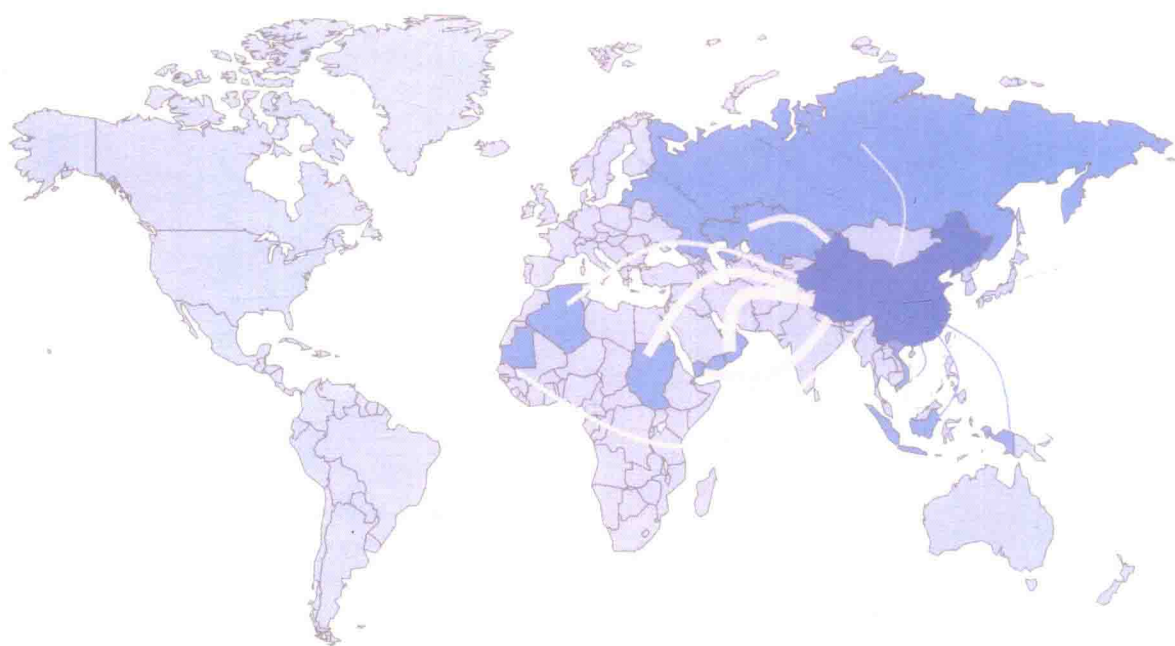




能源供需系统分析

——基于复杂网络新视角

孙 梅 高翠侠 韩 敦 高安娜 张培培 著

海外借



科学出版社

能源供需系统分析

——基于复杂网络新视角

孙 梅 高翠侠 韩 敦 高安娜 张培培 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

能源供需安全问题是各国经济发展的关键,是当前能源研究中广为关注的问题之一。能源供需系统是一个包含多主体参与、具有多重复杂性的经济系统,简单的研究方法和局部分析已不能适应能源供需系统的复杂性。本书基于系统科学的新视角,对能源供需这一复杂巨系统进行研究。从我国能源供需体系现状和历史演变数据出发,构建不同形成机制的能源供需复杂网络模型,分析各能源品种的供需内在机理、演化规律及它们之间的相互耦合、相互影响。

本书适合管理科学、能源经济、能源系统工程、复杂系统分析与决策等方向的研究人员和研究生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

能源供需系统分析:基于复杂网络新视角/孙梅等著. —北京:科学出版社, 2017.3

ISBN 978-7-03-051207-9

I. ①能… II. ①孙… III. ①能源需求-供需形势-系统分系
IV. ①F416.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 312898 号

责任编辑:李 欣/责任校对:杜子昂
责任印制:张 伟/封面设计:陈 敬

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

*

2017 年 3 月第 一 版 开本:720 × 1000 1/16

2017 年 3 月第一次印刷 印张:17 插页:1

字数:330 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

2003 年以来,我一直从事能源供需系统分析的研究工作,2010 年我和导师田立新教授共同出版了《能源供需系统分析》一书,主要基于中国东部能源需求、西部能源供应、东部能源进口及可再生能源发展之间相互耦合、相互影响及内在互动相关性的复杂背景,建立能源供需微分方程系统,针对能源供需系统的不确定性和时变性,研究能源供需系统的稳定性控制策略。

