

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MEI DE QINGJIE LIYONG
YU WURAN FANGZHI

煤的清洁利用 与污染防治

惠世恩 庄正宁 合 编
周屈兰 谭厚章



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



MEI DE QINGJIE LIYONG
YU WURAN FANGZHI

煤的清洁利用 与污染防治

惠世恩 庄正宁 合 编
周屈兰 谭厚章
徐通模 主 审



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”规划教材
PUTONG GAOJIAO YUJIYI WU SHIWU GUHUA JIAOCAI

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书共分七章，主要内容包括煤气化原理与技术，煤液化原理与技术，水煤浆的发展现状与特点、制备和燃烧组织，高效低污染煤燃烧技术和发电技术等。本书内容丰富，全面介绍了国内外该领域的最新技术和发展动向。同时，本书注意理论与实践相结合，对于扩大学生知识面，全面调动学生对科学内容深入研究的兴趣大有裨益。

本书可作为高等学校热能动力及相近专业学生的教材，也可供相关领域技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

煤的清洁利用与污染防治/惠世恩等编. —北京: 中国电力出版社, 2008

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-6218-2

I. 煤… II. 惠… III. ①煤炭工业—无污染技术—高等学校—教材②煤烟污染—污染防治—高等学校—教材
IV. X752 X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 169203 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售



*

2008 年 3 月第一版 2008 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19.25 印张 472 千字

定价 30.80 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
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

前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

我国是世界上最大的煤炭生产国和消费国,2005年我国原煤产量达21.9亿吨以上,煤炭占我国一次能源消费量的70%以上。

煤炭的开发与利用极大地推动了人类社会的发展。然而,人们在物质生活和精神生活不断提高的同时,也越来越感悟到大规模使用煤炭所带来的严重后果。据统计,我国煤炭总产量的84%用于直接燃烧,二氧化硫排放量的90%、烟尘排放量的70%都是煤燃烧产生的,而氮氧化物、二氧化碳的排放量也居世界前列。预计在今后20~50年,我国能源消费的结构基本不会改变,煤炭消费的绝对值也会不断增加,这将给生态和人居环境带来巨大的压力。发展洁净煤技术,减少二氧化硫、氮氧化物、烟尘和酸雨的污染,是实现能源与环境和谐发展、人类和自然界的和谐发展、生产和经济和谐发展的主要组成部分,是实现中国经济可持续发展的重要战略方针。

本书是在我们多年来从事热能工程、环境工程专业研究生教学工作和煤燃烧及污染防治等方面的科学研究工作基础上编写而成的,完整、系统地讨论了我国能源结构及大气污染现状,详细介绍了煤气化、煤液化加工利用的理论技术,高效低污染发电技术,以及煤燃烧中污染物生成的机理及在燃烧中和燃烧后烟气中污染物的治理技术。全书共分为七章,第一章为概论,主要论述了中国及世界能源现状及能源利用给环境带来的压力;第二章讨论了煤气化的基本原理、工艺和技术方法;第三章讨论的是煤液化技术;第四章讨论的是水煤浆的基本特性、燃烧原理和燃烧设备;第五章讨论了高效、低污染煤利用技术和发电技术;第六章为煤燃烧中氮氧化物的生成机理及低 NO_x 燃烧技术和烟气中脱氮的技术;第七章为煤燃烧中硫氧化物的生成机理与控制排放的技术。

本书第一、四章由惠世恩教授编写;第二、三章由庄正宁教授编写;第五、七章由周屈兰副教授编写;第六章由谭厚章副教授编写。本书由惠世恩教授担任主编。

徐通模教授对本书进行了全面的审阅,并提出许多宝贵意见,使本书增色不少。

本书在编写过程中得到了西安交通大学热能工程系气固两相流与燃烧课题组许多硕士、博士生的支持和帮助。在编写中引用了国内外许多研究者的资料,谨向有关的国内外作者、专家和科技工作者表示最诚挚的感谢。

由于作者的水平所限,国内外研究成果丰硕,本书还不可能把它们都准确、无误地反映出来,书中的不足之处敬请读者批评指正。

编者

2007.12

目 录

前言

第一章 概论	1
第一节 中国及世界能源现状	1
第二节 世界及中国能源经济	9
第三节 中国能源生产消费中存在的问题和带来的环境压力	10
参考文献	12
第二章 煤气化原理与技术	13
第一节 煤炭气化的基本原理	13
第二节 煤炭气化的反应动力学	25
第三节 移动床气化法	42
第四节 流化床气化法	60
第五节 气流床气化法	70
第六节 地下气化法	79
参考文献	82
第三章 煤液化原理与技术	83
第一节 煤炭液化概述	83
第二节 煤炭液化的基本原理	87
第三节 煤炭的直接液化工艺	99
第四节 煤炭的间接液化工艺	113
参考文献	122
第四章 水煤浆	123
第一节 水煤浆的发展现状与特点	123
第二节 煤的成浆性和水煤浆的制备	127
第三节 水煤浆的基本特性	132
第四节 水煤浆的燃烧组织	147
参考文献	152
第五章 高效低污染煤燃烧技术和发电技术	153
第一节 高效低污染超临界、超超临界发电技术	153
第二节 循环流化床燃烧技术	165
第三节 燃气—蒸汽联合循环发电技术	174
第四节 整体煤气化联合循环 (IGCC)	180
第五节 流化床燃烧联合循环	186
第六节 燃料电池用于洁净煤发电	190
参考文献	206

