

前 言

党的二十大报告指出，要深入推进能源革命，加强煤炭清洁高效利用，加大油气资源勘探开发和增储上产力度，加快规划建设新型能源体系，统筹水电开发和生态保护，积极安全有序发展核电，加强能源产供储销体系建设，确保能源安全。

长期以来，中国传统能源消费结构的不合理导致了较为严重的环境污染问题。随着全球对气候变化的关注日益增加，减少碳排放成为全世界各国的共同目标。为此，中国提出了碳达峰碳中和目标，希望通过控制化石能源消费和提升能源利用效率来推进能源结构转型。页岩气是一种清洁高效的优质燃料和常用工业原料，增加页岩气产能可以在一定程度上替代高碳排放的能源，有助于向低碳未来迈进，履行对应的环保承诺。

21 世纪初，美国引领的页岩气革命对国际天然气市场及世界能源格局产生了重大影响，此后，世界主要资源生产国都加大了页岩气的勘探开发力度。中国的页岩气工业经历了 2009~2012 年的开发试验阶段后，自 2014 年进入工业化开发阶段，2022 年以来，中国页岩气产业进入创新与全面发展阶段，页岩气勘探开发技术不断优化，年产量迅速增加。然而，页岩气开发项目的经济风险因素错综复杂，受到法律、法规及政策变化，市场供需变化，开发与利用，技术可靠性，工程方案，以及环境与社会条件等多个方面的共同影响。与常规天然气开发项目相比，页岩气开发具有风险来源更广、风险水平更高和风险带来的不确定性更大的特征。

作者十余年来承担多项页岩气项目开发与经济评价科研课题，总结研究工作所取得的成果与认识，考虑到页岩气项目开发的实际需求，撰写了本书，旨在为广大页岩气从业者提供较为全面的页岩气开发经济评价参考。本书以页岩气开发经济评价为主线，结合案例分析，力求呈现较为全面的页岩气开发经济评价的内容和方法。

本书内容分为以下五个部分。

第一部分为页岩气开发及其经济评价概况，包括第 1~2 章，其中第 1 章介绍页岩气发展与开发概况，包括页岩气的定义与开发特征、中国页岩气开发的必要性、国外页岩气开发现状、中国页岩气开发现状及中国页岩气产业发展存在的主要问题。第 2 章为页岩气开发经济评价已有研究概述，包括页岩气开发经济评价研究现状、页岩气开发经济评价方法概述。

第二部分为常规方法下页岩气开发经济评价，包括第 3~4 章，其中第 3 章介绍页岩气开发常规经济评价方法概要，包括基本经济要素、财务分析、不确定性分析、多方案比选。第 4 章结合实际案例，选择某地区页岩气区块作为研究对象，采用页岩气开发常规经济评价方法开展分析。

第三部分为基于风险分析的页岩气开发经济评价，包括第 5~7 章，其中第 5 章为页

岩气开发风险分析, 主要包括页岩气开发风险特征分析、页岩气开发基本风险单元分析、页岩气开发风险评价体系构建、页岩气开发风险估计。第 6 章介绍基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价, 包括蒙特卡罗模拟法简介、基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价步骤、基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价案例。第 7 章介绍基于实物期权法的页岩气开发经济评价, 包括实物期权理论简介、基于实物期权法的页岩气开发经济评价步骤、基于实物期权法的页岩气开发经济评价案例。

第四部分为基于生产效率的页岩气开发经济评价, 包括第 8~9 章, 其中第 8 章介绍基于数据包络分析(DEA)的页岩气开发经济评价方法, 包括 DEA 方法基本理论与模型介绍, 以及基于 DEA 方法的页岩气开发常规经济评价步骤。第 9 章结合实际案例, 选择某页岩气产区作为研究对象, 采用 DEA 经济评价方法开展分析。

第五部分为结论与启示, 包括第 10~11 章, 其中第 10 章总结本书的研究结论并对未来研究进行展望。第 11 章结合本书研究内容及社会实际给出针对性的政策启示与建议。

附录 1 给出页岩气项目常规经济评价财务数据表, 附录 2 给出页岩气项目复合实物期权定价模型与参数。

相较于传统的经济评价书籍, 本书的独特之处在于引入了前沿风险评估和生产效率分析工具, 使页岩气开发的经济评价更加精细化和科学化, 尤其在处理不确定性和风险时表现出很强的适用性。

本书提出的基于风险分析和生产效率的相关页岩气开发经济评价方法, 可为相关企业对页岩气开发经济评价工作实践, 政府主管部门理顺天然气价格, 在保障国家能源安全和“双碳”目标下制定天然气利用政策, 优化天然气和能源结构, 充分利用国家的页岩气资源提供基础分析工具和参考依据。

本书的撰写工作由张宗益教授带领的科研团队精诚合作完成, 团队成员包括重庆大学数字能源技术经济研究院、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司(简称中石油西南油气田分公司)天然气经济研究所和重庆大学经济与工商管理学院的研究人员和博士研究生。在本书的写作过程中得到了重庆大学、中石油西南油气田分公司、重庆市政府相关部门和相关企事业单位领导、专家的悉心指导和大力支持, 特表示衷心的感谢!

