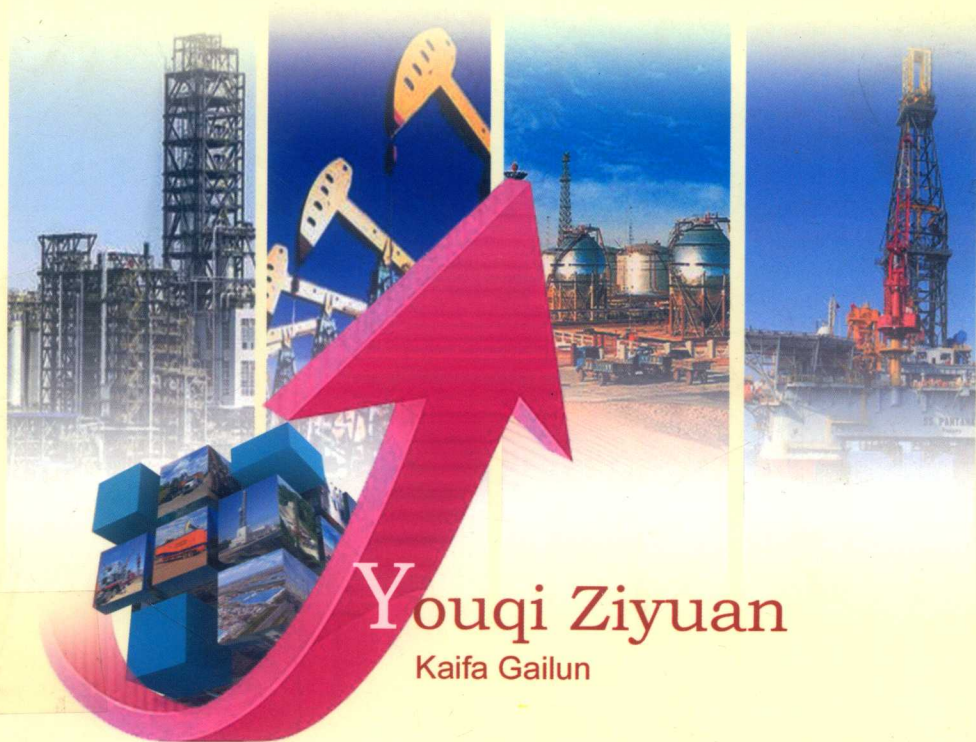


油气资源开发概论

主 编 杨科 刘钦节



中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

油气资源开发概论

杨 科 刘钦节 主编

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

油气资源是关系我国现代化建设全局和国家安全的重要战略资源,是我国经济发展、国家安全稳定和全面建设小康社会目标顺利实现的保障。本书主要针对当前国内外研究及开发利用的热点,对油气资源的生成、赋存及成藏地质特征、开采理论与技术方法、利用方式与途径等方面进行了论述。主要内容包括油气资源开采基础理论、油气资源开采技术简介、石油天然气开采、煤层气开采、页岩气开采、致密砂岩气及天然气水合物开采、油气资源利用等。

本书不仅可作为高等学校能源资源开发与利用相关专业本科生教材,也可作为研究生和现场工程技术与管理人士的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

油气资源开发概论/杨科,刘钦节主编. —徐州:

中国矿业大学出版社, 2015.10

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2829 - 1

I. ①油… II. ①杨…②刘… III. ①油气田开发
IV. ①TE3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第220470号

书 名 油气资源开发概论

主 编 杨 科 刘钦节

责任编辑 杨 廷

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司
(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×960 1/16 印张 12.25 字数 233 千字

版次/印次 2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

定 价 32.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

受到资源与环境制约等全球性因素影响,世界能源结构发生了重大变化,能源开发与利用将向安全、清洁、高效、低碳、绿色方向发展。我国能源结构调整步伐也正在加快,“以大气污染防治为契机,加快淘汰能源行业落后产能,着力降低煤炭消费比重,提高天然气和非化石能源比重”这一指导思想大致明确了未来的能源发展趋势。我国油气资源十分丰富,是煤炭等传统能源最现实的接替资源,在世界能源结构中扮演着越来越重要的角色。我国在借鉴国际石油公司先进技术,合作开发积累的技术、管理经验等基础上,开发利用技术日趋成熟,在某些领域也达到了世界先进水平。因此,开设常规和非常规油气资源开采及利用方面的课程,帮助学生理解并掌握常规和非常规油气藏开采及利用相关的理论基础、实验测试方法和开发利用装备情况,对拓展毕业大学生视野,完善其知识结构,提高能源资源、矿业类工程领域专业技术人员的综合素质,促进我国经济和社会发展,实施人才战略,具有十分重要的现实意义。