第六章 煤燃烧中氮氧化物的生成机理及排放控制技术	207
第一节 概述	207
第二节 NO_x 和 N_2O 的生成机理	207
第三节 低 NO_x 燃烧技术	212
第四节 O_2/CO_2 与化学链燃烧技术	220
第五节 烟气脱硝技术	224
参考文献	237
第七章 硫氧化物生成机理及控制排放技术	238
第一节 SO_x 排放标准	238
第二节 煤燃烧中 SO_x 的生成机理	244
第三节 煤燃烧中脱硫的方法和基本原理	250
第四节 烟气脱硫的方法和基本原理	256
参考文献	301



第一章 概 论

第一节 中国及世界能源现状

能源是支持社会发展和经济增长的主要物质基础和生产要素，充足稳定的能源供应不仅为工业提供动力，为农业提供保障，推动技术进步，保障国民经济的发展，而且还促进人民生活质量的改善，创造众多就业机会，促进人类社会文明和进步发展。而世界经济的快速发展，又促进了能源开发利用的技术水平提高，两者既相互促进，又相互制约。

能源可分为一次能源和二次能源。一次能源指现存于自然界的能源，包括化石能源（煤炭、石油、天然气等）、核燃料、可再生能源（水能、太阳能、风能、地热、生物质能、海洋能、潮汐能等）等。二次能源是指将一次能源转化而成的能源产品，如电力、煤气、焦炭、柴油、汽油、液化石油气等。

当今世界一次能源生产消费以化石能源为主导，可再生能源和新能源为补充。化石能源占一次能源生产消费的90%以上。化石能源消费中又以煤炭、石油、天然气为主。2002年全世界一次能源消费结构中，石油占37.45%；煤炭占25.50%；天然气占24.26%；核能占6.30%；水电占6.30%。随着世界经济的不断发展，谋求经济、社会、资源、环境和谐友好和可持续发展已成为人们的共同心愿，一次能源的洁净高效开发利用和可再生能源开发利用已逐步成为一种发展趋势。

中国一次能源消费结构与世界的情况有很大的不同，2002年中国一次能源消费结构为煤炭占66.1%；石油占23.40%；天然气占2.70%；核能和水电分别占0.70%和7.10%。预计到2020年中国一次能源消费为煤炭57.80%；石油20.90%；天然气8.20%；水电9.70%；核能3%；新能源0.40%。

一、世界能源现状

表1-1根据《世界能源综述》2000年资料，列出了世界一次能源储量和资源量。从表中可以看出世界化石能源总储量为1659.76Gtoe（10⁹t油当量）；资源量为3404.29Gtoe。其中煤炭的资源量和储量是最为丰富的化石能源。

表 1-1 世界一次能源储量和资源量 (Gtoe)

能源类型		储 量	资 源 量	其他埋藏
石 油	常 规	145.54	144.55	—
	非常规	182.42	334.95	1785.71
天 然 气	常 规	140.54	278.12	—
	非常规	191.40	257.19	380.95
	水合物	—	—	18571.43
煤 炭		999.86	2389.48	2880.95
合 计		1659.76	3404.29	2361.04

根据英国石油公司 BP 发布的《2002 年世界能源统计年评》报告整理结果（见表 1-2）数据显示，世界石油可采储量为 142.70Gt，折合 216.9Gtoe（ 10^9 t 标准煤）；天然气可采储量为 1557800 亿 m^3 ，折合 210.30Gtoe；煤炭可采储量为 984.45Gt，折合 703.20Gtoe。石油、天然气和煤炭的采储比分别为 40.6、60.8 和 204。石油、天然气至今探明的经济可采储量远远低于煤炭。

表 1-2 2002 年世界一次能源储量前 10 位的国家（年末可采储量）

石油 (Mt)				天然气 (10^8m^3)				煤炭 (Mt)			
国家名	储量	储采比	占总量 的比例/ %	国家名	储量	储采比	占总量 的比例/ %	国家名	储量	储采比	占总量 的比例/ %
沙特	36000	86.0	25.23	俄罗斯	475700	81.2	30.54	美国	249990	252	25.41
伊拉克	15200	>100	10.65	伊朗	230000	>100	14.76	俄罗斯	157010	>100	15.95
科威特	13300	>100	9.32	卡塔尔	144000	>100	9.24	中国	114500	82	11.63
阿联酋	13000	>100	9.11	沙特	63600	>100	4.08	印度	84400	235	8.57
伊朗	12300	73.8	8.62	阿联酋	60100	>100	3.86	澳大利亚	82090	243	8.34
委内瑞拉	11200	74.0	7.85	美国	51900	9.6	3.33	德国	66000	317	6.70
俄罗斯	8200	2109	5.74	阿尔及利亚	45200	56.3	2.90	南非	49510	221	5.03
利比亚	3800	59.4	2.66	委内瑞拉	41900	>100	2.69	乌克兰	34150	412	3.47
美国	3800	10.8	2.66	尼日利亚	35100	>100	2.25	哈萨克斯坦	34000	464	3.45
尼日利亚	3200	32.8	2.24	伊拉克	31100	>100	2.00	波兰	22160	138	2.25
中国	2500	14.8	1.75	中国	15100	46.3	0.79	世界总计	984450	204	100
世界总计	142700	40.6	100	世界总计	1557800	60.8	100				

