

天然气 冷热电联供能源系统

TIANRANQI

LENGREDIAN LIANGONG NENGYUAN XITONG

华 贲 主 编 ■

中国建筑工程工业出版社

天然气冷热电联供能源系统

华 贲 主编

中国建筑工业出版社

TE64
H651

图书在版编目(CIP)数据

天然气冷热电联供能源系统/华贵主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010
ISBN 978-7-112-11713-0

I. 天… II. 华… III. 天然气-热能-综合利用
IV. TE64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 000085 号

本书是作者及其在华南理工大学的研究团队多年来研究成果以及工程经验的集成。从热电联产到冷热电联供、规模化的分布式冷热电三联供系统与区域供冷和电力节能的关系、分布式能源与天然气产业在中国协同发展的历史机遇、第二代能源供应系统及规划的角度, 对天然气冷热电联供系统、区域能源供应、天然气定价机制等方面作了全面细致的分析。本书最后给出了作者取得的有关天然气冷热电联供、区域供冷系统等方面的中国专利。

本书对从事天然气利用研究人员、建筑节能设计人员、城市能源规划管理与研究人员、政府官员、高校师生等具有参考价值。

* * *

责任编辑: 张文胜 姚荣华

责任设计: 郑秋菊

责任校对: 王雪竹

天然气冷热电联供能源系统

华 贵 主 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 13½ 字数: 336 千字

2010 年 2 月第一版 2010 年 2 月第一次印刷

定价: 36.00 元

ISBN 978-7-112-11713-0
(18969)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

分布式冷热电联供能源系统，是随着第一次世界能源危机后能源成倍涨价、要求大幅度提高能效和国际天然气贸易大规模开展，而从 20 世纪 70 年代末开始最先在美国发展起来的。目前有各种不同的名称或叫法。“分布式冷热电（三）联供能源系统”，英文为“Distributed Energy System/Combined Cold Heat and Power”，缩写为 DES/CCHP，应该是最规范的名称。

据统计，到 2000 年，近 5000 个美国的 DES/CCHP 项目中，以天然气为一次能源的建筑物占 72%、工业的占 64%；2007 年日本城市建筑物 DES/CCHP 项目中，一半以上用天然气。现在，随着气候变化要求进一步大幅度减排温室气体，天然气 DES/CCHP 项目发展的步伐更进一步加速。在美国总统奥巴马的新能源政策中，发展 DES/CCHP 与智能电网、减少交通能源对石油的依赖，以及碳减排等一起，成为新战略的核心。

中国发展天然气比世界迟了 30 年。所以在过去的 30 年里，虽然燃煤的热电联产（CHP）有了一定的增加，但天然气 DES/CCHP 却是凤毛麟角，近几年才刚刚开始；甚至很多人还不知道，把 DES/CCHP 与 CHP 混为一谈。今天，在中国面临着气候变化所要求的 CO₂ 减排的极大压力，同时成千亿 m³/a 的天然气即将沿着数万公里的天然气管网进入人口稠密的各大城市的时候，实行“跨越式发展”，积极采用已经在发达国家成熟应用的 DES/CCHP 技术，结合我国国情，在系统集成优化等方面进一步自主创新，尽快普及推广，是逐步建立我国无碳/低碳能源体系的需要，是中国节能减排的最重要战略途径之一，也是发展我国低碳经济的一部分。

华贲教授及其团队从事过程工业能量系统优化的研究和运用 30 多年，为企业做了数十个能量系统优化改造、规划等项目。2000~2005 年，与清华大学过增元院士一起主持并完成了“高效节能的关键科学问题”国家重点基础研究（973）项目的过程中，他不仅在所负责的“能量系统多层次、一体化集成建模、创新和优化”研究方向中取得了理论研究成果，而且把工程应用从工业扩展到建筑物围护结构、分布式冷热电联供，乃至第二代城市能源供应系统。在本书所反映的研究成果中，他带领的团队，以所承担的多个实际工程项目为背景，对 DES/CCHP 系统的集成建模、优化匹配、柔性设计、经济性保障和评价、DES 与天然气下游市场开拓的互促关系，乃至 CCHP 项目的商业化运作模式等实际问题，都进行了深入、实际的研究。这些工作，在对 DES/CCHP 的阐释、宣传和促进天然气在中国的发展方面，将起着有益的作用。

中国科学院院士
中国工程热物理学会理事长
中科院工程热物理所研究员



尊敬的读者

感谢您选购我社图书！建工版图书按图书销售分类在卖场上架，共设 22 个一级分类及 43 个二级分类，根据图书销售分类选购建筑类图书会节省您的大量时间。现将建工版图书销售分类及与我社联系方式介绍给您，欢迎随时与我们联系。

