



国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国非化石能源

发展目标及其实现路径

Non-fossil energy
development objective
and
realizing route
in China

张运洲 白建华 程路 等 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



中国非化石能源
发展国际及国内新路径

中国非化石能源

发展国际及国内新路径

New fossil energy
development strategy

and
international
cooperation

2009 2009 2009 10 10



中国非化石能源
发展国际及国内新路径



国家电网公司
电力科技著作出版项目

中国非化石能源 发展目标及其实现路径

张运洲 白建华 程 路 辛颂旭 著
胡 泊 张 钦 伍声宇 陈立斌



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书是有关非化石能源与电力协调发展的专著。全书以回答“如何安全、经济、清洁、高效地满足国家提出的非化石能源占比目标”为核心，以丰富的能源电力规划、运行模拟等模型工具为支撑，论证了未来20年我国非化石能源与化石能源、电力发展的多种情景，分析了非化石能源的开发、输送、消纳、运行等关键技术问题，对比了不同发展情景的成本及效益，提出了实现我国非化石能源发展目标的路径和政策建议。

全书内容丰富，具有较强的学术和应用价值，可作为我国能源结构优化调整研究决策的参考书，对研究制定能源发展战略与规划、发展政策具有重要借鉴价值。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国非化石能源发展目标及其实现路径/张运洲等著. —北京: 中国电力出版社, 2013. 3

ISBN 978-7-5123-4191-3

I. ①中… II. ①张… III. ①能源工业-可持续性发展-研究-中国 IV. ①F426.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 050255 号

审图号: GS (2013) 540 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013年5月第一版 2013年5月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17印张 273千字

印数 0001—3000册 定价 80.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

当前世界能源与电力的发展正处于深刻的变革阶段：能源消费正由发达国家主导，开始向发达国家与发展中国家共享市场、发展中国家份额逐步上升的格局转变；能源供应正由化石能源主导，开始向以可再生能源和核能为代表的清洁能源快速发展且比重逐步提升转变。与此同时，能源新技术也正成为各国竞相争占的战略制高点。在这场能源变革中，最核心和最突出的特点就是清洁能源的异军突起，其对未来世界能源格局有着决定性的影响。可以预见，今后几十年内，世界能源结构将逐步进入油、气、煤、可再生能源和核能五方鼎立的格局。

我国由于历史和资源的原因，长期以来能源发展中存在能源结构不良、环境污染严重、碳排放量大、能源利用效率低、区域性供需失衡等一系列问题，保障安全供应和改善环境的压力很大。近年来，在科学发展观的指导下，我国能源发展的战略思路逐渐明朗：第一，要大力节约能源，控制总量，努力提高能源资源的使用效率；第二，要大力优化能源结构，多渠道开源，鼓励和积极推动非化石能源的发展，增加能源供给，减少环境污染。有人问：谁来供应中国的能源？回答是清楚的：我们固然要积极利用国外的能源资源，但作为能源大国，中国能源可持续发展归根结底得靠自己解决，非化石能源开发利用将对中国能源的科学发展作出日益重要的贡献。

水能、核能、风能、生物质能和太阳能等清洁、低碳的能源，在我国资源量和开发潜力都非常大。由于各种原因，除水能外，我国其他各类非化石能源基本还处于发展的初期阶段。现在，有了好的基础和更多共识，但科学技术水平和开发程度与发达国家相比还有较大的差距，开发成本还无法与传统的化石能源相竞争。未来我国清洁能源的发展，需要着力解决两个方面的重大问题：一是技术层面，如何依靠科学规划、科技进步和技术创新提高利用效率，降低开发成本；二是政策层面，如何打破现有的体制机制障碍，制订公平、高效的政策激励措施，促进清洁能源的发展。由于水能、核能、风能、太阳能等非化石能源主要依靠转换为电力加以利用，电力在推动非化石能源发展中扮演着关键角色。