表 1-3 为 2001 年和 2002 年世界前十位国家和一些地区一次能源消费量和全世界一次能源消费的总量。图 1-1 和图 1-2 所示为世界能源消费结构。可以看出 2002 年全球 94.05 亿 t 油当量的一次能源总消费中，矿物燃料消费占总消费量的 87.21%，其中石油、天然气、煤炭的消费分别占消费的 37.45%、25.50%和 24.26%。石油消费占第一位，其次是煤炭和天然气。

表 1-3 2001 年和 2002 年世界前十位国家和一些地区一次能源消费量和

全世界一次能源消费总量

(Mtoe)

年 消 费 量	年 份											
	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2002	2002	2002	2002	2002	2002
国 家	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计
美国	896.1	578.2	545.9	183.2	47.6	2250.9	894.3	600.7	553.8	185.8	58.2	2293.0
加拿大	88.7	74.5	30.3	17.4	75.0	285.9	89.7	72.6	30.7	17.0	78.6	288.7
全北美	1068.2	687.8	583.0	202.6	129.0	2670.5	1064.9	711.2	591.5	205.0	142.4	2715.4
南美与中美	218.8	88.0	19.5	5.1	117.2	448.7	214.8	88.2	17.8	4.7	122.7	448.2
法国	95.5	37.7	11.6	95.5	17.9	258.2	92.8	38.5	12.7	98.7	15.0	258.0

续表

年 消 费 量 国 家	年 份											
	2001	2001	2001	2001	2001	2001	2002	2002	2002	2002	2002	2002
	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计	石油	天然气	煤炭	核能	水电	总计
德国	131.6	74.6	85.0	38.7	5.8	335.7	127.2	74.3	84.6	37.3	5.9	329.4
俄罗斯	122.3	335.4	110.2	31.0	39.8	638.7	122.9	349.6	98.5	32.0	37.2	640.2
英国	77.3	86.7	40.3	20.4	1.5	226.0	77.2	85.1	36.5	19.9	1.7	220.3
全欧洲和欧亚大陆地区	930.5	920.7	523.3	276.1	194.9	2845.3	925.2	939.5	506.1	280.0	178.9	2829.5
全中东	206.4	180.6	8.0	—	1.5	396.5	207.4	185.1	8.4	—	1.9	403.1
全非洲	116.5	58.7	89.2	2.6	17.9	284.7	118.6	60.7	90.6	2.9	18.5	291.0
中国	232.2	25.0	518.7	4.0	53.7	833.6	245.7	27.0	663.4	5.9	55.8	997.8
印度	96.7	24.5	172.5	4.3	16.3	314.2	97.7	25.4	180.8	4.4	16.9	325.1
日本	247.5	71.1	103.0	72.7	20.4	514.8	242.6	69.7	105.3	71.3	20.5	509.4
韩国	103.1	20.8	45.7	25.4	0.9	195.9	105.0	23.6	49.1	27.0	1.2	205.8
全亚太地区	976.7	283.7	1020.1	114.6	124.2	2519.6	991.6	297.3	1183.5	118.0	127.7	2717.8
全世界	3517.1	2219.5	2243.1	601.0	584.7	9165.3	3522.5	2282.0	2397.9	610.6	592.1	9405.0

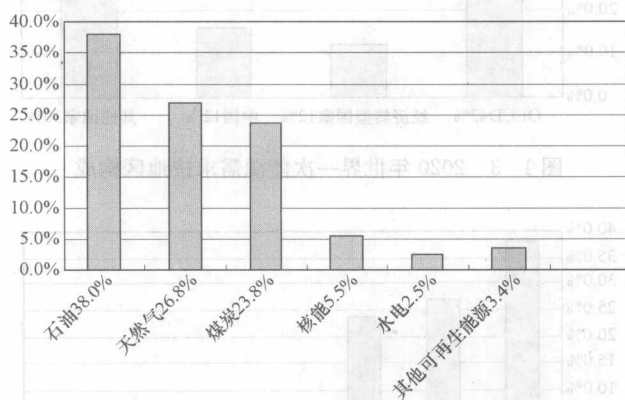


图 1-1 2002 年世界一次能源消费结构

从全球能源状况来看,化石能源的储量还是比较丰富的,但分布极不均匀,各国各地区差别很大。前十位国家集中了世界煤炭可采储量的 90%、石油可采储量的 84%和天然气可采储量的 76%。在石油、煤炭、天然气可采储量中,煤炭的可采储量远大于石油和天然气。

国际能源机构 IEA 根据世界人口的年增长率、GDP 的年增长率进行了 1998、2000、2001 和 2002 年世界能源评述。预计今后 20 年中世界一次能源总需求以每年近 2%的速度递增,到 2020 年将比 2000 年增加约 49%,一次能源需求总量达到 130 亿 t 标准油以上,其消费结构预测结果如图 1-3 和图 1-4 所示。2020 年世界一次能源消费中化石能源供应总量维持在 87%以上,其中石油约占总量的 38.0%;天然气约占总量的 26.8%;煤炭约占总量的