★建工版图书销售分类表（详见下表）。

★欢迎登陆中国建筑工业出版社网站 www.cabp.com.cn，本网站为您提供建工版图书信息查询，网上留言、购书服务，并邀请您加入网上读者俱乐部。

★中国建筑工业出版社总编室 电 话：010—58934845
传 真：010—68321361

★中国建筑工业出版社发行部 电 话：010—58933865
传 真：010—68325420

E-mail: hbw@cabp.com.cn

建工版图书销售分类表

一级分类名称(代码)	二级分类名称(代码)	一级分类名称(代码)	二级分类名称(代码)
建筑学 (A)	建筑历史与理论(A10)	园林景观 (G)	园林史与园林景观理论(G10)
	建筑设计(A20)		园林景观规划与设计(G20)
	建筑技术(A30)		环境艺术设计(G30)
	建筑表现·建筑制图(A40)		园林景观施工(G40)
	建筑艺术(A50)		园林植物与应用(G50)
建筑设备·建筑材料 (F)	暖通空调(F10)	城乡建设·市政工程· 环境工程 (B)	城镇与乡(村)建设(B10)
	建筑给水排水(F20)		道路桥梁工程(B20)
	建筑电气与建筑智能化技术(F30)		市政给水排水工程(B30)
	建筑节能·建筑防火(F40)		市政供热、供燃气工程(B40)
	建筑材料(F50)		环境工程(B50)
城市规划·城市设计 (P)	城市史与城市规划理论(P10)	建筑结构与岩土工程 (S)	建筑结构(S10)
	城市规划与城市设计(P20)		岩土工程(S20)
室内设计·装饰装修 (D)	室内设计与表现(D10)	建筑施工·设备安 装技术(C)	施工技术(C10)
	家具与装饰(D20)		设备安装技术(C20)
	装修材料与施工(D30)		工程质量与安全(C30)
建筑工程经济与管理 (M)	施工管理(M10)	房地产开发管理(E)	房地产开发与经营(E10)
	工程管理(M20)		物业管理(E20)
	工程监理(M30)	辞典·连续出版物 (Z)	辞典(Z10)
	工程经济与造价(M40)		连续出版物(Z20)
艺术·设计 (K)	艺术(K10)	旅游·其他 (Q)	旅游(Q10)
	工业设计(K20)		其他(Q20)
	平面设计(K30)	土木建筑计算机应用系列(J)	
执业资格考试用书(R)		法律法规与标准规范单行本(T)	
高校教材(V)		法律法规与标准规范汇编/大全(U)	
高职高业教材(Z)		培训教材(Y)	
中职中专教材(W)		电子出版物(H)	

注：建工版图书销售分类已标注于图书封底。

目 录

序

导言 中国低碳能源战略和天然气产业	1
第1部分 从热电联产到冷热电联供	11
1.1 我国分布式能源发展战略探讨	13
1.2 分布式冷热电联供系统在我国建筑中的应用前景分析	18
1.3 给热电联产和分布式能源正名	25
1.4 分布式能源系统：联产和联供	30
1.5 集成创新可使中国建筑物能效加倍	37
1.6 分布式冷热电联供能源系统经济性分析	45
1.7 广州大学城分布式冷热电联供项目的启示	52
1.8 燃气内燃机与燃气轮机冷热电联产系统的比较	60
第2部分 规模化的分布式冷热电三联供系统与区域供冷和电力节能的关系	65
2.1 分布式能源站对广东能源建设的重大意义	67
2.2 区域供冷与分布式冷热电联供系统	75
2.3 2008 雪灾思考：分布式能源与大电网的安全保障	80
2.4 用科学发展观缓解电力供应紧张的办法	84
2.5 燃气轮机进气温度对冷热电联产性能的影响	86
2.6 区域供冷系统制冷主机设计容量的优化分配	89
第3部分 分布式能源与天然气产业在中国协同发展的历史机遇	97
3.1 分布式能源系统对中国天然气下游市场开拓的重要性	99
3.2 LNG 产业链下游市场开拓策略探讨	108
3.3 分布式能源与天然气产业在中国协同发展的历史机遇	109
3.4 中国天然气资源、价格、上游市场刍议	115
3.5 广东如何高效用好天然气	121
3.6 中国天然气产业发展刍议Ⅱ——下游市场和政策	124
3.7 中国天然气产业政策	130
3.8 天然气价格问题粗探浅析	135
3.9 中国天然气定价机制急需改革	143

第 4 部分 第二代城市能源供应系统及其规划	151
4.1 城市的科学发展与能源规划	153
4.2 发展以分布式冷热电联供为核心的第二代城市能源供应系统	156
4.3 建设工业园区冷热电联供的能源系统	162
4.4 小城镇建设须重视能源规划	170
4.5 中国城市能源供应系统的集成创新	172
第 5 部分 专利选录	179
5.1 中国发明专利：一种区域供冷系统及其冷量梯级利用方法	181
5.2 中国发明专利：一种天然气冷热电联供的烟气低温端热利用系统及其操作方法	186
5.3 申请中国发明专利：一种用于区域供冷的高效节能空调系统及其实现方法	197
内容索引	205
跋	207