史蒂芬·霍金在世纪之交曾预言:“21 世纪将是复杂性的世纪。”随着复杂性科学和互联网技术革命的高速发展,网络科学已经从物理学、数学和计算机科学等工程技术领域拓展到社会学、管理学、经济学等众多不同学科,引起各国政府与科学界的广泛重视和高度关注。例如,1995 年美国科学院院士波士顿大学的物理学教授 H.E. Stanley 首次提出金融物理学的概念。此后,学者借助于统计物理、理论物理、复杂系统理论、非线性科学、应用数学等的概念、方法和理论来研究金融市场通过自组织而涌现的宏观规律及其复杂性。金融物理学现已成为一门新兴的交叉学科。

复杂网络理论主要借助图论和统计物理的一些方法,研究网络的各种拓扑结构及其性质。特别是小世界效应、无标度特性等复杂网络特性的发现,为各个领域的研究提供了新的思想、方法和途径,成为深入剖析复杂系统的有效工具。

能源供需系统是一个包含多主体参与、具有多重复杂性及其相互之间的复杂耦合关系等特性的复杂系统。例如,能源供需网络由能源供应企业和能源需求企业两类节点组成,有供需关系则连边;能源贸易网络由各个贸易国为节点,有贸易往来则连边等。这些能源网络中的每一个节点都有自身的经营策略,每个节点的目标都是通过不断提高自身对市场的适应能力从而提升其竞争力来获取利润,每个节点都遵循简单的市场规则并不断适应其所处的环境。节点之间相互作用,关系错综复杂,是典型的自组织、自适应性网络系统。如何更好地运用当前快速发展的复杂系统理论来研究能源供需系统,是我们课题组长期探索的课题。用复杂网络的方法研究能源供需系统,可以发现其他方法不易揭示的该类系统的有趣而且重要的内在机理及演化规律,而这些对系统的运作管理和科学决策具有重要的参考价值。

本书内容是由我和我的部分研究生近几年的成果整理而成,大多数成果已经以论文的形式正式发表。本书试图通过构建各能源品种的供需网络模型、多层能源贸易网络模型及能源价格网络模型等,来寻求能源供需的内在机理和演化特征,寻求各能源品种之间的相互耦合和相互影响,这是简单的定性方法和数理统计方法

无法做到的。

在研究过程中，我们得到了众多专家学者的帮助和指导，在此对严晋跃教授、魏一鸣教授、杨列勋研究员、范英教授、吴刚教授、狄增如教授、汪小帆教授、何大韧教授、史定华教授、耿涌教授、张中祥教授、周德群教授、周鹏教授、沈波博士、苏斌博士致以最诚挚的谢意！感谢我的导师田立新教授对我的研究工作长期的引领和支持！

本书研究工作得到国家自然科学基金面上项目——“基于计算实验的石油供需网络优化与动态调控研究”（71273119）和“基于复杂系统理论的能源供需模型的理论方法及政策分析”（71073071）的支持，在此表示衷心的感谢！

由于知识修养和学术水平有限，书中难免存在疏漏和不足，恳请各位同仁和读者批评指正。

孙 梅

2016 年 5 月 30 日

目 录

第 1 章 国内外能源供需现状分析	1
1.1 总能源供需现状	1
1.2 煤炭	7
1.2.1 世界煤炭发展现状	7
1.2.2 中国煤炭发展现状	11
1.3 石油	15
1.3.1 世界石油发展现状	15
1.3.2 中国石油发展现状	18
1.4 天然气	22
1.4.1 世界天然气发展现状	22
1.4.2 中国天然气发展现状	24
1.5 电力	26
1.5.1 世界电力发展现状	26
1.5.2 中国电力发展现状	29
1.6 风能与太阳能	33
1.6.1 风能	33
1.6.2 太阳能	38
1.7 其他可再生能源	43
1.7.1 水能	43
1.7.2 生物质能	46
1.7.3 地热能	49
1.7.4 潮汐能	53
1.7.5 核能	54
参考文献	56
第 2 章 复杂网络基本理论及方法	58
2.1 图论	58
2.2 复杂网络的一般特性	60
2.3 复杂网络的统计描述	61
2.3.1 度与度分布	61
2.3.2 点权与边权的差异性	62

