



非常规油气资源勘探开发的
投资决策优化方法 and 应用研究

孙金凤/著

非
油
气

 科学出版社

非常规油气资源勘探开发的 投资决策优化方法 and 应用研究

孙金凤 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合非常规油气资源勘探开发投资决策过程特点,根据分层递阶控制思想和结构化分析方法而提出的分层递阶结构研究方法,把非常规油气资源勘探开发整体投资决策问题,划分为一系列相对独立又相互联系的序列投资决策子问题,并集成在一个系统框架内进行研究,从而促使勘探开发投资决策问题能够实现一体化集成研究。这克服了以往勘探和开发投资决策“两张皮”现象,为石油企业科学投资决策创造了条件,促进了投资决策整体优化和局部优化、长期目标和短期目标的协调统一,为解决非常规油气资源勘探开发投资决策难题探索新思路和新途径。

本书可供管理科学、石油工程管理等专业的学者或企业研究人员阅读,也可为各石油企业管理者提供决策参考建议。

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气资源勘探开发的投资决策优化方法和应用研究/孙金凤著.
—北京:科学出版社,2018.4

ISBN 978-7-03-057088-8

I. ①非… II. ①孙… III. ①油气勘探-石油投资-研究 ②油气开发-石油投资-研究 IV. ①F407.22

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第062948号

责任编辑:魏如萍/责任校对:贾伟娟
责任印制:吴兆东/封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

http://www.sciencep.com

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年4月第一版 开本:720×1000 1/16

2018年4月第一次印刷 印张:9 1/2

字数:195 000

定价:68.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

非常规油气资源作为现实的可替代能源备受各国政府和企业的关注，对其进行勘探和开发对减少日益加大的石油供需矛盾和确保国家能源安全具有重大战略意义。然而，由于非常规油气资源的特殊性及其复杂性，目前在常规油气中普遍采用的基于人工经验和静态的处理方法，已不能满足其勘探开发投资决策的动态性、复杂性和不确定性，决策方案的科学性和有效性亟待加强。针对非常规油气资源勘探开发投资决策这一难题，以提高投资决策方案的科学性、动态性和实用性为目标，运用石油工程管理、运筹学及决策科学等领域相关理论与方法，按照“非常规油气资源勘探开发投资决策复杂性分析→投资决策优化模型构建→复杂优化模型求解→投资决策方案生成”这一研究思路，本书主要内容如下。

一是非常规油气资源勘探开发投资决策过程及其复杂性分析。剖析非常规油气资源勘探开发投资决策过程，并总结提炼呈现的结构特征，结合非常规油气资源特殊性，深入分析其投资决策问题的多阶段、多目标、多属性及不确定性等复杂性影响因素，为非常规油气资源勘探开发投资决策问题的形式化表达奠定基础。

二是非常规油气资源勘探和开发的投资决策优化模型。简化非常规油气资源勘探开发投资决策问题，并研究投资决策问题的形式化表达方法，依据勘探开发序列投资的分层递阶结构特点，建立多目标动态优化模型以确定勘探活动和开发活动的投资规模，建立不确定条件下的动态多属性决策模型以指明勘探投资的方向和优先次序，并依据不同石油企业的目标需求，分别建立开发投资的多阶段多目标决策优化模型和开发投资组合的多阶段决策优化模型，从而辅助石油企业优化非常规油气上游业务的战略投资决策。

三是非常规油气资源勘探开发投资决策优化模型的求解方法。非常规油气资源勘探开发整体投资属于多阶段、多目标、多属性的优化决策问题，模型十分复杂，求解困难，本书根据分层递阶决策问题的逻辑结构求解方法，把整体复杂的数学模型问题简化为序列子问题的数学模型进行求解，依据所求解子问题优先级的先后次序，引入序贯式算法的求解思路，并利用改进的动态规划逆序解法进行决策优化模型的依次求解。

四是非常规油气资源勘探开发投资决策优化方法应用研究。针对某石油企业

进行非常规油气资源勘探开发投资决策问题，运用本书构建的非常规油气资源勘探开发投资决策优化模型和算法，完成该问题从复杂性分析、模型构建与求解到决策方案生成的处理过程，对本书所构建模型和求解方法的可行性和有效性进行验证，并在计算机中加以实现，同时根据应用情况给出非常规油气资源勘探开发投资决策建议。

五是非常规油气资源开发投资决策仿真模型（以页岩气为例）及其生态预警系统研究。针对页岩气开发投资决策的复杂性和不确定性，本书构建页岩气开发投资决策仿真模型以便于石油企业投资者能够在仿真模拟环境下根据内外部环境的变化动态调整投资方案。另外，结合非常规油气资源开发需要解决的生态环境问题，设计生态环境预警指标体系并构建预警模型，希望能促进非常规油气资源开发与生态环境的和谐发展。