本书的研究工作历时较长, 邢文婷、姚梅洁等团队的博士、硕士研究生参与了相关辅助性工作, 向诚、邱雯慷、王茜参与了本书的校对工作, 在此一并感谢。此外, 特别感谢科学出版社的黄桥编辑为本书出版付出的辛勤劳动。

特别感谢国家自然科学基金重点项目“天然气资源的经济安全重大问题与对策研究”(项目批准号: 71133007)的资助。

目 录

第一部分 页岩气开发及其经济评价概况

第 1 章 页岩气发展与开发概况	3
1.1 页岩气的定义与开发特征	3
1.1.1 页岩气的定义和特性	3
1.1.2 页岩气开发的技术经济特点	5
1.2 中国页岩气开发的必要性	6
1.2.1 能源需求快速增长的要求	6
1.2.2 能源消费结构转变的要求	6
1.2.3 能源安全与能源战略的考量	8
1.2.4 “双碳”目标的要求	9
1.3 国外页岩气开发现状	10
1.4 中国页岩气开发现状	14
1.4.1 页岩气储量丰富、开发潜力大	14
1.4.2 四大页岩气产区初步形成	16
1.4.3 开发技术和设备部分实现国产化	17
1.4.4 配套管网建设或天然气就地利用	18
1.4.5 政策和标准逐步完善	18
1.5 中国页岩气产业发展存在的主要问题	19
1.5.1 短期发展存在的问题	19
1.5.2 中长期发展存在的问题	20
第 2 章 页岩气开发经济评价已有研究概述	22
2.1 页岩气开发经济评价研究现状	22
2.2 页岩气开发经济评价方法概述	24
2.2.1 折现现金流法	25
2.2.2 实物期权法	26
2.2.3 作业成本法	28
2.2.4 最小费用法	29
2.2.5 决策树法	30
2.2.6 边际值法	31
2.2.7 综合指数法	32

2.2.8 德尔菲法	32
2.2.9 蒙特卡罗模拟法	33
2.2.10 DEA 方法	34

第二部分 常规方法下页岩气开发经济评价

第3章 页岩气开发常规经济评价方法概要	39
3.1 基本经济要素	39
3.1.1 项目投资	39
3.1.2 折旧与摊销	41
3.1.3 成本	42
3.1.4 收入	43
3.1.5 税金	43
3.1.6 利润	44
3.1.7 现金流量分析	44
3.2 财务分析	45
3.2.1 盈利能力分析	46
3.2.2 偿债能力分析	49
3.2.3 财务生存能力分析	50
3.3 不确定性分析	50
3.3.1 盈亏平衡分析	50
3.3.2 敏感性分析	51
3.3.3 风险分析	53
3.4 多方案比选	53
3.4.1 方案比选类型及原则	54
3.4.2 互斥方案比选方法	54
第4章 页岩气开发常规经济评价案例	56
4.1 案例对象概述	56
4.2 财务效益与费用估算	57
4.2.1 收入估算	57
4.2.2 投资估算	58
4.2.3 成本估算	65
4.2.4 营业税金及附加	66
4.3 资金来源及融资方案	66
4.4 财务分析	67
4.5 不确定性与风险分析	68
4.5.1 盈亏平衡分析	68
4.5.2 单因素敏感性分析	69

4.6 经济评价结论·····	70
-----------------	----

第三部分 基于风险分析的页岩气开发经济评价

第5章 页岩气开发风险分析·····	75
5.1 页岩气开发风险特征分析·····	76
5.1.1 页岩气开发风险概述·····	76
5.1.2 页岩气开发的风险特征·····	77
5.2 页岩气开发基本风险单元分析·····	78
5.2.1 基本风险单元定义·····	78
5.2.2 剖析基本风险单元·····	78
5.3 页岩气开发风险评价体系构建·····	83
5.3.1 层次分析法简介·····	83
5.3.2 页岩气开发风险评价体系·····	84
5.3.3 页岩气开发风险对经济效益的传导路径分析·····	88
5.4 页岩气开发风险估计·····	90
5.4.1 产量风险·····	90
5.4.2 价格风险·····	90
第6章 基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价·····	92
6.1 蒙特卡罗模拟法简介·····	92
6.1.1 蒙特卡罗模拟法的基本思想·····	93
6.1.2 蒙特卡罗模拟法的优点·····	93
6.1.3 蒙特卡罗模拟法在页岩气开发经济评价中的适用性·····	93
6.2 基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价步骤·····	94
6.2.1 定义产量风险·····	95
6.2.2 确定风险变量的概率分布函数·····	95
6.2.3 生成随机数·····	95
6.2.4 计算经济效益值·····	95
6.2.5 统计内部收益率值的样本特征·····	96
6.3 基于蒙特卡罗模拟法的页岩气开发经济评价案例·····	96
6.3.1 案例概况·····	97
6.3.2 风险变量刻画及其概率分布规律·····	98
6.3.3 净现值和内部收益率的统计值及其分布规律·····	103
6.3.4 经济评价结果及分析·····	106
第7章 基于实物期权法的页岩气开发经济评价·····	108
7.1 实物期权理论简介·····	108
7.1.1 实物期权概念与内涵·····	108
7.1.2 实物期权法的常见定价模型·····	109