2.3.3	聚类系数	63
2.3.4	平均最短路径长度	63
2.3.5	小世界网络	64
2.3.6	无标度网络	64
2.3.7	介数中心度	65
2.3.8	K-核分解	65
2.3.9	社团结构	66
2.3.10	网络稳定性	67
2.3.11	平均场方法	68
2.4	其他研究方法	69
2.4.1	相关系数	69
2.4.2	最小生成树及其算法	69
2.4.3	阈值网络构建算法	70
2.4.4	随机矩阵理论	70
	参考文献	70
第 3 章	能源供需演化网络	72
3.1	研究现状	72
3.2	模型建立	73
3.2.1	模型 A: 边权不随时间变化的能源供需网络模型	73
3.2.2	模型 B: 边权随时间变化的能源供需网络模型	78
3.3	中美煤炭供需分析	81
3.3.1	美国煤炭行业基本状况分析	81
3.3.2	中国煤炭行业基本状况分析	82
3.3.3	中美煤炭供需的共同特征	83
3.4	中美煤炭供需演化网络实证研究	84
3.4.1	美国煤炭供需网络	84
3.4.2	中国煤炭供需网络	88
3.4.3	中美煤炭供需网络比较	90
3.4.4	中国煤炭供需策略建议	91
3.5	带有局域世界的能源供需网络模型	92
3.5.1	模型建立	92
3.5.2	点权分布解析	94
3.5.3	实证分析	98
	本章小结	100
	参考文献	101

第 4 章 多层化石能源贸易网络	102
4.1 研究现状	102
4.2 模型建立	103
4.2.1 单层能源贸易网络模型	103
4.2.2 多层能源贸易网络模型	104
4.3 度分布与点强度分布	105
4.3.1 度分布分析	105
4.3.2 点强度分析	107
4.4 社团结构演化	109
4.4.1 社团数目的演化分析	109
4.4.2 社团内部国家变动的演化分析	110
4.5 网络稳定性演化	112
4.6 国家综合能源地位的演化	114
4.7 政策建议	117
本章小结	117
参考文献	118
第 5 章 石油、天然气价格网络	120
5.1 研究现状	120
5.2 原油价格粗粒化网络模型	121
5.2.1 模型建立	121
5.2.2 油价波动率网络拓扑性质分析	124
5.2.3 模式间的转变距离及中介分析	126
5.2.4 未来模式的预测算法	128
5.2.5 引领模式及关键转折点预警信号的识别	130
5.3 天然气价格可视化网络模型	134
5.3.1 模型建立	134
5.3.2 天然气价格可视图网络的拓扑性质分析	135
5.3.3 小世界特性分析	140
5.3.4 价格的社团聚类演化分析	143
5.4 中国石油进口供应风险及其影响的量化研究	146
5.4.1 中国石油供需分析	146
5.4.2 风险量化	147
5.4.3 石油进口风险对进口成本的影响	150
5.4.4 石油进口风险对国内各部门的影响	151
5.4.5 政策建议	156

本章小结	157
参考文献	157
第 6 章 电力价格网络	162
6.1 研究现状	162
6.2 美国电力市场机制转折点研究	163
6.2.1 美国电力价格分析	164
6.2.2 电力市场相关性演化	164
6.2.3 特征值与特征向量	166
6.2.4 机制转折点识别	168
6.2.5 社团演化分析	171
6.3 二分网络电力竞价中的博弈模型	175
6.3.1 模型建立	175
6.3.2 数值模拟	178
6.4 政策建议	182
本章小结	182
参考文献	183
第 7 章 光伏市场网络	185
7.1 研究现状	185
7.2 国际光伏产品贸易竞争网络模型	187
7.2.1 模型建立	187
7.2.2 实证分析	189
7.2.3 中国光伏贸易地位分析	194
7.3 中国光伏企业最小生成树网络模型	199
7.3.1 模型建立	199
7.3.2 实证分析	201
7.3.3 中国光伏企业市场特征分析	203
7.3.4 中国光伏市场影响因素分析	207
7.4 中国光伏企业阈值网络模型	208
7.4.1 影响力指数的确定	209
7.4.2 模型建立	210
7.4.3 引领企业识别	210
7.4.4 企业对市场的影响	213
7.5 政策建议	219

