

“十二五”
国家重点图书



21 世纪可持续能源丛书

石油天然气的开发与利用

杜国敏 徐舜华 编著



化学工业出版社

“十二五”
国家重点图书



21 世纪可持续能源丛书

石油天然气的开发与利用

杜国敏 徐舜华 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

石油天然气的开发与利用/杜国敏, 徐舜华编著. —北京: 化学工业出版社, 2015. 5

(21 世纪可持续能源丛书)

ISBN 978-7-122-23513-8

I. ①石… II. ①杜…②徐… III. ①石油工业-可持续性发展-研究-中国②天然气工业-可持续性发展-研究-中国 IV. ①F426. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 066408 号

责任编辑: 戴燕红 郑宇印

文字编辑: 丁建华

责任校对: 宋 玮

装帧设计: 韩 飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 18 $\frac{3}{4}$ 字数 365 千字

2015 年 7 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 78.00 元

版权所有 违者必究

第二版序

20 世纪末，随着人类社会发展对能源可持续供应的迫切需要，出现了“可持续能源”的理念，并受到全世界人们的关注。

21 世纪以来，能源更是渗透到了人们生活的每个角落，成为影响全球社会和经济发展的第一要素。目前中国已经成为全球能源生产与消费的第一大国，能源与经济的关系、能源与环境的矛盾、能源与国家安全等问题日显突出。因此，寻找新型的、清洁的、安全可靠并可持续发展的能源系统是广大能源工作者的历史使命。

2005 年，化学工业出版社出版了“21 世纪可持续能源丛书”，受到我国能源工作者的广泛好评；时隔 8 年，考虑到能源形势的变化和新技术的出现，又准备出版“21 世纪可持续能源丛书”（第二版），的确是令人高兴的事情。

“21 世纪可持续能源丛书”（第二版）共 12 册，仍然以每一个能源品种为一个分册，除对原有的内容做了更新，补充了最新的政策、技术和数据等外，增加了《储能技术》、《节能与能效》、《能源与气候变化》3 个分册。丛书第二版包括了未来能源与可持续发展的概念、政策和机制，各能源品种的资源评价、新工艺技术及特性以及开发和利用等；新增加的 3 个分册介绍了最新的储能技术，能源对环境与气候的影响以及提高能源效率等，使得丛书内容更加广泛、丰富和充实。

由于内容的广泛性和丰富性，以及参加编写的专家的权威性，本套丛书在深度和广度上依然保持了较高的学术水平和实用价值，是能源工作者了解能源政策

及信息，学习先进的能源技术和广大读者普及能源科技知识的不可多得的好书。

让我们期待这套丛书的出版发行，能为我国 21 世纪可持续能源的发展作出贡献。



中国科学院院士

2013 年 11 月 6 日

前言

石油，作为本世纪最重要且最具有政治意义的商品之一，在各国及世界的工业、经济和政治中都起着非常重要的作用；同时，石油作为各种日用品、消费品产出的源头，也与我们的生活息息相关。天然气，作为 21 世纪最有发展潜力的清洁能源之一，正越来越广泛地用于工业生产和生活民用。

2013 年 1 月 1 日，国务院正式印发《能源发展“十二五”规划》（以下简称《规划》）。《规划》指出，“我国能源资源短缺，常规化石能源可持续供应能力不足。油气人均剩余可采储量仅为世界平均水平的 6%，石油年产量仅能维持在 2 亿吨左右，常规天然气新增产量仅能满足新增需求的 30% 左右。”“粗放式发展导致我国能源需求过快增长，石油对外依存度从本世纪初的 26% 上升至 2011 年的 57%。”到“十二五”末，要实现“石油对外依存度控制在 61% 以内。天然气占一次能源消费比重提高到 7.5%。”在今后很长的一段时间内，中国的石油天然气工业这一传统化石能源行业必将顺应“高效、清洁、低碳”的世界能源发展主流方向，继续昂首阔步，跨入石油、天然气、煤炭、可再生能源和核能并驾齐驱的新时代。

