

获得国家科技支撑计划 (2011BAK07B01-04) 资助

建筑物热惰性 的研究与应用

Research and Application of Building Thermal Inertia

韩莹 张宝忠 苏幼坡 著

中国建筑工业出版社

建筑物热惰性的研究与应用

韩莹 张宝忠 苏幼坡 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建筑物热惰性的研究与应用/韩莹, 张宝忠, 苏幼坡著.

北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 9

ISBN 978-7-112-15374-9

I. ①建… II. ①韩… ②张… ③苏… III. ①建筑热工-研究
IV. ①TU111. 19

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 081538 号

本书首先介绍了研究建筑物综合热惰性的意义, 国内外的研究现状。其次, 介绍了研究建筑物热惰性的理论基础。再次, 介绍了建筑物综合热惰性的实验研究, 包括对实际建筑物的测量和在实验室搭建实验平台的方法研究热惰性的变化规律。然后, 介绍了建筑物综合热惰性的计算机模拟研究。最后, 介绍了建筑热惰性在供热供冷调节和生态建筑中的应用。

* * *

责任编辑: 杨 杰 张伯熙

责任设计: 李志立

责任校对: 陈晶晶 关 健

建筑物热惰性的研究与应用

韩 莹 张宝忠 苏幼坡 著

*

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

北京红光制版公司制版

北京中献拓方科技发展有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 $\frac{3}{4}$ 字数: 220 千字

2013 年 9 月第一版 2013 年 9 月第一次印刷

定价: 28.00 元

ISBN 978-7-112-15374-9

(23021)

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)

前 言

随着世界环境和能源问题的日益严重,节约能源保护环境已经成为各国政府的重要工作之一。在所有能源消耗中,建筑能耗已经占到世界总能耗的 $1/5$ 。在中国,建筑用能已经达到全国能源消费总量的 $1/4$ 。而采用集中供热的北方城镇,其采暖能耗占城镇建筑能耗的 40% 左右,为建筑能源消耗的最大组成部分。对于目前现有的许多集中供热系统都没有采用先进的调节手段,只能依据室外气温的变化依靠经验来进行调节,所以普遍存在能源浪费的问题。在供热调节过程中,除了要考虑室外气温,还应结合供热管网的热惰性和建筑物的综合热惰性进行综合考虑。另外,在生态建筑的被动技术中,建筑物的热惰性也为充分利用自然条件,如太阳辐射、自然通风等发挥节能的重要作用。因此,从节能环保的角度出发,作者对建筑物的热惰性进行了研究和探索。

本书介绍的是建筑物的综合热惰性的研究。首先,介绍了研究建筑物综合热惰性的意义,国内外对建筑围护结构及建筑物蓄热性能的研究现状。其次,介绍了研究建筑物热惰性的理论基础,及相关的物理参数。再次,介绍了建筑物综合热惰性的实验研究,其中包括实测和实验室模型研究。在实测研究中,通过对实际住宅建筑室内环境温度和围护结构的温度进行测量,研究不同朝向房间内壁温度及室内温度在采暖期和非采暖期内的变化规律。在实验室研究中,通过建造住宅建筑的缩比模型进行实验,研究不同窗墙比、围护结构保温、室内人员活动以及室内家具对建筑物综合热惰性的影响。然后,介绍了建筑物综合热惰性的计算机模拟研究。介绍了目前常用的建筑能耗模拟软件。并介绍了利用 eQUEST 软件建立模型,分别就采暖期内无任何采暖设备、散热器采暖情况下的室内温度进行模拟并进行了比较分析,阐述各因素对建筑物综合热惰性的影响。以延迟时间和衰减倍数两个热惰性参数的变化为依据,分析总结了寒冷地区住宅建筑综合热惰性的特点。最后,介绍了建筑物热惰性在供热供冷调节和生态建筑中的应用。

本书共分为七章,主要由河北联合大学建筑工程学院(地震研究中心)韩莹撰写。书中的实测和实验研究是作者于 2008 年至 2011 年在天津大学博士研究生学习和研究期间完成的。在此,感谢博士生导师朱能教授和田喆副教授对本人研究工作的指导!本书的完成也得到了建筑工程学院领导苏幼坡院长的支持和帮助,在此也表示诚挚的感谢!

