

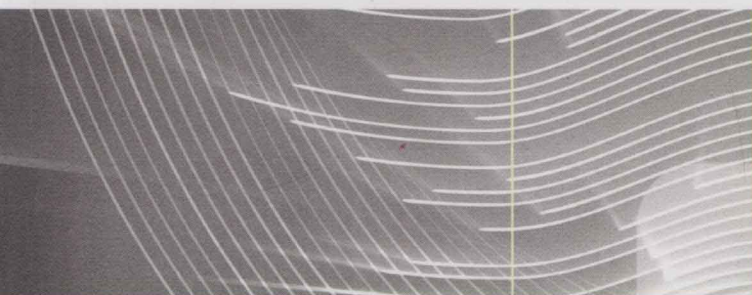
普通高等教育“十二五”规划教材

能源环境技术

天津大学
华北电力大学
同济大学

杨昭
杨勇平
张旭

主编



普通高等教育“十二五”规划教材

能源环境技术

主 编	杨 昭	杨勇平	张 旭		
参 编	史 琳	安青松	赵 亮	赵 军	
	朱家玲	陈冠益	何伯述		
主 审	马一太				

机械工业出版社

前 言

能源和环境的内容写成一本教材，在教学上应具有什么特色？它不应该是能源科学与环境科学简单的叠加，而应是两者的有机结合。首先“能源”不只是能源的开采，尽管能源开采中也产生了很多环境问题。“能源”泛指能量的开采、运输、转换、利用和回收的各环节及全过程，而在这个过程中能量数量和品位的利用水平，可采取的技术和评价方法，以及引起的环境问题是本教材的重点。

因为能量不可再生，在转换和利用过程中会不断降级，所以减少能量的转换次数，充分利用能量的做功能力和能质水平，真正实现能量的梯级利用是本教材涉及节能技术和评价方法的核心指导思想。在对能源利用效率的理论评价方面，焓分析法具有重要地位，但在实际应用上该分析法并不像第一定律能量平衡那样容易操作和广泛应用，原因在于焓参数与环境温度的依赖性。本教材讨论了焓分析法的有效性和局限性及第二定律效率的普遍性，给出了生命周期分析法的概念及方法并通过实例加以说明。

绝大多数能源转换和利用都是化石燃料燃烧，即发电厂、工业锅炉和采暖锅炉，污染主要存在于燃烧产物之中，如 SO_2 、 NO_x 、 CO_2 等。本教材在采用最新统计分析全球能源资源和能源消耗对环境影响的基础上，对全球环境质量标准及评价方法进行了较为系统的分析介绍，特别对 CO_2 的减排及处理进行了分析。其中，引入了“未来电力计划”、“碳税”和“碳交易”的概念。

因现代建筑能源及生产生活中广泛使用的人工合成制冷剂会引起大气中臭氧层的破坏和温室效应，所以工质的 ODP 及 GWP 问题也属能量转换和利用过程中引起的环境问题。本教材结合最新研究成果用相当的篇幅分析了全球该领域最新状况及发展态势。

当前可再生能源是化石能源的重要补充，其开发和应用必然涉及节能和环境问题，本教材简明介绍了该领域的相关技术及涉及的环境问题，便于学生对此有宏观的了解。

现有的环境科学书籍中，采用广义热力学的观点，特别是熵增原理来分析环境污染本质的较少。其实污染环境是熵增过程的热力学原理不难预见，污染后治理的代价是巨大的，“先污染，后治理”基本是不可能的。本教材力图让学生明白从源头治理的原则，应首先将可能的污染源从能源中分离出来，使燃烧产物中的污染物降至最小。

本教材的另一观点是能量的不易储蓄性。电能、热（冷）能虽然可以通过各种装置储存，但成本高，并因能量的蓄入和导出过程的不可逆性，所有蓄能系统，如冰蓄冷、抽水蓄能电站、各种相变材料蓄能系统等，都是非节能系统，是为解决负荷严重不均衡才可以发展的技术，如果大量使用，只会加速能源的消耗并增加环境污染。开发各种能量和转换中的“容量控制”，进行“按需供应”，才符合可持续发展的政策。

环境和生态科学对能源利用有着重要的指导意义，能源要来自自然界，用人工合成的方式生产地球上不存在的“未来能源”是不可取的。本教材在第 6 章和第 8 章通过耗散结构与生态环境理论的结合将能源与环境问题联系起来，并对能源与环境的可持续发展概念的形成和发展，涉及的热力学原理进行了分析，使学生进一步理解人口、资源和环境与可持续发

展之间的关系。

本教材的第1章、第6章、第7章及第4章4.1由天津大学杨昭教授编写，第2章由华北电力大学杨勇平教授编写，第3章3.1、3.5、3.6由西安交通大学赵亮教授编写，第3章3.2由天津大学赵军教授编写，第3章3.3由天津大学朱家玲教授编写，第3章3.4由天津大学陈冠益教授编写，第4章4.2及第5章由同济大学张旭教授编写，第4章4.3~4.5由北京交通大学何伯述教授编写，第8章由清华大学史琳教授及安青松编写。全书由天津大学的马一太教授主审，马一太教授对全书进行了认真的审核，提出了许多宝贵的意见。天津大学的尹海蛟对全书进行了大量的深入细致的修改、整理等工作；天津大学的朱恩龙、陈爱强、吴曦等也参加了整理工作，在此一并表示感谢！