石油和天然气工业涉及勘探开发、炼油化工、储存运输、贸易销售等几个大的环节，其中又按环节分工和技术特点的不同，细分为很多专门学科，相关书籍林林总总，既有适合广大非石油工作者的科普书籍，也有面向大中专石油院校学生的专业教材，还有适用于专业工作者的操作类手册或书籍。在本次《21 世纪可持续能源》丛书（以下简称《丛书》）石油天然气分册的编写中，为了与其他类型的书籍有所区别，并使整册书更有条理、重点更为突出，我们重点选取了勘探开发、炼油化工、储运等几个石油工业的关键环节；在各环节论述中，为了实现《丛书》专业科普性的特点，尽量避开了专业书籍中重点论述的纯技术性生产方

案、工艺路线的描述，突出了与可持续发展密切相关的技术发展历程的内容。本书的论述主要集中于两点：主要技术领域的发展历程、科技进步与后续发展。因此，本书面向的读者是对石油工业感兴趣且有一定专业基础的社会各界人士。希望通过上述两个重点，可以使读者大体清晰地看到一个多世纪以来石油工业主要技术领域的发展脉络，以及随着科技进步可以激发的巨大潜力，从而了解这个行业的昨天、今天和可能的未来。

在此，要特别感谢化学工业出版社组织《21 世纪可持续能源》丛书的编写，给我们搭建了这样一个与读者沟通分享的平台。编写团队根据技术方向的不同，分工合作编写了这册书。全书总体结构、深度把握和审核工作由杜国敏负责，其中第 1 章（石油天然气可持续发展的背景和环境）由阎君执笔，第 2 章（石油天然气的资源分布与消费）由张震执笔，第 3 章（石油天然气勘探开发）由曲德斌、唐红君执笔，第 4 章（石油天然气的加工与利用）由曹斌执笔，第 5 章（石油天然气的储存与运输）由徐舜华执笔，第 6 章（我国石油天然气可持续发展的几点思考）由团队成员共同编写。

尽管我们已尽最大可能将收集到的数据和信息，以及工作中的积累呈现在读者的面前，但由于石油天然气行业专业领域宽、业务链条长，不同的专业都有高深的理论知识和复杂的技术内涵，编写中难免存在疏漏之处，敬请读者批评指正。

编著者

2015 年 3 月

目 录

第 1 章 石油天然气可持续发展的背景和环境	1
1.1 全球油气能源形势分析	1
1.1.1 全球能源形势	1
1.1.2 全球油气形势	6
1.2 我国油气能源形势分析	17
1.2.1 能源总体形势和需求预测	17
1.2.2 油气形势和需求预测	23
1.2.3 我国石油天然气可持续发展面临的问题和挑战	30
参考文献	32
第 2 章 石油天然气的资源分布与消费	34
2.1 石油天然气的形成与发现	34
2.1.1 石油天然气的形成过程	34
2.1.2 石油天然气的发现历程	47
2.2 世界油气资源分布	49
2.2.1 世界油气资源概述	49
2.2.2 世界油气资源储量	52
2.2.3 世界油气资源区域分布	55
2.3 世界油气产量分布	63
2.3.1 世界油气产量概况	63
2.3.2 油气产量区域分布	66

2.4 世界油气消费	74
2.4.1 世界油气消费概况	75
2.4.2 油气消费区域分布	79
2.5 全球油气供需情况分析	88
2.6 我国油气资源分布与消费	89
2.6.1 我国油气资源分布	89
2.6.2 我国油气消费	95
参考文献	107