该书是有关非化石能源与电力协调发展的专著，由国网能源研究院的专家学者结合多年来的研究成果编著而成。全书以回答“如何安全、经济、清洁、高效地满足国家提出的非化石能源占比目标”为核心，以丰富的能源电力规划、运行模拟等模型工具为支撑，通过系统化定量研究测算，论证了未来20年我国非化石能源与电力系统发展的多种情景，分析了清洁能源的开发、输送、消纳，成本效益与代价等关键问题，提出了实现非化石能源发展目标的路径选择和政策建议。该书研究有几点独特的创新之处：一是将清洁能源发展融入电力规划，所提出的非化石能源发展方案是可实现、可消纳的，其发展目标是量化可支撑的；二是多情景对比分析，展示了未来20年多种可能的非化石能源发展场景，研究分析的结果具有代表性、针对性、典型性；三是结合非化石能源的特点，提出了电网发展对清洁能源发电高效利用的重要作用。全书观点鲜明、数据翔实、有理有据，可读性强，可信度高。书中所凝聚的电力工作者们对能源电力发展，特别是非化石能源开发利用等方面的一些重大问题的

深入思考和积极探索，对我国制定科学的能源战略和规划，有重要的借鉴价值。

未来几十年，我国能源发展的变革路径仍在探索中，我们还没有一个成熟的、完备的、经过实践检验的“中国模式”。在借鉴国际经验、立足我国国情的基础上，创新出一条经济社会可持续发展的道路，将是中国对全人类的最大贡献，科学、绿色、低碳能源战略是这条道路的要素。该书是一次积极有益的探索，也是一本难得的能源参考书籍。开卷有益，相信广大能源工作者将从中获得许多启发与思考。

是为序。

杜祥琬

2013年2月28日

能源安全作为国家安全的重要组成部分，是实现我国经济社会可持续发展的基石，同时也与气候变化问题关系密切，已成为当今国际政治热点和经济热点。受能源资源条件和经济发展水平的制约，我国长期维持以煤为主的能源消费结构。我国能源发展中存在环境污染严重、碳排放总量大、能源利用效率低等一系列问题，这给我国未来能源乃至经济社会可持续发展带来了巨大的压力，必须对我国能源供应结构进行优化调整。2009年9月22日，时任国家主席胡锦涛在联合国气候变化峰会上首次提出“大力发展可再生能源和核能，争取到2020年非化石能源占一次能源消费比重达到15%左右”的目标。党的十八大报告明确指出了我国能源发展的方向，即能源发展要与生态文明建设相适应，既要发展，又要环保。大力发展清洁能源，成为我国调整能源战略、保障能源安全，保护生态环境、应对气候变化、履行国际承诺的必由之路，事关政治、经济、社会发展大局。

本书为国家电网公司电力科技著作出版项目。项目研究以科学发展观为指导，统筹考虑能源、电力与清洁能源的协调发展，把握清洁能源加速发展的新趋势，寻求安全、清洁、经济、高效的非化石能源开发利用方式，优化配置能源结构，努力提高能源效率和保障能源安全。研究基于国网能源研究院自主开发的电力系统整体优化规划模型，通过系统化定量研究测算，构建了完整的清洁能源与电力协调发展情景，提出了实现2020年15%非化石能源发展目标的可行路径和政策建议。

本书共有9章。第1章分析了世界能源发展趋势和特征、清洁能源发展经验与趋势、电力未来发展特征；第2章分析了我国能源结构及非化石能源利用现状、我国能源发展面临的形势和挑战，以及未来我国能源总体发展思路；第3章阐述了非化石能源发展的总体分析思路、非化石能源与电力系统整体优化规

划方法体系；第4章分析了我国非化石能源和化石能源资源条件及开发潜力；第5章在分析预测2020年我国一次能源需求总量和电力需求总量的基础上，运用多情景比较分析方法，对不同的非化石能源发展情景进行了技术经济分析；第6章论述了能源结构调整与电力发展的关系，论证了电网在推动非化石能源发展中的核心作用；第7章从控制能源消费总量，实现水电、核电、风电、太阳能发电发展目标等角度分析了实现15%非化石能源发展目标需要采取的必要措施和条件；第8章从体制机制、法律法规、发展方式、科技创新等各个方面提出了促进我国非化石能源发展的政策和措施；第9章汇总了主要的研究结论。

