

—《能源工程技术丛书》—

潮流能 开发概论

肖 钢 吴勇虎 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

能源工程技术丛书

潮流能开发概论

肖 钢 吴勇虎 编著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

潮流能开发概论/肖钢,吴勇虎编著. —武汉:武汉大学出版社,
2015.10

能源工程技术丛书

ISBN 978-7-307-16599-1

I. 潮… II. ①肖… ②吴… III. 海洋动力资源—再生能源—
能源利用—研究 IV. P743

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 196557 号

责任编辑:徐 纯 孙 丽

责任校对:李嘉琪

装帧设计:张希玉

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:武汉市金港彩印有限公司

开本:720×1000 1/16 印张:19.5 字数:370 千字

版次:2015 年 10 月第 1 版 2015 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-16599-1 定价:122.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

能源是人类生存和社会发展的基础,其重要性不言而喻。为了人类社会的可持续发展,国际社会对逐步减少传统化石能源的依赖,加速开发清洁可再生能源已形成了共识。海洋能是全球能源储量极为丰富的能源之一,同时也是零排放的清洁能源,开发利用海洋可再生能源可替代化石能源,从而有效地减少 CO_2 的排放。按照国际上的一般标准折算,利用海洋可再生能源发电比用煤炭发电每千瓦时约减排 CO_2 0.997kg 和 SO_2 0.03kg。目前,世界各国对海洋能开发利用愈加重视,发布海洋能战略计划,制定海洋能发展路线图,出台一系列激励政策和措施,加大资金支持力度,促进了海洋能开发利用技术和产业化的快速发展。

海洋能的开发利用对促进我国沿海及海洋经济发展、缓解我国能源供给压力、减少环境污染、改善能源结构具有重要的意义。一方面,我国近岸海洋能资源可开发量十分丰富,另一方面,我国沿海地区海岛居民大部分面临能源供应短缺的问题,因此,开发海洋可再生能源是解决海岛居民生活用电的可行措施。由于开发海洋能需要对岛礁进行驻守、开发和保护,所以开发海洋可再生能源可以落实我国对南海管辖海域及岛礁的管控,提高管控能力。

在技术层面上,我国的海洋能开发利用工作起步较早,已有 40 多年历史。近年通过国家政策和专项资金的大力支持,已突破关键技术,并形成海上示范工程。潮汐能发电技术比较成熟,波浪能、潮流能进入示范工程和准商业化开发阶段,温差能和盐差能开发利用技术已取得一定进展,进入研制工程样机阶段。

本书共分为 9 章,围绕潮流能的开发利用过程中的工程内容展开。第 1 章介绍了能源及其使用历史,厘清海洋能应用的“前世今生”;第 2 章介绍了潮流能资源的特点和分布情况;第 3 章介绍了潮流能资源调查评估的一些方法;第 4 章介绍了潮流能开发过程中的关键技术及其发展现状;第 5 章介绍了在潮流能开发过程中涉及的配套工程技术;第 6 章宏观介绍了作为新能源工程项目该如何进行项目管理和风险控制;第 7 章介绍了世界先进水平的潮流能开发利用技术及其现状;第 8 章介绍了潮流能技术发展趋势及其经济性评价相关内容;第 9 章介绍了国内外海洋能开发的政策法规及产业规划情况。

在本书的编撰过程中,得到了中海油研究总院张理主任、李志川博士、于汀、马强、尹丰、张琳、齐宁和岳娟的热情帮助,在此表示诚挚的感谢!编写期间还参考了不少相关领域的著作、文献,借鉴了国内外许多专家发表的研究成果及图表资料,在此也向有关作者致以谢忱。