23.8%。石油消费以平均每年 1.6% 的速度增长, 天然气消费以平均每年 2.7% 的速度增长, 煤炭消费以平均每年 1.4% 的速度增长。

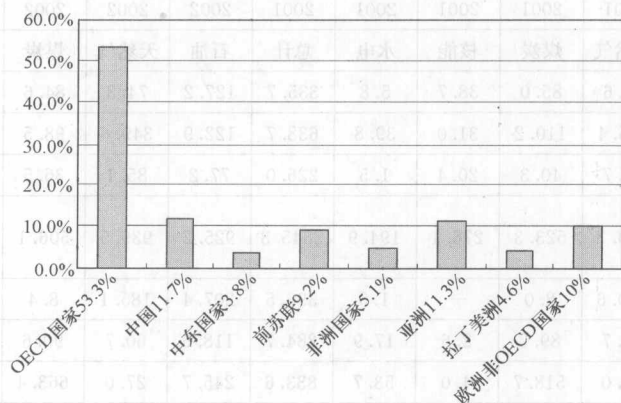


图 1-2 2000 年按地区一次能源消费比例, 总量 9963Mtoc

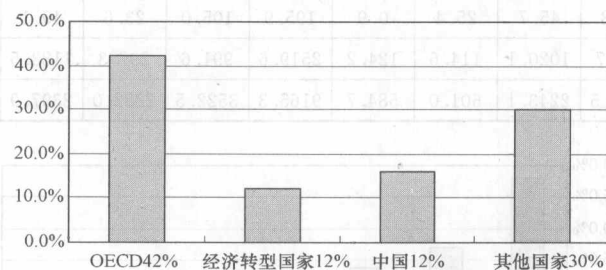


图 1-3 2020 年世界一次能源需求按地区构成

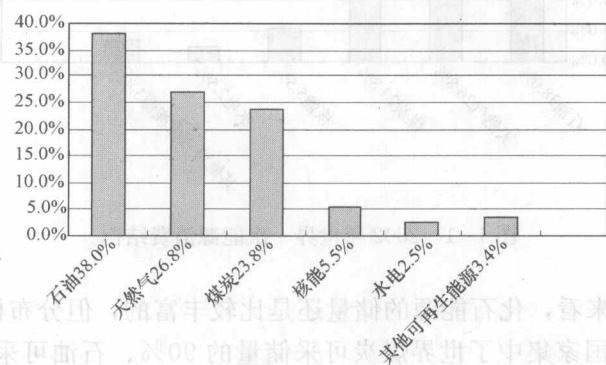


图 1-4 2020 年世界一次能源消费结构

综合分析研究结果表明, 到 2020 年, 尽管可再生能源利用技术会有长足的进展, 但常规化石能源仍将是全球的主要能源。到 21 世纪中叶, 如果人们无法找到大规模的替代能源的话, 人类又必须重新依赖于煤炭作为最主要的能源。

二、中国能源发展现状

据统计, 我国常规能源资源总量为 4.05 万亿 t 标准煤, 其中原煤 5.5 万亿 t, 占

89.30%；原油 940 亿 t，占 3.50%；天然气 38.14 万亿 m^3 ，占 1.30%；水能 5.92 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，占 5.90%。已探明能源资源总量为 8231 亿 t 标准煤，其构成为原煤 87.40%；原油 2.80%；天然气 0.30%；水能 9.50%。探明可经济开发的剩余可采总量为 1392 亿 t 标准煤，其中原煤 1145 亿 t (818.5 亿 t 标准煤)，占 58.8%；原油 25~36 亿 t，占 2.56~3.7%；天然气 1.37 万亿 m^3 ，占 1.30%；水能 1.27 万亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，占 36.50%。

表 1-4 列出了世界及中国经济可采能源资源及人均资源占有量和人均能源消费量以及能源强度、 CO_2 排放的基本状况。表 1-5 列出 1981~2002 年我国能源生产和消费的基本情况。从表 1-1~表 1-5 可以看出，我国能源结构、资源、生产、消费与世界其他国家有显著的不同，其特点是探明可经济开发的剩余储量比均低于世界平均值，人均资源占有量均低于世界平均值，能耗远高于世界平均值。煤炭在中国能源生产和消费中居绝对优势的地位，水能次之，油、气较少。虽然我国水资源和煤炭资源居世界前列，但人均资源拥有量很低。2000 年，中国人均煤炭可采储量为 89.8t；人均石油可采储量 2.6t；人均天然气可采储量 1074m^3 ，分别为世界平均水平的 55.20%、11%和 4.2%。按人均资源拥有值来看，只有煤炭是唯一有竞争力并且能满足总需求的能源资源。

表 1-4 世界及中国经济可采能源资源基本状况 (2000 年数据)