7.1.3	实物期权法在经济评价中的应用概况	111
7.1.4	页岩气开发经济评价引入实物期权的适用性	113
7.2	基于实物期权法的页岩气开发经济评价步骤	114
7.2.1	页岩气项目投资风险的识别与评价	115
7.2.2	页岩气开发项目中的实物期权识别	115
7.2.3	实物期权模型的价值估算	116
7.2.4	基于实物期权法的项目价值评估	117
7.2.5	投资决策分析	117
7.3	基于实物期权法的页岩气开发经济评价案例	117
7.3.1	案例概况	117
7.3.2	页岩气价格波动性分析	119
7.3.3	基于二阶段复合实物期权的页岩气开发经济评价	120
7.3.4	经济评价结果与分析	121

第四部分 基于生产效率的页岩气开发经济评价

第 8 章	基于 DEA 方法的页岩气开发经济评价方法	125
8.1	DEA 方法基本理论与模型介绍	125
8.1.1	DEA 方法基本理论	125
8.1.2	基于 DEA 方法的模型介绍	126
8.1.3	DEA 方法在页岩气开发经济评价中的适用性	132
8.2	基于 DEA 方法的页岩气开发常规经济评价步骤	132
8.2.1	明确问题阶段	133
8.2.2	建模计算阶段	133
8.2.3	分析结果阶段	135
第 9 章	基于 DEA 方法的页岩气开发经济评价案例	137
9.1	案例概述	137
9.2	投入、产出指标以及样本的选取	139
9.2.1	投入与产出指标体系的建立	139
9.2.2	分析样本的选取	141
9.2.3	用于页岩气开发经济评价的模型	141
9.3	经济评价结果及分析	142
9.3.1	SBM 模型评价结果	142
9.3.2	SBM-超效率模型评价结果	143
9.3.3	投入与产出指标可改进程度	144

第五部分 结论与启示

第 10 章 研究结论与展望	149
10.1 主要研究结论	149
10.2 研究展望	150
第 11 章 政策启示与建议	152
11.1 多种评价方法相结合	152
11.2 制定经济评价制度体系	152
11.3 组建专业的经济评价团队	153
11.4 建立评价案例数据库	153
11.5 总体与分步评价相结合	154
11.6 兼顾国家能源战略、社会效益与企业效益	154
11.7 注重环境保护与监管	155
11.8 积极发展碳排放交易市场	155
参考文献	157
附录 1 页岩气项目常规经济评价财务数据表	162
附录 2 页岩气项目复合实物期权定价模型与参数	173
附录 2.1 页岩气项目复合实物期权定价模型	173
附录 2.2 模型中的参数	176

第一部分

页岩气开发及其经济评价概况

第1章 页岩气发展与开发概况

随着绿色低碳发展的深入人心，我国对清洁能源的需求与日俱增。天然气是传统化石能源中最为清洁的能源，近年来，我国天然气行业稳步发展，市场规模快速扩大。2021年，天然气消费量达到 $3690 \times 10^8 \text{m}^3$ ，同比增长 12.5%，在能源消费总量中的比重升至 8.9%，比 2020 年提高了 0.5 个百分点。与此同时，天然气国内产量稳步提高，超过 $2070 \times 10^8 \text{m}^3$ 。天然气勘探硕果累累，新增天然气探明地质储量达到约 $1.6 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，其中页岩气探明储量较上年增长两倍以上。尽管如此，我国天然气的进口依存度依然较高。2021 年我国天然气进口呈现量价齐升，进口量达 $12136 \times 10^4 \text{t}$ ，同比增加 $1970 \times 10^4 \text{t}$ ，同比增长 19.9%，进口金额 3601 亿元，同比增长 56.3%，对外依存度达到 45.7%，创历史新高。页岩气是我国天然气资源的重要组成部分。资料显示，我国页岩气可采资源量达 $21.8 \times 10^{12} \text{m}^3$ ，高居世界第一，而我国页岩气探明率仅 4.79%，资源潜力巨大。因此，开发页岩气并对其进行经济评价具有重要的现实意义。