本章小结 219

参考文献 220

第 8 章 风电价格研究网络 223

8.1 研究现状 223

8.2 模型建立 224

8.3 综述性论文分析 225

8.4 论文发表整体结构分析 225

8.5 国家及机构分布 227

8.6 高被引论文分析 229

8.7 关键词分布 231

8.8 未来研究方向 233

本章小结 234

参考文献 234

第 9 章 能源结构优化 238

9.1 研究现状 238

9.2 基于投资组合理论的中国能源结构优化 240

9.2.1 模型建立 240

9.2.2 各种能源的热力成本 241

9.2.3 各种能源的风险 244

9.2.4 相关系数矩阵 245

9.2.5 中国未来能源结构优化 245

9.2.6 有效边界及敏感性分析 247

9.3 基于动态规划的风电减排优化研究 249

9.3.1 模型建立 249

9.3.2 限制条件和参数设定 251

9.3.3 参考情景下的结果分析 253

9.3.4 不确定因素的敏感度分析 255

9.3.5 情景分析 258

本章小结 260

参考文献 260

第1章 国内外能源供需现状分析

本章介绍国内外能源供需现状,主要包括煤炭、石油、天然气、电力、风能、太阳能及其他可再生能源,使读者对国际国内能源供需现状有一个初步的了解.本章中图形与表格所涉及的数据资料均来自 BP、IEA、EIA、中国国家统计局、中国统计年鉴、中国海关总署、世界核协会与国际原子能机构网站、F.O.Licht、CREIA、能源数据简明手册 2016、国家能源局以及中国电力企业联合会历年的电力工业统计资料.

1.1 总能源供需现状

农业经济时代,能源只是满足人们生活需要的一般性要素,薪柴等生物质能是人们使用的主要能源.18 世纪后半期,手工劳动逐渐被取代,对能源的需求大大增加,煤炭取代薪柴等,成为世界主要的能源消费品种.19 世纪到 20 世纪初,内燃机和电力两项革命性技术的诞生使得能源在现代经济社会中的地位得到巩固,从而对化石能源的需求量急速上升.第二次世界大战以后,石油消费量快速增长,在能源消费结构中的比重逐渐超过煤炭,大量天然气田的发现,也使得天然气的开发利用进入了快车道.21 世纪初,石油、煤炭和天然气三大化石能源成为世界能源供应的主角,占全球一次能源消费总量的比重达到 80% 以上,能源资源的开发利用,促进了人类社会和世界经济的发展.随着全球经济一体化的深入,世界能源的生产、消费、贸易和市场的发展也呈现全球化和区域化等特征.目前,世界能源发展主要呈现出以下几个方面特点.

1. 全球一次能源消费平稳增长,2011 年以来增速放缓

过去 40 多年的时间里,世界能源消费总量快速增长,从 1970 年的 49.13 亿吨油当量增加到 2014 年的 129.28 亿吨油当量,平均增长率为 11.9%.北美、中南美洲、欧洲及欧亚大陆、中东、非洲及亚太六大地区的一次能源消费总量均有所增加.但是,经济、科技与社会比较发达的北美、欧洲及欧亚大陆两大地区的能源消费增长速度非常缓慢.不同地区一次能源消费总量及其占世界总消费量比例的变化情况如表 1.1 和表 1.2 所示.从一次能源消费总量在世界的占比来看,2005 年亚太地区便超过了北美、欧洲及欧亚大陆地区,成为全球最大的一次能源消费地区.2011 年全球一次能源消费总量超过 120 亿吨油当量,总体能源消费量持续增长,但增速

有所放缓。然而, 2014 年的能源行业是在动荡中前行的一年。这一年, 全球一次能源消费量达到 129.28 亿吨油当量, 同比增长 0.9%, 为 2009 年以来最低增速, 远低于过去 10 年 2.1% 的平均增速水平。其中, 经济合作与发展组织 (OECD) 国家一次能源消费量 2004 年以来一直保持略高于 50 亿吨油当量的水平, 而非 OECD 国家的能源消费总量持续增加, 并且非 OECD 国家的能源消费增速均高于 OECD 国家及全球消费增速水平, 见图 1.1。

表 1.1 1970~2014 年世界各地区的一次能源消费总量 (单位: 百万吨油当量)

年份	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
北美	1817	2107	2326	2759	2849	2784	2785	2726	2796	2823
中南美洲	142	253	329	468	528	622	650	665	685	693
欧洲及欧亚大陆	2114	2834	3205	2821	2971	2949	2938	2943	2912	2830
中东	62	133	269	421	558	724	752	780	793	828
非洲	74	145	222	274	329	390	388	403	409	420
亚太	704	1161	1782	2628	3686	4643	4896	5069	5212	5335
世界	4913	6631	8133	9371	10 920	12 111	12 408	12 586	12 807	12 928