限于学术水平和收集的资料、文献不足,书中难免存在一些缺陷,敬请有关专家和读者批评指正。

本书有关彩图及扩展阅读材料可扫描书末二维码获取。

编 者

2015 年 6 月

目 录

1	能源与文明	1
1.1	概述	1
1.2	人类的能源利用历程	2
1.3	国内外能源形势	5
1.4	海洋可再生能源的崛起	11
1.5	小结	20
	参考文献	21
2	潮流能资源特点及蕴藏量	22
2.1	基本术语	22
2.2	海洋潮流种类	23
2.3	潮流能的特点	30
2.4	潮流能特征参数	36
2.5	潮流能资源分布	39
2.6	我国潮流能资源储量	45
2.7	小结	47
	参考文献	48
3	潮流能资源调查评估与选址	49
3.1	资源调查评估的必要性	49
3.2	潮流能资源调查评估现状	50
3.3	潮流能资源的计算方法	57
3.4	潮流能测试场开发	65
3.5	潮流能开发选址	69
3.6	小结	71
	参考文献	72
4	潮流能利用关键技术	74
4.1	潮流能利用基本原理	74
4.2	潮流能水轮机的类型	75
4.3	获能装置的支撑结构	84

2 | 潮流能开发概论

4.4	获能装置的总体设计	93
4.5	高效率叶片设计	104
4.6	潮流能发电功率控制技术	109
4.7	可再生能源电力网络	111
4.8	小结	119
	参考文献	119
5	配套海洋工程技术	121
5.1	获能装置的试验技术	121
5.2	密封系统设计	131
5.3	海底电缆技术	136
5.4	海洋工程的建造、安装	146
5.5	防污及腐蚀控制技术	153
5.6	海洋工程中的不确定性	159
5.7	小结	160
	参考文献	160
6	新能源工程项目管理	162
6.1	项目管理概述	162
6.2	项目启动管理	171
6.3	项目计划管理	177
6.4	项目实施管理	188
6.5	项目风险管理	198
6.6	工程项目管理误区	203
6.7	小结	204
	参考文献	204
7	国内外潮流能开发利用技术现状	205
7.1	概述	205
7.2	国外潮流能发展现状	207
7.3	我国潮流能发展现状	239
7.4	其他海洋能开发利用技术现状	250
7.5	小结	258
	参考文献	258
8	潮流能开发利用发展前景	260
8.1	开发海洋新能源带来了什么	260
8.2	潮流能技术的发展趋势	263

8.3	潮流能发电经济性评价	265
8.4	海洋能产业化评价体系	270
8.5	海洋能产业化发展的挑战	276
8.6	海洋能产业化的技术途径	276
8.7	海洋能产业化前景	279
8.8	海洋能开发中的挑战	281
8.9	海洋能开发、利用的基本原则	283
8.10	我国潮流能的未来之路	284
8.11	小结	285
	参考文献	285
9	国内外海洋能政策及产业规划	287
9.1	国外海洋能政策法规	287
9.2	我国海洋能政策法规	294
9.3	国内外海洋能产业规划	298
9.4	海洋能产业发展建议	301
9.5	小结	303
	参考文献	303

1 能源与文明

1.1 概 述

文明,广义上是指人类社会进步状态,相对于蒙昧和野蛮而言;狭义上是指一个时代或一个地区人类先进的物质成果与精神成果的总和。文明是人类所特有的,它使人类从动物界分化出来。

能源,是指能够直接取得或者通过加工、转换而取得有用能的各种资源,包括煤炭、原油、天然气、煤层气、水能、核能、风能、太阳能、地热能、生物质能等一次能源和电力、热力、成品油等二次能源,以及其他新能源和可再生能源,是人类文明之本。能源是人类文明的动力,人类历史的发展是一个可利用能量不断增长的过程,社会的发展水平与它可利用的能量大小成正比。

某一特定环境的能源基础是这一文明形成和发展的决定因素。文明的发展和进步有赖于能源资源的涵养和保护。纵观人类社会发展的历史,人类文明的每一次重大进步都伴随着能源的改进和更替。而人类发展史上每一次能源技术的转换都伴随着剧烈的“阵痛”。从木柴到煤炭,从煤炭到石油,都是如此。历史还告诉我们,能源技术的改进和更替是一个相对缓慢的过程,需要持续数十年。因此,替代能源发展是一个渐进的过程,它是技术开发和市场选择的过程,是不以人的意志为转移的客观发展过程。能源对人类社会的进步起到了巨大的推动作用。