本教材可供高等院校能源动力、环境工程和化工等相关专业的本科生、研究生使用，同时也可从事能源与环境问题研究及相关政策制定的人士提供参考。

由于编者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

目 录

前言	
第1章 能源环境概论	1
1.1 能源的结构及分类	1
1.2 能源技术的结构及分类	2
1.3 能源资源与消耗	4
1.4 环境质量及污染控制	11
思考题	17
参考文献	17
第2章 能源有效利用的评价方法	19
2.1 热力学原理及节能潜力	19
2.2 常用能量系统的用能评价及比较	29
2.3 焓分析法的有效性和局限性	32
2.4 生命周期分析法	36
2.5 实例分析	38
思考题	42
参考文献	42
第3章 新能源利用及发展现状	43
3.1 风能利用新技术	43
3.2 太阳能利用新技术	55
3.3 地热能利用新技术	72
3.4 生物质能利用新技术	83
3.5 海洋能利用新技术	106
3.6 其他可再生能源利用新技术	121
思考题	132
参考文献	132
第4章 节能新技术	137
4.1 制冷与热泵节能技术	137
4.2 建筑节能技术	161
4.3 蓄能技术及余热利用	174
4.4 动力循环系统节能技术	187
4.5 节能的技术经济评价	206
思考题	213
参考文献	214
第5章 环境质量标准及评价方法	217
5.1 环境质量问题	217
5.2 环境质量评价	223
5.3 环境标准	233
5.4 全球环境标准体系及评价	239
5.5 我国的环境标准体系及评价	248
思考题	253
参考文献	253
第6章 能量系统与生态环境	254
6.1 耗散结构与环境生态	254
6.2 地球的能量环境	258
6.3 生物与能量环境间的作用	260
思考题	265
参考文献	265
第7章 臭氧层问题、温室效应及二氧化碳减排	266
7.1 臭氧层问题	266
7.2 温室效应	272
7.3 二氧化碳减排	282
思考题	286
参考文献	286
第8章 能源与环境的可持续发展	288
8.1 可持续发展的思想形成及内涵	288
8.2 可持续发展的热力学原理	291
8.3 人口、资源、环境与可持续发展的关系	293
8.4 实现可持续发展	299
思考题	303
参考文献	303

第 1 章 能源环境概论

1.1 能源的结构及分类

所谓能源，是指可从中直接获取或经过转换而得到能量的自然资源。世界能源委员会（WEC）推介的能源分类为：固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、核能、电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能、波浪能、潮汐能等。根据研究的目的不同，能源有着不同的分类方法。常见的分类方法主要包括：按获取来源分类、按获取条件分类、按获取技术分类、按获取频度分类等。

按获取来源分类：第一类是太阳辐射到地球的太阳能，包括直接的太阳辐射和间接的太阳能，如煤炭、石油、天然气以及生物质能、水能、风能、海洋能等；第二类是直接从地球本身获取的能量，包括储藏于地球内部的地下热水、地下蒸汽、干热岩体的地热能和地球上铀、钍等核燃料所具有的能量，即原子核能；第三类则是来源于月球和太阳等天体对地球的引力，如以月球引力为主所产生的潮汐能。

按获取条件分类：一次能源是可直接取自于自然而不需要改变其基本形态的能源，如煤炭、石油、天然气、水能、生物质能、地热能、风能、太阳能等；二次能源是将一次能源加工或转换得到的人工能源，如电力、蒸汽、焦炭、煤气、烟气、余热余压流体及各种石油制品等。一次能源无论经过几次转换，其所得到的另一种能源均称为二次能源。

按获取技术分类：当前已广泛投入应用的一次能源称为常规能源，煤炭、石油、天然气、水能和核裂变能称为世界五大常规能源；常规能源之外的一些能源，如太阳能、生物质能、地热能、风能、海洋能、核聚变能等，称为替代能源。

按可获取频度分类：自然界中可以在短时间内不断产生并有规律地得到补充的能源，称为可再生能源，如水能、太阳能、生物质能、风能、海洋能、地热能等；需较长时间形成且获取后短期内无法恢复的能源，称为不可再生能源，如煤炭、石油、天然气、核燃料等。

能源分类图如图 1-1 所示。

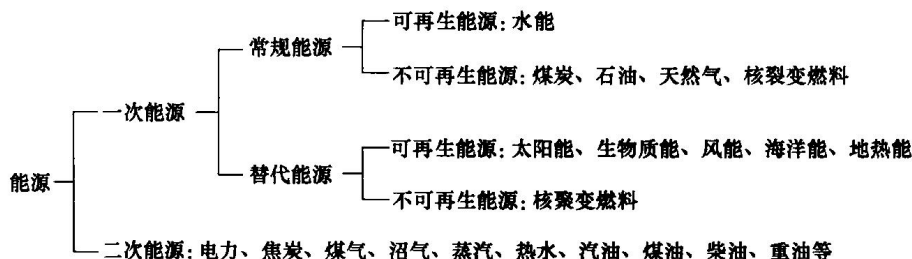


图 1-1 能源分类图

能源（能量）的国际单位（International System of Units, SI）有焦耳（J）、千焦（kJ），有时用千瓦〔小〕时（kW·h）、卡（cal）及英热单位（Btu）等，各单位间的换算关系

如下：

$1\text{ J}=2.778\times10^{-7}\text{ kW}\cdot\text{h}=2.389\times10^{-1}\text{ cal}=9.48\times10^{-4}\text{ Btu}$

$1\text{ kW}\cdot\text{h}=3.6\times10^6\text{ J}$

$1\text{ cal}=4.1868\text{ J}$

$1\text{ Btu}=1055.06\text{ J}$

1.2 能源技术的结构及分类

能源技术是指能源的开发—传输—转化—使用—回收过程的各环节所应用的主要技术。

1. 能源开发和布局

能源开发节能技术包括能源合理开采及合理规划布局技术。在能源资源的开发过程中首先要考虑所开发能源的储量，其次还应考虑环境保护和减少开采损失的问题。包括对能源的品质及数量进行合理评估、合理规划并采用先进的开采技术，在能源资源较丰富的地区还要考虑合理布局规划和技术经济等问题。根据我国的资源和产业结构分布情况，除煤炭、石油、天然气、水力等常规能源要根据储量、技术经济等因素合理部署开发外，还要因地制宜地开发核能、风能、地热能、潮汐能、太阳能等各种可再生能源。

2. 能源传输与储存

能源传输指能源在空间上的传递。能源的输送是通过输送载体进行的，如石油的输送可通过火车、轮船、输送管道等，煤、天然气等也是如此，电能是通过输电线路来实现空间传递的。