第3章 石油天然气勘探开发

3.1 世界石油天然气勘探开发历程	108
3.1.1 世界早期的石油发现和世界现代石油工业的兴起	108
3.1.2 世界石油天然气勘探开发的快速发展	109
3.1.3 结构重组确立的世界油气勘探开发新格局	109
3.1.4 世界油气勘探开发的国有化时代和新跨越	110
3.2 我国石油天然气勘探开发历程	110
3.2.1 石油勘探开发发展历程	110
3.2.2 天然气勘探开发发展历程	119
3.3 石油天然气勘探开发技术展望	124
3.3.1 世界油气勘探开发技术发展历程	124
3.3.2 我国油气勘探开发技术发展历程	128
3.3.3 世界油气勘探开发技术展望	133
3.3.4 我国石油勘探开发技术展望	133
3.3.5 我国天然气勘探开发技术展望	135
3.4 我国石油天然气勘探开发潜力	137
3.4.1 石油勘探开发潜力	138
3.4.2 天然气勘探开发潜力	140
参考文献	141

第4章 石油天然气的加工与利用

4.1 石油的加工	142
4.1.1 世界炼油产业发展现状	142
4.1.2 国内炼油产业发展态势	157
4.1.3 石油加工技术发展	166
4.2 天然气的综合利用	175
4.2.1 天然气利用发展现状	175

4.2.2 天然气利用技术发展	181
参考文献	190
第5章 石油天然气的储存与运输	193
5.1 石油的储存与运输	193
5.1.1 石油运输发展	193
5.1.2 石油储存发展	227
5.2 天然气的储存与运输	229
5.2.1 天然气运输发展	229
5.2.2 天然气储存发展	252
参考文献	266
第6章 我国石油天然气可持续发展的几点思考	268
6.1 油气勘探开发与资源接替相关思考	268
6.1.1 美国的油气勘探开发先进经验	268
6.1.2 我国油气勘探开发建议与思考	271
6.2 油气加工与利用相关思考	275
6.2.1 石油加工和利用	275
6.2.2 天然气利用	283
6.3 油气储运相关思考	286
参考文献	289

第 1 章

石油天然气可持续发展的背景和环境



1.1 全球油气能源形势分析

1.1.1 全球能源形势

(1) 一次能源消费总量继续增加，消费增速逐渐放缓

2013 年，全球一次能源消费总量达到 127.3 亿吨油当量，创历史新高。受全球经济不振、欧债危机进一步演绎深化的影响，能源消费增速在经历了 2010 年 5.6% 增速的强劲反弹后回落走低，2013 年增速为 2.0%，与过去 10 年平均增长水平低 0.5 个百分点，见图 1-1。

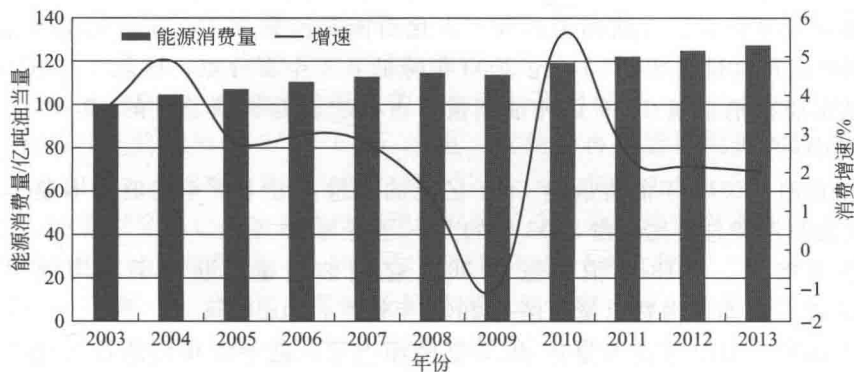


图 1-1 全球一次能源消费量及增速 (2003~2013 年)

(数据来源: BP《世界能源统计年鉴》, 2014)

根据 BP《世界能源展望 2030》报告预测，人口和收入仍是未来能源需求的关键驱动因素。未来 20 年，世界人口总量仍将继续增长，预计 2030 年世界人口将达 82 亿，比 2010 年增加 14 亿，但增长速度由 1990~2010 年的年均 1.3% 下