		世 界	中 国	美 国	OECD
人口/ 10^8		60.57	12.62	2.82	11.25
经济可采化石燃料储量	煤 (10^8t)	9842	1145	2466	4474
	人均 (t/人)	162.5	89.8	876.4	399.2
	石油 (10^8t)	1421	33	37	112
	人均 (t/人)	23.5	2.6	13.1	10.0
	天然气 (Tm^3)	150.19	1.37	4.74	13.43
	人均 ($\text{m}^3/\text{人}$)	24796	1074	16843	11991
可再生能源	水资源 (10^8kW)	15.96	2.75		
	人均 (kW)	0.26	0.22		
	风能 (10^8kW)	96	2.5		
	人均 (kW)	1.58	0.2		
	生物质 (10^8tce)	65	7		
能源消费	人均 (kW)	1.07	0.55		
	一次能源 (10^8tce)	125.03	11.496	32.55	73.9
	人均 (kgce/人)	2064	901	11567	6598
	煤 (10^8t)	3123	6.86	8.06	15.81
	人均 (kgce/人)	515.6	537.8	2863.7	1411
	石油 (10^8t)	3504	2.27	8.97	21.85
	人均 (kgce/人)	578.4	177.9	3188.8	1950.6
	天然气 (10^8m^3)	24046	248	6544	13199
发电情况	人均 ($\text{m}^3/\text{人}$)	397	19	2325	1178
	发电量 ($\text{TkW} \cdot \text{h}$)	15.36	1.354	4.004	9.629
	人均 ($\text{kW} \cdot \text{h}/\text{人}$)	2536	1062	14249	8597
	能源强度 (tce/MUSD)	377	1274	364	214
	CO_2 排放量 (Mt-C)	6422	881	1580	1470

表 1-5 我国能源生产与消费情况

年 份		1981	1985	1990	1995	2000	2001	2002
煤炭 (10 ⁸ t)	生产	6.165	8.723	10.793	12.922	9.992	10.897	13.804
	消费	6.208	8.73	10.672	13.438	9.094	10.374	13.268
石油 (10 ⁸ t)	生产	1.012	1.249	1.383	1.49	1.626	1.648	1.67
	消费	0.848	0.903	1.103	1.607	2.301	2.322	2.457
天然气 (10 ⁸ m ³)	生产	119	120	142	176	272	303	346.6
	消费	115	128	147	177	245	278	301
水能 (10 ⁸ kW·h)	消费	635	924	1267	1886	2431	2375	2880

可再生能源的现有资料显示，我国水资源的人均占有量接近世界平均值，太阳能比较丰富，约 2/3 国土太阳能年总辐射量大于 0.6MJ/m²。生物质能的总量占世界总量的 10.7%，人均占有量为世界人均值的 1/2。这些资源的挖掘和利用，将对缓解我国能源紧缺、促进经济和社会发展有重大的作用。

中国一次能源消费结构与世界相比，仍然存在很大的区别。2002 年能源消费中，煤炭占一次能源消费的比例高达 66.5%；石油占 23.4%；天然气占 2.7%；水电占 5.6%；核电占 0.6%。

表 1-6 是 2000~2020 年中国一次能源需求预测，可以看出中国经济的高速度增长，使能源消费速度同比例增长，而在能源消费中煤炭仍然在一次能源消费中占主要地位。

表 1-6 中国 2000~2020 年一次能源需求预测

	2000 年	2010 年			2020 年		
		能源所	IEA	EIA	能源所	IEA	EIA
一次能源总计 (Mtce)	1303	1860~2130	1860	1985	2470~3280	2440	3040
煤炭 (Mt)	1206	1205~1425	1320	1630	2050~2900	1660	2350
石油 (Mt)	224.4	332~377	336	340	610~980	455	525
天然气 (10 ⁸ m ³)	245.0	810~865	610	790	1450~1650	1090	1810
一次电力 (Mtce)	88.2	63~80	80	230	110~145	130	370
其中核电 (TW·h)	16.7	42~102	90	75	110~260	163	130

注 1. IEA、EIA 预测为基础方案；

2. 一次电力包括核电、水电以及火电等。

1. 石油生产和消费

中国石油产量从 1995 年起，以年均 1.67% 的速度增长，原油产量到 2002 年已达 1.67 亿 t，而消费了 2.457 亿 t，石油依靠进口的比例越来越高，图 1-5 是中国历年石油生产、消费和进口量。根据 IEA 国际能源机构和 EIA 美国能源信息署和国家计委能源所预测，到 2020 年我国石油进口的依存度达 59%~72%，石油净进口量将达到 2.4~4.25 亿 t。可以看

出我国石油消费和生产中存在供需严重不平衡的一高一低问题,而这一局面会持续很长时间。石油安全问题应引起我们的高度重视。

2. 天然气生产和消费

中国天然气产量近年有较大的发展,从1995年的179.47亿 m^3 增加到2002年的326亿 m^3 ,年增长速度达到8.67%。图1-6为中国天然气历年生产量。2002年中国天然气消费总量为301亿 m^3 。根据2000年天然气消费结构,约有82.4%用于工业。具体消费结构为:用于化工生产36.9%;油气田自用29.7%;民用13.2%;电力2.6%;交通运输2.4%;冶金建材1.9%;机械制造3.0%。



图 1-5 中国历年石油生产、消费和净进口量

国内天然气生产主要是四川省,东北大庆、辽河油田,西北鄂尔多斯与陕甘宁盆地的长庆气田。其中四川省的产气量占全国产气量的1/3左右,东北大庆、辽河油田产气量占全国产气量的17%,长庆气田的产气量约占全国产气量的10%。在天然气消费中遇到的主要问题是,天然气资源远离消费市场,供需输送距离长,气田开发和输送成本高。但随着天然气开采输送技术的进步,国内主要输气管线的建设,今后天然气的消费量会有较大发展的。按国家计委能源所和国防能源机构预测,到2020年中国天然气消费总量会达到1450~1650亿 m^3 。