1.1 页岩气的定义与开发特征

1.1.1 页岩气的定义和特性

页岩气是指赋存于富有机质泥页岩及其夹层中，以吸附或游离状态为主要存在方式，成分以甲烷为主的非常规天然气。这种非常规天然气贮存于富有机质泥页岩及其夹层中，以前被认为很难经济有效地开发，但是，随着水平井大规模压裂技术的成功应用，页岩气的开发利用得以快速发展。美国掀起的页岩气革命对国际天然气市场及世界能源格局产生了重大影响，自此，世界主要资源国都加大了页岩气勘探开发的力度，中国也不例外。

截至 2020 年底，我国已探明的天然气田 289 个，其中页岩气田共 7 个，页岩气田数量仅占全国天然气田的 2.4%，但其产量已经超过国产气总量的 10%。2020 年我国页岩气产量突破 $200 \times 10^8 \text{m}^3$ ，同比增长超 30%。如今，我国页岩气产能已位居世界第二。我国页岩气产量自 2018 年突破百亿立方米以来，连年增长，探明地质储量 6 年增长了 19 倍，产气量 8 年增长了 200 倍，有力实践了习近平总书记“能源革命”的指示。

作为非常规天然气的一种，页岩气成藏的生烃条件及过程与常规天然气藏类同，泥页岩的有机质丰度、有机质类型和热演化特征决定了其生烃能力和时间。页岩气的非常规之处体现在如下几个方面：一是赋存方式存在差异，常规天然气以游离赋存为主，页

岩气以吸附和游离赋存方式为主；二是移运模式不同，常规天然气成藏除了烃类气体在泥页岩中初次运移以外，还需要通过断裂、孔隙等输导系统二次运移进入储集层中；三是储集层和储集空间不同，常规天然气储集于碎屑岩或碳酸盐岩的孔隙、裂缝、溶孔、溶洞中，页岩气主要储集于泥页岩层系黏土矿物和有机质的表面、微孔隙中；四是成藏条件不同，常规天然气需要产生、储存、覆盖三者的合理组合，而页岩气属于自生自储，其成藏过程与成藏机理与煤层气极其相似。页岩气与常规天然气、煤层气、致密砂岩气的对比如表 1-1 所示。

表 1-1 页岩气与常规天然气、煤层气、致密砂岩气的对比

对比项目	常规天然气	页岩气	煤层气	致密砂岩气
界定	浮力作用影响下，聚集于储层顶部的天然气	主要以吸附态、游离态和溶解态聚集于泥页岩层系中的天然气	主要以吸附态聚集于煤系地层中的天然气	不受或部分不受浮力作用控制、以游离态聚集于致密储层中的天然气
气源(成因)	多样化	生物气、热成熟气	生物气、热成熟气	以热成熟气为主
埋深	埋深有深有浅，一般大于 1500m	埋深有深有浅	一般小于 1500m	一般小于 1500m
分布特点	构造较高部位的多种圈闭	盆地古沉降-沉积中心及斜坡	具有生产能力的煤岩内部	盆地斜坡、构造深部位及向斜中心
勘探开发模式	滚动勘探开发或先勘探后开发	滚动勘探开发	滚动勘探开发	滚动勘探开发
开采范围	在圈闭范围内	大面积连片开采	大面积连片开采	大面积连片开采
成藏即勘探有利区	正向构造(圈闭)的高部位	3000m 以浅的页岩裂缝带	3000m 以浅的煤岩成熟区、高渗带	紧邻烃源岩储层中的“甜点”
储层压力	超压或常压	欠压或常压	欠压或常压	欠压或常压
井距	井距大，可采用单井，一般用少量生产井开采	必须采用井网，井的数量较多	必须采用井网，井的数量较多	必须采用井网，井的数量较多
产出机理	气体在自然压力下向井筒渗流，并服从达西定律；在近井地带可出现紊流	大规模压裂产气，早期以大孔隙和裂缝中游离气的达西流为主，稳定期以基质孔隙内的游离气和吸附气解吸—扩散—渗流为主	通过排水降压，气体在压力下降后解吸，在微孔中扩散，然后经裂缝渗流到井筒	压裂后气体经过致密基块—天然裂缝—水力裂缝—井筒等跨尺度、多机制、多路径的复杂流动过程，气体流动方式包括扩散和渗流
初期单井产量	高	低	低	低
增产措施	一般不需要	一定需要	一定需要	一定需要
开采技术工艺	较简单，常规工艺技术	主要有水平井、多段压裂技术、清水压裂技术、同步压裂技术等	主要有裸眼完井技术、定向羽状水平井、水力压裂、排水采气工艺技术等	较复杂，必须压裂
生产特点	采收率高，初始产气量大，随时间而降低，无水或者很少水产出，气/水随时间而减少	采收率低，生产周期长，无水或很少水产出，产气量随时间增加，直至达到最大值，然后下降	采收率低，产气量随时间增加，直至达最大值，然后下降，产水量随时间而增加	早期高产，一段时间后供气明显不足，压力急剧降低，稳产困难