导言 中国低碳能源战略和天然气产业

一、2009 年：世界和中国能源的第三次大转型

人类从 19 世纪开始工业化进程以来，已经经历了两次能源构成的转型。图 0-1 给出了世界能源构成变化的历史轨迹，图中三角形坐标的三个顶点分别表示纯非化石能源（右下角）、纯煤炭（左下角）和纯油气（顶角）；黑色曲折线为文献 [1] 给出的人类耗用的一次能源利用构成变化的历史数据。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可再生能源向煤的转化。在图中，曲线是从 1850 年，再生能源占 80%，煤炭占 20%，油气为零的 A 点开始，一直朝煤炭比率增加的右方延伸的。第二次是始于 20 世纪前 20 年，从煤转向石油，推动力是汽车和飞机的普遍使用。从图中可以看到，曲线在 1900 年和 1920 年附近转折的 B 点；然后一直向上。到 1990 年至今的近 20 年间，在油气占 60% 多、煤炭占约 30%、非化石能源占 10% 的区域徘徊。而从现在开始，人类将开始第三次能源大转型，即重点转向可再生能源，并且化石能源内部结构重组。发展的大方向就是图中的两个直朝向右下方的箭头。2030 年的目标是非化石能源占到 40%、油气和煤炭各占 30% 左右；到 2100 年，非化石能源趋近 60%、油气和煤炭各占 20% 左右。这次大转型的推动力主要是气候变化。工业化 100 多年来，特别是 1990 年开始的近 20 年来，由于化石能源加速消耗，大气中温室气体浓度急剧增加而导致的气温上升、冰山融化、海平面上升和各种灾害性气候增加的频度和速度都大大增加了。

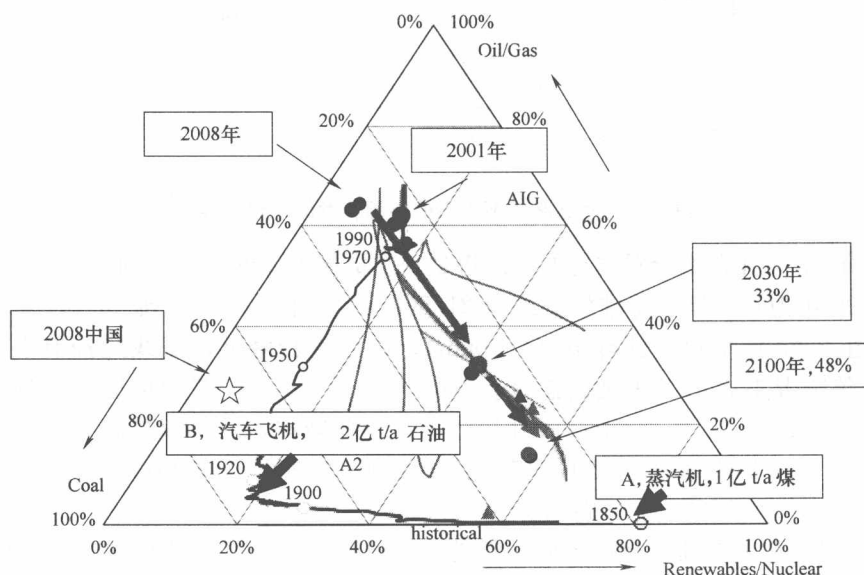


图 0-1 世界一次能源构成的变化轨迹以及发展趋势

气候变化是我们这一两代人面临的最严峻挑战之一。化石能源的过度使用加速了气候变化和地球表面升温的过程。科学家预测，地球生态警戒线是大气中 CO_2 浓度不超过 450ppm，以控制地表温升在 2°C 以内，一旦超过 2°C 的“非线性气候引爆点”，就会朝着 $6\sim 7^\circ\text{C}$ 的严酷升温发展，全球变暖将无法控制。2008 年，全球 CO_2 的总排放量已达 300 亿 t/a，大气 CO_2 浓度已达 400ppm。IEA 预测，照此趋势，2050 年地表温升就将达到 2°C ！此外，气候变化导致的风暴、热浪、洪水、冰灾等灾害也正在加剧。人类需要有一个所有国家都参与的国际协议来划分责任，落实避免灾难的规划和进程。

1997 年的《京都议定书》，要求发达国家在 1990 年基准上，2008~2012 年的 5 年间减排 5.2%。2002 年通过了《联合国气候变化公约》之后，在 2007 年制订的《巴厘行动计划》是气候科学的关键一年。开始了“双轨谈判”；坚持在可持续发展框架下应对气候变化，坚持“共同带有区别的责任”原则。并且提出了“巴厘岛路线图”，指出了减排的具体途径和措施、目标^[2]，如图 0-2 所示。

巴厘岛路线图对能源相关的温室气体排放的预期

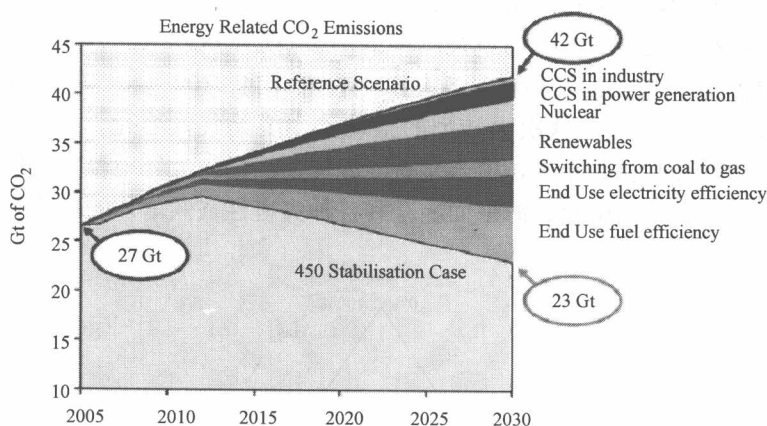


图 0-2 巴厘岛路线图指出的能源转型的 7 项内容^[2]