本书系统地介绍了常规油气资源以及页岩气、煤层气、致密砂岩气及天然气水合物等非常规油气资源的生成、赋存及富集特征、开采机理及技术、利用方式与途径等内容,可安排 32 学时讲授、32 学时自学。通过阅读和学习,读者能够掌握油气资源开发与利用基本原理、方法与技术。同时,希望能够抛砖引玉,引导读者结合自己实际情况,去查阅和掌握更多的知识。

本书由安徽理工大学杨科教授和刘钦节博士主编,第一章、第五章、第八章由杨科编写,第二章、第三章、第四章、第六章和第七章由刘钦节编写。在编写过程中,编者参考借鉴了国家能源局及石油、煤炭类高等院校、科研院所、企事业单位的大量文献资料,特别是非常规天

然气开发利用方面参考并引用了国内外众多相关研究团体或个人的专著、科研论文等文献资料,在此特向文献作者致以诚挚的谢意!感谢中国工程院袁亮院士及团队的指导与支持;感谢邵淑成、朱朋彬、何祥等研究生为本书文字录入、图片扫描、排版方面所作的工作;感谢第三批国家级采矿工程特色专业国家质量工程项目、采矿工程国家级卓越计划、采矿工程国家级专业综合改革试点经费、采矿工程专业省级教学团队经费、国家自然科学基金(51374011)、安徽省精品资源共享课程《煤矿开采学》和安徽理工大学采矿工程专业教学团队资助经费对本书出版的支持!感谢中国矿业大学出版社对本书的大力支持!

由于编者的水平有限,错漏、不足之处在所难免,恳请广大读者及相关专家批评指正!

编 者

2015 年 6 月

目 录

前言	1
第一章 绪论	1
第一节 世界能源结构与发展趋势	1
第二节 中国能源消费现状	5
第三节 中国油气资源开发利用特点	8
第四节 我国能源中长期发展战略	15
思考与练习	17
第二章 油气资源开采基础理论	18
第一节 油气资源形成与赋存	18
第二节 油气资源富集机理	23
第三节 油气资源产出机理	30
第四节 煤层气运移及产出机理	37
思考与练习	42
第三章 油气资源开采技术简介	43
第一节 钻井技术与工艺	43
第二节 固井与完井技术	62
第三节 油气资源抽采方法与设备	75
第四节 压裂增产原理与技术	88
思考与练习	92
第四章 石油天然气开采	93
第一节 油田开发技术简介	93
第二节 气井工程特点及其方案设计	98
第三节 提高石油采收率的方法	101

思考与练习	106
第五章 煤层气开采	107
第一节 井下煤层气抽采技术	107
第二节 地面煤层气开采	115
第三节 煤层气井增产技术	127
思考与练习	131
第六章 页岩气开采	132
第一节 概述	132
第二节 页岩气藏开采技术	136
第三节 页岩气增产改造技术	143
思考与练习	147
第七章 致密砂岩气和天然气水合物开采	148
第一节 致密砂岩气常规开采技术	148
第二节 天然气水合物开采技术	154
思考与练习	165
第八章 油气资源利用	166
第一节 石油利用	166
第二节 常规天然气利用	170
第三节 煤层瓦斯开发利用	177
第四节 页岩气资源利用技术	180
思考与练习	183
参考文献	184

第一章 绪 论

能源是人类生存和发展的重要物质基础,资源和环境制约等全球变化因素对传统能源格局提出了挑战。世界各主要国家纷纷调整战略,能源新技术成为竞相争占的战略制高点,以争取可持续发展的主动权。我国亦不例外,力图在科学发展观指导下,立足国情,总结历史经验,给出中国特色的新型能源战略,进一步向节能、高效、清洁、低碳方向发展。把资源和环境约束作为经济发展的基本制约条件,注重发展的质量、效率和环境友好,实现科学发展观指导下健康可持续发展,为今后长远的发展开创一条可持续的新型道路。本章主要介绍了世界能源结构组成与发展趋势、我国能源消费现状、中国油气资源开发利用特点及我国能源中长期发展战略等内容,重在帮助学生了解国内外能源生产与消费情况、发展趋势,明确发展方向,拓展视野、增长见识,以激发学习本课程的兴趣。