能源储存指能源在时间上的转换。如今天的矿物燃料是若干年前的太阳能储存演变而成的常规能源。目前最难处理的是电能和天然气的储存，特别是在我国，电能的绝大部分来自火力发电，而用电量的大小具有明显的时段性，因此低谷用电时段电厂常通过锅炉压火等方法来减小发电量，结果降低了电厂的发电效率，造成了大量的能源浪费。建设地下储气库是调节天然气市场季节性供需矛盾的一种较为先进的方法，但此种方法难度在于天然气储存对地质构造的要求较高，必须保证盖层的连续性和气密性。目前世界各国针对天然气的存储正致力发展一些新技术，如寻找适于建库地质的四维地震勘探技术、垫底气设计技术、水平井技术、岩穴储气技术及线性岩层洞穴建库技术等。

3. 能源转化

能源转化是指能源从一种形式转换成另一种形式的过程。如矿物燃料通过燃烧将化学能转化成热能，然后通过汽轮机将热能转换成机械能，再通过发电机将机械能转换成电能等均属于能量转换过程。能量转换过程及转换设备（系统）见表 1-1。

表 1-1 能量转换过程及转换设备（系统）

能 源	能源形态转换过程	转换设备（系统）
石油、煤炭、天然气等矿物燃料	化学能→热能	燃烧炉、燃烧器
	热能→机械能	各种热力发动机
	机械能→电能	发电机
	化学能→电能	燃料电池
水力、风力、潮汐、海流、波浪	机械能→机械能	水车、风车、水轮机
	机械能→电能	发电机

(续)

能 源	能源形态转换过程	转换设备（系统）
太阳能	辐射能→热能	热水器、光化学反应，太阳灶
	辐射能→电能	光电池
	辐射能→机械能	太阳热发动机
	辐射能→化学能	光化学反应
	辐射能→生物质能	光合作用
核能	核分裂→电能	核发电
	核聚变→电能	可控核聚变

· 目前，国际上普遍用“能源效率”（Energy Efficiency）来替代 20 世纪 70 年代能源危机后提出的“节能”（Energy Conservation）一词。按照世界能源委员会于 1979 年提出的定义，节能是“采取技术上可行、经济上合理、环境和社会可接受的一切措施，来提高能源资源的利用效率”。这就是说，节能是旨在降低能源强度（单位产值能耗）的努力，应在能源系统的所有环节，包括开采、加工、转换、输送、分配到终端利用，从经济、技术、法律、行政、宣传、教育等方面采取有效措施，来消除能源的浪费。

世界能源委员会在 1995 年把“能源效率”定义为“减少提供同等能源服务的能源投入”。一个国家的综合能源效率指标是单位 GDP 的能源需求，即单位产值能耗；部门能源效率指标分为经济指标和物理指标，前者为单位产值能耗，物理指标工业部门为单位产品能耗，服务业和建筑物为单位面积能耗和人均能耗。

能源效率指标可分为经济能源效率和物理能源效率两类。经济能源效率指标又可分为单位产值能耗和能源成本效率；所谓物理能源效率，是指在使用能源（开采、加工、转换、储运和终端利用）的过程中所得到的起作用的能源量与实际消耗的能源量之比，物理能源效率可分为热效率和单位产品或服务能耗。

能源效率的组成及分类如图 1-2 所示。

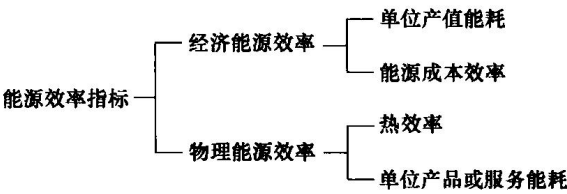


图 1-2 能源效率的组成及分类

4. 能源使用和梯级利用

能源使用贯穿于工业、农业、交通运输、国防、人民生活及第三产业。如各种锅炉、窑炉、钢铁冶炼和各类动力汽车直接消耗一次能源或二次能源，而且煤和天然气及石油还是珍贵的化工原料；机械加工、起重、物料传送、气动液压机械、各种电机均使用电力驱动；在现代化农业生产中，耕种、收割、烘干、冷藏、运输等都需要直接消耗能源。

人类发现“电”是最好的终端能源，但简单循环火力发电效率只能达到 40%。“电”是高级能，可以有效、方便地使用，并且必要时可以方便地变为热能。而“热”不同于“电”，它是一种能级品位较低的能源形式，不仅使用范围窄，而且不如电能有效和方便。

根据热力学第二定律：自然界一切过程都具有方向性。热不可能自发地、不付代价地从低温物体传到高温物体。由此可见，在能量的使用过程中除了尽可能地提高能源效率外，还应避免能量在使用过程中的降级利用，应提倡能量的梯级利用。

能量的梯级利用避免了能量质量不必要的降级。高质量的热能应首先应用于相应能级的目的，当它一次利用能级下降后，再用于较低能级的目的。例如某地 80℃ 的地热水，通过一次换热后得到 75℃ 的水，用于房间采暖，出水温度 50℃ 进入另一座建筑，采用风机盘管散热，出水温度 40℃，再进入地板采暖系统，出水温度 30℃，尾水最后进入热泵系统蒸发器利用到 10℃ 并回灌到地下，上述过程是典型能量梯级利用的实例。

5. 能源回收与“再生”

能源回收和能源“再生”是能源技术的一个重要方面。能源回收主要包括余热资源的回收及余能资源的回收两个方面。余热回收是指采用一定的技术手段对生产生活过程中产生的以热量形式存在的能源进行回收的过程，如利用换热器回收锅炉排烟余热，利用热泵技术回收各种低品位热量等。为了最大限度地发挥能源回收的效益，在进行能源回收的过程中要坚持多级、梯级、逐级回收原则。能源“再生”是指采用一定的技术手段对生产生活中产生的废弃物的再利用，能源“再生”的特点是突破了传统“节”能特点，而向“造”能方向进行的转变，如煤灰渣的综合利用，制药厂回收发酵过程产生的沼气等。