2009 年 12 月在哥本哈根举行的会议将是一次更加重要的人类共同行动。目标是发达国家以 1990 年为基准年（总排放量约为 21.5Gt/a），到 2020 年减排 40%，全球 CO_2 排放浓度将在 2020 年左右达到峰值（450ppm），以后逐步降低，底线是控制温升不超过 2°C 。美英等国带头表示了积极的态度。2009 年 6 月 28 日，美国奥巴马政府已宣布到 2020 年，减排 2005 年（5.87Gt/a）的 17%，2050 年减排 83%（仅排放 1 Gt/a）。英国政府在 2009 年 7 月 15 日发布的《英国低碳转换计划》白皮书中提出到 2020 年和 2050 年将 CO_2 排放量在 1990 年基础上分别减少 34% 和 80%。

相应于这些强制减排目标的措施，就是能源利用的大转型。如图 0-2 右侧所概括，大体可分为两类措施。自下而上的前 3 项：提高终端利用能效，提高电网效率（“智能电网”）和天然气替代煤，旨在减少能源消耗的总量；而后 4 项：发展可再生能源、核能、

工业和发电用能产生的 CO_2 的捕集和封存 (CCS)，则着眼于大幅度增加零排放的清洁能源的比率。

二、气候变化对世界和中国能源消耗总量和构成的约束

(1) 按年增长 0.8% 计，2030 年世界人口将从目前的 67 亿增加到 83 亿。世界能耗总量约为 240 亿吨标准煤^[3] [人均能耗为 2.9tec/(人·年)]。基于巴厘岛路线图和能耗与二氧化碳排放关系数据的分析，可以估算出 2030 年控制气温升高不超过 2℃ 的世界 CO_2 总排放量约为 230 亿 t。为了满足 230 亿 t 排放总量的约束，在 240 亿 t 能源消耗中，可再生能源（包括核能）必须占 40% 以上；石油和天然气约占 30%，煤约占 30%，但是煤的一半须采用 CCS 利用。图 0-1 中标志为 2030 年的点示出了这种能源构成的位置。2030~2100 年，继续朝这个方向前进，排放量进一步减低。

(2) 由于世界各国、各地区发展程度和时间不同，能耗和碳排放也存在极大的差异。图 0-3 给出了 1990~2002 年世界各地碳排放的比较数据。

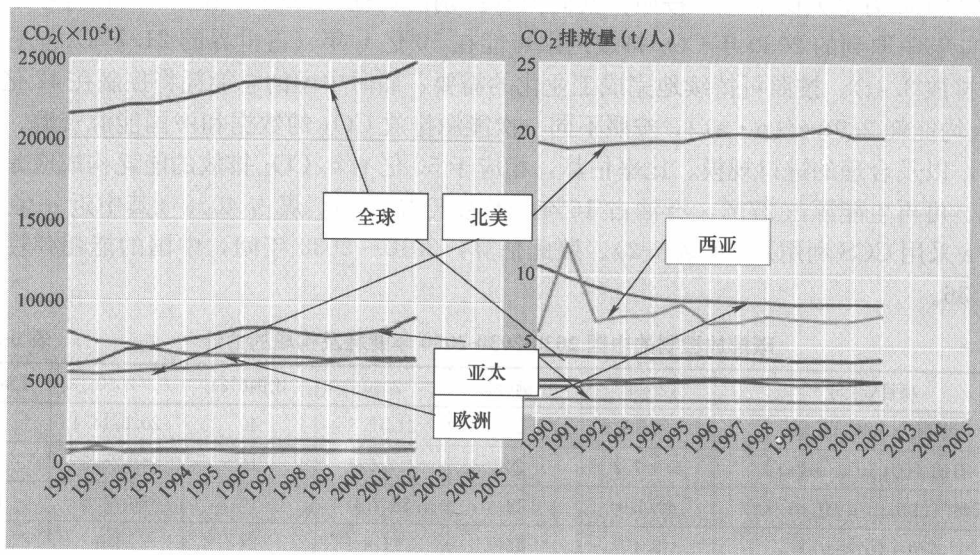


图 0-3 2002 年世界各个地区 CO_2 排放总量和人均量比较

1990 年，世界约排放 21.5Gt/a CO_2 当量，其中发达国家排放约 17Gt/a，占 80%。自工业化以来的一百多年间累计的排放比率，大致也是如此。而 1990 年中国温室气体净排放量约为 3.1Gt/a，占世界的 14.4%。由于中国经济近 20 年起飞所带来的能源消耗，特别是煤炭消耗急剧增长，到 2008 年全世界排放的 30Gt/a CO_2 中，中国占了 6.2Gt/a，即 20.7%；成了第一位的排放大国。曾几何时，60 年前的 1950 年，中国 CO_2 排放量为 0.079Gt，仅占当时世界 1.31%^[4]。