表 1.2 1970~2014 年世界各地区一次能源消费量占世界的比例 (单位: %)

年份	1970	1980	1990	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
北美	36.98	31.77	28.60	29.44	26.09	22.99	22.45	21.66	21.83	21.84
中南美洲	2.89	3.82	4.05	4.99	4.84	5.14	5.24	5.28	5.35	5.36
欧洲及欧亚大陆	43.03	42.74	39.41	30.10	27.21	24.35	23.68	23.38	22.74	21.89
中东	1.26	2.01	3.31	4.49	5.11	5.98	6.06	6.20	6.19	6.40
非洲	1.51	2.19	2.73	2.92	3.01	3.22	3.13	3.20	3.19	3.25
亚太	14.33	17.51	21.91	28.04	33.75	38.34	39.46	40.27	40.70	41.27
世界	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

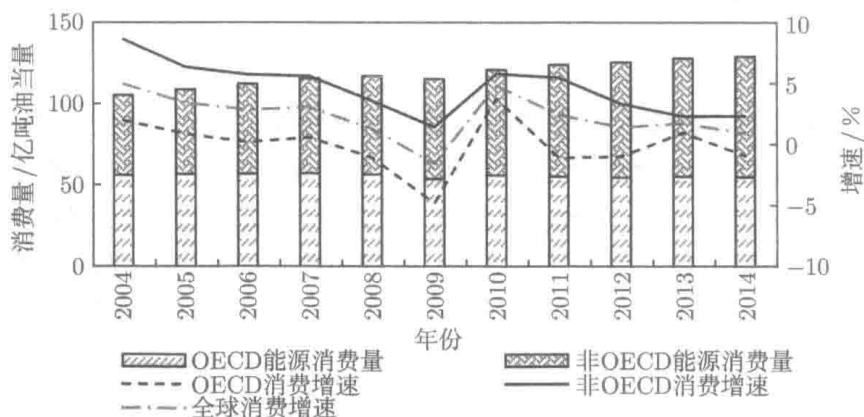


图 1.1 2004~2014 年世界一次能源消费量及增速

从地区层面来看，2014 年亚太地区是全球一次能源消费增量最大的地区，但增速连续四年放缓，仅为 2.3%；中东地区跃居成为全球一次能源消费量增速最快的地区，同比增长 4.4%；欧洲地区成为全球唯一出现能源消费量下滑的地区，同比下降 2.8%，一次能源消费量减少 0.81 亿吨油当量。亚太地区、欧洲地区以及中南美洲地区的能源消费增速显著低于过去 10 年平均水平，见表 1.2。

从国家层面来看，中国在 2014 年是全球一次能源消费量最多的国家，为 29.72 亿吨油当量，占世界总量的 23.0%，见图 1.2。同时，中国连续 14 年成为世界一次能源消费量最大增量国，但增速为 1998 年以来的最低值。美国的页岩气革命带动石油供给大幅提升，并成为有史以来首个连续三年增产超过 100 万桶/日的国家。印度一次能源消费增量超越美国居第二位，达到 0.42 亿吨油当量。乌克兰成为全球一次能源消费量下降最多的国家，减少 0.17 亿吨油当量。