本书主要供建筑节能研究和技术人员自学使用和参考,也可供大专院校建筑设备等专业作为研究生实践教材使用。

由于作者水平有限,书中难免会出现谬误和不妥之处,恳请同行和广大读者批评指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 背景	1
1.1.1 能源现状	2
1.1.2 建筑能耗现状	10
1.1.3 建筑蓄热的重要性	13
1.2 国内外研究现状	16
1.2.1 建筑围护结构热工特性的研究现状	16
1.2.2 建筑蓄热特性的研究现状	18
1.3 研究建筑物热惰性的意义	20
第2章 建筑物热稳定性的理论分析	22
2.1 建筑蓄热体的蓄热特性	22
2.1.1 建筑蓄热体的分类	22
2.1.2 建筑蓄热性能评价指标	23
2.1.3 建筑围护结构的热稳定性	28
2.2 室外空气综合温度	42
2.2.1 室外辐射强度的计算	42
2.2.2 室外空气综合温度的计算	44
2.3 室内环境的热稳定性	48
2.3.1 建筑室内热过程分析	48
2.3.2 室内空气温度计算	51
2.3.2.1 室内空气温度精细计算方法	51
2.3.2.2 室内空气温度简化计算方法	51
2.4 本章小结	55
第3章 建筑综合热惰性的实测研究	56
3.1 实测介绍	56
3.1.1 选取被测建筑	56
3.1.2 建筑室内综合热惰性的影响因素	57
3.1.2.1 建筑的围护结构	57
3.1.2.2 建筑室内的通风	61
3.1.2.3 建筑室内的家具	63
3.1.2.4 建筑室内的热源	66

3.2 实测方案	69
3.2.1 测量内容	69
3.2.2 测量仪器	69
3.2.3 测点布置	71
3.3 测试结果分析	73
3.3.1 供暖期室内温度的变化	73
3.3.2 非采暖期室内温度的变化	77
3.4 本章小结	79
第4章 建筑综合热惰性的实验研究	80
4.1 建筑综合热惰性实验设计	80
4.1.1 相似理论简介	80
4.1.2 模型实验的相似准则	81
4.1.2.1 非稳态传热相似	81
4.1.2.2 相似比的确定	84
4.1.3 实验模型设计	84
4.2 实验台的设计	88
4.2.1 测点布置	88
4.2.2 测试仪器	88
4.2.2.1 环境模拟设备	88
4.2.2.2 数据采集系统	92
4.3 模型实验测试	93
4.3.1 实验安排	93
4.3.2 实验结果分析	93
4.3.2.1 直观分析	94
4.3.2.2 方差分析	95
4.4 本章小结	95
第5章 建筑综合热惰性的模拟研究	96
5.1 建筑能耗模拟软件	96
5.1.1 建筑能耗模拟软件介绍	97
5.1.2 建筑能耗模拟软件对比	103
5.1.3 能耗模拟软件的气象数据	105
5.2 建筑模型的建立	107
5.2.1 建筑简介	107
5.2.2 模拟参数的设置	108
5.3 模拟结果分析	111
5.3.1 全年温度变化	111
5.3.2 采暖期温度变化	112

5.3.3 非采暖期温度变化	113
5.3.4 建筑墙体材料对综合热惰性的影响	113
5.3.5 建筑窗墙比对综合热惰性的影响	114
5.4 本章小结	115
第6章 建筑物热惰性的应用	116
6.1 供热（冷）系统的运行调节	116
6.1.1 集中供热系统	116
6.1.2 区域供冷系统	117
6.1.3 运行调节	120
6.2 生态建筑	121
6.2.1 生态建筑简介	121
6.2.2 热惰性在生态建筑中的应用	124
第7章 总结与展望	127
7.1 结论	127
7.2 展望	127
参考文献	129