目前人类所知的能源类型有:化石能源、生物质能、水力、风能、太阳能、热能、核能、海洋能等,从图 1-1 中可以看出各种能源生成所需要的大致时间。生成传统化石能源,如煤炭、石油和天然气,所花费的时间需要上百万年,如今使用的石油则是 100 多万年前形成的。

回顾过往几个世纪使用能源的情况,可以发现一直是以新能源替代旧能源的过程。能源推动了机器转动,机器与人结合形成了先进的生产力,先进的生产力推动了人类社会不断向前发展。人类进入现代社会,与能源的关系比以往任何时候都更加密切。

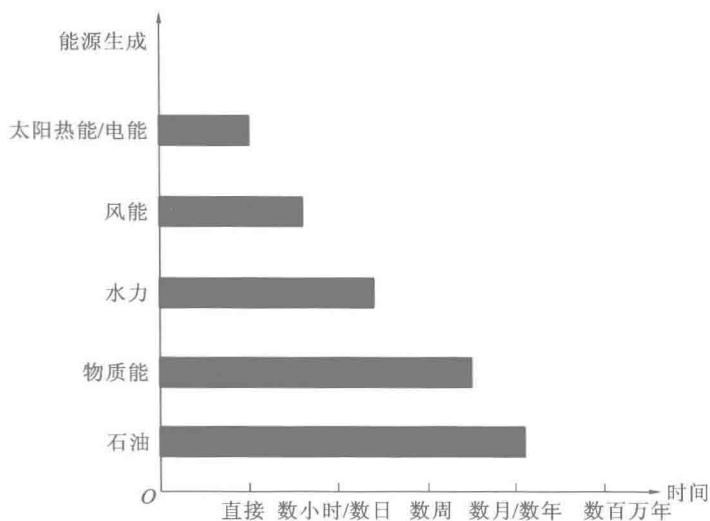


图 1-1 各种能源生成所需大约时间

1.2 人类的能源利用历程

1.2.1 能源利用诞生文明

文明的起源,迄今公认的标志有三个:会使用工具、语言与火。前两者并非人类所独有,动物也具有用声音交换信息的能力,有的也能利用器物完成单靠自身器官所不能完成的工作,然而没有任何动物会利用火。正是对火——这个自身体力以外的能源的驾驭,使人类迈上了通向文明的道路。

有了火,人类经受住了艰苦环境的考验,得以幸存,并通过熟食促进了身体和大脑的进化。火,作为一种信仰上的象征,被古人视为圣物,保护和传递圣火的习俗一直流传到当代,如奥运会开幕盛典。可见,人类文明,无论物质文明或精神文明,其萌芽都来自火,即体外能源的利用。人类最早使用火的场景见图 1-2。

1.2.2 能源变迁决定文明

狩猎采集社会的原始文明的能源基础是柴草燃料和天然食物。天然食物的日益匮乏,使狩猎和采集逐渐被畜牧和种植所取代,这就是农业文明的起源。金属工具的发明促进了农业的发展。

回顾人类利用能源的历史,大致可分为三个阶段:18 世纪以前漫长的岁月



图 1-2 人类最早使用火

里,木材在世界一次能源消费中占主导地位,可谓“木材时代”(图 1-3)。18 世纪中叶以前人类主要使用柴草、畜力、风力、水力等作为能源;18 世纪中叶以后,蒸汽机的发明引发的第一次工业革命促进了煤炭工业的发展,煤炭取代了木材等成为人类的主要能源,并在此后的 200 年中,一直占主导地位,可谓“煤炭时代”(图 1-4)。



图 1-3 木材时代



图 1-4 煤炭时代

第二次世界大战后,石油和天然气工业又获得迅速发展。20 世纪 60 年代,石油取代了煤炭,在世界能源消费中占据首位,由此开始了“石油时代”(图 1-5)。可见,文明变迁的根本原因是能源基础的转移。

在能源利用总量不断增长的同时,能源结构也在不断变化(图 1-6)。每一次能源时代的变迁,都伴随着生产力的巨大飞跃,极大地推动了人类经济社会的发展。



图 1-5 石油时代

同时,随着人类使用能源特别是化石能源的数量越来越多,能源对人类经济社会发展的制约和对资源环境的影响也越来越明显。图 1-7 为过去 100 多年世界能源消费变化。