1.1.2 页岩气开发的技术经济特点

页岩气藏所具有的自生自储、无气水界面、大面积连续成藏、低孔、低渗等特殊性质，决定了其与其他种类天然气在开发所需技术方面的差异，因而必须采用先进的储层改造工艺才能实现页岩气的商业性开发。虽然我国页岩气开发可以以美国、加拿大的成功经验做参考，也拥有世界第一的页岩气可采资源量及较为完备的天然气生产基础设施等内在条件，但我国毕竟处于页岩气开发的初级阶段，在页岩气开发项目中仍然面临着很多经济风险。

页岩气开发项目的经济风险因素来源错综复杂，会受到法律法规及政策变化，市场供需变化，开发与利用，技术可靠性，工程方案，以及环境与社会、外部配套条件等多个方面的共同影响。与常规天然气开发项目相比，页岩气开发风险具有风险来源更广、风险水平更高和风险带来的不确定性更大的特征。

(1) 风险来源广。页岩气开发风险主要来源于政策、市场、资源、技术、工程、融资、环境与社会、配套条件八个方面，每一方面都对页岩气开采的成功与否产生重要影响。另外，页岩气开发属于技术和资金密集型产业，技术要求和单位资金投入远高于常规天然气资源开发，使页岩气开发项目的经济风险受到政策、环境、社会及项目本身等多方面因素的共同影响。因此资源风险、市场风险和技术风险成为现阶段页岩气开发中最重要的风险来源。

(2) 风险水平高。页岩气作为非常规天然气资源，与常规油气藏相比，其勘探开发具有开采成本高、投入资金大、投资回收期长和产量变化大等自身特征。同时，我国页岩气开发尚处早期阶段，面临着核心技术尚不成熟、基础设施不健全等问题，导致页岩气开发项目面临的风险水平更高。

(3) 不确定性大。页岩气开发项目中风险来源广且风险之间的关系错综复杂，使得各风险给项目带来的不确定性增大。以产量的不确定性为例，页岩气具有井初期产量高、递减快，单井差异大、生产难同步，地面工程配套难、生产管理任务重的生产特点，这与常规天然气差异较大，加之我国页岩气开采尚处早期阶段，对页岩气井产能、产量递减规律和单井累积可采储量的认识存在局限，在实际操作中难以准确预计平台或单井产量情况，单井配产难度增加，生产过程中资源、技术、工程等风险因素对产量影响的不确定性加大。

经济效益评价作为项目决策的重要手段，对于提高页岩气项目决策的科学性，降低页岩气项目的投资风险，促进页岩气行业持续快速高效发展具有重要作用。页岩气的风险性决定了其项目经济效益评价方法的特殊性。常规的天然气经济效益的评价方法中，通常是对整个项目进行统一分析对比，通过相关财务及费用估算对项目进行经济效益评价。常规经济评价方法也进行了不确定性分析和风险分析，广泛使用的是敏感性分析技术，主要用以考察项目涉及的各种不确定因素对项目基本方案经济评价指标的影响，找出敏感因素，估计项目效益对它们的敏感程度。但这种不确定性评价方法只能粗略预测项目可能承担的风险，做法比较简单，在投资期限短、风险和不确定性相对较小的项目

经济评价中应用广泛。页岩气资源的特性决定了页岩气开发项目周期长,所需投资额巨大,涉及的工艺繁杂,风险和不确定性相对较高的特点,因此应充分结合页岩气项目自身的特点,在常规经济评价方法的基础上,考虑页岩气开发项目的风险特征,基于风险导向对页岩气开发项目进行经济评价,并为最终决策提供参考。

1.2 中国页岩气开发的必要性

1.2.1 能源需求快速增长的要求

国家经济发展所带动的能源需求上涨是开发页岩气的现实驱动力。能源被称为经济的“血脉”,是经济发展的重要物质基础,是影响人类生存的重要因素,能源对一国的工业化、农业现代化、城市化等起着决定性的作用。到2018年,我国一次能源生产总量是1949年的158倍。其中,煤炭产量增长114倍,原油产量增长1574.9倍,天然气产量增长22894.7倍,发电量增长1652.9倍。中国从能源工业基础的“一穷二白”发展成为世界能源生产的第一大国。中国持续40余年的经济高速增长,其背后是各种能源的巨大支撑。据国家统计局国民经济和社会发展统计公报,2021年能源消费总量为 52.4×10^8 t标准煤,比上年增长5.2%,增长率较2020年提高3个百分点;全国发电装机容量为 237692×10^4 kW,比上年增长7.9%;发电量为 85342.5×10^8 kW·h,比上年增长9.7%,比2019年增长13.7%,两年平均增长6.6%。