第 1 章 绪论

1.1 背景

能源是人类现代生活赖以生存和经济发展的物质基础。随着世界人口的增长和经济的发展，能源短缺、环境污染、生态恶化等问题日趋严重，能源供需矛盾日益突出。当前世界能源以化石资源消费为主，少数国家（如中国）是以煤炭为主，大部分国家则是以石油与天然气为主。大规模使用化石燃料导致的环境污染已经到了地球难以承受的程度。大量化石能源人为燃烧产生的二氧化碳再加上生命呼吸、生物体腐败及火灾等产生的二氧化碳，已经超过了绿色植物光合作用吸收的二氧化碳的量，从而破坏了自然界的二氧化碳循环平衡，已经对地球臭氧层造成了破坏和其他一些气象反常现象。

因此，全世界各个国家都在致力于能源消费结构的调整和能源产业的发展。在 2012 年财富世界 500 强的前 20 排名公司中有 13 家是能源产业方面的公司，如表 1-1 所示。由此可见，能源问题是全世界关注的一个非常重要的问题。

财富世界 500 强前 20 家公司 表 1-1

排名	公 司	营业收入 (百万美元)	利润 (百万美元)	国家
1	荷兰皇家壳牌石油公司 (ROYAL DUTCH SHELL)	484489.0	30918.0	荷兰
2	埃克森美孚 (EXXON MOBIL)	452926.0	41060.0	美国
3	沃尔玛 (WAL-MART STORES)	446950.0	15699.0	美国
4	英国石油公司 (BP)	386463.0	25700.0	英国
5	中国石油化工集团公司 (SINOPEC GROUP)	375214.0	9452.9	中国
6	中国石油天然气集团公司 (CHINA NATIONAL ETROLEUM)	352338.0	16317.0	中国
7	国家电网公司 (STATE GRID)	259141.8	5678.1	中国
8	雪佛龙 (CHEVRON)	245621.0	26895.0	美国
9	康菲石油公司 (CONOCOPHILLIPS)	237272.0	12436.0	美国
10	丰田汽车公司 (TOYOTA MOTOR)	235364.0	3591.3	日本
11	道达尔公司 (TOTAL)	231579.8	17069.2	法国
12	大众公司 (VOLKSWAGEN)	221550.5	21425.5	德国
13	日本邮政控股公司 (JAPAN POST HOLDINGS)	211018.9	5938.8	日本
14	嘉能可国际 (GLENCORE INTERNATIONAL)	186152.0	4048.0	瑞士
15	俄罗斯天然气工业股份公司 (GAZPROM)	157830.5	44459.6	俄罗斯
16	意昂集团 (E.ON)	157057.1	- 3085.4	德国

续表

排名	公 司	营业收入 (百万美元)	利润 (百万美元)	国家
17	埃尼石油公司 (ENI)	153675.5	9538.5	意大利
18	荷兰国际集团 (ING GROUP)	150570.7	6590.7	荷兰
19	通用汽车公司 (GENERAL MOTORS)	150276.0	9190.0	美国
20	三星电子 (SAMSUNG ELECTRONICS)	148944.4	12059.1	韩国

在全球的能耗中，建筑及其运行的能源消耗和环境效应，对全球资源和环境的影响越来越明显。降低建筑能耗和减少污染排放，节约能源、保护环境，实现建筑与自然能够和谐共存，是全球面临的共同课题。作为一个发展中的人口大国，中国面临着发展经济、改善民生的繁重任务，也面临着资源环境制约的严峻挑战。

1.1.1 能源现状

人类社会的发展是以能源为基础的，衣食住行离不开能源。化石能源，例如石油、煤和天然气是不可再生的能源，虽然化石能源在地球上依然在不断生成，但其生成的速度，不是以年为时间单位计算，而是要用地质年代来计算，是一个十分漫长的过程，因此，全球的化石能源枯竭是不可避免的。