降到年均 0.9%；未来 20 年，中低收入经济体的快速发展推动全球各国 GDP（国内生产总值）的增长，预计增速将从 1990~2010 年间的年均 3.2% 提高到年均 3.7%，从而带来人均收入的快速增长。虽然未来全球能源效率的加速提高会抑制一次能源消费量的增长，预计 2030 年全球一次能源消费总量仍将达到 166 亿吨油当量，未来 20 年能源消费年均增速将为 1.6%，比过去 20 年年均增速下降了 0.4 个百分点，见图 1-2。

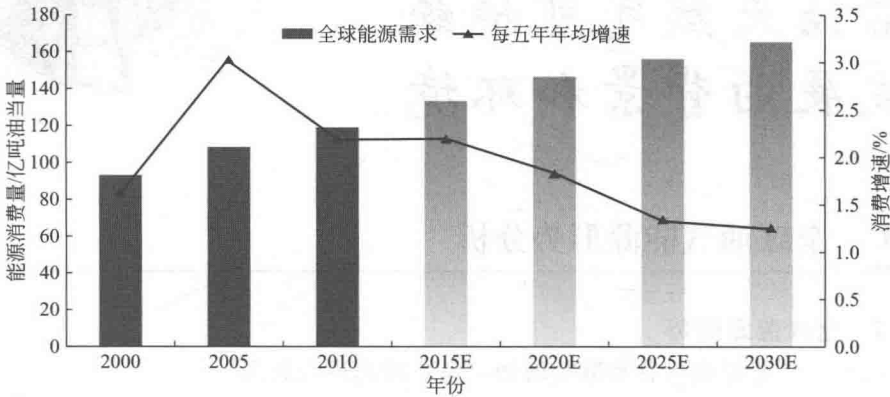


图 1-2 全球一次能源消费量及增速预测 (2010~2030 年)

(数据来源：BP《2030 世界能源展望》，2012)

(2) 能源消费结构仍以化石能源为主，呈低碳化和清洁化发展趋势

从近十年一次能源消费结构发展趋势来看，能源消费仍以化石能源为主。2013 年，全球煤炭、石油和天然气三大化石能源消费量 110.3 亿吨油当量，占一次能源消费总量的 86.7%，比 2003 年降低 0.5 个百分点；核能、水电以及其他可再生能源消费量 16.9 亿吨油当量，占一次能源消费总量的 13.3%，见图 1-3。其中：

① 石油 2013 年消费量达 41.9 亿吨油当量，近十年年均消费增速 1.4%，占一次能源消费总量比例由 2003 年的 37% 下降为 33%；

② 天然气 2013 年消费量达 30.2 亿吨油当量，近十年年均消费增速 2.6%，占一次能源消费总量比例与 2003 年持平，为 24%；

③ 煤炭 2013 年消费量达 38.3 亿吨油当量，近十年年均消费增速 3.9%，占一次能源消费总量比例由 2003 年的 26% 上升为 30%；

④ 核能 2013 年消费量达 5.6 亿吨油当量，比 2003 年消费量降低 0.35 亿吨油当量，占一次能源消费总量比例由 2003 年的 6% 下降为 4%；