即便是每年持续的高增长,依然不能满足我国能源的消费需求,我国已经成为世界上最大的能源消费国。国家统计局数据显示,2021年煤炭消费量增长4.6%,原油消费量增长4.1%,天然气消费量增长12.5%,电力消费量增长10.3%。能源消费需求与生产能力的差距使得我国能源对外依存度居高不下。2021年,我国进口煤及褐煤 32322×10^4 t,比上年增长6.6%,全年累计进口总金额2319亿元,较上年增长64.1%。进口原油 51298×10^4 t,比上年减少5.4%,进口金额16618亿元,同比增加34.4%。进口成品油 2712×10^4 t,比上年下降4%,进口金额1078亿元,同比增加31.6%。进口天然气 12136×10^4 t,比上年增长19.9%,进口金额3601亿元,比上年增长56.3%。

如此大的能源需求对我国天然气工业的发展提出了严峻的挑战。如何提高产业效率,增加产品供应以适应我国经济社会发展的需求,成为整个天然气行业亟须解决的问题,而如何利用好现阶段我国天然气的可采储量,成为解决这一问题的关键环节。

1.2.2 能源消费结构转变的要求

任何一个国家的能源结构演变都需要一个长期的历史过程。在未来相当长的一段时间内,矿物燃料都将在能源结构中占据主导地位,这一点我国也不例外。目前,世界能源消费以油气为主,我国正在完成从以煤炭消费为主转向以石油消费为主的过程。由于资源条件的限制和工业发展路径等原因,我国是目前世界上仅有的几个能源消费以煤炭

为主的国家，原煤生产和消费量在整个能源结构中占据绝对主导地位。相比石油和天然气，我国的煤炭储量较为丰富，开采成本低，因此长期以来，煤炭在我国能源消费结构中的比重超过 50%，而煤炭资源的特点是转换效率较低、灰分较大、热值较低、运输不便，燃烧后对环境的污染较大，而煤炭燃烧是我国二氧化碳排放的主要来源。

面对日益严峻的环境问题，逐步实现清洁能源对煤炭的替代已经成为我国实现可持续发展的战略目标之一。如图 1-1 所示，近年来，我国加快推动形成能源节约型社会，传统能源利用方式加速转变，清洁低碳转型步伐明显加快，整体形成了“两下降”“三提升”的良好态势，煤炭消费比重连年下降，自 2018 年以来连续保持在 60.00%以下，2021 年更是下降至 56.00%，同时天然气消费比重提升至 8.90%。

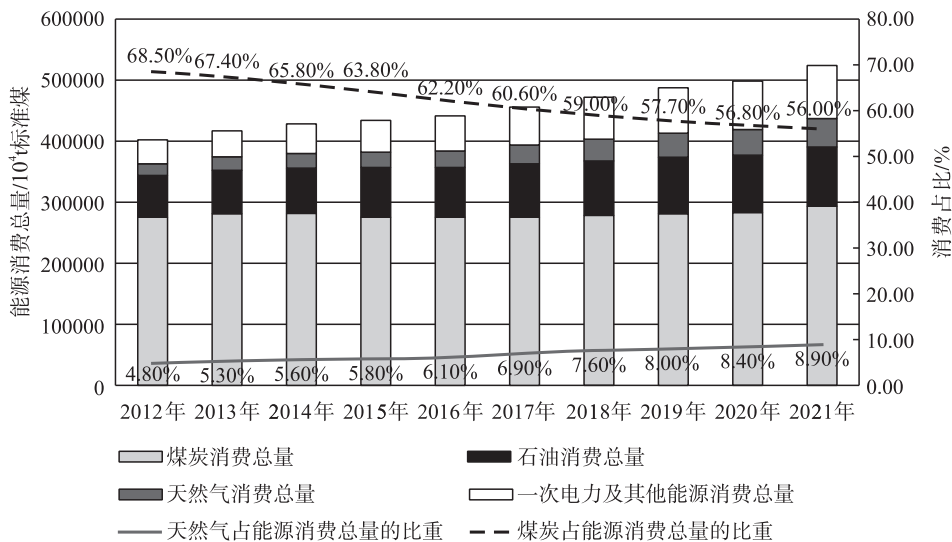


图 1-1 2012~2021 年中国能源消费结构变化图

数据来源：国家统计局

能源消费结构的转变将促使清洁能源的使用量增大，而根据我国现阶段各能源的综合发展状况，天然气将成为清洁能源的主要组成部分。要实现能源供给结构的持续优化，天然气的使用是关键。然而当前，我国常规天然气的开采已面临资源瓶颈，要实现天然气产量的大飞跃，必须依靠非常规天然气，而在非常规天然气中，目前开采条件最为成熟，其产量能够支撑起整个天然气行业发展的气种，当属页岩气。

在天然气中，非常规天然气资源储量丰富，成为天然气产量增长的重要动力。我国页岩气的技术可采储量位居全球第一，页岩气的发展已初具规模，局部地区已呈现出商业化开采，在钻完井技术、水力压裂技术、测录井技术、地球物探技术等方面都实现了国产化。在非常规天然气中，页岩气具备较强的发展潜力，对其充分开发利用，必将支撑起整个天然气行业的发展，从而促进我国的能源转型。