根据英国石油世界能源统计数据显示，截止到 2011 年底，全世界的石油探明储量为 2343 亿吨，主要分布在中东地区；天然气储量为 208.4 万亿立方米，主要分布在中东地区和欧亚大陆；煤炭储量为 8609.3 亿吨，在北美洲、欧洲和亚洲都有较多分布，如表 1-2，

图 1-1~图 1-3 所示^[1]。

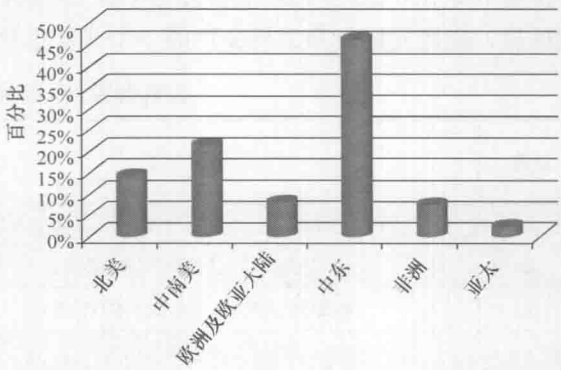


图 1-1 世界石油储量分布情况

世界能源储量 表 1-2

	石油 (亿吨)	天然气 (万亿立方米)	煤炭 (亿吨)
北美	335	10.8	2450.9
中南美	505	7.6	125.1
欧洲及欧亚大陆	190	78.7	3046.0
中东	1082	80.0	12.0
非洲	176	14.5	316.9
亚太	55	16.8	2658.4
总量	2343	208.4	8609.3

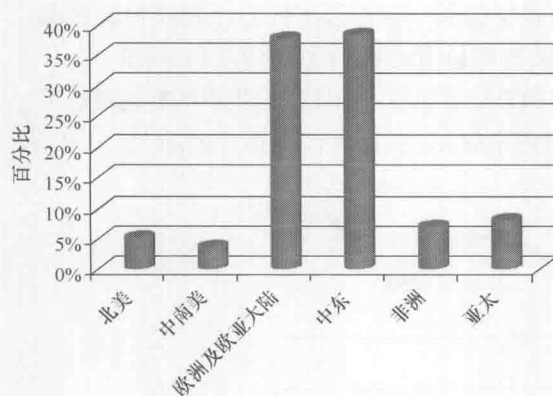


图 1-2 世界天然气储量分布情况

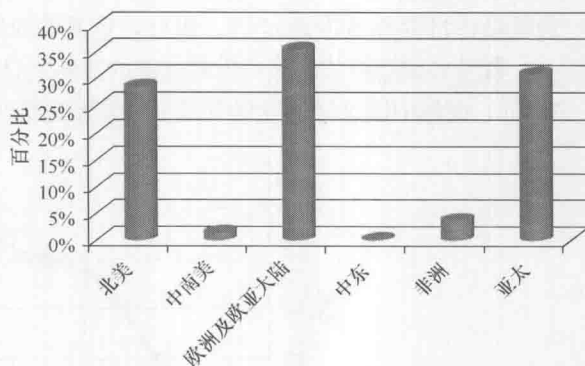


图 1-3 世界煤炭储量分布情况

从能源储量上看，中东地区的石油和天然气约占世界总量的 50% 左右，北美、亚太地区、欧洲及欧亚大陆的煤炭分别占到 30% 左右。可见，世界各地区能源的储量不均衡。由于各个地区和国家经济发展情况差距较大，所以各地区的能源消耗量也会出现很大不同，如图 1-4 所示。