3. 煤炭生产和消费

根据资料显示,中国煤炭资源总量为55700亿t,但探明煤炭储量为10421.35亿t,探明可经济开发的剩余储量为1145亿t。在探明储量中,烟煤占75%,无烟煤占12%,褐煤占13%。资源主要分布在华北和西北地区,分别为48.95%和29.98%,总计达78.93%。

表1-7为中国1980~2000年各行业煤炭消费情况,从表1-5、表1-7中显示的数据看出,中国煤炭生产和消费从20世纪80年代初的6.165亿t增加到2002年的13.8亿t。20

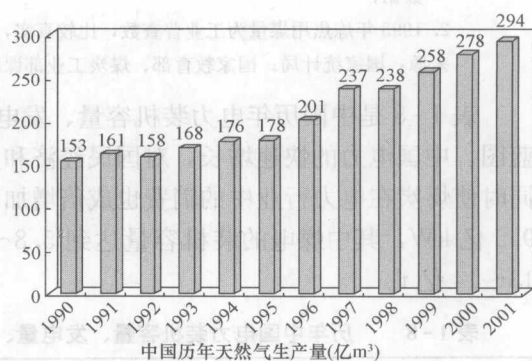


图 1-6 中国历年天然气生产量

年间煤炭生产和消费增加了一倍，达到世界煤炭消费总量的 1/4。从消费结构看，以工业消费为主，主要集中在电力、建材、冶金和化工四个耗煤行业。到 2002 年用于发电和供热的煤（发电和热电联产）达 7.2 亿 t，占煤炭消费总量的 54.7%；建材用煤 1.6 亿 t，占 12.6%；冶金用煤 1.2 亿 t，占 9.2%；化工用煤 0.78 亿 t，占 5.9%。按直接用途，2002 年除发电用煤为第一消费用量外，工业锅炉和工业窑炉用煤约为 3.5~3.8 亿 t，约占全国煤炭消费的 1/3，加上全国居民生活用煤 0.78 亿 t，动力用煤已达到煤炭消费总量的 85% 左右。

表 1-7 中国 1980~2000 年分部门煤炭消费

煤炭消费 \ 年份	1980	1985	1990	1995	1997	1998	1999	2000
发电 (%)	18.0	20.1	25.8	34.2	37.4	38.2	40.5	43.9
电厂供热 (%)	2.8	1.8	2.8	4.5	4.7	4.9	5.1	5.4
炼焦 (%)	10.9	8.9	10.1	14.2	14.7	12.1	11.8	12.0
农药 (%)	2.5	2.7	2.0	1.4	1.4	1.5	1.4	1.3
工业 (%)	41.1	41.7	38.5	32.0	30.0	34.0	32.2	28.9
运输 (%)	3.2	2.8	2.0	1.0	1.1	1.1	1.0	0.9
民用、商业及其他 (%)	21.5	22.0	18.7	12.7	10.0	8.2	8.0	7.6
总计 (Mt)	610.1	816.0	1055.2	1299.2	1310.7	1294.9	1263.7	1245.4
百分比 (%)	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

注 1. 1995~1997 年煤炭总消费量采用国家计委和煤炭工业部课题组“全国煤炭消费状况调查和预测研究”报告数据；

2. 1995 年炼焦用煤量为工业普查数，比较真实，此前的统计少算或漏计了土焦生产用煤，数字偏低。

来源：国家统计局；国家教育部、煤炭工业部课题组“全国煤炭消费状况调查和预测研究”，1999。

表 1-8 是中国历年电力装机容量、发电量、发电煤炭消费量以及到 2020 年电力发展的蓝图。中国电力的快速增长，对国民经济和人民生活水平的提高起到了积极而重要的作用。同时使煤炭在电力行业中的消费也成倍增加。预计到 2020 年，中国电力装机容量将达到 9~9.5 亿 kW，其中煤电的装机容量达到 5.8~6.0 亿 kW，届时仅煤电消耗的煤炭量将达到 13~14 亿 t。

表 1-8 历年中国电力装机容量、发电量、发电用煤以及到 2020 年电源发展预测

年份		1949	1957	1965	1970	1980	1990	1995	2000	2001	2002	2005	2010	2020
项目	装机容量 (10 ⁸ kW)	0.0185	—	—	—	—	1.37	2.17	3.19	3.38	3.56	4.30	5.80	9.0~9.5
	装机总容量	—	—	—	—	—	1.02	1.63	2.37	—	2.65	3.15	4.00	6.00
	煤电装机容量	—	—	—	—	—	0.36	0.52	0.79	0.83	0.86	—	—	2.00
	水电装机容量	—	—	—	—	—	—	0.021	0.021	0.021	0.047	—	—	—