本书应用新的理论和方法，结合非常规油气资源勘探开发的特殊性来解决其勘探开发投资决策问题。利用分解-协调思想，将动态规划、多属性决策、多目标优化决策和投资组合理论相结合，首先建立勘探开发投资各子问题的数学模型以进行各层次决策问题的优化，然后通过协调作用实现投资决策问题的整体优化，即“合零为整”，最后利用递阶决策问题的逻辑结构求解方法，根据所求解子问题优先级的先后次序依次进行模型求解，使复杂的数学模型转化为层层递进的相对简单的决策子问题模型进行求解，得以“化整为零”，为解决非常规油气资源勘探开发投资决策难题探索新思路和新途径。

感谢长江学者特聘教授、国家杰出青年基金获得者、大连理工大学胡祥培教授的悉心指导，他为本书最终完成提出了宝贵意见。

孙金凤

2017年12月

目 录

第 1 章 非常规油气资源类型及其分布情况	1
1.1 非常规油气资源勘探开发背景	1
1.2 非常规油气资源类型及其属性特征	3
1.3 非常规油气资源分布情况综述	6
1.4 非常规油气资源投资决策问题	10
1.5 本章小结	13
参考文献	13
第 2 章 非常规油气资源勘探开发理论研究	16
2.1 非常规油气资源勘探开发难点分析	16
2.2 非常规油气资源发展潜力问题	18
2.3 油气资源勘探开发模型及其应用研究	21
2.4 常规油气资源勘探开发决策仿真模型	25
2.5 非常规油气资源勘探开发决策问题研究进展	26
2.6 本章小结	28
参考文献	28
第 3 章 非常规油气资源勘探开发投资过程及其复杂性分析	34
3.1 勘探开发投资决策问题描述	34
3.2 勘探开发投资决策过程分析	36
3.3 投资决策问题的复杂性分析	42
3.4 本章小结	47
参考文献	47
第 4 章 非常规油气资源勘探和开发的投资决策模型	48
4.1 问题简化与研究假设	48
4.2 非常规油气资源勘探和开发活动投资分配模型	51
4.3 非常规油气资源勘探投资决策优化模型	54
4.4 非常规油气资源开发投资决策优化模型	57
4.5 本章小结	66
参考文献	66

第 5 章 非常规油气资源勘探开发投资决策优化模型的求解方法	67
5.1 模型的复杂性及其求解思路	67
5.2 多阶段多目标多属性决策问题求解方法的研究	72
5.3 分层递阶结构决策优化问题的算法分析与设计	76
5.4 基于区间数的 TOPSIS 方法和改进的逆序解法	80
5.5 本章小结	86
参考文献	87
第 6 章 非常规油气资源勘探开发投资决策优化方法应用研究	89
6.1 鄂尔多斯盆地页岩油气投资决策优化问题	89
6.2 勘探开发投资决策优化方法应用的模拟结果分析	92
6.3 非常规油气资源勘探开发投资决策建议	101
6.4 本章小结	104
参考文献	105
第 7 章 页岩气勘探开发投资决策的仿真模型	106
7.1 页岩气仿真优化模型问题研究	106
7.2 基于 Simulink 的页岩气开发投资决策仿真模型	110
7.3 页岩气开发投资决策方案生成	120
7.4 本章小结	122
参考文献	123
第 8 章 非常规油气资源开发的生态预警系统研究	128
8.1 非常规油气资源开发生态环境研究	128
8.2 非常规油气资源开发生态预警指标体系设计	131
8.3 非常规油气资源开发生态预警模型构建	135
8.4 本章小结	138
参考文献	139
第 9 章 非常规油气资源投资决策研究前景	141
9.1 投资决策研究主要观点	141
9.2 本书研究特色	143
9.3 未来研究展望	144

第1章 非常规油气资源类型及其分布情况

本章在对我国石油对外依存度的分析基础之上，阐述我国非常规油气资源的勘探开发背景和重要性，对非常规油气资源类型如油砂、超重油、页岩气、煤层气和致密气等的基本概念、分类及各自的属性特征进行剖析，并分析和综述全球和我国非常规油气资源的分布情况，指明非常规油气资源勘探开发投资时面临的投资决策问题及本书重点解决的相关内容。