第一节 世界能源结构与发展趋势

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。随着经济社会的发展,人们使用的能源特别是化石能源越来越多,能源对经济社会发展的制约日益突出,对赖以生存的自然环境的影响也越来越大,而化石能源最终将消耗殆尽。因此,提高能源利用效率、调整能源结构、开发和利用可再生能源将是能源发展的必然选择。《BP2014 世界能源统计报告》表明:能源消费与经济增长保持一致,世界能源消费量逐年增加,2002~2012 年年均增长 3% 左右,如图 1.1 所示。发达国家经济增速放缓,能源需求将长期保持微弱增长,发展中国家和新兴市场国家经济快速增长、人口持续增加、城市化进程不断推进,成为世界能源消费增长的引擎,如图 1.2 所示。自 2001 年以来,非经合组织经济体的发展中国家开始进入经济快速增长期,主导着全球能源需求的增长,2008 年非经

合组织的需求增长超过以发达国家为主体的经合组织^①,2012 年非经合组织的能源消费占世界一次性能源消费的 56%,如图 1.3 所示。

全球消费量
(单位:百万吨油当量)

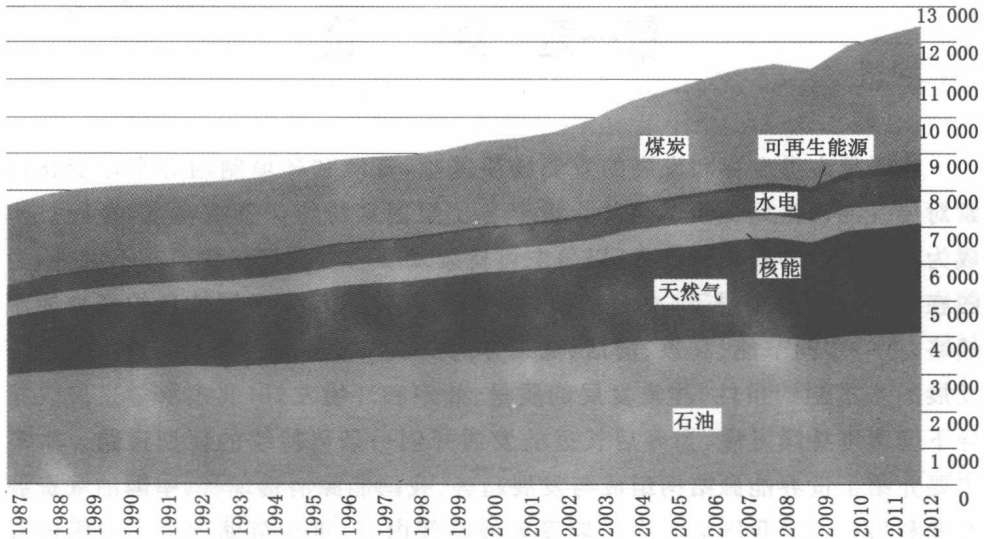


图 1.1 全球能源消费量增长情况

据 BP 公司 2014 年的《BP 2035 世界能源展望》预测,2012~2035 年,一次能源需求将增长 41%,年均增长 1.5%。能源消费增长呈现从经合组织转向非经合组织的明显和长期趋势。几乎所有的增长预期(95%)将出现在非经合组织,其能源消费在 2012~2035 年期间年均增长为 2.3%。与此形成对比的是,经合组织能源消费在相同时期的年均增长仅为 0.2%,并在 2030 年后出现负增长。中国已成为主要的增长动力,但到本展望期结束时,中国的推动力开始减弱。印度的贡献有所增加,到本展望期的最后 10 年将与中国的消费增长贡献接近持平,如图 1.3 所示。

价格、技术和政策推动着燃料结构的变化。按实际价值计算,化石燃料价格

^① 经合组织,即经济合作与发展组织(OECD),是由 34 个市场经济国家组成的政府间国际经济组织,旨在共同应对全球化带来的经济、社会和政府治理等方面的挑战,并把握全球化带来的机遇。其宗旨是促进成员国经济和社会的发展,推动世界经济增长;帮助成员国政府制定和协调有关政策,以提高各成员国的生活水准,保持财政的相对稳定;鼓励和协调成员国为援助发展中国家作出努力,帮助发展中国家改善经济状况,促进非成员国的经济发展。