以上各环节均为节能技术的重要环节，只有在使各环节的节能技术达到较高水平的基础上，并保证各环节之间的优化与匹配关系才能称得上是能源的合理利用。

1.3 能源资源与消耗

1.3.1 全球能源资源及现状

自 19 世纪开始工业化进程以来，人类社会已经经历了两次能源构成的转型。第一次大转型开始于 19 世纪，由蒸汽机的发明和推广应用所促成的由薪柴为主的能源向煤的转化。第二次是在进入 20 世纪以后，煤向石油的转化。第二次世界大战后，石油和天然气的生产与消费持续上升，石油于 20 世纪 60 年代首次超过煤炭，占据一次能源的主导地位。20 世纪 70 年代以来，世界经历了三次石油危机，但世界石油消费量却没有丝毫减少的趋势。到 2003 年年底，化石能源仍是世界的主要能源，在世界一次能源供应中约占 87.7%，其中，石油占 37.3%，煤炭占 26.5%，天然气占 23.9%。非化石能源和可再生能源虽然增长很快，但仍保持较低的比例，约为 12.3%。由于中东地区油气资源最为丰富、开采成本较低，故中东能源消费的 97% 左右为石油和天然气，该比例明显高于世界平均水平，居世界之首。在亚太地区，中国、印度等国家煤炭资源丰富，煤炭在能源消费结构中所占比例相对较高，石油和天然气的比例明显低于世界平均水平。除亚太地区以外，其他地区石油、天然气所占比例均高于 60%。

世界一次能源构成的变化轨迹及发展趋势如图 1-3 所示。

1. 煤炭

全世界煤炭的储藏量十分丰富，根据世界能源委员会的评估，世界煤炭可采资源量达 48400 亿 t 标准煤，占世界化石燃料可采资源量的 66.8%。世界各国中，煤炭的储量以美国、俄罗斯、中国最多，拥有世界总可采储量的 61%。到 2010 年年底，世界煤炭探明可采

储量为 8609 亿 t，储采比为 118。探明储量前两位的国家分别是：美国 2373 亿 t，占总量的 27.6%；俄罗斯 1570 亿 t，占总量的 18.2%。2010 年，全球煤炭产量 72.73 亿 t（37.31 亿 t 油当量），同比增长 6.3%。其中，产量超亿吨国家有中国、美国、印度、澳大利亚、俄罗斯、印度尼西亚、南非、德国、波兰、哈萨克斯坦，十国产量共占全球总产量的 89.7%。2010 年，全球煤炭消费量 69.32 亿 t（35.56 亿 t 油当量），同比增长 7.6%。其中，我国煤炭消费量占全球消费量的比例为 48.2%。2010 年，全球煤炭消费前十名国家分别是：中国、美国、印度、日本、南非、俄罗斯、德国、韩国、波兰、澳大利亚。

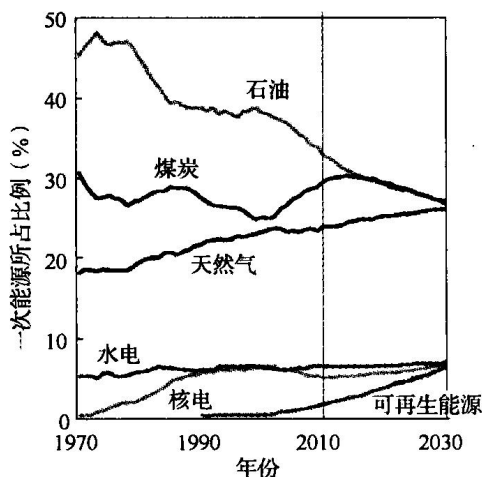


图 1-3 世界一次能源构成的变化轨迹及发展趋势

2. 石油

石油不仅是优质燃料，而且良好的化工原料。石油的诸多优点使其在所有燃料中占据统治地位。根据第 16 届世界石油大会估计，世界常规石油可采资源量为 4582 亿 t，非常规石油可采资源量为 4000 ~ 7000 亿 t。据美国《油气杂志》2006 年报道，世界石油剩余探明储量 1635.68 亿 t，可供人类使用 30 ~ 40 年。中东地区是世界上最大的石油生产基地，储量占世界的 61.9%，2006 年全世界原油产量为 38.68 亿 t，比 2005 年增长 4.45%。到 2010 年，世界石油产量达到 39.14 亿 t（含非常规油），同比增长 2.2%。其中，OPEC（石油输出国组织）国家石油产量达到 16.23 亿 t，同比增长 2.5%；非 OPEC 国家石油产量达到 23.83 亿 t，同比增长 1.6%。中东地区和前苏联地区仍是世界主要的石油产地。

2010 年，世界石油消费达到 40.28 亿 t，同比增长 3.1%，不同地区石油消费的增长情况各有差异。其中，美国消费石油 8.5 亿 t，同比增长 2%；中国 4.29 亿 t，同比增长 10.4%；日本 2.02 亿 t，同比增长 1.5%；印度 1.56 亿 t，同比增长 2.9%；俄罗斯 1.48 亿 t，同比增长 9.2%；沙特 1.25 亿 t，同比增长 7.1%。亚太、北美、欧洲和欧亚大陆、非洲、中东、中南美地区的石油消费分别占总量的 31%、26%、23%、4%、9%、7%。亚太、北美和欧洲是世界消费的主要地区，合计占世界石油消费的 70% 以上。从世界范围看，石油消耗已经超过煤炭，近 10 年来石油消耗量相当于过去一个世纪总量的两倍还多，并继续增长。

3. 天然气

近年来，世界各国十分重视天然气的开发和利用，其目的是替代储量日趋减少的石油和改善环境。由于天然气热值高，易于开发，极富经济价值等特点，故世界天然气消费量逐年增加。截至 2010 年年底，全球天然气剩余探明储量为 188.3 万亿 m^3 ，相当于 1695 亿 t 油当量，比 2009 年净增 1.1 万亿 m^3 ，增幅为 0.6%。其中，中东地区增长率最高，达到 3.7%，增加了 2.68 万亿 m^3 ，而西欧和亚太地区剩余探明储量呈负增长。