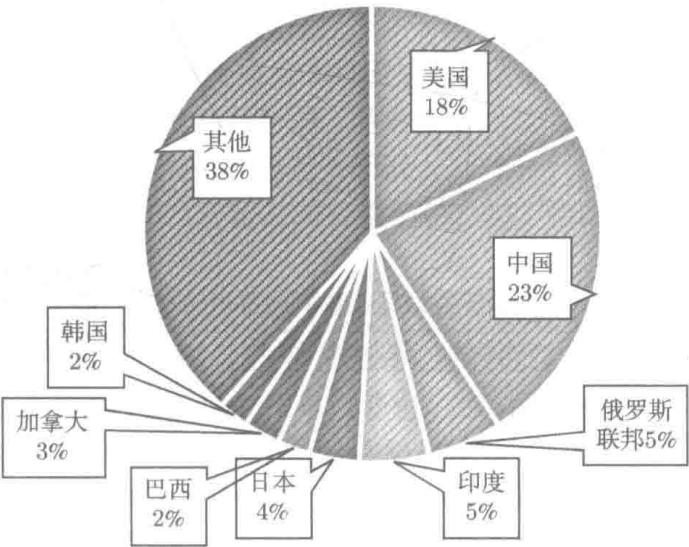


图 1.2 2014 年主要国家一次能源消费量占比

2. 化石能源资源储备丰富，地区差异促进能源贸易

在化石能源中，煤炭资源储备最为丰富，但其分布也存在巨大的不平衡性。2015 年的《BP 世界能源统计年鉴》显示，世界煤炭剩余可采储量为 8915.31 亿吨，储采比高达 110。其中，北美、欧洲及欧亚大陆和亚太三个地区是世界煤炭资源的主要分布地区，合计占世界总量的 94.6%，而亚太地区的储采比远低于其他几个地区，仅为 51，见表 1.3。同期，天然气剩余可采储量为 1 871 000 亿立方米，储采比达到 54.1。其中，中东和欧洲及欧亚大陆是世界天然气资源最为丰富的地区，合计占世界总量的 73.7%，然而，这两个天然气资源丰富地区的储采比却相差很大，北美和亚太地区的天然气储量及储采比均较小，见表 1.3。相比煤炭和天然气资源，石

油的储备相对较低,截至 2014 年底,全世界剩余石油探明可采储量为 17 001 亿桶,储采比为 52.5. 2014 年世界石油产量平均每天为 8867.3 万桶,比上一年度增加 2.4%. 表 1.4 对比了 2014 年世界各地区石油产量与消费量,可以发现,中东地区每天需要向外输出约 1984.9 万桶石油,非洲和中南美洲的石油产量大于消费量,而北美、欧洲及欧亚大陆和亚太地区的产销差分别为 -462.6 万桶/天、-105.4 万桶/天和 -2253.2 万桶/天.

表 1.3 2014 年世界各地区煤炭和天然气资源的储量与储采比

地区	煤炭			天然气		
	储量/亿吨	比例/%	储采比	储量/万亿立方米	比例/%	储采比
北美	2450.88	27.5	248	12.1	6.5	12.8
中南美洲	146.41	1.6	142	7.7	4.1	43.8
欧洲及欧亚大陆	3105.38	34.8	268	58.0	31.0	57.9
中东	329.36	3.7	122	79.8	42.7	> 100
非洲				14.2	7.6	69.8
亚太	2883.28	32.3	51	15.3	8.2	28.7
世界	8915.31	100	110	187.1	100	54.1

表 1.4 2014 年世界各地区石油剩余探明储量、产量与消费量

	北美	中南美洲	欧洲及欧亚大陆	中东	非洲	亚太	世界
探明储量/亿吨	2325	3302	1548	8107	1292	427	17 001
比例/%	13.7	19.4	9.1	47.7	7.6	2.5	100.0
产量/(万桶/天)	1872.1	761.3	1719.8	2855.5	826.3	832.4	8867.3
比例/%	20.5	9.3	19.8	31.7	9.3	9.4	100.0
消费量/(万桶/天)	2334.7	712.5	1825.2	870.6	380.0	3085.6	9208.6
比例/%	24.3	7.8	20.4	2.8	4.3	33.9	100.0
产销差	-462.6	48.8	-105.4	1984.9	446.3	-2253.2	-341.3

随着能源资源的不均衡现象严重,世界各地区及国家之间的能源贸易交易量进一步增大,能源储运安全及能源供应安全等问题将日益受到重视. 2000 年以来,世界化石能源贸易量逐渐增加,特别是石油,平均增速保持在 5% 以上,2008 年以来,世界石油的总贸易量维持在较高水平,见图 1.3. 2014 年世界石油总贸易量为 4214 万吨,是 2000 年的两倍. 世界煤炭贸易量变化较大,特别是 2003 年以来,持续降低,2014 年仅有 574 万吨,天然气总贸易量在 2010 年有小幅增加后又回落到 2007 年的贸易量水平,总体变化不大.