1.1 非常规油气资源勘探开发背景

石油被许多专家和学者称为“工业的血液”“黑色的金子”，是关系国家经济发展和能源安全的重要战略物资。石油对外依存度是指一个国家石油净进口量占本国石油消费量的比例，比值的大小用来描述石油安全的程度，一般把50%作为石油安全能源警戒线。中国自1993年成为石油净进口国以来，石油对外依存度不断上升，具体如图1.1所示。

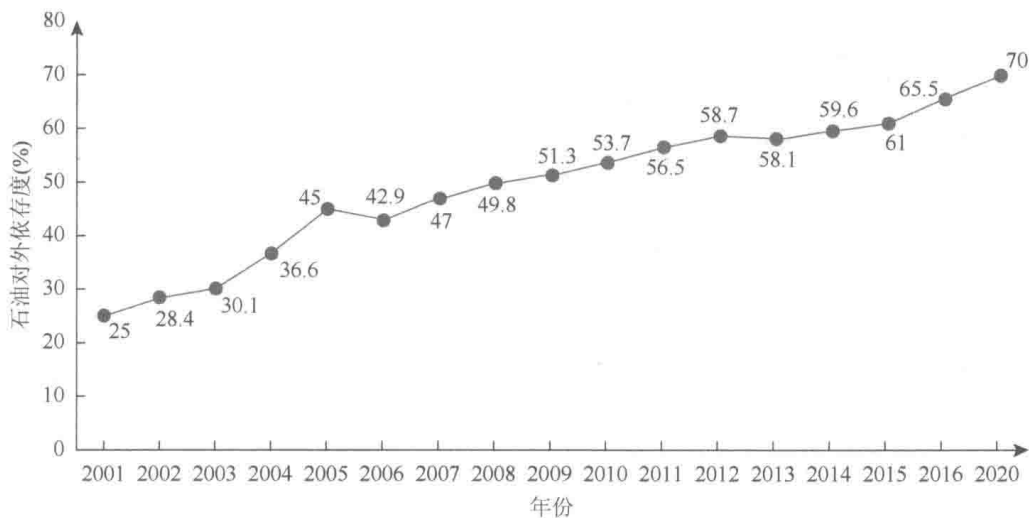


图 1.1 中国 2001~2020 年石油对外依存度

资料来源：中国能源统计年鉴

从图 1.1 可以看出，我国石油对外依存度日益上升，2009 年开始就已超过石

油安全能源警戒线 50%，2016 年高达 65.5%，且根据国内经济发展形势，有关专家预测，对外依存度仍会加剧上升，到 2020 年将超过 70%，严重威胁国家能源安全。主要原因在于：①石油供应呈下降趋势。常规石油资源开采难度日益加大、现有油田日益老化，产量降低且品质下降，难以再发现大的油气田。②石油消费需求不断上升。国民经济、工业、交通运输业等的快速发展使石油消费需求日益上升，年增幅达 4%。③“马六甲困局”。我国进口石油的 60%~80%都经过海上“咽喉”通道马六甲海峡、霍尔木兹海峡，而“咽喉”通道海盗猖獗，政局极为不稳。在常规石油资源日益短缺、供需矛盾日益加剧的形势下，开发、应用非常规油气资源具有重要的战略意义。

在常规石油资源日益短缺、供需矛盾日益加剧、石油对外依存度不断上升的形势下，非常规油气资源作为最现实的接替能源，其勘探和开发对确保国家能源安全具有重要的战略意义。2011 年，由中国工程院原院长徐匡迪领衔，国内油气领域知名专家邱中建、黄其励、康玉柱、童晓光、周守为、翟光明、韩大匡等 14 名院士联名上书国务院，建议国家重视非常规油气资源的勘探开发，随后，温家宝和李克强均做出重要批示支持其勘探开发。2011 年 7 月页岩气首度招投标，2011 年 12 月，国务院批准页岩气为我国一个新的独立矿种并进行管理，开启了我国非常规油气资源开发的时代，有效弥补了常规石油资源日益短缺，并缓解了供需矛盾，同时可有效降低对外依存度，提升国家能源安全。康玉柱院士^[1]明确指出非常规油气资源潜力巨大，从我国非常规油气资源储量和产量来看，虽然我国已进入世界油气生产大国行列，但原油对外依存度仍逐年攀升，非常规油气必将成为我国油气资源开发的重要接替领域。非常规油气资源的勘探开发虽然风险极高、投资巨大，但以页岩气为例，一旦获取工业流之后，其成本投资回收期非常短，单井产量虽低但稳产周期长，企业越早进入越能抢占先机并有利于业务的开拓和转型，因此，非常规油气资源开发依然具有很大的诱惑力。并且，培育和发展非常规油气资源作为我国未来接续发展方向，已势在必行，其成功开发对整个国家油气资源供应和接替能力及能源安全保障均具有重要的战略意义。