⑤ 水电 2013 年消费量达 8.6 亿吨油当量，近十年年均消费增速 3.5%，占一次能源消费总量比例由 2003 年的 6% 上升为 7%；

⑥ 其他可再生能源 主要包括风能、地热、太阳能、生物质能和垃圾发电

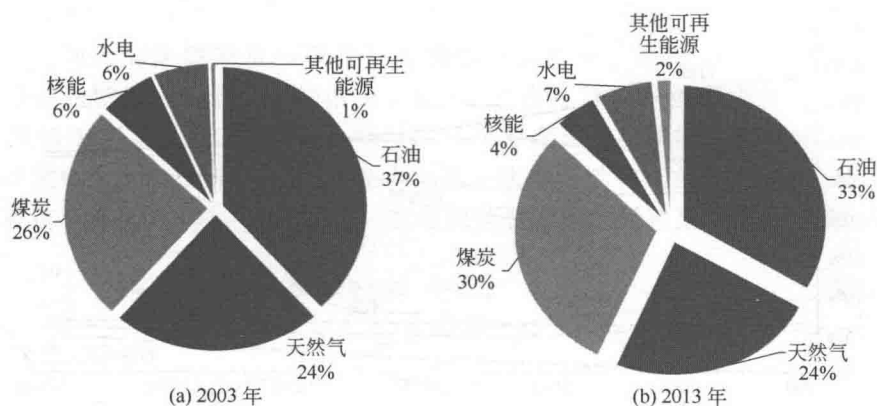


图 1-3 2003 年与 2013 年全球一次能源消费结构变化

(数据来源: BP《世界能源统计年鉴》, 2014)

等, 2013 年消费量达 2.8 亿吨油当量, 近十年年均消费增速 17.9%, 占一次能源消费总量比例比 2003 年上升 1 个百分点。

受石油、煤炭资源储量的制约, 以及新能源、清洁能源技术进步的推动, 全球能源消费结构正在不断发生变化, 低碳化、清洁化将是能源消费结构变化的长期趋势。

根据 BP《世界能源展望 2030》报告分析, 未来 20 年, 石油消费比例将继续大幅下滑, 将从 2011 年的 33% 下降到 2030 年的 28%; 煤炭比例在经历 21 世纪头十年的回升后又步入下降通道, 预计 2030 年将比 2011 年下降 2 个百分点达到 28%; 天然气作为相对清洁的能源, 在全球能源结构中的地位日益重要, 预计到 2030 年天然气占一次能源消费量比例将提高 2 个百分点, 达到 26%; 受日本福岛核事故的影响, 全球发展核能的规划开始变得保守, 预计未来 20 年核能占一次能源比例将维持在 5%~6%; 水电、其他可再生能源则得到较快发展, 预计 2030 年占一次能源比例将分别达到 7% 和 5%, 见图 1-4。

(3) 能源消费重心向非经合组织国家转移, 亚太地区消费增速最快

根据 BP 统计数据显示, 经济合作与发展组织 (本文简称“经合组织”或“OECD”) 国家一次能源消费量已较长时间趋于稳定, 近十年平均能源消费量为 56 亿吨油当量, 上下波动幅度不超过 2 亿吨油当量, 占全球消费总量的比例由 2003 年的 56% 下降到 2013 年的 43%。随着多数经合组织国家工业化和城镇化进程的逐步完成, 发达国家将高耗能产业向发展中国家转移, 以及受自身经济增速较低等因素影响, 预计未来 20 年经合组织国家能源消费增量仅 2 亿吨油当量, 到 2030 年达到 58 亿吨油当量, 占全球一次能源消费总量的比例进一步下降到 35%。

而非经合组织国家经济的快速发展, 拉动着能源消费的快速增长。根据 BP

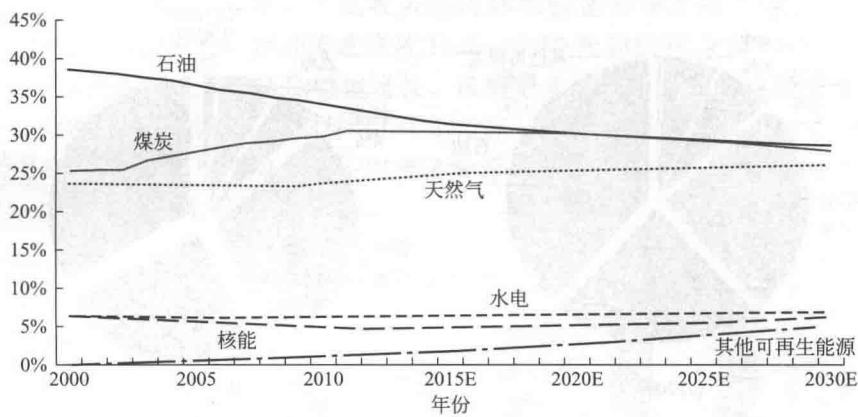


图 1-4 2000~2030 年全球一次能源消费结构趋势

(数据来源: BP《世界能源统计年鉴》、《2030 世界能源展望》, 2012)