本书的主要研究成果，可为国家制定中长期能源规划、可再生能源中长期规划，完善我国能源发展战略提供决策参考。全书数据资料翔实，定性论证与定量分析相结合，希望能为关注我国能源经济环境发展的领导、专家、科技人员和其他读者提供有益的参考与借鉴。

本书由张运洲、白建华、程路、辛颂旭、胡泊、张钦、伍声宇、陈立斌合著。对本书作出贡献的人员还有张栋、金艳鸣、刘俊、张富强、贾德香、陈伟、梁芙翠、付蓉、魏晓霞、徐翀、王頔、高赫、李茜、傅观君、张晋芳等。

在本书的编写过程中，中国工程院原副院长杜祥琬院士为本书作序，周小谦、冉莹、王信茂、欧阳昌裕、蒋莉萍等能源与电力领域的多位专家对本书编写提供了很多帮助，并提出了很好的建议，在此一并表示感谢！

限于作者水平，虽经反复研究推敲，书中仍难免存在不当之处，恳请读者批评指正！

著 者

2013年2月

序
前言

1	世界能源发展回顾与展望	1
1.1	发展历史与现状	1
1.2	主要发达国家能源发展战略及启示	9
1.3	世界清洁能源发展经验与趋势	17
1.4	世界能源与电力未来发展特征	27
2	我国能源发展现状及未来发展思路	32
2.1	我国能源结构及非化石能源利用现状	32
2.2	我国能源发展存在的主要问题	39
2.3	未来我国能源发展思路	48
3	非化石能源发展的研究方法 with 模型	55
3.1	总体分析思路及方法	55
3.2	非化石能源与电力系统整体优化规划方法	57
3.3	能源电力发展评价模型	63
4	能源资源条件及开发潜力	70
4.1	非化石能源	70
4.2	化石能源	97

5	非化石能源发展情景构建及综合评价	109
5.1	情景分析的主要原则	109
5.2	主要边界条件	110
5.3	发展情景设计	118
5.4	情景优化分析	128
5.5	情景综合评价	161
6	电网发展及其综合社会效益	168
6.1	未来我国电网发展格局	168
6.2	电网对非化石能源发展的推动作用	173
6.3	电网发展的综合社会效益	182
7	非化石能源发展目标的实现路径	189
7.1	总体路径	189
7.2	具体路径及支撑条件	194
8	实现非化石能源发展目标的政策和措施	205
9	主要结论	218
附录 I	主要统计指标解释	226
附录 II	电源优化的技术经济参数	229
附录 III	多区域电源扩展优化模型简介	232
附录 IV	电力系统随机生产模拟模型	236
附录 V	电力系统调频分析模型	239
附录 VI	可计算一般均衡 (CGE) 模型	241
附录 VII	能源发展质量评价指标体系	243
附表	世界能源生产与消费数据表	247
	参考文献	261

能源开发利用的进步是人类文明的标志，贯穿人类的原始文明、农业文明、工业文明和现代生态文明。在能源推动人类社会发展的同时，人类文明也推动能源开发利用方式的变革。伴随着人口、经济和技术的发展，世界能源经历了相互交织、逐步过渡的三大转换阶段：第一次是煤炭取代薪柴等成为主要能源；第二次是石油取代煤炭而居主导地位；第三次是 20 世纪后半叶开始出现的向多元能源结构的过渡转换。

18 世纪工业革命前，薪柴等生物质能是主要能源，之后，随着蒸汽机等的使用，煤炭逐步取代薪柴。到 19 世纪末 20 世纪初，由于内燃机、电力两项革命性技术的诞生，对化石能源的需求量飞速上升，煤炭成为主要能源。第二次世界大战后，随着汽车工业的发展和跨国石油公司的出现，石油消费开始快速增长，石油在能源消费结构中的比重逐步超过煤炭。随着大量天然气田被发现，天然气的开发利用驶入快车道。到 21 世纪初，石油、煤炭、天然气三大化石能源成为世界能源供应的主角，占全球能源消费总量的 80% 以上。