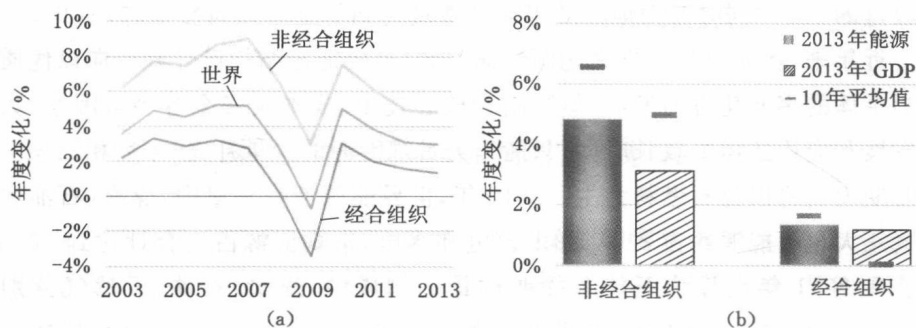


图 1.2 2003~2013 年世界能源和经济发展情况

(a) 近十年 GDP 增长情况; (b) 经合组织与非经合组织能源与 GDP 对比

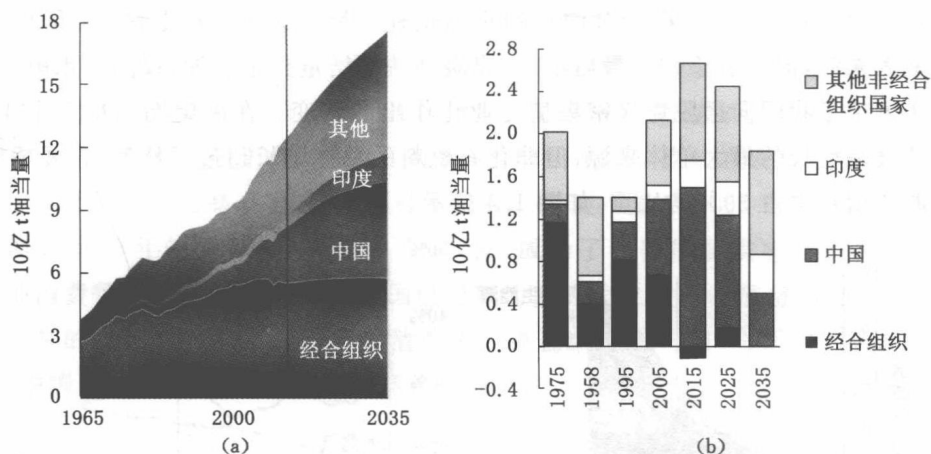


图 1.3 世界能源分区域消费及十年增量情况

(a) 分区域的消费情况; (b) 各区域的十年增量

在过去 10 年已涨至纪录新高。石油的年均实际价格在 2007~2011 年的 5 年期间比 1997~2001 年期间高出 220%，煤炭价格上涨了 141%，天然气价格上涨了 95%，而煤炭价格相对石油、天然气始终较便宜，具有最大的竞争力。全球煤炭资源主要集中在北半球的欧亚、北美地区，美国、俄罗斯、中国、澳大利亚、印度、南非等是世界上煤炭资源最丰富的国家。十大产煤国煤炭总产量占世界总产量的 83.9%，这些国家稳定的政治环境为煤炭资源的安全供应提供了保障。世界煤炭产量稳步增加，2010 年达 35.48 亿 t 油当量，2013 年增长到 38.81 亿 t 油当量，年均增长 2.27%。煤炭是亚太地区的主导能源，该地区是全球唯一的单种能源占一次能源消费总量 50% 以上的地区。2012 年，亚太地区占了全球能源消

费总量的 40%，同时亚太地区的煤炭消费量达到了全球总消费量的 69.9%。

近年来，新能源与可再生能源快速发展，世界能源结构已经开始向以优质能源为主体的多元化方向发展，但受制于核心技术、成本及安全等多重因素，大规模发展和应用还需要较长时间，只能作为常规能源的少量补充，今后相当长的一段时期内仍将以化石燃料为主。2010 年，世界能源消费总量中，煤炭、石油和天然气三大化石能源约占 81%，加上核电和水电，常规能源占比合计达到 90% 左右。在 2011 年世界化石能源探明储量的构成中，煤炭、石油、天然气分别占 53.83%、24.14%、22.03%，储采比分别为 112、54.2、63.6，说明煤炭依然是最丰富的化石能源。在化石燃料中，天然气消费增长最快（年均 1.9%），而且是超过能源总体增速的唯一化石燃料；石油增长最慢（年均 0.8%），煤炭增速仅略高于石油（年均 1.1%）。煤炭对增长的贡献迅速下降。目前，煤炭是消费量增长的最大来源，但在展望期的最后十年，煤炭消费的增量少于石油，仅高于水电，这再次体现了我国向摆脱煤炭密集型工业化作出的转变。在展望期的最后十年，天然气是增长的最大单体来源；但非化石燃料的总体增长超过天然气，在展望期的能源增长中占 39% 的比重，如图 1.4 所示。