的统计和分析, 2013 年非经合组织国家一次能源消费总量已由 2003 年的 44 亿吨油当量增长到 72 亿吨油当量, 年均增速 5%, 占全球一次能源消费总量的比例也由 44% 增长到 57%, 并在 2008 年超过了经合组织国家。预计未来 20 年, 非经合组织国家一次能源需求仍将继续增长, 2030 年将达到 109 亿吨油当量, 年均增速为 2.7%, 占全球一次能源消费总量比例上升至 65%, 见图 1-5。

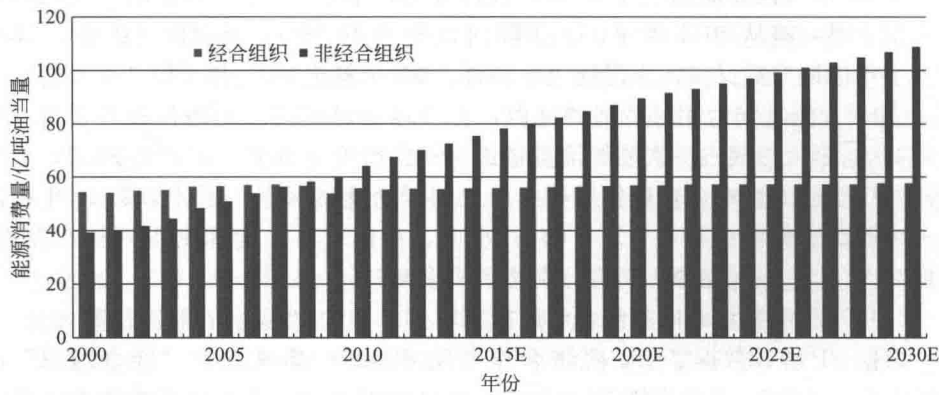


图 1-5 经合组织与非经合组织一次能源消费量对比

(数据来源: BP《2030 世界能源展望》, 2012)

分区域分析, 北美、欧洲和亚太三大主要能源消费区域中, 北美和欧洲能源消费量趋于饱和, 近十年消费量分别维持在 28 亿吨油当量和 29 亿吨油当量左右, 2013 年能源消费占全球一次能源比例分别为 22% 和 23%, 比 2003 年均下降 6 个百分点。预计未来 20 年, 北美地区消费量继续维持在 28 亿吨油当量左右, 欧洲地区消费量预计增长 4 亿吨达 33 亿吨油当量, 占全球一次能源比例分

别下降至 17% 和 20%。

亚太地区的能源消费一直保持着快速增长势头，并于 2002 年超过北美、2003 年超过欧洲，近十年年均增速 5.6%，其占全球一次能源消费量比例也由 2003 年的 30% 增长到 2013 年的 40%，2013 年全球一次能源消费增量几乎全部来自亚太地区。预计到 2030 年，亚太地区一次能源消费量将达 77 亿吨油当量，年均增速下降至 2.7%，但占全球一次能源消费量比例提高至 46%，见图 1-6。



图 1-6 北美洲、欧洲和亚太地区占全球一次能源消费比重
(数据来源：BP《2030 世界能源展望》，2012)

(4) 全球可再生能源生产和消费发展势头较好

受化石能源资源有限性和气候变化等环境问题的影响，减少或减缓化石能源消费量，加快开发利用可再生能源已成为国际社会的共识。近年来，全球以风电、太阳能光伏发电为代表的可再生能源发电量，以及以生物乙醇和生物柴油为代表的生物燃料大幅增长，见图 1-7。据 21 世纪可再生能源政策网络统计数据显示，2013 年全球可再生能源新增长投资 2.49 万亿美元，比 2010 年增长 13.4%；水电、风电、太阳能光伏发电装机容量分别达到 1000GW、318GW 和 139GW，