化石能源在使用过程中大量排放二氧化碳、二氧化硫、氮氧化物和烟尘，带来十分严重的生态和环境问题。为缓解能源使用对气候、生态和环境的影响，当前国际社会对以水能、核能、风能、太阳能等为代表的非化石能源前所未有地重视，世界能源发展开始了低碳绿色发展的崭新时期。

1.1 发展历史与现状

1.1.1 人口、经济、环境与能源消费

世界人口的快速增长是近代（1950 年以来）出现的现象。根据联合国经

济与社会事务部人口司的数据资料，约两千年前，世界人口为 3 亿左右。自 1950 年，世界人口开始快速膨胀，1999 年超过 60 亿，几乎是 1950 年的 2.5 倍。1965—1970 年期间，全球人口增长率达到 2.0% 的历史峰值，世界人口每增加 10 亿的时间间隔从 19 世纪的 123 年缩短至 12 年，如图 1-1 所示。20 世纪 70 年代之后，随着世界大多数地区生育率的下降，全球人口增长率开始降低。2011 年，世界人口突破 70 亿。

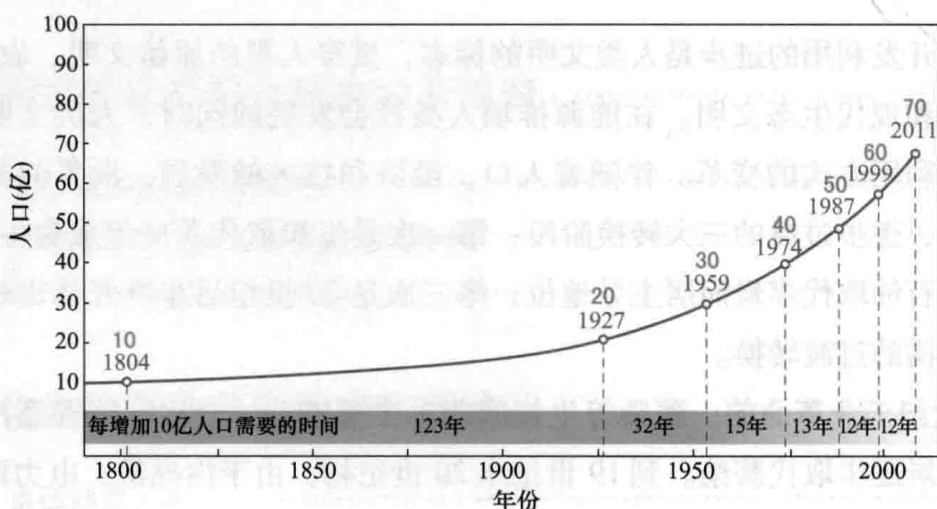


图 1-1 世界人口增长趋势

资料来源：联合国人口基金，2011 年世界人口状况报告，2011。

世界人口快速增长的同时，城市人口比重也在持续上升。1950 年以来，世界城市人口比重上升约 20%，目前世界人口的一半为城市人口。

20 世纪是人类社会有史以来经济发展最为迅速的一个世纪。科学技术的进步、城市化和工业化的发展、产业结构的调整等共同构成并促进了社会生产力的发展，人们的生产方式和生活面貌也随之发生了巨大的变化。20 世纪，全球经济的年平均增长率达 6%，进入 20 世纪时，世界国内生产总值（Gross Domestic Product, GDP）仅为五六百亿美元，而在 20 世纪末，这一数字已高达 30 万亿美元。进入 21 世纪，世界经济受到 2008 年全球金融危机的影响，经济增长有所放缓，2009 年世界经济出现 -0.5% 的负增长。2011 年，世界 GDP 达到 44 万亿美元^①。

① 国际货币基金组织，世界经济展望 2011，2011。

随着世界人口增长与经济规模的不断增大,世界能源消费量持续增长。英国石油公司(British Petroleum, BP)于2012年6月公布的世界能源统计数据显示,1965年世界一次能源(各能源指标定义和范围界定详见附录I)消费量仅为37.50亿吨标准油,2011年已达122.75亿吨标准油。过去46年来,世界能源消费量年均增长率为2.6%。1965—2010年世界一次能源消费总量见附表1,增长趋势如图1-2所示。

