源包括：油页岩、油砂；非常规天然气资源包括：煤层气、盆地中心气、页岩气、天然气水合物等。

不同学者对非常规油气资源有不同的理解。牛嘉玉等（2002）认为非常规油气资源是不能完全用现有常规方法和技术进行勘探、开发与加工的油气资源，主要包括稠油、深盆气和煤层气等。包书景（2008）认为非常规油气资源是指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发技术等方面有别于常规油气资源的烃类资源，可分为非常规石油资源和非常规天然气资源。非常规石油资源包括：油页岩、油砂、重油、天然沥青；非常规天然气资源包括：煤层气、致密砂岩气、天然气水合物、浅层生物气、无机成因气、水溶气等。汪凯明（2009）认为非常规油气资源是相对于“常规”而言的，指在成藏机理、赋存状态、分布规律或勘探开发方式等方面有别于常规油气藏的烃类或非烃类资源，主要包括非常规石油和非常规天然气两大部分。

二、油气资源金字塔

资源金字塔可用来表示某一地区资源储量的经济可行性。优质资源位于金字塔顶部，其资源量少，开采成本低，而底部为低品质资源，资源量多，开采成本高（图 1-1）。当勘探金、银、铁、锌、石油、天然气或其他资源时，最好或等级最高的往往是那些资源量小的，一经发现就易于开采的矿藏。

从图 1-2 可知，在资源金字塔中，越往下矿藏级别越低，这通常意味着储层物性逐渐变差。然而，这些低渗透性矿藏规模通常远远大于这些高品质矿藏。与其他自然资源一样，低品质的油藏和天然气藏只有通过改进技术和适当提高价格才能经济有效地进行开采。然而，与常规或高品质的矿藏相比，非常规或低品质矿藏规模往往比较大。资源金字塔原理适用于世界上每一个含油气盆地。

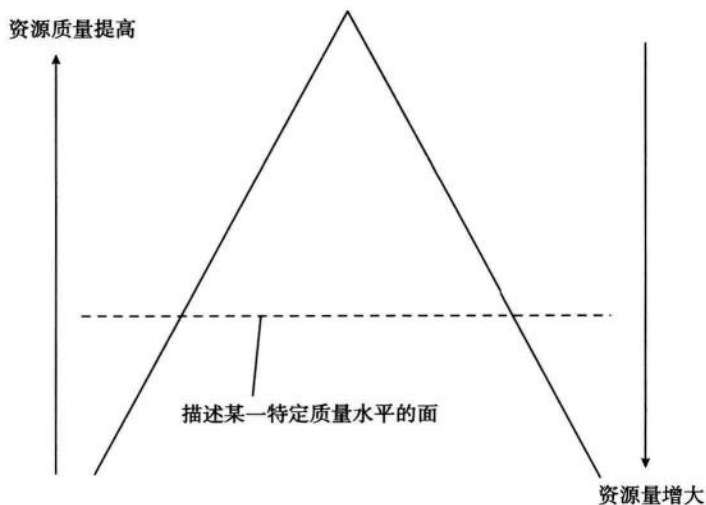


图 1-1 二维天然气资源金字塔示意图
(据 Schmoker et al., 1999; 初次修改自 McCabe, 1998)

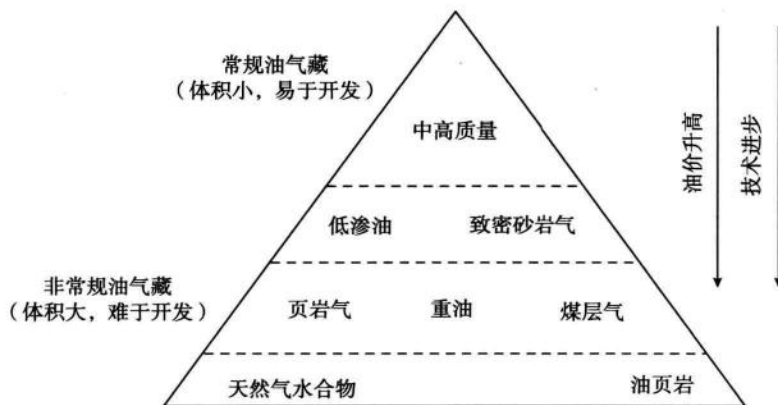


图 1-2 油气藏资源金字塔
(据 Holditch, 2007)