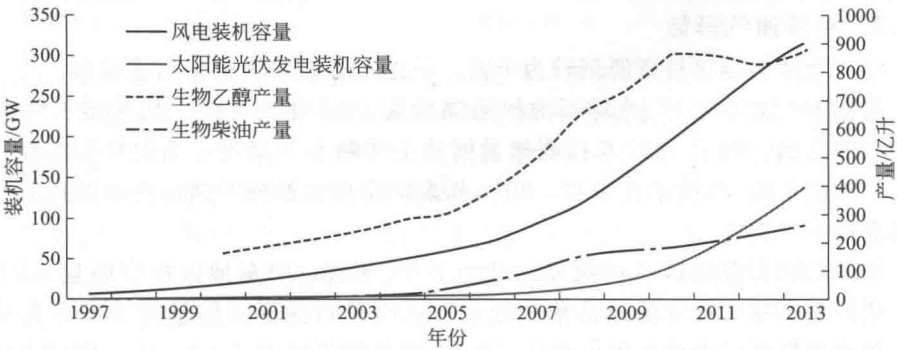


图 1-7 全球可再生能源装机容量或生产量

[数据来源：21 世纪可再生能源政策网络 (REN21)，2014]

分别比上年增长 4.2%、12.4%和 39%；生物乙醇产量继续保持 872 亿升以上，生物柴油产量达到 263 亿升，分别比上年增长 5.6%和 11.4%，见表 1-1。

表 1-1 全球可再生能源发展状况（2009~2013 年）

可再生能源发展指标	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年
可再生能源新增长投资/亿美元	1610	22000	25700	24950	24940
可再生能源装机容量(不含水电)/GW	250	315	390	480	560
可再生能源装机容量(含水电)/GW	1170	1260	1360	1440	1560
水电装机容量/GW	915	945	970	960	1000
风电装机容量/GW	159	198	238	283	318
太阳能光伏装机容量/GW	23	40	70	100	139
太阳能热水器容量/GW·h	153	182	232	282	326
生物乙醇产量/亿升	731	865	861	826	872
生物柴油产量/亿升	178	185	214	236	263

注：数据来源：21 世纪可再生能源政策网络（REN21），2014。

在 2008 年金融危机影响下，全球经济增速下滑、复苏乏力，传统能源产业面临着需求下降、投资下滑等系列冲击，但给可再生能源产业发展提供了新的契机。可再生能源作为全球的新兴产业，许多国家都从抢占技术制高点的战略高度出发，利用全球改善环境减少碳排放的大趋势，将发展可再生能源产业作为应对金融危机、加强本国能源安全与推进经济复苏的重要举措之一。如中国在 2012 年发布的《可再生能源发展“十二五”规划》中，提出到 2015 年全部可再生能源的年利用量将达到 4.78 亿吨标准煤，其中商品化可再生能源年利用量 4 亿吨标准煤，在能源消费中的比重达到 9.5%以上。根据美国能源情报署预计，到 2030 年包括太阳能、风能、生物质能、地热能等可再生能源发电量将占全美电网能力的 50%以上。而欧盟提出到 2020 年可再生能源消费将占据总消费能源量 20%，日本和韩国提出到 2030 年，可再生能源消费比重将分别提高至 20%和 11%。部分国家和地区可再生能源消费比例及制定的开发目标如表 1-2 所示。

1.1.2 全球油气形势

（1）全球石油储量资源仍较为丰富，石油产量稳步增长但增速放缓

根据 BP 数据统计，全球石油探明储量从 1990 年的 10275 亿桶增长到 2013 年 16879 亿桶，除了 1998 年探明储量同比上年略有下降外，其他年份均保持正增长，见图 1-8。以储采比来看，2013 年底的全球石油探明储量尚足以满足 53.3 年的全球生产需求。