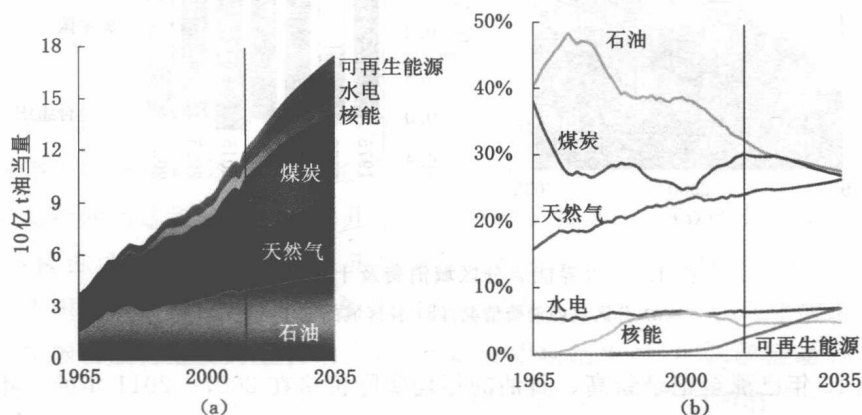


图 1.4 世界能源各类燃料消费和一次能源构成情况

(a) 各类燃料消费情况；(b) 各类燃料十年增量情况

在展望期内，所有类型的燃料消费均有所增长，其中增长最快的是可再生能源（年均 6.4%），可再生能源、页岩气、致密油和其他新型燃料的总体年均增长为 6.2%，贡献了 43% 的能源生产增量。2012~2035 年，世界一次能源产量年均增长 1.5%，与消费增长持平。产量增长集中在非经合组织，其贡献了近 80% 的生产增量。除欧洲外，所有区域的生产都有所增长。亚太地区的增速最快（年

均 2.1%)而且增量最大,提供了 47%的全球能源生产增量。中东和北美是第二大增长来源,而北美仍是第二大能源生产区域。

第二节 中国能源消费现状

中国已是世界上最大的能源消费国。我国的能源需求增长迅速,10 年前能源消费总量只有美国的一半,如今则保持着每年 2 位数的增长速率,其能源需求在 2007 年超过欧盟,2010 年超过美国,2012 年则超过整个北美。2013 年,中国能源消费占全球消费总量的 22.4%,占全球净增长的 49%。

进入 21 世纪以来,我国加入了 WTO,加快了进入经济全球化的进程,能源需求出现超高速增长,能源消费弹性系数从 20 世纪后 20 年平均 0.4 左右,迅速提高到 2004 年最高值 1.60。据国家统计局数据显示(图 1.5):2001~2014 年,我国能源消费总量从 15.5 亿 t 标准煤增加到 42.6 亿 t 标准煤,增长速度平均达到 12.4%,远远高于同时期世界不到 2%的增长速度。煤炭在我国能源消费结构中的比例一直居高不下,甚至有所提高。煤炭产量从 2001 年的 14.72 亿 t 增加到 2013 年的 36.8 亿 t,增长了 150%,成为了我国能源供应增长的主力。石油消费每年平均增长 9.3%,我国已经成为世界第二大石油消费国,而同期国内产量的增长率只有 2.1%,增加消费主要靠进口。据英国《金融时报》网站报道,中国 2015 年 4 月份石油进口达到每日 740 万桶(相当于全球每日石油消费

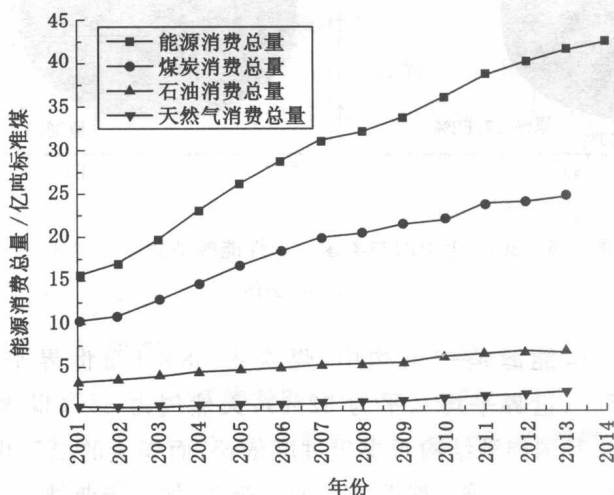


图 1.5 我国能源消费总量变化曲线

量的 1/13),超过美国每日 720 万桶的进口量,成为全球最大原油进口国。美国页岩革命降低了该国对进口石油的依赖,而中国的石油需求在经济放缓之际有增无减。我国天然气起步始于 20 世纪 60 年代,经过半个世纪的发展,国内天然气开发取得了长足进步,2013 年全国天然气产量为 1209 亿 m^3 ,创下历史新高。但市场需求量以更快的速度增长,目前呈现供不应求的局面,而且短期内,我国天然气抽采能力远无法与快速增长的需求相匹配。据我国天然气“十二五”规划,2015 年我国天然气产量可达到 1 700 亿 m^3 ,与此同时供需缺口也将上升至 900 亿 m^3 ,相当于对外依存度达到 35%。