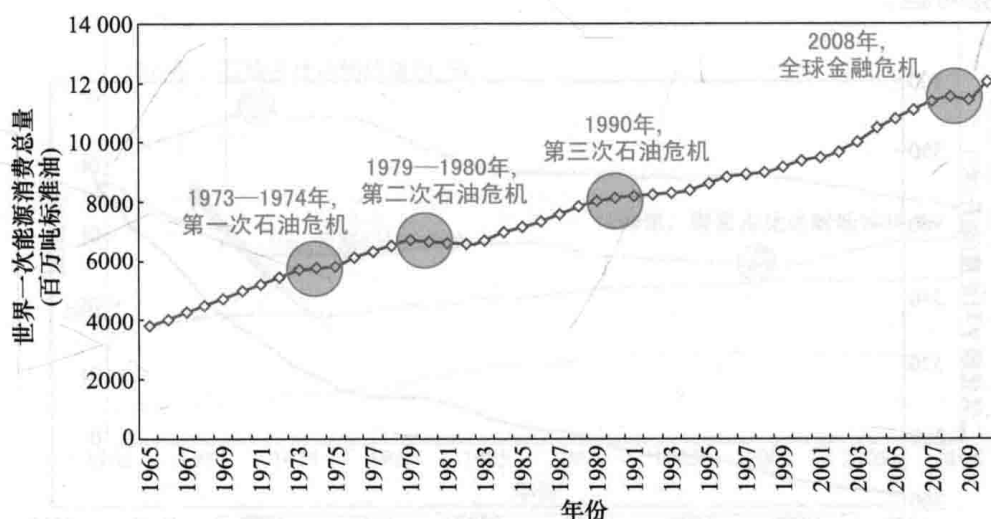


图1-2 世界一次能源消费量增长趋势

从图1-2和附表1所表达的数据信息可以发现,世界能源消费呈现出随着人口增加、经济发展和技术进步而增长的显著特征。同时,在能源需求增速明显变化的时间节点上也体现出了与重大的经济和能源事件相关的特点,其中以20世纪下半叶三次石油危机和2008年全球金融危机的影响最大。

化石能源的使用带来温室气体排放等问题。国际能源署(International Energy Agency, IEA)统计结果显示,《联合国气候变化框架公约》(United Nations Framework Convention on Climate Change)附件一缔约方国家^①排放的全部温室气体^②中80%左右为化石燃料燃烧产生的二氧化碳,而全球温室气体排放

① 《联合国气候变化框架公约》附件一缔约方国家包括:①列入《联合国气候变化框架公约》附件二的具有捐款义务的发达国家;②经济转轨国家,指苏联和东欧国家。

② 温室气体是大气层中能够吸收和重新放出红外辐射的自然和人为排放气体的总称,包括水汽、二氧化碳、甲烷、氧化亚氮、臭氧、氟利昂或氯氟烃类化合物、氢代氯氟烃类化合物、氢氟碳化物、全氟碳化物、六氟化硫等。

总量中 60% 左右为化石燃料燃烧而产生的二氧化碳排放。人类大量使用化石燃料，导致二氧化碳排放量大，大气中二氧化碳的浓度在过去 110 多年里由 270 毫升/米³ 上升到 350 毫升/米³，如图 1-3 所示。预计到 21 世纪中期将达到 600 毫升/米³。大气中二氧化碳平均浓度的上升速率不断加快，自 2000 年起年均增长 2 毫升/米³ 以上，而 20 世纪 80 年代年均增长为 1.5 毫升/米³。化石燃料在使用过程中还引起大量二氧化硫、氮氧化物和烟尘排放，带来十分严重的生态和环境问题。