2010 年全球天然气消费量为 3.17 万亿 m^3 ，同比增长 7.4%。美国是世界上最大的天然气生产国与消费国，2010 年天然气产量为 6110 亿 m^3 ，消费量为 6834 亿 m^3 ，分别占全球总产量和总消费量的 19.3% 和 21.7%。俄罗斯是世界第二大天然气消费国和生产国，2010 年天然气消费量为 4141 亿 m^3 ，占世界总量的 13.0%，生产量为 5889 亿 m^3 ，占世界总量的

18.4%。加拿大是世界第三大天然气生产国，而消费量居世界第六位。伊朗是世界第三大天然气消费国和第四大天然气生产国。中国天然气资源不是很丰富，生产量居世界第七位，占世界总产量的3.0%，而消费量居世界第四位，仅次于伊朗，占世界消费总量的3.4%。

全球能源结构变化和消费变化分别如图 1-4 和图 1-5 所示。

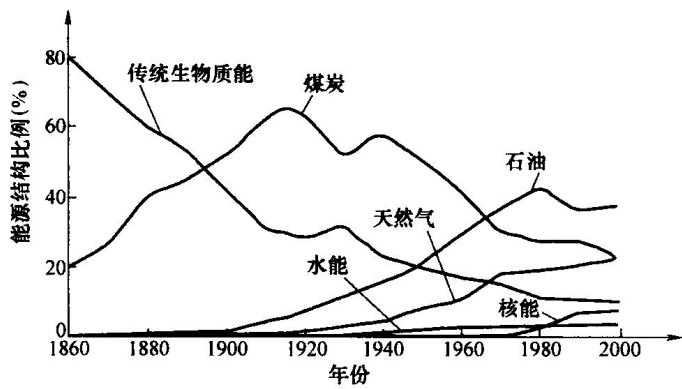


图 1-4 全球能源结构变化

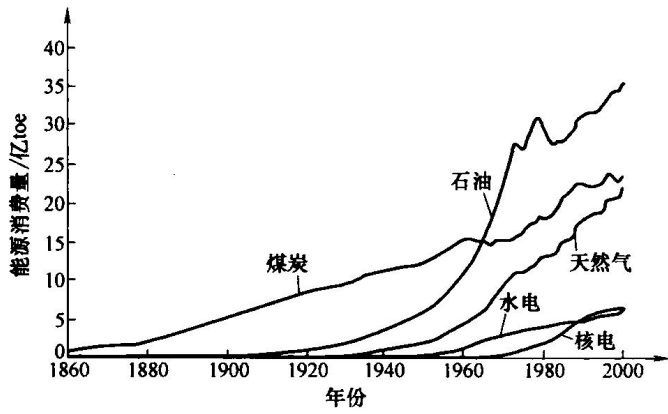


图 1-5 全球能源消费变化 (toe 为吨油当量)

1.3.2 我国的能源资源及现状

2010 年，我国的一次能源总产量达 29.7 亿 t 标准煤，居世界第一位。其中，原煤 32.4 亿 t，居世界首位，原油 2.03 亿 t，天然气生产量为 968 亿 m³，居世界第七位，发电量 42065 亿 kW·h，居世界第二位。但是由于我国人口超过 13 亿，所以人均能源消费量很低。2010 年，人均商品能源消费量约为 2.17t 标准煤，远低于世界平均水平。

1. 煤炭

1992 年，我国原煤产量达 13.73 亿 t 高峰后，一直持续减少，2000 年不足 10 亿 t，以后快速上升，2006 年达 23.6 亿 t，2010 年达到 32.4 亿 t。原煤占一次能源生产总量的比例由 1990 年的 74.2% 下降为 2000 年的 73.2%，2006 年上升到 77.8%，2010 年又降为 76.5%；占消费总量的比例由 1990 年的 76.2% 下降为 2000 年的 69.2%，2007 年又上升到 71.1%，到 2010 年又降为 68%。

2. 石油

1997 年，我国原油产量达 1.6 亿 t 后，一直在 1.6~1.7 亿 t 之间徘徊，原油占能源生产总量的比例由 1980 年的 23.8% 下降为 1990 年的 19.0%，2000 年下降为 17.2%，2006 年下

降为 11.3%，2010 年下降为 9.8%。1990 年，我国原油消费量 1.18 亿 t，2000 年达 2.24 亿 t，2006 年达 3.5 亿 t，2010 年增加到 6.17 亿 t，20 年的平均增长率达 8.6%；1990 年，我国原油生产量高出消费量 2345 万 t，2000 年低于消费量 6139 万 t，2006 年低于消费量近 1.6 亿 t，2010 年低于消费量近 2.2 亿 t。

3. 天然气

近年来，我国天然气市场发展迅速。随着天然气勘探开发的不断深入和产业利用政策的不断完善，天然气在我国能源安全中的重要作用日益彰显。截至 2010 年年底，我国天然气探明可采储量约为 3.9 万亿 m³，比 2009 年增加 3.7%。我国在天然气勘探方面不断取得新成果，尤其是四川普光气田、新疆塔里木气田等大型气田的天然气储量有了较大幅度的增长，但是值得注意的是，我国的天然气资源依旧存在较大的缺口。

我国能源生产总量及构成见表 1-2。

表 1-2 我国能源生产总量及构成

年 份	能源生产总量 /万 t 标准煤	占能源生产的比例 (%)			
		原 煤	原 油	天 然 气	水电、核电、风电
1997	133460	74.3	17.2	2.1	6.5
1998	129834	73.3	17.7	2.2	6.8
1999	131935	73.9	17.3	2.5	6.3
2000	135048	73.2	17.2	2.7	6.9
2001	143875	73.0	16.3	2.8	7.9
2002	150656	73.5	15.8	2.9	7.8
2003	171906	76.2	14.1	2.7	7.0
2004	196648	77.1	12.8	2.8	7.3
2005	216219	77.6	12.0	3.0	7.4
2006	232167	77.8	11.3	3.4	7.5
2007	247279	77.7	10.8	3.7	7.8
2008	260552	76.8	10.5	4.1	8.6
2009	274619	77.3	9.9	4.1	8.7
2010	296916	76.5	9.8	4.3	9.4