三、连续油气藏与非常规油气藏

连续油气藏最早由 Schmoker 于 1995 年提出, 指在含油气盆地的致密砂岩、煤层、页岩等非常规储层中, 大面积聚集分布, 缺乏明确油气水界面的油气聚集 (邹才能等, 2009) (图 1-3, 图 1-4)。连续油气藏包括下倾方向的含水岩层, 具有以下一些常见的地质特征: 没有明确的圈闭界限和盖层、含有大量的油或气、面积分布广泛、基岩渗透率低、发育异常压力 (异常高压或异常低压)、近源分布。连续油气藏储层孔隙度、渗透率低、储量丰度低、勘探和开发难度较大。常见的生产特征包括: 石油地质储量大、采收率低、干井少、渗透率取决于裂缝、存在常规油气藏中所普遍具有的“甜点”。连续油气藏

的基岩中通常不含可动水，但能够从裂缝或劈理中产生大量的水。有时候会遇到相反的情况：局部连续油气藏中的储层物性较好的某一层如砂岩层，其具有良好的孔隙度和较高的渗透率，但由于可动水含量较高而不符合生产要求（Schmoker, 2005）。

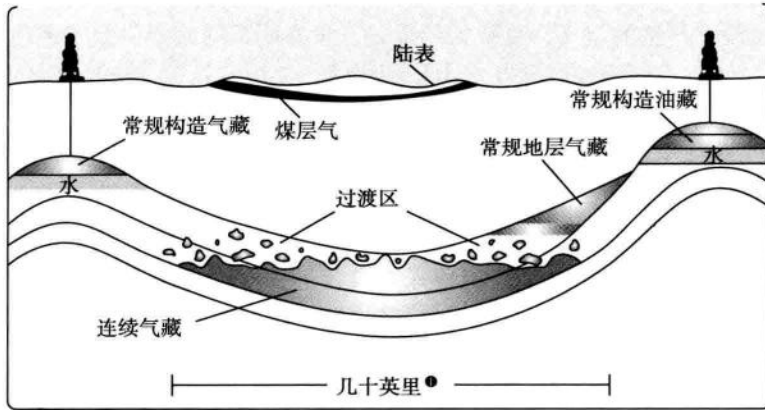


图 1-3 应用于美国油气资源评价项目中的石油和天然气藏的分类图
(据 Schenk et al., 2002)