分析各项数据的走势可以看出，1990 年以来导致世界气候变化的各种因素中，中国因素起着相当大的作用：1990 年以来中国新增能源消耗占世界的 40%，其中中国新增煤炭消耗占世界的 70%。这就导致世界新增温室气体排放量中，中国新增部分占了 50%^[2]。

美、欧、日等发达国家先后在 20 世纪中、晚期完成了工业化。他们已经经历了人

均能耗较高的历史时期；也积累了强大的经济实力和科技基础。低碳发展对于他们，首先是通过发展各种新能源科学技术进一步提高能效、降低能源消耗总量和人均能耗，然后才是加速发展无碳能源来实现的。特别是美国奥巴马政府期望藉领先发展新能源科学技术和能源金融机制，以保持世界领先地位。表 0-1 给出了各国达到人均 1 万美元时能耗的历史数据^[5]。

人均 GDP 达到 1 万美元的时间和能耗 表 0-1

	美国	英国	日本	韩国
年份	20 世纪 60 年代	20 世纪 70 年代	20 世纪 80 年代	20 世纪 90 年代
能耗[t _{ec} /(p·a)]	8	6	4.1	3.9

2008 年美国的人均 GDP 为 4.7 万美元，人均能耗为 11t_{ec}/(p·a)，人均碳排放为 19.5 亿 t。按照奥巴马的计划，到 2020 年减排 2005 年的 17%，2050 年减排 83%，即 2050 年美国人均碳排放减为 3.3t。相应地，人均能耗也将大幅度降低。

按照我国计生委和发改委能源所的预测，2030 年中国人口约 14.7 亿（占世界 18%），GDP 约 150 万亿人民币^[6]。按照“共同但有区别的责任”原则，相信中国在哥本哈根会议上能够争取到的 2030 年 CO₂ 排放约限可能在 50 亿 t/年（占世界的 21.7%）左右（人均碳排放 3.4t）。按照可持续地完成工业化的需要，届时中国的总能耗将控制在 42 亿 t_{ec}/a [人均能耗 2.9t_{ec}/(p·a)]。按照不同一次能源排放 CO₂ 的数据和中国能源资源、自产能力，以及合理的进口规模、比率估算，相应于 50 亿 t/年 CO₂ 排放的能耗构成应是：新能源、可再生能源占 27%，石油占 16%，天然气占 17%，煤占 40%（其中近一半约 12 亿 t/a 采用 CCS 利用）（见表 0-2）。照此估算，2010～2030 年间，中国的能耗弹性系数为 0.36。

碳排放控制的中国 2020-2030-2050 年能耗及构成的估计 表 0-2

项目\时间	2020	比例(%)	2030	比例(%)	2050	比例(%)
煤(亿 t/a/亿 t _{ec} /a)	26.2/18.4	51	24/16.8	40	20.2/14.4	32
石油(亿 t/a/亿 t _{ec} /a)	5.0/7.2	20	4.7/6.7	16	4.4/6.3	14
天然气(10bcm/a /亿 t _{ec} /a)	40/5.0	14	56/7.1	17	56 /7.2	16
其他*(亿 t _{ec} /a)	5.4	15	11.4	27	18.0	38
总计(亿 t _{ec} /a)	36	100	42	100	45	100

注：* 包括水电、核、可再生能源。

三、中国实现低碳能源发展的可能性讨论

在 20 年内实现上述气候变化对中国能源构成的约限目标，将是中国能源构成的 180°大转型，也是一个极大的挑战。从以下四方面分析实现的可能性。

(1) 关于人均能耗。表 0-1 的历史数据和美国政府今后的能源规划说明，科技进步是促使能源利用效率快速提高的根本因素。只要能够充分利用今后 20 年能源科技加速进步的成果，中国人均能耗不超过 3t_{ec}/(p·a) 是完全可能的。而 2030 年以后到 2050 年，中国已经完成了工业化，人口增长也步入常规，充分利用全世界的科技成果，不断提高能

效，总能耗应当不会再有大的增长。

(2) 27%，11.4 亿 tec/a 可再生能源，能否实现？

胡锦涛主席在联合国气候峰会上发言中承诺，到 2020 年非化石能源占 15% 的指标，是 2008 年制定的中国可再生能源规划的目标。而按照最近一年多以来中国可再生能源发展的速度，和对发展规划的研究，这个目标是完全可以实现的。表 0-3 给出了最近的研究结果（注意，这里还没有包括核能）。

 可再生能源发展规划的最新研究^[7]

表 0-3

项 目	单 位	2010 年	2020 年	2030 年	2050 年
不包括水电	亿 tec/a	0.6	1.8~3.3	4~8	9~17
水电		2.3	3.6	4.6	4.1
合计		2.9	5~7	9~12	13~21
占一次能源的比例	%	10	19~25	20~30	30~40