1.3.3 能源形势及预测

1. 全球能源形势及预测

未来世界能源供应和消费将向多元化、清洁化、高效化、全球化和市场化方向发展。

(1) 多元化 世界能源结构先后经历了以薪柴为主、以煤为主和以石油为主的时代，现在正在向以天然气为主转变，同时水能、核能、风能、太阳能也正得到更广泛的利用。可持续发展、环境保护、能源供应成本和可供应能源的结构变化决定了全球能源多元化发展的格局。天然气消费量将稳步增加，在某些地区，燃气电站有取代燃煤电站的趋势。未来在发展常规能源的同时，可再生能源将受到重视。在欧盟 2010 年可再生能源发展规划中，风电要达到 4000 万 kW，水电要达到 1.05 亿 kW。英国政府公布的《2004 年年度能源白皮书》确定了新能源战略，到 2015 年，英国的可再生能源发电量占英国发电总量的比例将达到 15.4%，到 2020 年达到 20%。

(2) 清洁化 随着世界能源新技术的进步及环保标准的日益严格，未来世界能源将进一步向清洁化的方向发展，不仅能源的生产过程要实现清洁化，而且能源工业要不断生产出

更多、更好的清洁能源，清洁能源在能源总消费中的比例也将逐步增大。以煤炭为代表的传统能源将向清洁化方向发展，洁净煤技术（如煤液化技术、煤气化技术、煤脱硫脱尘技术）、沼气技术、生物柴油技术等将取得突破并得到广泛应用。一些国家，如法国、奥地利、比利时、荷兰等已经关闭其国内的所有煤矿而发展核电，并大力推广核电等高效、清洁的能源，以解决温室气体排放等环境问题。

(3) 高效化 世界能源加工和消费的效率差别较大，能源利用效率提高的潜力巨大。随着世界能源新技术的进步，未来世界能源利用效率将日趋提高。如以 1997 年美元不变价计，1990 年世界的能源强度为 0.3541 吨油当量/千美元，2001 年已降低到 0.3121 吨油当量/千美元，预计 2025 年为 0.2375 吨油当量/千美元。但是，世界各地能源强度差异较大，2001 年世界发达国家的能源强度仅为 0.2109 吨油当量/千美元，2001 ~ 2025 年发展中国家的能源强度预计是发达国家的 2.3 ~ 3.2 倍，可见世界的节能潜力巨大。

(4) 全球化 由于世界能源资源分布及需求分布的不均衡性，世界各个国家和地区已经越来越难以依靠本国的资源来满足其国内的能源需求，越来越需要依靠世界其他国家或地区的资源供应，世界贸易量将越来越大，贸易额呈逐渐增加的趋势。以石油贸易为例，世界石油贸易量由 1985 年的 12.2 亿 t 增加到 2000 年的 21.2 亿 t 和 2002 年的 21.8 亿 t，年均增长率约为 3.46%，超过同期世界石油消费 1.82% 的年均增长率。在可预见的未来，世界石油净进口量将逐渐增加，年均增长率达到 2.96%。预计 2020 年将达到 4080 万桶/日，2025 年达到 4850 万桶/日。世界能源供应与消费的全球化进程将加快，世界主要能源生产国和能源消费国将积极加入到能源供需市场的全球化进程中。

(5) 市场化 市场化是实现国际能源资源优化配置和利用的最佳手段。随着世界经济的发展，特别是世界各国市场化改革进程的加快，世界能源利用的市场化程度越来越高，各国政府直接干涉能源利用的行为将越来越少，而政府为能源市场服务的作用则相应增大，特别是在完善各国、各地区的能源法律法规并提供良好的能源市场环境方面，政府将更好地发挥作用。当前，俄罗斯、哈萨克斯坦等能源资源丰富的国家，正在不断完善其国家能源投资政策和行政管理措施，这些国家能源生产的市场化程度和规范化程度将得到提高，从而有利于境外投资者进行投资。

目前，全球有多家机构定期发布全球能源需求预测结果，其中比较权威和有代表性的包括国际能源署（IEA）和美国能源部（EIA）。根据参考文献 [9] 的预测，预计 2030 年全球一次能源的消费总量将比 2006 年增加 57.2%，年均增长率达到 1.9%，增长速度与过去 25 年基本持平；2006 ~ 2015 年全球能源消费年增速为 2.0%，2015 ~ 2030 年为 1.8%；预计 2006 ~ 2030 年全球人均能源消费量将从 1.8t 油当量以 1% 的年均增长率持续增加至 2.4t 油当量。未来 20 年，发展中国家能源消费总量年均增长率将达到 2.8%，而发达国家仅为 0.4%。预计 2030 年发展中国家能源消费总量占全球份额将从 2006 年的 56% 上升到近 70%。

参考文献 [9] 依据各国经济发展水平、产业结构、城市化率以及基础设施建设情况等综合指标，将发展中国家分为四类：第一类发展中国家人均 GDP 大于 7000 美元、城市化水平较高、基础设施较完备、经济结构接近发达国家，共计 47 个国家，主要包括俄罗斯、沙特、墨西哥等；第二类发展中国家大多处于工业化中期，人均 GDP 在 4500 ~ 7000 美元之间，基础设施和城市化处于世界平均水平，共 36 个国家，包括中国、巴西、南非等；第三类发展中国家人均 GDP 在 1500 ~ 4500 美元之间，共 37 个国家，主要包括印度、印度尼西

亚、古巴、埃及等国，这类国家处于工业化早期，城市化率较低，基础设施水平较低；第四类发展中国家人均 GDP 低于 1500 美元，共有 48 个国家，大部分为非洲和亚洲国家，这类国家大多数处于农业社会，经济和社会极不发达。参考文献 [9] 对各类国家未来的一次能源需求进行了预测，预测结果见表 1-3。