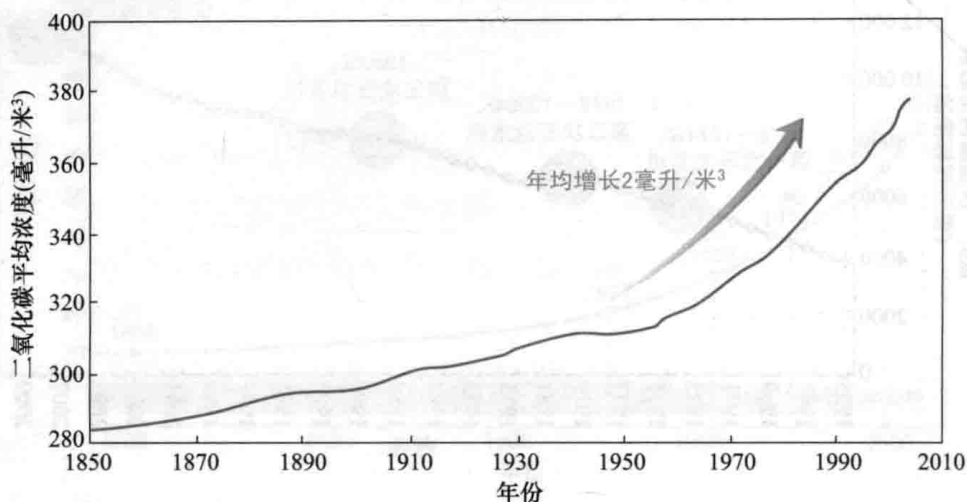


图 1-3 近百年来的二氧化碳浓度变化

目前，气候变化是国际社会公认的最主要的全球性环境问题之一。为保护地球环境，延缓气候变化，自 1992 年 6 月联合国环境与发展大会起，全世界 150 多个国家签署了《联合国气候变化框架公约》，我国也是缔约方之一。

1.1.2 世界一次能源与终端能源消费结构

自 18 世纪 60 年代第一次工业革命^①之后，化石能源就一直在人类能源生产和消费中占据主导地位。1930 年，煤在能源消费中占到 70% 左右，此后开始逐渐下降。自 1859 年第一口油井被开发以来，至 20 世纪 60 年代，石油消费超过煤炭，跃居一次能源的主导地位。2011 年，全球一次能源消费量共计约 122.75 亿吨标准油，其中，煤炭、石油和天然气三种化石能源消费量分别占 30.3%、

① 第一次工业革命是指 18 世纪 60 年代至 19 世纪中叶从英国发起的以机器代替手工工具的技术革命。革命以工作机的诞生开始，以蒸汽机作为动力机被广泛使用为标志。

33.1% 和 23.7%。

出于对能源供应安全和全球气候变化的担忧，世界各国纷纷致力于寻找和开发传统化石能源的替代能源。天然气这种相对低碳的化石能源和非化石能源消费的快速增长，构成了对石油和煤炭消费的替代。石油在世界一次能源消费中的比重于 1973 年达到峰值，第一次石油危机后开始持续下降，2011 年石油占比下降到 33.1%。世界一次能源消费结构变化趋势如图 1-4 所示。