我国经济社会的快速发展,能源需求不断增长,以煤炭为主的能源资源条件使得煤炭在一次能源生产和消费中的比例始终维持高位运行,能源结构极不合理,见图 1.6。而我国较低的人均能源拥有量,使得一次能源赤字逐渐增加,并于 2013 年首次超过美国,见图 1.7。2013 年,我国进口了 3.27 亿 t 煤、2.82 亿 t 原油和 480 亿 m^3 天然气,进口依存度分别为 8%、58%和 29%,随着时间推移,供需缺口还会加大,大大加剧了我国进口能源的经济负担,如图 1.8 所示。

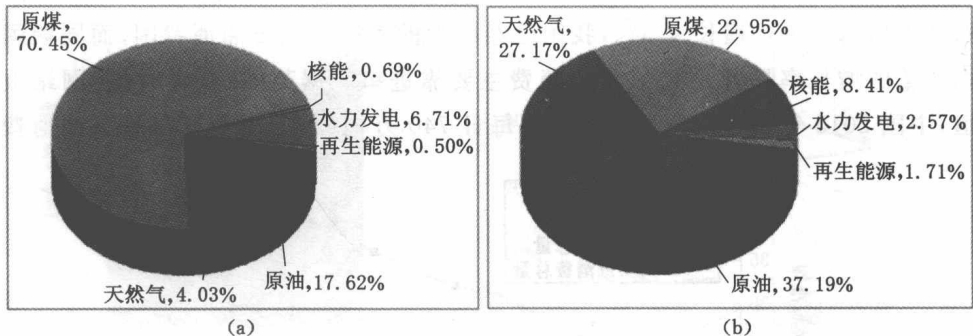


图 1.6 2010 年中国与美国一次性能源消费结构对比

(a) 中国; (b) 美国

2013 年,在我国能源消费结构中,煤炭占 68% (而世界平均水平只有 30%),原油占 18% (世界平均水平为 32%),天然气占 5% (世界平均水平为 24%)。可以看出,我国能源结构对煤炭过度依赖,而煤炭的二氧化碳强度是石油的 1.3 倍,天然气的 1.7 倍。能源结构的不合理,加上产业结构的问题所带来的高能耗导致二氧化碳高排放、空气严重污染等问题。作为目前世界上最大的

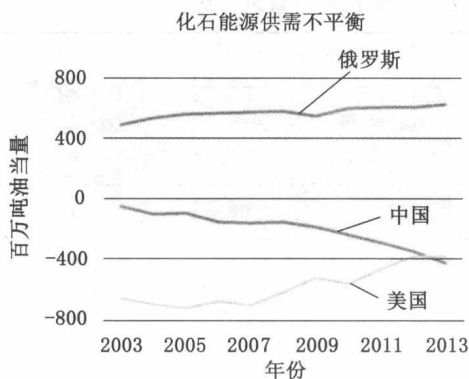


图 1.7 中国、美国、俄罗斯化石能源供需变化

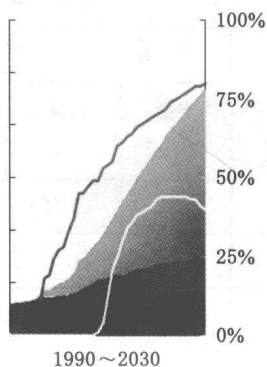


图 1.8 我国石油天然气对外依存度预测

二氧化碳排放国,2012年,我国排放了92亿t二氧化碳,相当于全球排放量的27%左右,2013年我国碳排放总量达到100亿t,超过欧盟和美国的总和,2014年我国迎来了十多年来的首次二氧化碳排放量下降,表明我国控制污染的决心和努力正在取得成效。