表 1-3 2030 年全球一次能源需求预测

国家类别	能源消费量/亿 t 油当量		年均增长率 (%)
	2020 年	2030 年	2010 ~ 2030 年
第一类发展中国家	26. 90	30. 92	1. 7
第二类发展中国家	42. 99	57. 22	3. 4
第三类发展中国家	22. 46	31. 83	3. 5
第四类发展中国家	6. 38	7. 70	2. 1
发展中国家合计	98. 73	127. 67	2. 8
发达国家	57. 45	56. 94	0. 4
全球合计	156. 18	184. 61	1. 90

2. 我国能源形势及预测

在我国，煤炭在一次能源消费总量中所占的比例最大，建国初期我国的煤炭消费量占一次能源消费量的 90% 以上，随着我国石油天然气工业和水电事业的发展，煤炭消费比例有所下降。石油、天然气、核能和水能、风能、太阳能等可再生能源的份额将不断提高。我国是能源生产大国，也是能源消费大国，从总量上看，我国的能源生产和消费基本上是平衡的。根据国家统计局 2005 年的《国民经济与社会发展统计公报》的相关数据，2005 年我国的一次能源自给率达到 95. 8%，进口依赖度仅为 4. 2%。但是由于我国的一次能源供需结构的不平衡，自 1993 年起，我国成为成品油净进口国，1996 年成为原油净进口国。2005 年原油和成品油净进口数量分别达到了 11875 万 t 和 1742 万 t，石油进口依赖度超过了 40%。

参考文献 [10] 中，根据《中国统计年鉴—2006》的相关数据对我国的能源生产、消费及供需差进行了预测，见表 1-4。预测结果表明，在未来的几十年中，我国的能源生产能力将得到不断提高，但同时能源的需求也在逐年增长，能源生产与能源消费间的缺口也在逐年加大。参考文献 [11] 对我国的石油、天然气产量与需求量进行了预测，见表 1-5。预测结果表明，在未来的几年中，我国对石油与天然气的产量与需求量均有不同程度的增加，但对石油的需求量大于其产量，石油供应存在一定的缺口。

表 1-4 我国能源生产、消费及供需差预测 (单位: 亿 t 标准煤)

年 份	2015	2020	2030
能源生产预测	25. 44	30. 90	45. 58
能源消费预测	26. 63	32. 34	47. 72
能源缺口预测	- 1. 19	- 1. 44	- 2. 14

表 1-5 我国未来对石油、天然气的产量与需求预测

年 份		2015 年	2020 年
需求 预测	石油/亿 t	3. 2	3. 6
	天然气/亿 m ³	—	1701
产量 预测	石油/亿 t	2. 0	2. 0
	天然气/亿 m ³	1500	1800 ~ 2000

1.3.4 能源问题对策

1. 国家的能源政策

目前,世界各国均在积极制定并采取一系列的政策与措施以应对日益突出的能源问题。在我国,自改革开放以来,为了缓解经济持续高速发展、能源需求大幅度增长与能源短缺的矛盾,我国政府制定了一系列能源政策,这些能源政策包括能源开发投资政策,能源布局政策,能源技术装备政策,能源价格、税收、信贷政策,能源进出口政策等。

(1) 以增加能源供给为宗旨的能源开发投资政策 1978年,《中共中央关于加快工业发展若干问题的决定》中提出把发展燃料、动力、原材料工业和交通运输放在突出位置。1988年,《政府工作报告》提出加快以电力为中心的能源建设政策,电力工业的投资力度进一步加大,发展速度较快。1992年10月,《加快改革开放和现代化建设步伐,夺取有中国特色社会主义事业的更大胜利》提出加快交通、通信、能源、重要原材料和水利等基础设施和基础工业的开发与建设。1994年3月的《政府工作报告》指出,保持合理投资规模,优化投资结构,为了实现国民经济持续、快速、健康发展,各地区各部门都要从全局出发,作出合理安排,把财力、物力首先用于在建的交通、通信、能源、重要原材料工业,以及大江大湖治理等方面的重点建设。2007年,为解决可再生能源发展中存在的成本较高、风险较大、相关技术不成熟等问题,政府相关部门陆续出台了一系列制度,初步形成了一整套促进可再生能源发展的财税政策体系框架,有力促进了可再生能源发展。

(2) 各种经济成分共同发展的能源政策 1988年,财政部《关于沿海经济开放区鼓励外商投资减征、免征企业所得税和工商统一税的暂行规定》中指出,属于能源、交通、港口建设的项目可按减15%的税率征收企业所得税,以鼓励外资投向能源等基础工业设施建设。除了主要依靠国内企业投资之外,我国政府也鼓励外国公司以多种方式投资我国能源项目。在2004年修订的《外商投资产业指导目录》中将大型发电、油气田开发、煤炭开采、清洁煤炭和新能源项目等均列入“鼓励类”,享受税收等优惠政策。

(3) 能源的价格政策 1991年,国家在提高平价原油价格水平的同时,每年将一定数量的平价油转为高价油,原油平均价格有所提高。1998年6月,我国对原油、成品油价格的形成机制进行了改革,实现国内原油价格与国际原油价格接轨,使我国的石油生产走向国际化。2006年1月,国家发改委公布了《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》,对可再生能源发电价格作出了相关的规定。2007年11月,国家发改委对外发布了《煤炭产业政策》,提出建立健全煤炭交易市场体系,完善煤炭价格市场形成机制,鼓励煤炭供、运、需三方建立长期合作关系。

(4) 调整结构、提高效益的能源政策 1994年以后,我国的能源政策从注重发展数量方面转向注重工业增长的效益方面,把提高经济的增长质量、优化经济结构放在了更重要的位置。1998年《政府工作报告》中指出,要进一步加强和改善宏观调控,投资要重点用于加强农业水利建设、能源、交通、通信、环保等基础设施建设,要支持中西部地区的资源开发和重大基础设施建设,重点加快新能源产业的发展。2005年2月,我国正式颁布了《中华人民共和国可再生能源法》,为可再生能源的发展提供了法律保障。2007年8月,国家发改委下发了《可再生能源中长期发展规划》,提出从现在到2020年期间我国可再生能源发展的目标,即力争2020年使可再生能源消费量占到能源消费总量的15%。