续表

年份		1949	1957	1965	1970	1980	1990	1995	2000	2001	2002	2005	2010	2020
项 目														
发电 量 (TW · h)	总发 电量	43.1 (10 ⁸ kW·h)	193.4 (10 ⁸ kW·h)	676 (10 ⁸ kW·h)	11.56	300.63	621.32	—	1368.5	1483.8	1654.2	2200	2758	3900~ 4290
	煤电	—	—	—	—	—	—	—	1107	—	1350	—	2139	2860~ 3217
	水电	—	—	—	—	—	126.35	—	243.1	261.1	274.6	—	—	700
	核电	—	—	—	—	—	—	—	14.8	17.5	26.5	—	—	260
	油电	—	—	—	—	—	—	—	46	—	—	—	18	11
	气电	—	—	—	—	—	—	—	6	—	—	—	107	161
	新能源	—	—	—	—	—	—	—	0	—	—	—	5	19
发电用煤量(10 ⁸ t)		—	—	—	—	1.10	2.72	4.44	5.5	—	7.2	—	10.9	13.5~ 15.1
供热用煤(10 ⁸ t)		—	—	—	—	—	—	—	0.64	—	0.74	—	1.02	1.10

按照“优先发展水电、加快发展核电、优化发展煤电、积极发展新能源发电、适宜发展气电”的原则，预计 2010、2020 年燃煤机组装机仍将分别达到 4.19 亿 kW 和 5.77 亿 kW，占全国总装机容量的比例分别为 66.6% 和 62.1%。今后 20 年，煤电在中国电源结构中的比例会有所下降，煤炭发电的技术将有根本性的提高，但以煤为主的电源结构特点不会改变。用于发电和供热的煤炭绝对数量会有较大的增加。

第二节 世界及中国能源经济

表 1-9 是中国及发达国家能源消费与经济性比较，按 1995 年美元值计算，中国人均 GDP 是 824 美元；按购买力平价计算人均 GDP 是 3817 美元，两种方法计算美国人均 GDP 分别为 31996 美元和 32600 美元，是中国人均 GDP 的 40 倍和 8.54 倍（按 3P 计算）。美国人均一次能源消费是中国的 11 倍，人均发电量是中国的 12.6 倍，但每百万美元 GDP 的能耗却是中国的 28.5%，即使不发达国家印度单位 GDP 的能耗也比中国低 30% 左右。这反映出中国能源生产和消费中存在的问题之一就是能源有效利用率低。国际上通用 GDP 的能耗强度作为衡量能源效率的宏观指标。表 1-9 中统计的数据说明我国与世界先进水平相比还存在较大的差距，单位产值能耗是世界平均水平的 2~3 倍。而我国能源系统的总效率更低，仅为 10% 左右，不到发达国家的一半，煤炭利用的总效率只有 6% 左右。这意味着能源可采量经开采、加工、转换、储运、分配到终端利用，有 90% 左右被损失和浪费了。其中开采效率为 32% 左右，中间环节（加工、转换和储运）效率 70%，终端利用效率为 41%。中间环节效率和终端利用效率的乘积通常称为能源效率。我国能源效率仅有 29%，比国际先进水平约低 10%。

能源消费中存在的另一问题是能源消费行业。世界终端能源消费中工业占 35.4%，交通占 28.3%；而我国能源消费部门构成是工业大于 70%，是世界平均水平的一倍，交通运

输仅占 8.8%，又远低于世界平均值，这一高一低的能源消费构成造成能源利用效率更低。

表 1-9 中国及世界部分国家能源消费与经济性

国家		中国	美 国	欧 盟	日 本	印 度	俄罗斯
项目		2000/2003					
GDP	GDP (按 1995 年美元值) (10 ¹² 美元)	1.04/1.41	9.009	9.756	5.688	0.482	0.358
	人均 GDP (美元/人)	824/—	31996	25946	44830	474	2456
	按 3P 计 GDP (10 ¹² 美元)	4.818/—	9.194	8.531	3.263	2.294	1.134
一次 能源 消费 情况	煤占一次能源中的比例 ^① (%)	66.5	24.2	—	20.7	55.6	15.4
	石油占一次能源中的比例 ^① (%)	24.6	39.0	—	47.6	30.0	17.2
	天然气占一次能源中的比例 ^① (%)	2.7	26.2	—	13.7	7.8	54.6
	水电 ^① (%)	5.6	2.5	—	4.0	5.2	5.8
	核电 ^① (%)	0.6	8.1	—	14	1.4	5.0
	一次能源消费总量 ^① (10 ⁸ tce)	13.26	32.86	20.86	7.50	4.29	8.67
	人均一次能源消费量 (tce/人)	1.05/—	11.65	5.55	5.90	0.42	—
	发电情况						
发 电 情 况	总发电量 (10 ¹² kW·h)	1.355/1.91	4.004	2.572	1.082	0.542	0.874
	人均发电量 (kW·h/人)	1063/—	13474	6840	7415	499	6030
	总装机容量 (10 ⁸ kW)	3.19/3.845	—	—	—	—	—
能 耗	其中核电装机容量 (GW)	2.2/—	98.08	—	43.26	25.48	19.85
	单位 GDP 能耗 (tce/MUSD)	1274/—	364	214	131	889	2422
	CO ₂ 总排放量 (Mt-c) ^②	881	1580	879	328	266	654
排 放	人均排放量 (t-c/人)	0.698/—	5.61	2.34	2.58	0.262	—
	人口 (10 ⁸ 人)	12.62/—	2.82	3.76	1.27	10.16	1.46

① 为 2002 年数据。
② 为 2001 年数据。

经济的快速增长、能源效率低下、能源消费行业比重不合理等因素致使我国能源需求增长速度过快，出现煤炭、石油和电力同时紧缺的局面。从长远看，能源的相对短缺将是伴随我国经济社会发展整个过程的长期问题。