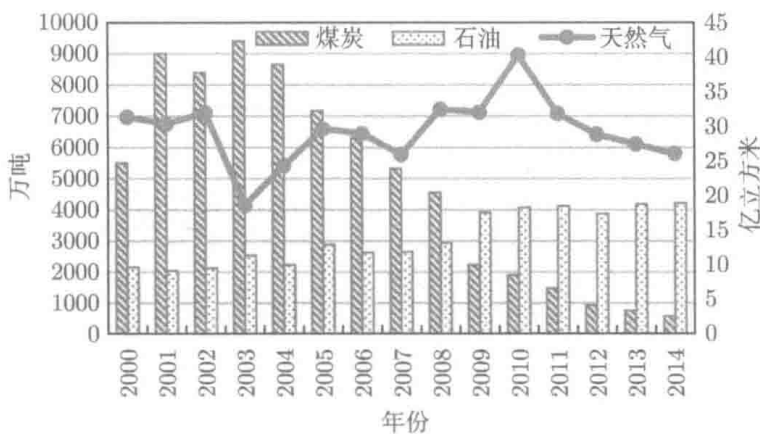


图 1.3 2000~2014 年世界化石能源贸易量

3. 化石能源消费比重持续下降，可再生能源发展态势良好

在世界一次能源消费结构中，清洁能源和天然气比重不断上升，呈现多元化发展趋势，风能等可再生能源已经成为一些发达国家能源供应体系中不可或缺的重要组成部分，使得化石能源的比重持续下降。但是化石能源仍占据主体地位，见图 1.4。石油已经连续第 15 年在能源消费总量中缩减占比。2014 年，全球一次能源消费构成仍以化石能源为主，占一次能源总消费量的 86.3%，相比 2004 年下降了 0.4 个百分点，见图 1.5。

随着传统化石能源的大量使用以及温室气体的大量排放，可再生能源的发展为解决当今世界所面临的能源供需矛盾和环境问题提供了新的途径。从图 1.6 中世界可再生能源累计装机容量的发展可以看出，在可再生能源中，风能发电装机容量增长最快，其次是太阳能，地热能发展较慢。2014 年，用于发电和交通领域的可再生能源继续保持良好的发展态势，在世界一次能源消费中所占比例首次达到了 3.0%。其中，美国为可再生能源消费量最多的国家，消费量为 0.6 亿吨油当量，同比增长 10.8%，占世界可再生能源总消费量的 20.5%。中国为可再生能源消费量增长最多的国家，增加消费 0.07 亿吨油当量，同比增长 15.1%。作为传统可再生能源项目，水电仍在可再生能源总体消费中占据主体地位。2014 年，世界水电消费量为 8.8 亿吨油当量，占一次能源消费比例首次提升至 6.8%，同比增长 2.0%。但水能的增速明显低于风能、太阳能及生物质能等。作为新型可再生能源，2004~2014 年，风能和太阳能增长最快，分别从 2.7% 和 0.08% 增长到 13.4% 和 3.52%；生物质能、地热能等总体平稳增长，从 7.8% 增长到 9.6%；而处于主体地位的水能，增速则明显较低，占比从 89.4% 减少到 73.5%，见图 1.7。