根据新一轮油气资源评价和全国油气资源动态评价(2010年),我国常规天然气地质资源量为52万亿 m^3 ,最终可采资源量约32万亿 m^3 。2010年我国天然气产量为948亿 m^3 ,储采比约为40,处于勘查开发快速发展阶段。鄂尔多斯盆地、四川盆地、塔里木盆地和南海海域是我国四大天然气产区,合计探明剩余技术可采储量和产量分别约占全国的78%和73%,是今后增储上产的重要地区。2015年国产天然气供应能力将达到1760亿 m^3 左右,其中常规天然气1385亿 m^3 (含致密气),煤制天然气约150亿~180亿 m^3 ,煤层气地面开发生产约160亿 m^3 ,页岩气65亿 m^3 ,进口天然气量约935亿 m^3 。表1.1所列为我国2009~2012年三种非常规天然气产量及占比,由此可见我国的非常规天然气刚刚起步,对天然气总量的占比还非常低。据预测,2015年我国天然气供应结构如图1.9所示,其中页岩气仅占2.4%。基于资源现状和技术成熟程度,未来5至10年是我国非常规天然气发展的关键期。通过加快非常规天然气资源开发利用,加上常规气和进口气,天然气在我国一次能源消费结构中的比重将由2011年的4.5%提高到2030年的15%左右,将为改善我国能源结构、保障能源安全作出重要贡献。

表 1.1 我国 2009~2012 年三种非常规天然气产量及占比

年份	致密气		煤层气		页岩气		天然气总产量 /亿 m ³
	产量 /亿 m ³	占比 /%	产量 /亿 m ³	占比 /%	产量 /亿 m ³	占比 /%	
2009	150	17.58	71	8.32	0	0.00	853
2010	233	24.58	90	9.49	0	0.00	948
2011	256	24.98	115	11.22	0	0.00	1 025
2012	320	29.99	125	11.72	0.5	0.05	1 067

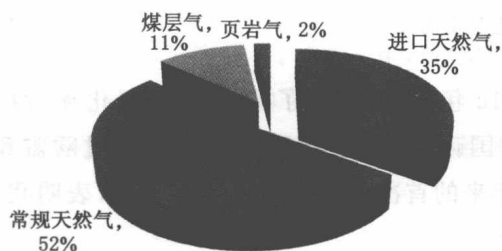


图 1.9 2015 年我国天然气供应结构

第三节 中国油气资源开发利用特点

我国的能源资源特点为“多煤、少气、贫油”，2013 年中国化石能源探明储量构成中，煤炭、石油、天然气分别占 93.95%、2.72%、3.33%。长期以来，煤炭一直占我国能源生产和消费总量的 60% 以上，2013 年分别达到 77.3% 和 66.6%，图 1.10 所示为进入 21 世纪以来我国能源生产结构及消费结构变化情况。煤炭工业的可持续发展维系着国家的能源安全，为我国国民经济和社会长期平稳较快发展提供支撑。

随着新能源发展和节能减排政策的强制执行，未来煤炭消费总量的比重将呈缓慢下降趋势，但国民经济的稳定健康发展对煤炭的需求总量仍将保持平稳增长。据预计，“十三五”将把控制能源消费总量作为重要任务，其中煤炭作为控制总量的重点，到 2020 年消费比重有望从目前的 66% 降到 60% 以下；天然气等清洁能源将继续快速增长，非化石能源也将进一步发展，2020 年占一次能源消