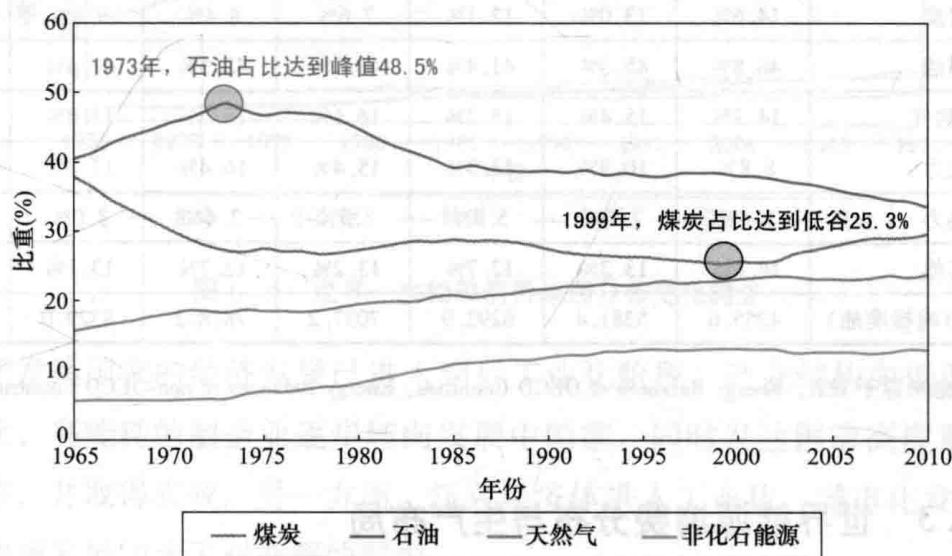


图 1-4 世界一次能源消费结构变化趋势

20 世纪下半叶，煤炭在世界一次能源消费中的比重持续下降，从 1965 年的 37.9% 下降到 1999 年的低谷值 25.3%。与此同时，世界煤炭消费还受到发达经济体煤炭消费疲软和新兴经济体煤炭消费旺盛两方面的影响。从煤炭消费占比变化趋势来看，20 世纪 70 年代之前，世界煤炭消费占比处于高速下降阶段；而之后新兴经济体的发展开始起步，拉动了煤炭消费量的快速增长。20 世纪 70—90 年代，煤炭消费占比下降速度趋缓，这期间一度有所反复。1999 年成为煤炭消费占比变化的转折点，中国、印度等发展中国家的经济发展对煤炭的旺盛需求拉动了世界煤炭消费占比的上升，2011 年世界煤炭消费占比回升到 30.3%。

天然气和非化石能源消费占比呈现稳定上升态势，1965—2011 年，天然气、非化石能源消费占比年均分别提高 0.17、0.16 个百分点。1965—2011 年世界一次能源结构见附表 2。

IEA 统计了 1971—2010 年世界终端能源的消费结构，见表 1-1。世界终端



能源消费结构中，化石能源比重持续下降，而电力比重大幅提高，越来越多的煤炭、天然气等化石能源被转化成电力。1971—2010 年期间，煤炭、石油、天然气等化石能源在世界终端能源消费中的比重下降了 9.5 个百分点，而电力所占比重几乎翻了一番，2010 年达到 17.7%。能源消费电气化的特点与趋势越来越明显。

表 1-1 世界终端能源消费结构

能源品种	1971 年	1980 年	1990 年	2000 年	2005 年	2009 年	2010 年
煤炭	14.6%	13.0%	12.1%	7.6%	8.4%	9.8%	9.8%
石油	46.8%	45.3%	41.4%	44.2%	43.5%	41.6%	41.1%
天然气	14.2%	15.4%	15.2%	16.1%	15.6%	15.2%	15.2%
电力	8.8%	10.9%	13.3%	15.4%	16.4%	17.3%	17.7%
热力	1.6%	2.2%	5.3%	3.5%	3.4%	3.0%	3.2%
其他	14.0%	13.2%	12.7%	13.2%	12.7%	13.1%	13.0%
合计（百万吨标准油）	4255.6	5381.4	6292.9	7037.2	7878.2	8329.0	8676.6

注 数据来源于 IEA, Energy Balances of OECD Countries, Energy Balances of non-OECD Countries。

1.1.3 世界能源消费分布与生产布局

1. 世界一次能源消费分布

从世界一次能源消费地理分布来看，亚太地区是近 40 年来世界能源消费增长最快的地区，其能源消费量在 2001 年和 2002 年分别超过北美和欧洲，如图 1-5 所示。2011 年，世界一次能源消费量的 39.1% 在亚太地区，23.8% 在欧洲，22.6% 在北美，其余 14.5% 在中南美、中东和非洲等。在全球新增一次能源消费中，能源消费的地理分布变化趋势更加明显，1965—2011 年全球新增能源一次消费量中，亚太地区占 51.2%，而北美和欧洲分别仅占 15.8% 和 14.8%。

从世界一次能源消费量分布看，2008 年以发展中国家为主的非经济合作与发展组织经济体的能源消费量超过经济合作与发展组织（Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD）^① 经济体，如图 1-6 所示。一方

① 目前 OECD 有 34 个成员国，包括澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、捷克、丹麦、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、意大利、日本、韩国、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国、美国、智利、爱沙尼亚、以色列、斯洛文尼亚。