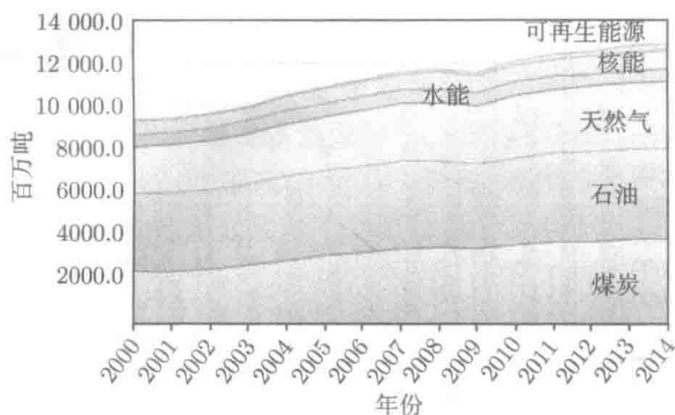


图 1.4 2000~2014 年世界一次能源消费结构

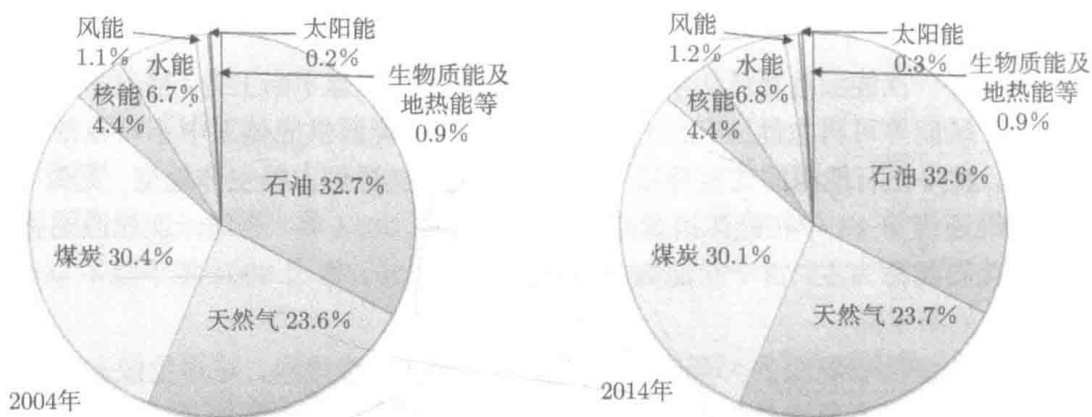


图 1.5 2004 年和 2014 年世界能源消费结构对比

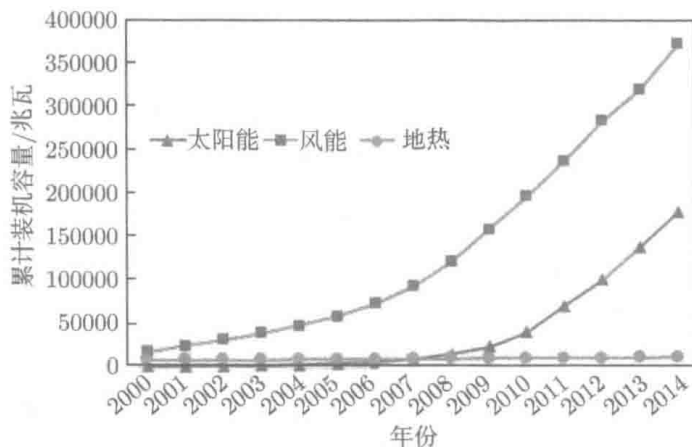


图 1.6 2000~2014 年世界可再生能源累计装机容量

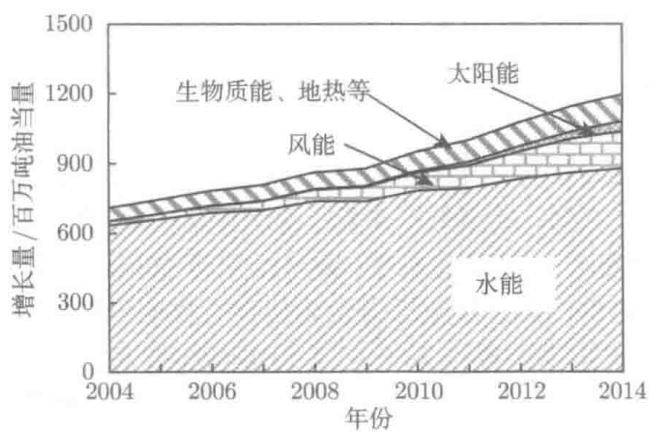


图 1.7 2004~2014 年世界可再生能源消费量

1.2 煤 炭

1.2.1 世界煤炭发展现状

1. 煤炭生产潜力及分布

全世界拥有煤炭资源的国家约有 80 个，煤盆地 2900 余个，但是各地的煤炭资源分布不均。在过去的 30 年里，世界煤炭生产不断变化，可采储量的分布亦发生改变。2014 年世界各地区煤炭资源探明储量的分布见图 1.8。欧洲及欧亚大陆煤炭资源探明储量最多，为 3105.38 亿吨，占世界总储量的 34.8%，其次是亚太地区

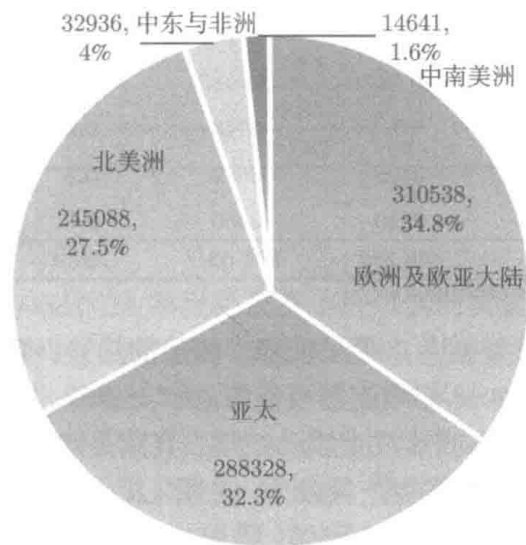


图 1.8 2014 年世界各地区煤炭探明储量及比例 (单位: 百万吨)