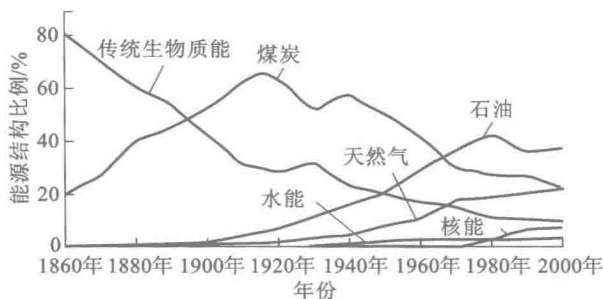


图 1-6 过去 100 多年世界能源结构变化

[来源:詹金斯,《石油经济手册(第五版)》]

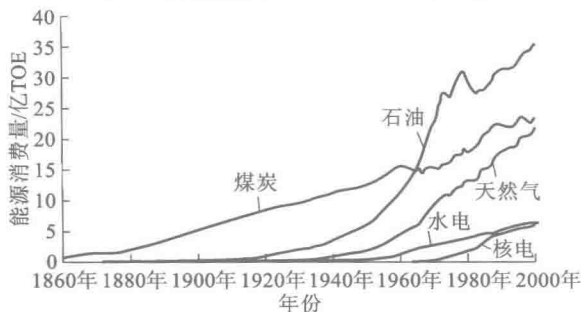


图 1-7 过去 100 多年世界能源消费变化

(来源:世界能源理事会,《2050 年及以后世界能源展望》)

1.2.3 能源滥用与文明兴衰

据研究文明兴衰的英国历史学家汤因比(A. J. Toynbee)的统计,世界各地共有 19 个古代文明曾经繁荣一时,但其中只有 5 个幸存延续至今,其余 14 个都早已消亡。汤因比把它归因于阶级对立的动乱和外族入侵的战争。这当然是正确的。如果换一个角度看问题,激发阶级矛盾的天灾人祸和无力抵抗外族入侵,都是滥用能源导致经济凋敝和国力衰微的结果。

新石器时代古埃及奴隶制国家的统治者,为了兴建一座王坟(金字塔),竟然动用十万名劳动者建造了三四十年。从公元前 3000 年至公元前 300 年的两千多年间,大大小小的金字塔建了约 80 座。古埃及统治者在生前极为骄奢淫逸,滥用能源,结果民不聊生,国力每况愈下,终于在几次外族入侵的战争中亡国灭种。现在的埃及人是后来的阿拉伯占领者的后代。古代埃及文明已经消

亡,只剩下金字塔遗迹散布在沙漠之中。其他如两河流域的苏美尔,以及希腊和小亚细亚的古代社会,都是由于滥伐森林造成水土流失以致能源枯竭、农业凋敝,导致文明的衰落与消亡。恩格斯曾对此作过精辟的论述。

幸存的 5 个文明也都历经兴衰。古老的中华文明就是在农民运动的起伏、外族入侵的战争,以及改朝换代中屡衰屡兴的典型。衰于能源基础的滥用和枯竭,兴于能源基础的涵养和复苏。农业文明之所以能够屡衰屡兴,原因还在于它的能源特性。再生能源在过度消耗而枯竭之时,只要还剩下一线生机,经过一定时间的休养生息,还能逐渐复苏,重新繁茂,文明也就有了再度繁荣的基础。如果能源基础未能获得再生的机会,文明就会在衰落中消亡。如果文明在面临衰落的危机之中顺利地转移到新的能源基础之上,旧的文明就演化为一种新的文明,旧文明中的精华也就得以被继承和发展,成为新文明的有机组成部分。

1.3 国内外能源形势

1.3.1 世界能源基本现状

目前,世界能源供应主要依赖化石能源。世界化石能源剩余可采储量还有较长的供应保障期,尚未对能源供给形成实质性制约。未来能源供求关系和市场价格将主要受能源开采利用技术、能源结构调整、环境与气候变化、国际政治经济秩序等多种因素影响。