(3) 5800 亿 m³/a 天然气的供应保障

在政策的推动和各部门、各大公司的努力下，近年来我国天然气从勘探开发、生产，到国外资源的利用和进口，都取得了很快的进展。天然气消耗量以每年 20% 以上的速度增加。表 0-4 是根据各方面的信息估算的 2020 年我国天然气供应情况。

2020 年中国天然气供应总量和构成的估计

表 0-4

总 量	370~420 bcm/a, 4.8~5.4 亿吨油当量/a
国内大气田	150~170
非常规天然气	100~110
国内小计	250%~280, 67%
进口管输	80~90
进口 LNG	40~50 (3.1~3.9 千万吨/a)
国外小计	120%~140, 33%

(4) 近一半的煤通过 CCS 洁净利用，能否实现？

表 0-5 列出了 2008 年 4 月颁布的煤化工规划数据。但自那时起的一年多以来，情况已经有很大变化。油价冲高和气候变化压力在中国掀起了一波波煤化工高潮。文献 [8] 甚至提出了 12 亿吨煤/年大化工的构想；中国自主知识产权的气化炉走出了国界^[9]；IGCC 等从煤发电角度考虑 CCS 的各种技术的规模化应用也已起步。中国在煤 CCS 利用的技术和规模上，必将领先于世界。表 0-2 中煤 CCS 利用的目标，是完全可以实现的。

 2008 年 4 月颁布的中国煤化工中、长期规划^[10]

表 0-5

项目(百万 t/a)	2010 年	2015 年	2020 年
煤制油	1.5	10	30
甲醇	16	38	66
二甲醚	5	12	20
煤制烯烃	1.4	5.0	8
(估计耗煤, 亿 t/a)	1	3	4.2

四、中国低碳能源战略和天然气产业发展

1. 中国碳减排任务和途径既有特殊性，也有后发优势

世界各国实现低碳发展都有三个共同的途径。一是节制用能和提高能效，指标是降低总能耗和人均能耗；二是快速提高没有 CO₂ 排放的核能和可再生能源的比率；三是采用 CCS 技术的化石能源（主要是煤）的洁净利用。

与已经实现工业化的发达国家相比，中国的特殊性在于：（1）煤在一次能源中比率过高，占 70%（世均 28%），天然气则过低（为 3.5%，世均 23%）；加上经济的粗放性，致使能源利用效率低（36.8%，低于世均的 50%）。（2）处于工业化中期，总能耗〔（28.5 亿 tce/a 和人均能耗 2.1 tce/（p·a）〕还要增加。（3）除水电外，新能源及可再生能源基础薄弱，成为主导一次能源还需要较长的时间。（4）煤的洁净利用和 CCS 刚刚起步，受资金和技术的制约，也需要时间。

这个特殊性，特别是（1），既展示了中国减排任务的艰巨性，也指出了通过产业结构优化调整、改变粗放的发展模式，以及尽快调整化石能源中煤、油、气的比率，实现藉总能效快速提高而减排的潜力和后发优势。

2. 在 2030 年之前的继续工业化时期，中国碳减排的关键是降低能源需求总量增长的速度和比率，体现为能源弹性系数不能超过 0.36

因为如果能源弹性系数继续保持改革开放前 30 年的 0.5 的话，那么 2030 年中国总能耗将达 60 亿 tce/a，人均能耗 4.1 tce/（p·a）。由于届时核能与可再生能源只能达到 11~12 亿 tce/a 的规模；则其余 48 亿 tce/a 化石能源导致的 CO₂ 排放量将超过 100 亿 t，占届时气候变化所约束的世界排放总量的 40% 以上，是不可接受的。因此，今后的 20 年，中国只能藉优化产业结构、节制用能和提高能效，使在 0.36 的能源弹性系数下保持经济持续发展和实现工业化。

能不能在 0.36 的能源弹性系数条件下实现中国经济的持续增长和继续并完成工业化？这可能是让人心存疑虑的。拿已经工业化国家的历史数据可以证明，中国还要发展重化工业，就需要保持高的能源弹性系数。这是一个简单的算术题。但是，有一个因素是不能忽略的，那就是科技进步对能源利用效率提高的重大推动作用。现在的能源科技与主要发达国家完成工业化的 20 世纪 60~80 年代相比，已有了长足的进步。20 世纪 70 年代末最先进的英国 Spay 燃气轮机的单循环效率只有 24%，目前大型燃机单循环效率已可达 44%，几乎提高了一倍。世界能源总体利用效率当时只有 40% 左右，现在已超过 50%。开放的中国已经并且将继续引进各种先进技术和设备，来发展自己的工业和其他产业，为什么能效不能与时俱进呢！如果过去的 30 年，中国以 28%~36% 的能效和 0.5 的能源弹性系数实现了世界钢铁、煤炭、水泥等高耗能产量的世界遥遥领先和经济总量翻两番。那么，今后的 20~30 年，只要中国把能效提高到世界平均的 50%，以 0.36 的能源弹性系数继续和完成工业化、经济再翻两番，就也是一个简单的算术题。