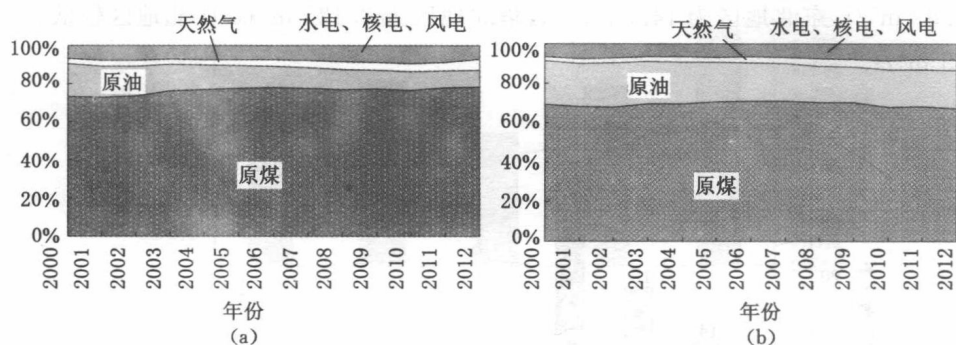


图 1.10 中国能源生产结构与能源消费结构

(a) 能源生产结构; (b) 能源消费结构

费比重到 15% 左右。

一、煤炭资源

中国是世界上最大的煤炭生产国和消费国。我国煤炭资源丰富, 2 000 m 以浅煤炭及煤层瓦斯资源量分别为 5.95 万亿 t 和 36.81 万亿 m^3 , 仅次于俄罗斯和加拿大, 世界排名第三。主要分布在华北及西北地区, 分别占全国煤炭总资源量的 90.7% 和煤层瓦斯总资源量的 84.5%, 其中新疆、山西、陕西资源储量约占 60% 以上, 分布呈现“北多南少、西多东少”的特点。近年来, 随着我国对能源需求量增加和矿井开采强度不断加大, 矿井开采延深速度加快, 煤矿开采深度平均每年增加 10~20 m, 目前东北及中东部地区的多数矿井开采历史长, 开采深度相对较大。据统计, 我国已有平顶山、淮南和峰峰 43 个矿区的超过 300 座矿井的开采深度超过 600 m, 逐步进入深部开采的范畴, 其中近 200 处矿井开采深度超过 800 m, 千米深井已达 47 处, 平均深度为 1 086 m, 最大开采深度已达到 1 500 m。预计在未来 20 年, 很多煤矿的开采深度将达 1 000~1 500 m。由于受开采条件、开采技术、开采环境等各种因素的制约和限制, 可供开发利用以及建设新井的资源十分有限, 已经对国家的能源安全构成了潜在威胁。

据《1:200 万中国煤层瓦斯地质图》对全国 105 个煤矿区调查结果, 全国含气量 $10 \text{ m}^3/\text{t}$ 以上的矿区有 43 个, 占 41%; $8\sim10 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 29 个, 占 28%; $6\sim8 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 19 个, 占 18%; $4\sim6 \text{ m}^3/\text{t}$ 含气量矿区 14 个, 占 13%, 见图 1.11。各大地区的平均矿井相对瓦斯涌出量分别为: 华南地区为

19.89 m³/t, 东北地区为 14.53 m³/t, 华北地区为 8.425 m³/t, 西北地区较低, 为 4.5 m³/t。

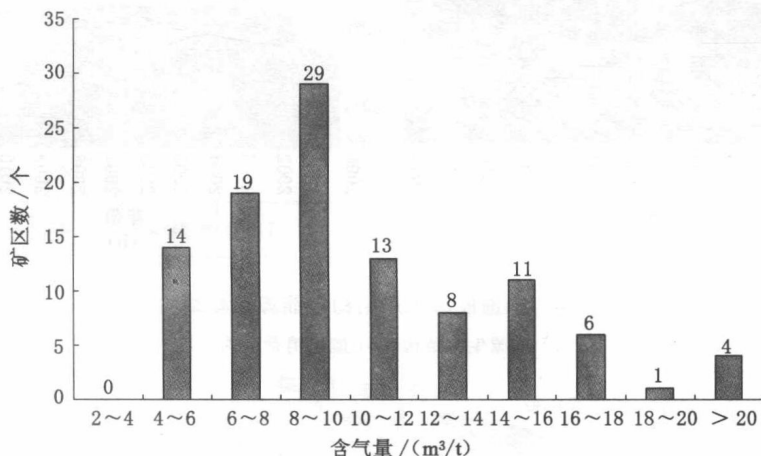


图 1.11 全国 105 个煤矿区煤层含气量统计直方图

在我国,构造是影响煤炭资源开发和煤矿开采最重要的因素。我国晚古生代聚煤期后的多期次地质构造运动,对煤层产生了不同程度的破坏作用,在一些地区形成大量的构造煤或软煤。这些煤层的原生结构遭到强烈破坏,煤层破碎、揉皱,煤层渗透性变差,常为 $10^{-1} \sim 10^{-3}$ mD 以下,给煤层气抽采和煤炭安全开采造成了极大困难。

二、常规油气资源

石油天然气是世界各国经济发展最重要的战略性资源之一。近年来随着我国石油对外依存度的不断增大,石油安全问题越来越突出,国家已经将油气和粮食、水资源一同列为影响经济社会可持续发展的三大战略资源。另外,石油产业拉动效果明显,是推动整个国民经济和社会发展的主要动力之一,机械、汽车、电子、建筑、化工等各行业都离不开石油,石油成为国民经济运转的血液。

因此,石油天然气行业发展在国民经济发展乃至国家能源安全中具有十分重要的地位。同时,油气行业本身在国民经济中的分量也较大,见图 1.12。2011 年,全行业工业总产值达 1.33 万亿元,占 GDP 的 2.8%;实现利润 4 044.3 亿元,占规模以上工业企业利润总额的 7.4%;上缴税金 2 568.97 亿元,占全部央企上缴税金的 15.1%。