(1) 目前,石油、煤炭和天然气等化石燃料仍是世界能源的主体

截至 2006 年年底,世界煤炭探明剩余可采储量 9091 亿吨,按目前生产水平,可供开采 147 年。与煤炭相比,世界常规石油和天然气资源相对较少,但每年新增探明储量仍在持续增长。此外,世界非常规油气资源,即受开采技术和成本限制目前还不能大规模开发利用的油气资源,如重油(此处指密度为 $0.920 \sim 1.000 \text{ g/cm}^3$ 的原油)、油砂油、页岩油气以及天然气水合物等十分丰富。

据《2000 世界能源统计评论》资料,1999 年世界一次能源消费构成比例(图 1-8)是石油 40.5%,天然气 24%,煤炭 25%,核能 8%,可再生能源 2.5%。由此可见,化石燃料约占世界一次能源构成的 89.5%。

(2) 能源构成走向多元化

在经济合作与发展组织(Organization of Economic Cooperation and Development, OECD)组成国中,煤炭消费的比重不断下降,天然气消费的比重已经超过煤炭而居第 2 位。随着国际社会越来越关注环境问题以及能源技术的不断进步,替代煤炭和石油的清洁能源增长迅速,煤炭和石油在一次能源总需求

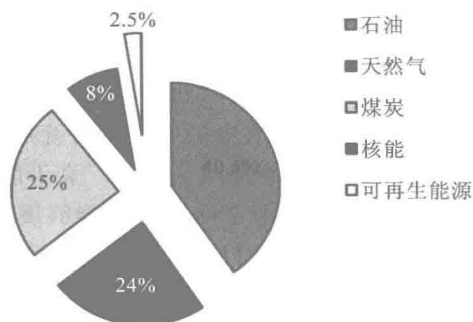


图 1-8 《2000 世界能源统计评论》中 1999 年世界一次能源消费比例

中的份额将进一步下降,天然气、核能和可再生能源(包括生物燃料)的份额将不断提高。其具体趋势见图 1-9。

各国的能源强度(图 1-10)呈现长期趋同的趋势,使得全球能源强度降低。趋同现象背后的推手是能源贸易、技术普及和消费模式的标准化。化石燃料所占市场份额将趋同至 26%~28%,而非化石燃料的市场份额则趋同为 6%~7%。石油的市场份额将延续长期下滑的趋势,而天然气的份额将继续提高。煤炭市场份额近年所呈现的增长趋势将很快被逆转,在 2020 年前明显下降。可再生能源在全球能源市场崭露头角的速度非常类似于 20 世纪 70 和 80 年代核能的崛起。

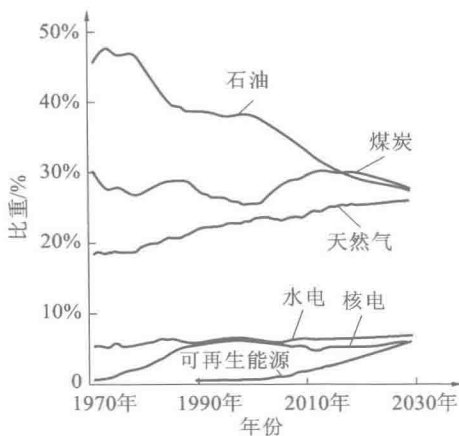


图 1-9 世界一次能源的份额比例趋势

(来源:《BP2030 世界能源展望》)

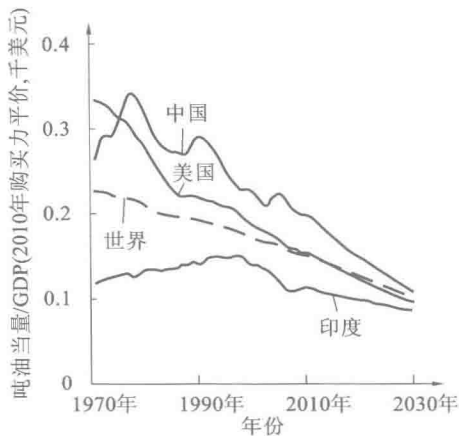


图 1-10 世界范围内能源强度

(来源:《BP2030 世界能源展望》)