优化产业结构主要是藉宏观调控抑制钢铁、化肥、电解铝等一批高耗能产业的过度扩张和大量出口。在全球化的格局下，摈弃一切自给自足的小农经济思想，以全方位评价

(GSA)的思维^[11],依照资源、环境等要素配置,把产业链的不同环节安置在不同的国家和地区。不单纯以眼前和局部的经济指标作为宏观调控的尺度,而是以全生命周期分析(LCA)的社会经济效益、能效、碳排放3个指标来衡量产业发展的布局和取舍。几年前,日本把全部先进的预焙槽电解铝停掉,全部需求以回收废铝来满足的时候,中国却在保留许多落后的自焙槽工艺电解铝的情况下,以几百万吨/年的规模扩张电解铝。LCA研究指出,投资者获取40亿元/年的代价是社会效益损失上千亿元^[12、13、14]。

节制用能在中国政府所提倡的“循环型经济,节约型社会”里有充分的阐述。不过目前无论在衣、食、住、行的各个领域,相当一部分人铺张浪费、挥霍排场之风还很盛行;节制用能在中国的潜力还相当大。

3. 在2030年之前,最重要的提高能效措施是尽快增加天然气在一次能源构成中的比率

中国的GDP从1990年的1.87万亿增加到了2008年的30万亿。也就是说,94%是近18年新增的。其中的工业、建筑和交通等增加部分,相当多是从国外(成套)引进的先进技术和设备。为什么能效却比国外低13个百分点之多呢?

中国到2008年煤电转换效率约35%,而天然气联合循环发电效率为50%~60%;天然气冷热电联供(DES/CCHP)的能源利用效率更在70%以上。而天然气CCHP的CO₂排放则只有煤电+燃煤锅炉的1/4。中国总能效比世界平均值低13个百分点的一个重要原因是天然气在一次能源中的比率太小。经过几年的努力才从2.7%提高到3.5%,远低于世界平均值的23%~25%。在20年内把天然气比率从3.5%提高到17%,是中国能够在人均能耗3tec/(p·a)下实现中等发达的最重要保证。巴厘岛路线图指出的发展天然气减排CO₂措施,对世界来说是“锦上添花”,对中国则是“雪中送炭”——更侧重在其提高能效的作用。

主要战略措施包括:(1)作为主要工业燃料(包括68万台小锅炉中的8成)的煤(占全国煤耗的30%,其余55%发电,15%制水泥)尽可能采用集约化的天然气DES/CCHP替代;(2)占建筑物耗能80%的采暖、空调、热水和占14%的用电,尽可能用天然气DES/CCHP集约化高效联供;(3)占中国1.3亿t/a柴油耗量近30%的中、重型卡车,改用高效、廉价、低排放的LNG车(还可大幅度降低石油对外依存度,保障能源安全)^[15、16、17]。这3项技术在发达国家已经开发和成熟应用,但还没有充分推广。如果中国能够随着天然气的快速普及而同时普及推广这些技术,就能真正发挥“后发优势”。此外还有用天然气替代LPG等实现城市炊事燃料洁净化,天然气调峰发电等的节能减排效果,自不待言。

4. 2030年之后到2050年,新能源、可再生能源利用和CCS的CO₂减排作用将更加重要

因为到那时科技进步将使新能源开发成本大幅度降低,可供量大大增加,占一次能源的百分比也将大大提高;公众节能意识的普及和能源利用效率的进一步提高使总能耗比2030年不会有大幅度的增加,因而不但化石能源在一次能源中所占的比率将稳步下降,而且绝对耗量也将递减;bp公司刚刚宣布的“石油还能用42年、天然气60年、煤122年”的推断将彻底改变,三种化石能源资源将会被“细水长流”地“物尽其用”,直到百年以后。

5. “能源转型”将不仅仅是一次能源的构成，更重要的是从一次能源到终端利用的模式和技术途径

人们的观念往往落后于时代的发展和进步，并采用习惯思维来计算和推理。图 0-4 展示了从各种一次能源到工业和建筑物用能、交通用能、有机化工原料三类终端利用目前科技已经掌握的主要技术路线^[18]。

以工业燃料来说，中国迄今主要是依靠煤。除了提供发电转换的部分，如上所述，能效几乎相差一倍以上；直接用于工业用热、用蒸汽的燃料，采用天然气冷热电联供（DES/CCHP）的集约化的能源供应系统途径，比传统的锅炉和加热炉途径，效率也几乎高出一倍^[20]。民用和商用建筑物以空调制冷采暖和热水为主的能源供应系统，也是这样^[16]。

再以交通能源为例，虽然迄今为止绝大部分还是依赖石油产品（图中黑色线），但是不可以按照交通总量的扩大而对石油需求增加量作随着线性外推。因为飞速的科技进步使电、LNG、煤基二甲醚、生物燃料和氢气等替代能源，凭借它们在经济、能效和 CO₂ 排放上的优势，必将在今后 20~40 年替代大部分汽柴油。智能电网所推进的电动和混合动力汽车将替代部分公交和私家车；新型高效 LNG 车将取代相当比率的柴油车；麻风树、亚麻寄、藻类等为原料的第二代生物燃油 2040 年将占航空燃料的 50%，非粮乙醇取代部分汽油，都已取得技术突破。氢气燃料电池车也将在 20 年后实现商业化应用。