非常规油气主要是指在现今经济、技术条件下，利用常规技术无法进行规模化和经济化开采的资源，水平井、分段压裂及井工厂模式等先进“井工厂”技术的出现是页岩油气等非常规油气资源成功开发的关键，进入 21 世纪之后，这些技术得到了大规模的应用，促进了非常规油气资源的快速发展。其中，全球非常规油气资源发展较好的是美国的页岩油气、加拿大的油砂和委内瑞拉的超重油。而在其他国家，非常规油气资源的勘探开发起步较晚，多处于初级阶段，更多的是在进行非常规油气资源的评估以摸清“家底儿”，并通过勘探的持续深入掌握不同区域非常规油气资源的属性特征，再根据内外部环境条件变化进行发展潜力和发展前景的分析，之后才能采用各种有效的决策方法制定科学合理的勘探开发投资

方案,从而有效促使非常规油气资源开发的规模化和产业化。因此,本书主要考虑石油企业在不确定动态环境下的非常规油气资源勘探开发投资决策问题,针对不同阶段非常规油气勘探开发投资决策及其复杂性,利用相关理论和方法进行决策问题的形式化表述,从而尽快促使非常规油气资源的商业化和产业化开发。

1.2 非常规油气资源类型及其属性特征

美国早期区分常规和非常规油气资源的主要依据是油气资源的经济性^[2]。非常规油气资源主要是指那些在当前油价和使用常规技术无法进行经济开采的资源,可分为非常规石油及非常规天然气,前者主要是指页岩油、油砂油和超重油资源,后者则主要是指致密气、页岩气及煤层气等,具体划分可见表 1.1。

表 1.1 非常规油气资源分类

分类依据	类型		种类	特征
储层类型	致密型	致密砂岩	致密砂岩油气	储层为致密砂岩,油气为近源生储
		致密碳酸盐岩	致密碳酸盐岩油气	储层为致密碳酸盐岩,油气为近源生储
		页岩	页岩气	储层为页岩,油气为自生自储
		煤层	煤层气	储层为煤层,天然气为自生自储
相态	气态	致密气、煤层气、页岩气	非常规天然气	
	液态	致密油、超重油	非常规石油	
	固态	油砂	非常规油气	
油气分布或圈闭类型	连续型	煤层气、页岩气、天然气水合物	油气藏呈连续分布,多属于自生自储类型,储层物性差	
	准连续型	致密油气	油气藏呈准连续分布,储层为致密砂岩或碳酸盐岩,主要为近源储集型	
	不连续型	大部分油砂、稠油	油气藏呈非连续分布,储层为常规储层,部分致密层也属此类,油气多为远源储集型	

资料来源:赵靖舟.非常规油气有关概念、分类及资源潜力[J].天然气地球科学,2012,23(3):393-406

1.2.1 非常规石油资源类型

非常规石油资源主要是指页岩油、致密油、油砂油和超重油资源。

1. 页岩油和致密油

目前不同机构和学者对于页岩油(shale oil)和致密油(tight oil)的涵义有着不同的理解,但基本共识是^[3]:页岩油是指储存于富有机质、纳米级孔径为主的

页岩地层中的成熟石油，通常是由处理过的油页岩人工合成而来的，属于合成的常规石油。致密油和广义的页岩油一致，储层致密、渗透性极差，用常规的技术不能实现经济开发，需要利用水平钻井和分段水力压裂等技术才能开采，美国能源信息署（Energy Information Administration, EIA）因致密油也是来自于页岩地层且开采方法与页岩气相同，故也称其为页岩油。而在中国，页岩油气一般是指致密油和页岩气资源。

2. 油砂油

油砂（oil sand）也称作焦油砂（tar sand）或沥青砂（bitumen），是主要由砂粒或岩石、沥青、黏土和水组成的混合物。油砂油是指从油砂矿中开采出来的或直接从油砂中提炼出来的未处理的石油，也称为天然沥青或沥青砂油^[4]，API 重度（American Petroleum Institute gravity, API gravity）小于 10，和超重油一样，但是比超重油黏度更大，通常大于 10 000cP（1cP = 10^{-3} Pa·s）^[5]，主要的开采方式有就地开采和露天开采两种。

3. 超重油

超重油（extra-heavy oil）是原油中的一种，是 API 重度小于 10 及黏度小于 10 000cP 的碳氢化合物^[6]。相对于传统的轻质原油来说，由于超重油黏度高、密度大且硫、酸等含量较高，超重油的勘探、开采和炼制都需要投入较多的资金。但相对于页岩油和油砂油而言，超重油算是勘探开发最早、开发利用程度最高且投资相对较低的一种非常规石油资源^[4]。