(3) 发达国家能源消费高位徘徊,发展中国家能源需求加快增长

发达国家在工业化和后工业化过程中,形成了高消耗的产业用能、交通用能和建筑物用能体系。从能源消费的增长情况来看,发达国家已经处于能源消

费的缓慢增长期;发展中国家为摆脱贫穷和落后,正致力于加快发展,其能源消费的增长也在加快。据统计,1996—2006年,欧美26国能源消费年均增长率为0.62%;同期发展中国家能源消费年均增长率为4.36%。

全球煤炭产量净增长全部来自亚太地区,相对美国的产量却大幅下降。现今,亚太地区生产了全球2/3的煤炭。全球煤炭消费量增长了2.5%,而欧盟消费量连续三年出现增长。1987—2012年全球分区域煤炭产量和消费量以及2012年全球煤炭人均消费量分别见图1-11、图1-12。

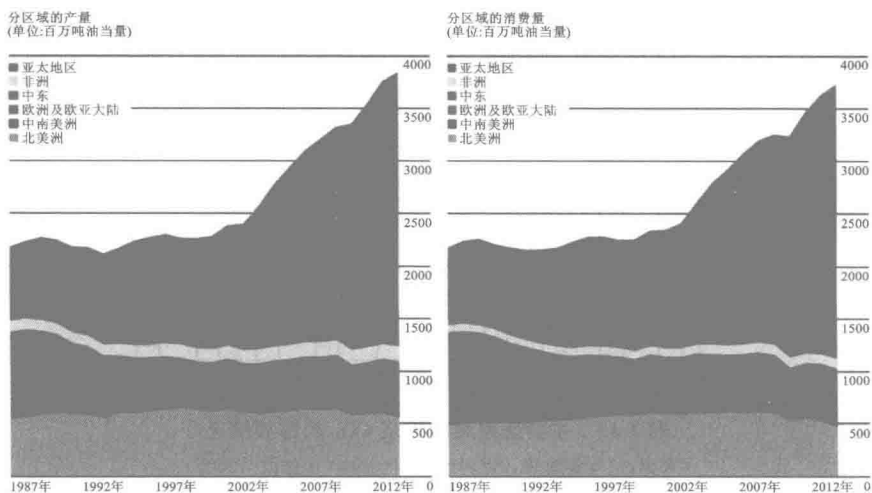


图 1-11 1987—2012 年全球分区域煤炭产量和消费量统计

[来源:《BP 世界能源统计年鉴(2013 版)》]



图 1-12 2012 年全球煤炭人均消费量分布(单位:吨油当量)

(4) 气候环境变化对能源发展影响加大, 低碳和无碳能源称为新热点

虽然化石能源是当前的主要能源, 但化石能源的大规模低效开发和利用会导致大量资源的浪费和污染物、温室气体的排放。

伴随着能源的大量消耗而来的是地球环境的日益恶化。仅 20 世纪的 100 年, 全球能源消耗规模扩大了约 20 倍, 已经达到了阻碍地球生态系统自律功能正常运转的程度。CO₂ 气体的温室效应引起的全球变暖, 是这方面最初的征兆。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第 2 次报告明确指出, 地球变暖并不是地球环境自然的变化, 而是由于人类排放的大量 CO₂ 等气体引起的温室效应。图 1-13 为主要国家燃料燃烧 CO₂ 的排放情况。

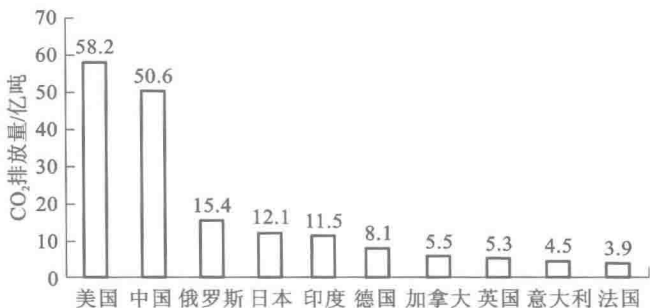


图 1-13 主要国家燃料燃烧 CO₂ 的排放情况

(来源: 国际能源署, 《燃料燃烧产生的 CO₂ 排放》, 2005)