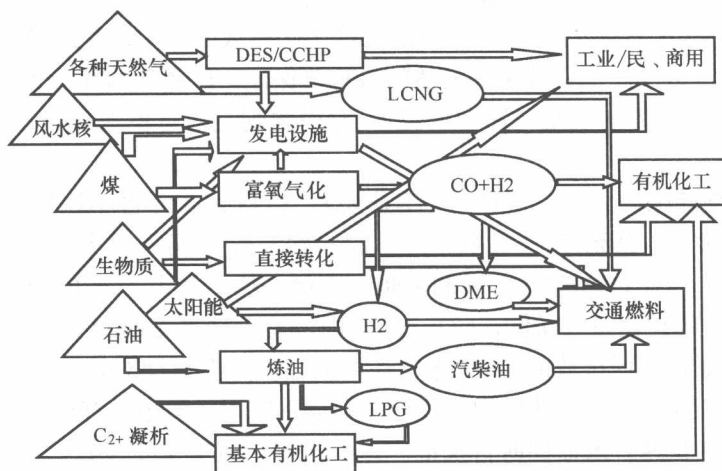


图 0-4 从一次能源到终端利用途径的大系统优化示意^[18]

至于有机化工原料，本来是从 20 世纪初才从煤化工转为石油化工的。一百年后的今天，带 CCS 的现代煤化工也在经济、能效和 CO₂ 排放三个指标上，初步具有了对石油化工的竞争力。虽然在不同国家、不同时期、不同条件下的具体比较结论会有不同。但是显然在大多数情况下，天然气或碳一化工不会成为主流，因为从三个指标来衡量，碳一化工并不全比煤和石油化工好；但利用天然气直接、高效发电和用作工商业燃料，却有煤和石油难以比拟的优势。

现代信息技术已经完全能够追踪所有上述技术途径的最新科技成果的技术经济数据，建立包括所有从一次能源到终端利用的模式和技术途径的大系统模拟、展示和优化决策的

模型。既可用于特定终端应用目标选取不同一次能源路线的比较决策,也可用于不同地区或国家在各个时期能源战略辅助决策工具。

拓展时间和空间的视野,高屋建瓴、高瞻远瞩,充分认识科技进步的巨大潜力和关键作用,利用好全球化的正面因素,用大系统优化的思维认识和处理当今世界能源大转型带来的挑战和机遇,尽到政府的责任、发挥它的政策、立法、规划和组织职能,中国必将能够同时完成现代化和能源转型两个历史使命。

参考文献

- [1] 气候变化国际组织网站. www.ipcc.ch/ipccreports/sers/emission/index.php?idp=135
- [2] 李俊峰. 气候变化孕育的商机—低碳经济与可再生能源. 大珠三角地区低碳经济发展论坛, 广州, 2008.6.23
- [3] 唐伟章. 确保可持续的能源供应. 南沙科技论坛, 香港科技大学, 2005.5.26
- [4] 《中国应对气候变化国家方案》
- [5] 徐建中. 中国能源战略的一些问题. 南沙科技论坛, 香港科技大学, 2005.5.26
- [6] 姜克隽、胡秀莲等. 中国 2050 年低碳情景和低碳发展之路. 中外能源, 14 (6), 1~7
- [7] 黄其励. 科技日报, 2008 年 7 月
- [8] 李琼玖等. 中外能源
- [9] 兖矿集团, 华东理工大学. 多喷嘴对置式煤气化技术及其工业应用, 2009 中国煤化工技术、信息交流会暨产业发展研讨会, 深圳, 2009.4.1
- [10] 中国煤化工产业规划, 中外能源
- [11] 华贲. 经济与资源、环境协调的全方位评价法. 华北电力大学学报, 2004, 31 (6): 1~4
- [12] 王小伍, 华贲. 从电解铝工业看能源和环境与产业结构的协调. 能源研究通讯, 2004, 4: 35~40
- [13] 王小伍等. 中国电解铝工业的多因素综合生命周期评价. 轻金属, 2005, (6): 3~6
- [14] 金涌. 低碳经济: 理念、实践、创新. 全国石油与化工行业节能节水减排高级研讨会, 北京, 2009.8.29
- [15] 华贲, 龚婕. 分布式能源与天然气产业在中国协同发展的历史机遇. 能源政策研究, 2007, 5: 14~20
- [16] 华贲. 中国城市建筑能源系统的集成创新. 华南理工大学学报, 2007, 35 (10): 111~116
- [17] 熊标, 华贲. 加速开发中国 LNG 汽车产业链. 中外能源, 2007, 12 (1): 12~15
- [18] 华贲. 中国能源和资源优化配置的战略思考. 能源思考, 2008, 3: 06~11
- [19] 倪维斗. 以煤气化为核心的多联产系统. 论文集, 2009, 8: 3~20
- [20] 华贲. 建设工业园区冷热电联供的能源系统. 工厂动力, 2009