第三节 中国能源生产消费中存在的问题和带来的环境压力

从前述的数据可以获得以下结论，第一是能源资源不足，分布不平衡。中国能源资源总量虽然比较丰富，但人均资源占有量相对较少，不仅石油、天然气资源短缺，总量居世界前列的煤炭资源，人均探明可采储量只有 89.8t，仅为世界人均值的一半。

第二是能源资源地域分布不平衡，资源与区域经济发展矛盾突出。总体上讲，是北多南少、西富东贫，能源品种的分布是：煤炭资源的近 90%分布在西部和北部，石油资源的 85%分布在长江以北，水资源的 2/3 集中在西南。而经济发达的东部和中部地区资源贫瘠，长期以来是北煤南运、西煤东运、西电东送、西气东输。其结果是综合能源利用的效率低，

经济性差,给人类带来的运输和环境压力大。

第三是能源生产消费结构与世界其他国家显著不同。煤炭在中国能源资源中占绝对优势地位,石油、天然气资源短缺。大量的煤炭开采、运输、消费带来严重的环境问题。而石油消费的高速增长,进口石油的依存度提高,预计到2020年石油的海外依存度将达到50%以上,进口量将达到2亿t以上。石油供应不仅影响到国家经济的发展,还涉及到国家政治和安全问题。

第四是能源效率低下,虽然中国节能工作取得了巨大的成绩,平均每年节能率为5%,但平均能源效率与世界先进水平相比仍有较大的差距。2000年单位GDP能耗是世界水平的3.4倍,美国的3.5倍,日本的9.7倍。2001年平均供电煤耗为360gce/kW·h,比国外同期先进水平高44gce/kW·h。全国工业锅炉年耗煤为3.5~3.8亿t,但平均效率仅有60%左右,比国际水平低20个百分点。主要耗能的工业产品单位能耗平均比国际先进水平高30%~50%。民用直接燃煤设备效率更低。

第五是能源环境问题。我国每年消耗十几亿吨煤,其利用途径十分广泛,在煤的开采、加工、运输、使用中会对环境产生破坏并产生各种各样的污染物,图1-7是煤从开采到终端使用过程的一个典型例子,在这一过程中的各个环节都可能产生各种环境问题。对于中国,由于大规模地使用煤炭,这一问题就更为突出。

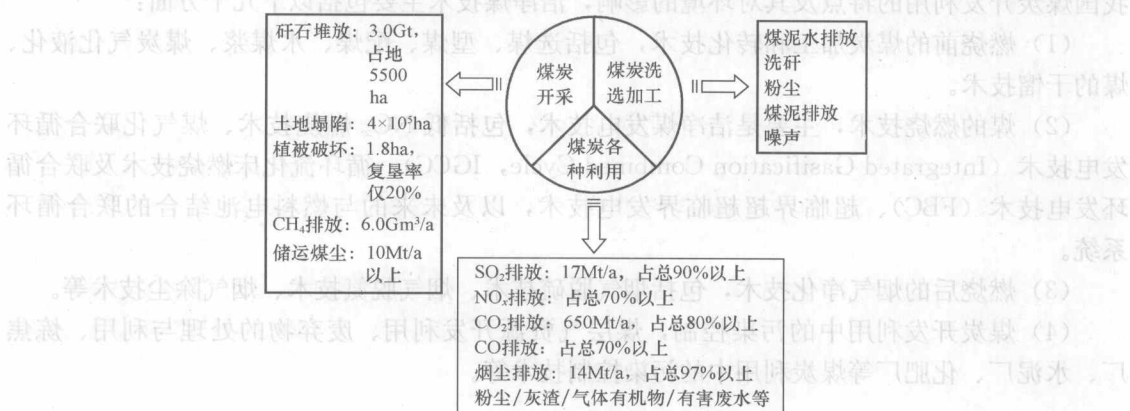


图 1-7 煤炭开采、运输、加工、利用中引起的环境污染

大量的煤炭生产和消费带来严重的环境污染问题。近年来,国家加强对重点污染源的综合治理,要求新建的燃煤含硫量大于1%的电厂必须安装脱硫装置并相继制定了GB 13271—2003《锅炉大气污染排放标准》、GB 13223—2003《火电厂大气污染排放标准》等标准,使全国SO₂排放总量呈明显下降趋势,已由1995年的2370万t下降至2002年的1927t,如图1-8所示,但2002年仍有62.3%的城市环境空气SO₂年平均浓度超过国家环境空气质量二级标

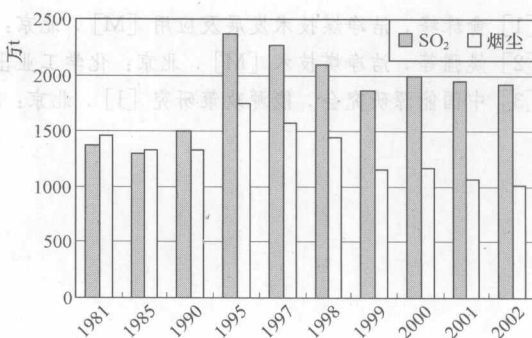


图 1-8 我国历年 SO₂、烟尘排放量