1.2.2 非常规天然气资源类型

非常规天然气资源主要是指致密气、页岩气及煤层气等。

1. 致密气

致密砂岩气（tight sandstone gas）简称致密气（tight gas），是指聚集在渗透率小于或等于 0.1mD（ $1D = 0.986\ 923 \times 10^{-12} \text{m}^2$ ）的致密砂岩储层中的天然气，储层表现为较强的非均质性和不连续性。对于致密气而言，一般情况下，单井没有自然产能或者自然产能低于工业气流下限，但在一定经济条件和技术措施下，如压裂、水平井、多分支井等则可获得工业天然气产量^[7]。

2. 页岩气

页岩气（shale gas）是一种以游离或吸附状态藏身于页岩层或泥岩层中的非常规天然气。最简单的定义就是：页岩气是还保留在生油岩层中的天然气，为典

型的原地成藏模式。与油页岩、油砂等差别较大，页岩既是页岩气生成的源岩，也是聚集和保存页岩气的储层和盖层^[8]。

3. 煤层气

煤层气 (coalbed methane) 是形成于煤层又储集在煤层中的一种自生自储的天然气体，是与煤伴生、共生的非常规天然气资源，但也不排除非煤源岩气体进入煤层的可能性。具体关于煤层气的生产过程的描述有不少假想的理论和模型，目前常用的主要有双重及三重孔隙模型^[8]，得出的结果略有差异。

1.2.3 非常规油气资源属性特征

自 1979 年 Masters 提出资源三角图展现不同级别的资源量以来^[9]，许多专家和学者就开始利用此三角形来描述矿产资源量，其中 Holditch^[10]与 Snyder 和 Seale^[11]就对此进行了扩展，形成常规与非常规油气资源三角形，如图 1.2 所示。

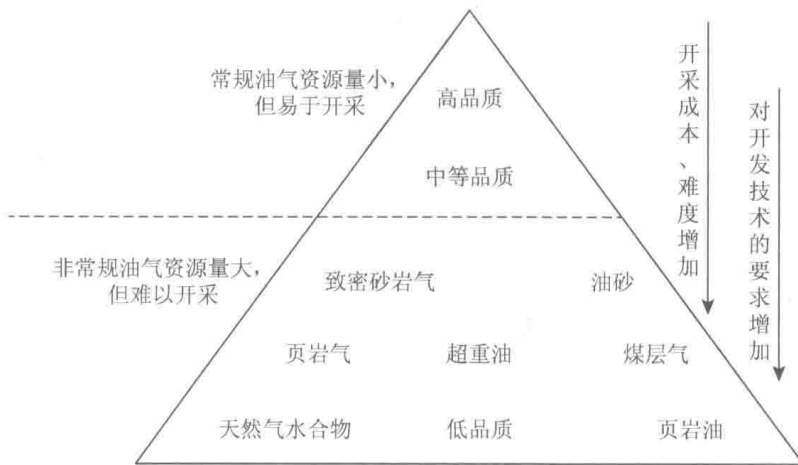


图 1.2 常规与非常规油气资源三角形

和常规油气资源相比，非常规油气资源虽然资源量更丰富，但其勘探开发过程却十分复杂，主要原因在于非常规油气资源具有密度高 (API 重度通常小于 22，常规原油即轻质原油的 API 重度通常大于 22)、黏度大、埋藏深、流动性差等特点^[12-16]。常规油气储藏的品质一般较高且渗透率也高，只要做好生产布局，通过打垂直井就能进行商业化生产，不需要特别的激励措施。然而非常规油气储藏则不然，它们是低品位的储藏，这种低品质主要是由低渗透和高黏度资源属性造成的，因此，必须采取各种措施加以刺激才能得以实现商业化开发。低渗透储藏如致密油、致密气、页岩气或煤层气等，大多数情况下都需要长距离的水平井

及多阶段压裂技术的刺激才能够生产^[17], 这使开采成本增加、开采难度加大, 同时环境破坏力度更大^[18]。超重油和油砂油是世界上最重要的两种非常规石油资源, 但都属于高密度、高黏度、高沥青质、高残碳、高金属、高硫的劣质原油^[19], 这给勘探开发带来很大的困难。另外, 这些非常规油气资源分布区域广且连续、埋藏深浅不一等特点使非常规油气资源开采方式和技术要求与常规油气资源都有所不同^[20-29], 并且, 非常规油气资源储量和其商业价值开发潜力并不成正比, 这些都使非常规油气资源勘探开发过程中面临的复杂性和不确定性大, 使勘探开发复杂程度更高, 投资决策难度更大^[30, 31]。