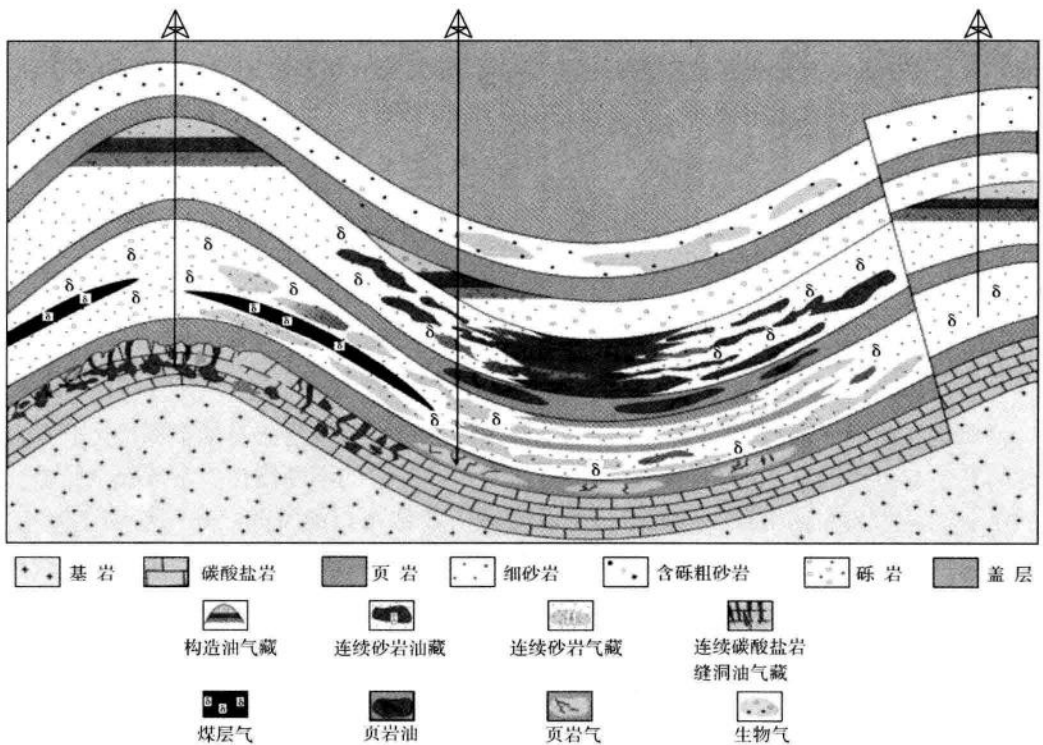


图 1-4 连续油气藏分布图
(据邹才能等, 2009)

● 1 英里 (mile) = 1609.344m。

近年来,美国地质调查局(USGS)基于资源评价,对常规油气藏和连续油气藏进行了区分(Gautier et al., 1995; U. S. Geological Survey National Oil and Gas Resource Assessment team, 1995; U. S. Geological Survey World Energy Assessment Team, 2000)。简单地说,常规油气藏是指水的浮力作用促使油气在非连续的构造或地层圈闭中的聚集。比较而言,连续油气藏没有严格的定义,具较大的空间,没有明显的边界,差不多独立于水柱而存在(Schmoker, 1995)。常规油气藏在水中呈漂浮状、气泡状;而连续油气藏不具此特征。

由于地质条件存在差异,连续油气藏形成了一个地质上多变的群体,包括煤层气、致密气、页岩气、天然气水合物、浅层生物成因气等。尽管这些非常规油气之间有明显的差别,但它们具有两个重要的地质特征:①这些油气藏通常由大量充满石油或天然气的岩石所组成;②它们并不直接依赖于石油或天然气在水中的浮力而存在。

非常规油气藏指那些无法以经济流量开采或者不采取大型水力压裂、水平井眼或多层井眼或其他特殊开采工艺和技术就无法获得经济油气流量的油气藏。非常规油气藏没有统一的特征:埋深可深可浅,高压或低压型,高温或低温型,呈披覆状或透镜状,均质的或裂缝发育,包含单个或多个生产层。对单井来说,最佳钻井、完井及增产措施与储层物性和经济形势密切相关。美国得克萨斯州南部的非常规油气藏的储层物性与美国南部或中东地区的非常规油气藏存在显著差异。

通常所用的“非常规”一词,在这不用作“连续”的同义词。连续油气藏是根据地质特征来进行划分的,定义相对明确。而非常规油气藏定义比较宽泛,主观性强。通常,把一个油气藏定义为非常规油气藏依据的标准有很多,如人为的基岩渗透率、特殊的法律法规、一定阶段对特别工程技术的需要,或者恶劣的自然地理条件(如极地、深水地区)等。

第二节 非常规油气资源研究与开发现状

一、非常规石油资源

近年来,国际原油价格持续走高、石油需求不断攀升以及常规石油资源过度开采和消耗等问题引起世界的广泛关注。随着世界经济对石油需求的不断增加,常规石油资源已不能满足石油需求的快速增长,人们纷纷把目光转向非常规石油资源。在这样的大背景下,非常规石油资源以其储量巨大、分布集中、开发技术日趋进步等特点成为世界石油市场的新宠。其中,油页岩、油砂是目前最为现实的非常规石油资源。

油页岩的开发利用已有 200 多年的历史,但由于战争和世界市场油价的波动,直接影响了油页岩开发利用的进程。20 世纪 80 年代后期,随着世界能源消费量的迅速增加,许多国家在能源消费多元化的同时,也着眼于各种可再生能源或其他替代能源的开发和利用,油页岩工业再次复苏。随着国际油价的飙升及在全球能源需求不断增长的今天,石油资源短缺已是制约全球经济发展的重大难题,开发石油及替代品是各国能源开发研究的主要课题,开发油页岩矿藏的时机已经到来。油页岩作为一种重要的石油补充和替代能源,以其巨大的储量、丰富的综合利用层次,引起了全世界的关注。世界上的油页岩的储量远