全球气候变化对农业和生态造成了严重的影响, 由于煤炭燃烧产生越来越多的酸雨, 破坏了陆地上的植被, 进而造成水土流失、珍贵动植物资源日益减少甚至消失。环境的恶化进一步导致了干旱、洪涝、飓风等严重的自然灾害。

(5) 世界范围内的能源危机

能源危机另一个明显的表现就是近几年来严重困扰人民生活 and 生产的电力紧张, 随着经济发展, 全球电力产业的发电量也在持续增长, 在 2009 年就达到了约 17000 太瓦时/年, 这巨大的电能需求成了全球资源的明显负担, 加快了传统能源的消耗速度。在继 2001 年美国加州大停电后, 我国也出现了前所未有的大面积“拉闸限电”现象。自 2001 年夏天以来, 福建、浙江等省份就没有停止过“拉闸限电”, “电荒”最甚的是浙江省, 用电负荷高达 95%/日。2002 年全国有 12 个省限电, 2003 年先后有 21 个省级电网出现了不同程度的“拉闸限电”, 缺电局面进一步加剧。造成这次电力供应紧张的原因既有经济快速增长、高耗能产业急速发展的因素, 也有能源结构不合理, 新能源、可再生能源开发不足方面的因素。由于我国目前的电力供应主要以水力发电和火力发电为主, 一旦干旱严重或煤炭供应紧张, 电力供应就会受到很大的影响。目前煤炭短缺,

价格上扬,很多火电厂因无煤可用而被迫停机,致使电力供应减少。

1.3.2 我国能源基本现状

(1) 能源品种丰富,人均占有量少

我国水能和煤炭较为丰富,蕴藏量分别居世界第1位和第3位;而优质化石能源相对不足,石油和天然气资源的探明剩余可采储量目前仅列世界第13位和第17位。由于人口众多,各种能源资源的人均占有量都低于世界平均水平,具体见图1-14。

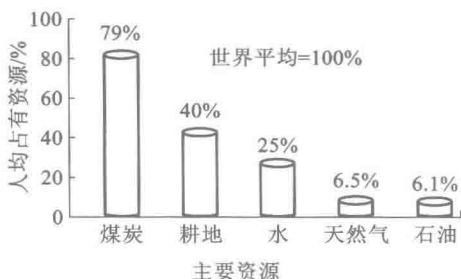


图1-14 我国主要资源人均占有水平与世界平均水平的比较

(2) 能源生产迅速增长,生态环境压力明显

在需求快速增长的驱动下,中国能源生产增长很快,煤炭增长尤为迅速。根据《BP世界能源统计年鉴(2013版)》资料显示,2012年全球煤炭消费增长2.5%,尽管中国煤炭消费增长6.1%,低于历史平均水平,但全球煤炭消费净增长全部来自中国,中国的煤炭消费量也首次超过全球消费总量的一半,占50.2%。我国是世界上最大的煤炭生产国和消耗国,煤炭占商品消耗能源的74%,已成为我国大气污染的主要来源。

煤炭大量生产和使用中存在一系列问题,如资源回采率低、浪费严重,安全事故多发、死亡率高,对地表生态和地下水系破坏大。此外, SO_2 、烟尘、粉尘、氮氧化物以及 CO_2 排放量也有所攀升,给生态环境治理带来了难度。中国作为一个发展中国家,人均 CO_2 排放量低于世界平均水平,但也面临着温室气体减排的压力。图1-15为我国主要污染物排放情况。

(3) 能源消费以煤为主,能源结构需要优化

改革开放特别是20世纪90年代以来,中国能源结构总体上朝着优质化方向发展(表1-1)。煤炭消费占能源消费总量的比重由1990年的76.2%下降到2002年的66.3%。但近年来,煤炭占能源消费的比重有所上升,2006年达到69.4%,而发达国家这一比重平均只有21%左右。