尽管如此, 在常规油气资源供应日益短缺的情况下, 非常规油气资源勘探开发依然被各国提上重要日程。值得庆幸的是, 大部分产气的页岩分布范围广、厚度大且普遍含气, 这使页岩气开发具有较长的开采生命周期且产气速率比较稳定, 为非常规油气资源的产业化和商业化开发提供了基础条件保障。

1.3 非常规油气资源分布情况综述

1.3.1 全球非常规油气资源分布情况

全球非常规油气资源量与常规油气资源量比例约为 8:2, 其中非常规石油资源量与常规石油资源量大致相当, 非常规天然气资源量约是常规天然气资源量的 8 倍^[32]。2014 年, 全球的石油产量为 42 亿 t, 其中非常规石油占了 10%, 超过 4 亿 t; 天然气产量是 3.5 万亿 m³, 其中非常规天然气占了 13.6%。然而, 非常规油气资源分布极为不均衡, 主要集中在少数几个地区, 如美国、加拿大、委内瑞拉及中国等。具体全球非常规油气资源量及其分布区域如表 1.2 和表 1.3 所示。

表 1.2 全球非常规石油资源量及其分布区域

单位: 亿 t

地区	致密油	超重油	天然沥青	页岩油	可采资源总量
北美	109.1	53.5	870.3	1011.1	2044.0
南美	81.4	823.5	0.2	39.1	944.2
非洲	58.5	10.9	70.5	77.7	217.6
欧洲	19.5	7.4	0.3	56.3	83.5
中东	0.1	118.5	0.0	46.8	165.4
亚洲	100.8	44.8	70.2	152.1	367.9
俄罗斯	103.4	20.3	55.2	118.2	297.1
合计	472.8	1078.9	1066.7	1501.3	4119.7

资料来源: 美国地质调查局 (<https://www.usgs.gov/>) 和美国能源部 (<https://www.energy.gov/>)

表 1.3 全球非常规天然气资源量及其分布情况 单位: 万亿 m³

地区	致密气	煤层气	页岩气	可采资源总量
北美	38.8	85.4	108.8	233.0
拉丁美洲	36.6	1.1	59.9	97.6
欧洲	12.2	7.7	15.5	35.4
俄罗斯	25.5	112.0	17.7	155.2
中东和北非	23.3	0	72.2	95.5
撒哈拉以南非洲	22.2	1.1	7.8	31.1
亚太	51.0	48.8	174.3	274.1
合计	209.6	256.1	456.2	921.9

资料来源: Oil & Gas Journal on line

全球非常规石油资源的分布比较集中, 主要分布在北美、南美和亚洲地区, 如表 1.2 所示。根据世界能源理事会 (World Energy Council, WEC) 的研究报告可知^[33]: 世界上 85% 的油砂资源分布在加拿大艾伯塔省, 主要集中在阿萨巴斯克 (Athabasca)、科尔德湖 (Cold Lake) 和皮斯河 (Peace River) 三个油砂区, 面积分别达 430 万 hm²、72.9 万 hm² 和 97.6 万 hm² (1hm² = 0.01km²), 其原始地质资源量约有 17 000 亿桶天然沥青。在过去 20 年间, 艾伯塔省北部的油砂矿开采行业吸引了 2000 亿加元的投资, 现在已经达到日产 250 万桶石油的油砂矿开采规模, 这些开采出的石油绝大部分出口到美国。接近 90% 的超重油则主要分布在委内瑞拉东部盆地的奥里诺科石油带, 它是世界上规模最大的超重油富集带, 总面积为 54 000km², 超重油地质储量约 2000 亿 t, 可采储量约 500 亿 t。另外, 油页岩主要分布在北美、亚洲和大洋洲等地区, 约占全球油页岩资源量的 83%^[34]。

对于非常规天然气而言, 全球资源主要分布在北美、俄罗斯和亚太地区。2015 年美国的天然气产量为 8400 亿 m³, 非常规天然气则占 4800 亿 m³, 其中致密气 1670 亿 m³、煤层气 480 亿 m³、页岩气 2650 亿 m³, 美国已进入非常规油气开发时代^[34]。致密气主要集中在北美洲和亚太地区, 其中美国的落基山盆地群和加拿大的西加拿大盆地致密气资源最为丰富^[35], 煤层气和页岩气资源则主要集中在俄罗斯和北美地区, 亚太地区的页岩气资源也较为丰富, 具体资源量及其分布情况如表 1.3 所示。