全球石油资源地区特征明显。截至 2013 年底，中东地区探明储量 8085 亿桶，依然是全球石油资源最富集的地区，占全球石油探明储量的 48%，但产量的大幅提升拉低了该地区的储采比，2013 年底储采比达到 78.1 年。中南美洲主要由于委内瑞拉探明储量的大幅提高，超越了北美洲、欧洲及欧亚大陆成为全球第二大产油地区，2013 年底探明储量达 3296 亿桶，占全球探明储量的 19%，储

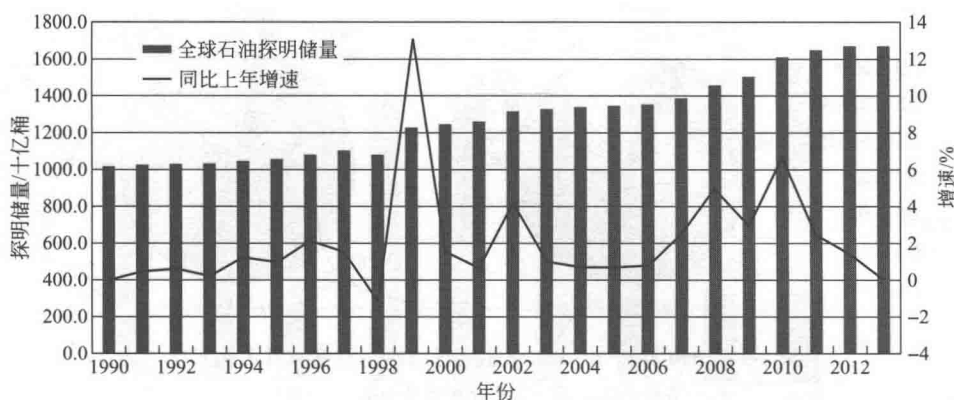


图 1-8 1990~2013 年全球石油探明储量及增速

(数据来源: BP《世界能源统计年鉴》, 2014)

表 1-2 部分国家和地区可再生能源消费比例及发展目标

国家和地区	2010 年消费比例	2015~2030 年发展目标
中国	8.60%	2015 年可再生能源年利用量达 4.78 亿吨标准煤, 其中商品量占比达 9.5% 以上
美国	8.49%	2030 年可再生能源发电 2.2 万亿千瓦时, 占电网能量的 51.3%
加拿大	27.22%	2020 年水电比例将达 76%
欧盟	7.80%	2020 年再生资源消费占据总消费能源量 20%
法国	7.01%	2020 年可再生能源在其能源消费总量中的比重提高到至少 23%
德国	7.17%	2020 年可再生能源占终端能源消费比重 18%; 2030 年可再生能源占终端能源消费比重 30%
英国	2.73%	2020 年可再生能源在能源消费总量中的比重将达到 15%
日本	4.87%	2030 年可再生能源利用率将达到 20%
韩国	1.72%	2030 年可再生能源生产比重 11%

注: 数据来源:《中国能源报告(2012)》、《可再生能源发展“十二五”规划》。

采比超过 120 年; 北美洲因加拿大油砂的发现, 带来储量的上升, 2013 年底达到 2296 亿桶, 占全球探明储量的 14%, 居全球探明储量第三位。欧洲及欧亚大陆、非洲和亚太地区居后三位, 2013 年底占全球探明储量比例分别为 9%、8% 和 2%, 储采比分别为 23.4 年、40.5 年和 14 年, 见图 1-9、图 1-10。

根据 BP 统计数据, 2013 年全球石油产量 41.3 亿吨, 1993~2013 年年均增速 1.3%。其中, 中东地区石油产量 13.3 亿吨, 过去二十年年均增速 1.7%, 为全球最大的石油产区, 占全球总产量 32.2%; 欧洲及欧亚大陆石油产量位居第二位, 达到 8.4 亿吨, 过去二十年年均 1.2%, 产量增速有所放缓, 占全球总产量的 20.3%; 北美洲次之, 2013 年产量为 7.8 亿吨, 占全球总产量的 18.9%; 非洲、亚太和中南美洲分别位居第四、五、六位, 分别占全球总产量的 10.1%、