远超过常规石油的储量。伴随着高油价时代的来临，全球兴起了油页岩开发的技术研究热潮，其主要研究方向就是如何降低开发成本、提高油页岩的综合利用水平。

2006年世界页岩油产量超过 $100 \times 10^4 \text{t}$ ，主要集中在中国、爱沙尼亚、巴西和澳大利亚等国。中国页岩油的生产主要集中在辽宁抚顺，2005年产量为 $20 \times 10^4 \text{t}$ ，2007年产量接近 $30 \times 10^4 \text{t}$ 。油页岩开发利用速度加快，形式多样。世界上油页岩 69% 用于发电（含供热），25% 用于提取页岩油，6% 用于化工和其他用途。

目前，对油砂的研究与开发，世界各地均在加速进行。随着勘探开发技术的提高，使得一些原来不具备经济开采规模的油砂矿成为可能。近年来，各石油公司开始加快油砂的并购、重组工作，包括壳牌、英国石油、埃克森美孚等公司积极投资油砂开发领域，加大对油砂的勘探开发力度。加拿大是目前世界上唯一实现油砂商业开采的国家，由于油砂资源的加入，使其石油储量迅速增加。到2009年石油可采储量为 $1800 \times 10^8 \text{bbl}$ ^①，成为全球第二大储油国。2002年从油砂矿中提炼的原油达 $4800 \times 10^4 \text{t}$ ，2006年为 $7280 \times 10^4 \text{t}$ 。预计今后油砂的开采量将会逐渐增加。

二、非常规天然气资源

进入21世纪以来，世界经济步入新的发展周期，社会对天然气等高效资源需求呈直线上升，由于常规天然气勘探难度越来越大，世界各国在继续勘探和开发常规油气资源的同时，越来越重视非常规天然气资源的研究与开发。随着非常规油气资源基础理论水平的不断提高和配套工艺技术的不断创新，非常规天然气资源在世界能源体系中发挥着举足轻重的作用。包括煤层气、盆地中心气、页岩气、天然气水合物在内的非常规天然气成为具有利用价值的资源，代表了一个新的勘探与开发领域。

煤层气勘探开发利用是集能源利用、环境保护、煤矿安全于一体的新兴领域。目前，美国、加拿大、澳大利亚、中国、英国、德国、波兰、捷克和印度等国家的煤层气勘探开发活跃。美国是世界上开采煤层气最早和最成功的国家，其煤层气工业起步于20世纪70年代，大规模发展始于80年代。1984年共有煤层气井2840口，1990年上升到2982口，1995年增到7256口，2000年13986口，生产井数几乎每五年翻一番。美国的煤层气探明可采储量增长迅速，1989年仅有 $1103.4 \times 10^8 \text{m}^3$ ，2009年为 $5260.7 \times 10^8 \text{m}^3$ 。煤层气产量直线上升，从1980年的不足 $1 \times 10^8 \text{m}^3$ ，迅速上升到2009年的 $541.98 \times 10^8 \text{m}^3$ ，占天然气产量的9%。

盆地中心气的勘探目前主要集中在北美地区，美国每年的天然气总产量有15%来自盆地中心气。在世界上其他地区，盆地中心气勘探和开发越来越引起人们的重视。

页岩气成藏机理特殊，成藏条件多样，具有普遍发育、广泛分布特点，是值得高度重视且具有广泛勘探意义的非常规油气资源。美国开发页岩气已经有180多年的历史，美国页岩气主要产自古生界和中生界页岩中，5个主要产气的页岩层分别是 Antrim 页岩、Ohio 页岩、NewAlbany 页岩、Barnett 页岩和 Lewis 页岩。西加拿大盆地的页岩气已经进入开发阶段。英国的页岩气研究也较深入。中国对页岩气的研究还处于起步阶段，主要集中在成藏机理和赋存规律研究方面。2008年4月在美国 San Antonio，2009年6月在美国 Denver

① 1bbl=1桶。