随着常规油气资源的快速消耗和新增油气资源勘探开发难度的不断加大, 世界油气资源勘探开发格局发生重大变化, 正在由传统的常规油气资源为主转为常规与非常规油气资源并重的局面。目前, 全球基本形成了以中东地区为主的东半球“常规油气版图”和以美洲地区为核心的西半球“非常规油气版图”^[36]。美国

页岩气大规模的商业化开发,带动了全球非常规油气资源的勘探和开发,北美地区正在形成“非常规油气资源版图”,加拿大和委内瑞拉成为非常规油气发展的重点领域,中国也有望成为除北美地区以外开发页岩气最成功的国家。全球的能源格局正在发生变化,美国因为页岩气的成功开发而有望实现能源的自给自足。然而,由于世界许多地方对油页岩等资源并未进行全面调查和勘探,上述很多数据只是估测或推算出来的,尚不能真正反映非常规油气资源储量的真实情况,不同机构给出的各种数据差别也较为悬殊,但无论如何,结果都一致认同非常规油气资源量非常丰富。

1.3.2 中国非常规油气资源分布情况

中国非常规油气资源比常规油气资源丰富得多。据估算,中国非常规油气资源可采量为 890 亿~1260 亿 t, 约是常规油气资源可采量的 3 倍^[32]。其中,非常规石油资源可采量为 223 亿~263 亿 t, 与常规石油资源大致相当;非常规天然气资源可采量为 84 万亿~125 万亿 m³, 是常规天然气资源可采量的 5 倍左右。其中页岩气、煤层气、致密气、致密油和油砂等资源开发利用潜力巨大^[31-37], 具体资源量及其分布区域如表 1.4 所示。

表 1.4 中国非常规油气资源量及其分布区域

类型	地质资源量	技术可采资源量	主要分布区域
致密气/万亿 m ³	17.4~25.1	8.8~12.1	苏里格、子洲-米脂、广安、合川及徐深
页岩气/万亿 m ³	86~166	15~25	四川、重庆、贵州、安徽
煤层气/万亿 m ³	36.8	10.9	鄂尔多斯、沁水、渤海湾
致密油/亿 t	74~80	20~25	四川川中
页岩油/亿 t	476.44	120	松辽、鄂尔多斯和广东等
油砂/亿 t	59.7	22.58	准噶尔、塔里木、柴达木、松辽和四川等
超重油/亿 t	198	19	渤海湾、准噶尔等

注:表中体积单位对应非常规天然气资源,质量单位对应非常规石油资源

但中国非常规油气资源地质研究起步较晚,非常规油气的资源潜力目前还缺乏全面深入评估^[2],具体每种资源到底有多少还不清楚,且开发技术也相对落后,因此,在非常规油气资源勘探开发上急需新技术、新模式和新方法的突破。另外,尽管我国非常规油气资源十分丰富并且几乎遍布于各大含油气盆地,但我国非常规油气资源的区域分布也不完全均衡^[1]。

我国页岩气资源潜力巨大,可采资源潜力居世界前列,油页岩资源多集中

在中东部和青藏地区, 勘查开发点上取得重大突破, 技术装备基本实现国产化, 多元投资勘查局面已经形成。国土资源部组织开展的全国页岩气资源潜力调查评价及有利区优选结果显示, 我国页岩气地质资源量 134 万亿 m^3 , 可采资源量 25 万亿 m^3 。截至 2014 年底, 累计投资 230 亿元, 在重庆涪陵和四川长宁、威远等地取得重大突破, 获得页岩气三级地质储量近 5000 亿 m^3 , 其中探明地质储量 1067.5 亿 m^3 , 建成产能 32 亿 m^3/a , 累计生产页岩气 15 亿 m^3 (2014 年生产页岩气 13 亿 m^3)^[38]。自 2010 年中国第一口页岩气勘探评价井——威 201 井在海相页岩中获得工业气流后, 借鉴北美页岩气勘探开发的成功经验, 开展页岩气地质综合评价、勘探评价及开发先导试验, 陆续在四川盆地、渝东鄂西、滇黔北、湘西等地区发现页岩气, 并在四川盆地威远、长宁-昭通、富顺-永川、涪陵等地区获得工业页岩气产量^[39]。