1.2.3 能源安全与能源战略的考量

对能源安全的考量使得页岩气开发成为国家能源战略的重要组成部分。现阶段，我国的能源安全面临较大挑战。作为世界上最大的能源生产国和消费国，我国能源供应与经济发展模式之间存在着突出的矛盾。如图 1-2 所示，2021 年，我国天然气进口量达 $1675 \times 10^8 \text{m}^3$ ，同比增长 19.9%，对外依存度达到 45.7%，创历史新高。由于历史、民族、文化以及现实的政治经济矛盾相互交织，世界天然气的主要产区也是全球主要的动荡区域。

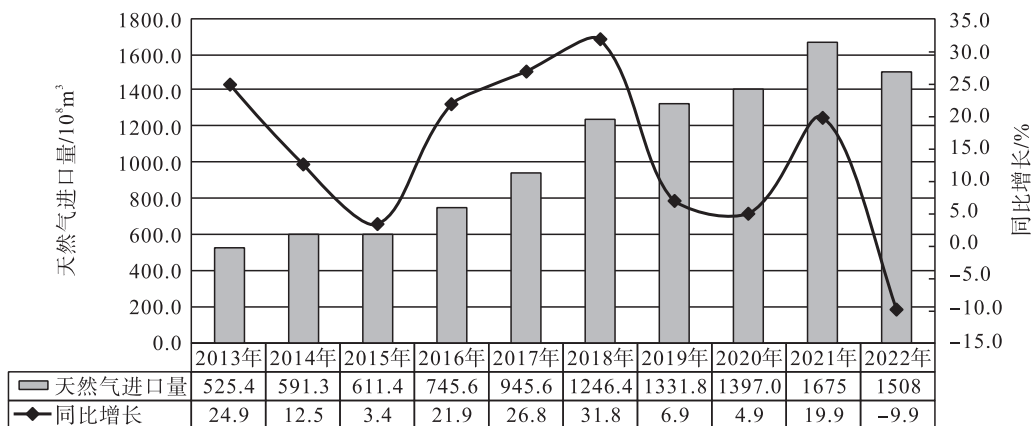


图 1-2 2013~2022 年中国天然气进口量变化图

数据来源：国家统计局、海关总署

我国的天然气进口主要来自俄罗斯以及中亚国家，俄罗斯与乌克兰、欧盟的天然气博弈告诫我们，要维护国家的能源安全，能源进口必须要和自力更生相结合，要随时做好进口供应中断的准备。目前，我国天然气进口的一些预警性机制还未建立起来，包括境外管线全面评估、预警和国内保障机制等；而要建立这些机制，提高国内产量，提升国内天然气开采效率是关键，要树立“安全 = 效率”的能源理念。

能源安全包含能源的可靠供给、价格合理和环境友好三个部分。虽然中国已是世界天然气需求增长的最大驱动力，但在天然气定价方面缺乏话语权，长期承受不合理的“亚洲溢价”。随着能源消费和进口量的持续走高，其负面影响将会越来越大。而定价话语权的缺失，究其根源在于我国尚未形成独立的天然气价格体系，缺乏合理的市场定价机制，现行政府定价多通过挂靠国际其他市场价格形成，所以在卖方主导全球天然气市场的情况下，国内天然气价格无法达成定价谈判的基础。再加上“亚洲溢价”，更突显中国在天然气定价权方面的薄弱。而这一问题也强化了对国内天然气保障的需求力度，对国内天然气产出的质与量提出了更高的要求。

为促进清洁能源开发利用，优化能源结构，保障能源安全，2020 年 6 月 12 日，财

政部印发了《清洁能源发展专项资金管理暂行办法》，规定可使用专项资金对煤层气(煤矿瓦斯)、页岩气、致密气等非常规天然气开采利用给予奖补，按照“多增多补”的原则分配。超过上年开采利用量的，按照超额程度给予梯级奖补；未达到上年开采利用量的，按照未达标程度扣减奖补资金；对取暖季生产的非常规天然气增量部分，按照“冬增冬补”的原则给予奖补。

总体而言，基于能源转型和能源安全的考量，天然气的开发迎来鼎盛期，而在天然气的诸多气种中，页岩气是储量大、开采条件较为成熟的气种，我国也出台了一系列政策支持页岩气的发展，页岩气开发前景广阔。