2. 能源问题的技术对策

(1) 煤炭的高效利用 煤炭的现代化利用是提高煤炭利用效率的有效手段。煤炭的现代化利用是指煤先被气化,然后再用来做液体燃料和发电,即把化工过程和发电过程结合起来,以气化为龙头并实现煤、气、电联产。在这个过程中,煤气化以后去掉其内部的杂质,然后通过化学变化及燃烧实现燃气与蒸气的联合循环,煤炭的这种循环利用被称为整体煤气化联合循环,即所谓的 IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)。此种循环能极大地提高煤炭的利用效率,同时在一定程度上降低煤炭燃烧对环境的污染。

(2) 核电的推广 我国在核能领域及核电站建设方面已经积累了相当多的技术和经验,具备了自主研究开发核电站的能力。与改革开放同步发展起来的我国核电工业,已经具备 30 万~60 万 kW 压水堆核电站自主设计能力,而且基本具备了第二代百万千瓦级核电站设计能力和自主批量规模建设的工程设计能力。在核电设备制造方面,60 万 kW 和 100 万 kW 核电站国产化率可达 70% 以上。我国最大最早的核电站是大亚湾核电站,其发电容量为 180 万 kW。2000 年以后,我国对核工业的发展作出新的战略调整,并计划在 2020 年前我国的核电发电量大概要发展到 4000 万 kW 容量,核电装机容量将占电力总装机容量的 5%。目前,在核电的发展过程中,核废料处理问题还没有得到彻底的解决。

(3) 可再生能源的开发 从目前可再生能源的资源状况和技术发展水平看,今后发展较快的可再生能源除水能外,主要是生物质能、风能和太阳能。水能开发的技术已经相当成熟。生物质能利用方式包括发电、制气、供热和生产液体、固体燃料,将成为应用最广泛的可再生能源利用技术。风力发电技术已基本成熟,经济性已接近常规能源,并在今后相当长时间内将会保持较快发展速度。太阳能发展的主要方向是光伏发电和热利用。光伏发电的主要市场是发达国家的并网发电和发展中国家偏远地区的独立供电;太阳能热利用的发展方向是太阳能一体化建筑,并以常规能源为补充手段,实现全天候供热,提高太阳能供热的可靠性,在此基础上进一步向太阳能供暖和制冷的方向发展。

总体来看,近 20 年来,全球特别是在发达国家,大多数的可再生能源技术发展迅速,其产业规模、经济性和市场化程度也正在逐年提高。预计在 2010~2020 年间,大多数可再生能源技术可具有市场竞争力,2020 年以后将会有更快的发展。

1.4 环境质量及污染控制

自工业革命特别是进入 20 世纪以来,随着科学技术及经济的快速发展、城市人口的积聚、工农业生产中化学物质的大量使用,人类生存的环境付出了巨大的代价。其中大气污染、水污染、土壤污染、噪声污染等环境问题已成为某些国家的社会公害,并成为世界各国广泛关注的三大问题(资源、能源、环境)之一。全世界人民保护环境、提高环境质量的呼声日益高涨。

1.4.1 环境质量的定义

环境广义上是指以人类社会为主体的外部世界的总体。在环境科学中,环境是指围绕着人群的空间及其中可以直接或间接影响人类生活和发展的各种自然因素和社会因素的总和。环境涵盖了自然界及社会中各种物质性的要素,并包括由这些要素所构成的系统及其所呈现出来的各种状态。在自然环境中,按其主要的环境组成要素,可分为大气环

境、水环境（如海洋环境、湖泊环境等）、土壤环境、生物环境（如森林和草原）、地质环境等。社会环境包括社会中的经济、文化、美学等因素，社会环境及社会发展的程度与区域有关。

环境质量是指在一个具体的环境内，环境的总体或环境的某些要素，对人群的生存和繁衍以及社会经济发展的适宜程度。环境质量概念的提出是为了反映人类的具体要求而形成的对环境评价的一种概念。它是环境系统客观存在的一种本质属性，是客观存在的，并能够实现对环境系统所处状态的定性和定量的描述。

1.4.2 影响环境质量的主要因素

环境质量包括自然环境质量和社会环境质量。自然环境质量又包括物理、化学及生物环境质量。物理环境质量是针对周围物理环境条件好坏而言，如自然界气候、水文、地质、地貌等条件的变化，人为的放射性污染、热污染、噪声污染等，自然灾害也会影响物理环境质量；化学环境质量是指周围化学条件的好坏，不同的地区各环境要素的化学组成不同，其化学环境质量不同；生物环境质量是自然环境质量的主要组成部分，是针对周围生物群落构成的特点而言，不同地区生物群落结构及组成的特点不同，其生物环境质量也有差别。社会环境质量包括社会中的经济、文化、美学等状况，由于各地发展程度不同，社会环境质量有明显的差异，同时随着科学的发展，人类将不断创造更美好的劳动、工作和生活环境，对环境质量的概念也会不断提出新的要求与内容。

1.4.3 能源消耗对环境的影响

能源是人类赖以生存和发展的不可缺少的物质基础，它在两方面影响着人类社会。一是地球上的不可再生能源是有限的，它制约着人类社会经济的发展；二是由于能源利用方式的不合理，损害了人类赖以生存的地球环境。

1. 能源消耗对大气环境的影响

燃煤和石油燃料燃烧产生了大量烟尘及有害物质。以燃煤型工业锅炉或工业窑炉为例，其年烟尘排放量及污染物排放量可按如下方法进行计算：

(1) 烟尘排放量

$$G = Mk(1 - \eta_1)$$
 (1-1)

式中， G 为年烟尘排放量（t）； M 为燃料（煤、油、燃气）用量（t）； k 为粉尘系数，见表 1-6； η_1 为除尘系统的除尘效率。

表 1-6 燃煤粉尘系数 k

炉型 燃料	窑炉	链条炉	振动炉	抛煤机炉	沸腾炉	煤粉炉
型煤	0.003	0.071	0.107	0.116	0.156	0.199
煤球	0.004					
散煤	0.005					

(2) 污染物排放量

$$SO_2 \text{ 排放量} \quad W = \beta M(1 - \eta_2)$$
 (1-2)