致密气作为非常规油气资源的主力, 在我国却通常被认为是常规油气资源。我国致密气成藏条件复杂、开发难度大、前期投入高, 在开采技术日臻成熟的情况下如何尽可能降低成本, 实现效益化、规模化生产变得尤为关键。长庆油田的苏里格气田是我国已探明的陆上储量最大的致密砂岩气田, 仅 2014 年致密砂岩气产量就达 235.3 亿 m^3 , 占同期我国致密砂岩气总产量的 65% 以上, 推动我国致密砂岩气开发实现了质的飞跃, 对缓解我国天然气供需紧张的局面做出了重要贡献^[40]。需要注意的是, 非常规天然气开发是一个“过程性概念”, 特别是开发技术的成熟、价格的合理等, 非常规天然气资源可转化为“常规资源”开发, 转换的条件是主体开发技术达到成熟程度、开发方式具备规模化和集约化特性、油价稳定在 60~80 美元及常规油气资源勘探难度增大且开采量减少^[41]。

近年来, 随着全球能源需求和油气生产的压力日益走高, 作为非常规石油资源, 致密油已成为继页岩气之后全球非常规油气勘探开发的新热点, 被称为非常规油气革命的“生力军”。在我国, 致密油具有资源潜力大、分布广泛的优点。自 20 世纪 60 年代以来, 我国在松辽盆地、渤海湾盆地、柴达木盆地、吐哈盆地、酒西盆地、江汉盆地、南襄盆地、苏北盆地及四川盆地均发现了致密油资源, 勘探前景十分广阔。据国土资源部新一轮油气资源评价显示, 在我国的可采石油资源中, 致密油占 2/5。近年来, 我国的致密油开发取得了战略性突破, 相继在鄂尔多斯盆地和准噶尔盆地等发现 5 亿~10 亿 t 级储量规模区, 初步预计全国地质资源量超过 200 亿 t^[42]。中国各主要盆地致密油具体资源量如表 1.5 所示^[43]。

表 1.5 中国各主要盆地致密油资源量

序号	盆地	勘探面积/ 万 km^2	资源量/亿 t
1	鄂尔多斯盆地	10	19~25
2	松辽盆地	1.5	16

续表

序号	盆地	勘探面积/万 km ²	资源量/亿 t
3	准噶尔盆地	0.3	12
4	渤海湾盆地	2	11
5	四川盆地	1.5	10
6	柴达木盆地	1	4
7	酒泉盆地	0.03	2

可见,致密油重点分布在鄂尔多斯盆地、松辽盆地、准噶尔盆地、渤海湾盆地、四川盆地、柴达木盆地及酒泉盆地等。但是,我国的致密油与北美巴肯(Bakken)致密砂岩油、伊格尔福特(Eagle Ford)致密灰岩油均具有相似的形成条件和分布特征。目前国内不同致密油区的发展程度不同,鄂尔多斯盆地延长组已经进入工业化开发阶段,不断优化技术手段和寻找周围新区是下一步工作重点^[44]。

除上述之外,我国也是世界油砂矿资源丰富的国家之一,居世界第五位。根据专家的一般推测,结合初步调查结果认为,中国油砂资源潜力可能大于稠油资源^[45]。根据国土资源部新一轮油砂资源评价结果,我国油砂油地质资源量为 59.7 亿 t,可采资源量为 22.58 亿 t,主要分布在新疆、青海、内蒙古、四川、西藏等地。已发现矿带 0~100m 埋深油砂的地质资源量为 9.45 亿 t、可采资源量为 6.56 亿 t;已发现矿带 100~500m 埋深油砂的地质资源量为 18.69 亿 t、可采资源量为 5.66 亿 t;预测矿带的地质资源量为 31.55 亿 t、可采资源量为 10.37 亿 t,主要分布在准噶尔盆地、塔里木盆地、羌塘盆地、鄂尔多斯盆地、柴达木盆地、松辽盆地、四川盆地,这 7 个盆地将是我国油砂下一步勘探的重点区,是新的油砂矿带发现的有利地区^[46]。但总体上而言,我国油砂勘探开发起步较晚,尚处于普查与初步研究阶段。

1.4 非常规油气资源投资决策问题

随着勘探开发工作的深入,投资决策(区块是否投资、投资方向和次序及资源分配等)所依据的关键信息也会发生不同程度的变化,石油企业要及时调整投资部署和策略以确保投资规划期内决策方案的有效性和资源的优化配置。通过到石油企业实地调研分析,再加上一系列国内外相关研究,本书决定将研究的重点聚焦在非常规油气资源勘探开发投资决策问题上,不仅研究勘探和开发活动投资分配、勘探投资方向和次序、开发区块和开发项目优选等抉择问题,还需要研究投资决策方案适应环境的动态调整性和科学实用性。

本书按照“提出问题→分析问题→解决问题”的逻辑思路,剖析非常规油气