1.2.4 “双碳”目标的要求

自 1850 年以来，发电、供热、交通和工业等领域的人类活动大规模开发利用化石燃料，导致二氧化碳排放量大幅增加。近百年尤其是近几十年来，极端气候事件发生频率和严重程度显著增加，全球气温明显升高，已超出一般的自然变迁水平。20 世纪 80 年代，联合国环境规划署和世界气象组织成立了政府间气候变化专门委员会，该委员会得出结论：大气层二氧化碳浓度增加是全球气候变化的主要原因，而化石燃料消耗是导致二氧化碳浓度增加的最主要原因。全球气候变化涉及能源安全、粮食安全、水资源安全、生态安全和公共卫生安全等问题，直接影响人类的生存和发展，对全球经济社会的可持续发展带来严峻的挑战。

应对气候变化风险已经成为国际共识，能源结构向可再生能源转型成为必然趋势。联合国政府间气候变化专门委员会支持和推动了一系列国际气候文件的制定与实施，包括《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》、“巴厘路线图”和《巴黎协定》。2020 年是能源领域低碳转型的关键一年，占全球碳排放总量一半以上的经济体都宣布了到 21 世纪中叶实现碳中和的目标，多家欧洲石油公司明确转型为综合能源公司。

根据联合国政府间气候变化专门委员会的定义，碳中和为特定时期内，人为二氧化碳排放量与二氧化碳移除量相平衡的状态。我国“相对富煤、缺油、少气”的化石能源资源禀赋特点，决定了我国煤炭消费占比过高，天然气消费占比较低的能源消费结构。

要实现碳中和目标就必须加快能源消费结构的转变，增加清洁能源的使用。天然气和新能源作为清洁能源将在不同历史时期担负不同的历史使命。目前，天然气发挥着能源转型的桥梁作用。英国石油公司(British Petroleum, BP)发布的《世界能源展望》(2020 年版)提出，未来 30 年天然气需求将持续增长，在经济快速增长的发展中国家的低碳转型中，可再生及其他非化石能源的增速不足以替代煤炭需求，而增加对天然气的利用可以减少对煤炭的使用。从世界勘探开发潜力来看，天然气资源丰富，具备长期快速发展的基础，目前常规天然气探明率仅约 50%。页岩气、煤层气、致密气、天然气水合物等非常规天然气资源量是常规天然气的 8 倍多，美国、中国等国家页岩气、致密气的成功开发，已拉开非常规天然气开发的序幕。

1.3 国外页岩气开发现状

从目前官方机构以及学术界发布的消息来看,世界页岩气资源非常丰富。2011 年 4 月,美国能源信息署(Energy Information Administration, EIA)发布世界页岩气资源初步评价报告,对美国以外 32 个国家的页岩气资源进行了评价,估计页岩气资源量为 $623.43 \times 10^{12} \text{m}^3$,技术可采资源量为 $163.10 \times 10^{12} \text{m}^3$ 。加上美国的页岩气,33 个国家合计页岩气技术可采资源量为 $187.52 \times 10^{12} \text{m}^3$,这 33 个国家的页岩气就与目前全球的天然气储量($187.1 \times 10^{12} \text{m}^3$)相当。美国能源信息署评价了 14 个油气区、48 个含页岩气盆地和 70 个页岩气层(未包括俄罗斯、中亚、中东、东南亚和中非等地区,因为这些地区或有非常丰富的常规资源,或缺乏基础的评价资料),评价采用的方法是首先对所选择页岩盆地和地层进行地质和储层描述,确定主要页岩地层的分布范围、厚度和关键的储层参数,然后确定各页岩地层的潜力区,最后计算地质资源量和技术可采资源量。根据美国能源信息署的评价报告,从各大洲的分布来看,北美洲页岩气潜在技术可采资源量最丰富,为 $54.68 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全球的 29.2%;亚洲页岩气潜在技术可采资源量为 $39.76 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全球的 21.2%;南美洲为 $34.69 \times 10^{12} \text{m}^3$,占全球的 18.5%(表 1-2)。

表 1-2 各大洲原地页岩气潜在资源量和潜在技术可采资源量

大洲	原地页岩气潜在资源量/ 10^{12}m^3	页岩气潜在技术可采资源量/ 10^{12}m^3	页岩气潜在技术可采资源量占比/%
北美洲	109.19	54.68	29.2
南美洲	129.38	34.69	18.5
欧洲	73.26	17.67	9.4
非洲	112.19	29.51	15.7
亚洲	160.30	39.76	21.2
大洋洲	39.11	11.21	6.0
合计	623.43	187.52	100.0

资料来源:美国能源信息署 2011 年公布的数据。

页岩气技术可采资源量排名前 10 位的国家依次是中国、美国、阿根廷、墨西哥、南非、澳大利亚、加拿大、利比亚、阿尔及利亚和巴西。这 10 个国家技术可采资源量占全球的 84.7%。此外,欧洲的波兰和法国的页岩气资源也比较丰富。从美国能源信息署的评价结果来看,这些国家的技术可采页岩气资源量都远远多于已证实的天然气储量,如法国技术可采页岩气资源量是已证实天然气储量的 850 倍,中国是 12 倍,页岩气资源勘探开发前景看好(表 1-3)。