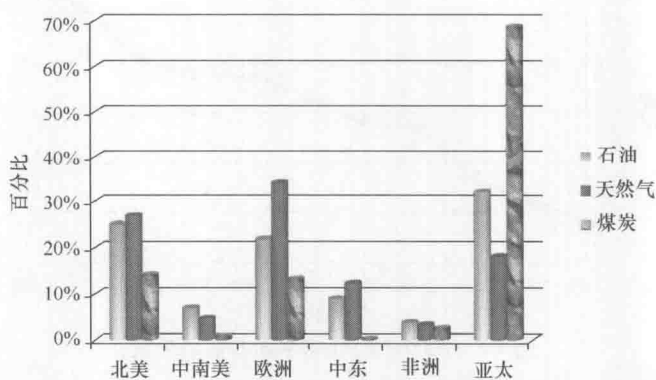


图 1-4 2011 年世界化石燃料能源消耗情况

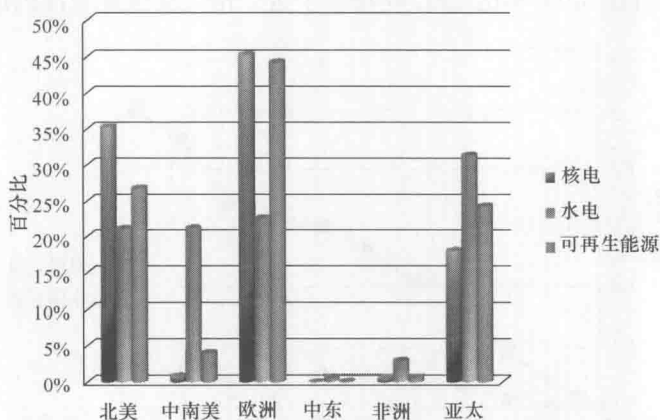


图 1-5 2011 年世界非化石燃料能源消耗情况

由图 1-4、图 1-5 可知，亚太地区的化石燃料的能源消费结构中煤炭的消耗量约占世界

煤炭消费总量的 69%，而欧美发达地区的煤炭消费量较低。欧洲国家的非化石燃料的能源消耗量占世界总量接近 45%。因此，世界各地区的能源利用效率方面还存在较大差距。

随着各国经济的发展，世界能源的消耗量总体趋势是增加的，2011 年全世界的能耗增长了 2.5%，而像中国这样的发展中国家对能源的需求量越来越大，如图 1-6、图 1-7 所示^[1]。

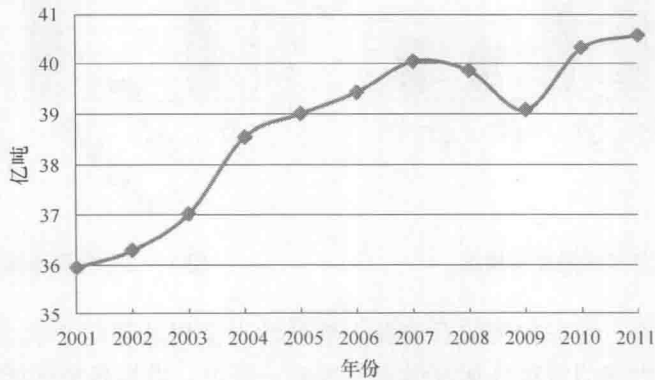


图 1-6 2001~2011 年世界石油消耗量

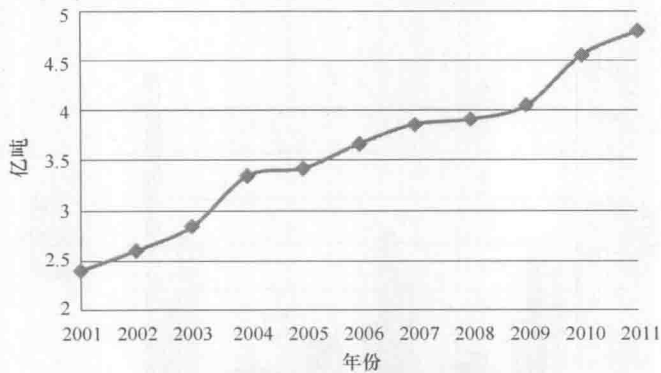


图 1-7 2001~2011 年中国石油消耗量

由图 1-8 可以看出，世界石油和中国石油的消耗量在 2001~2011 年期间，都是逐年增加的，但是中国石油 2011 年比 2001 年增长了近 2 倍，而世界石油的增幅是 12%。

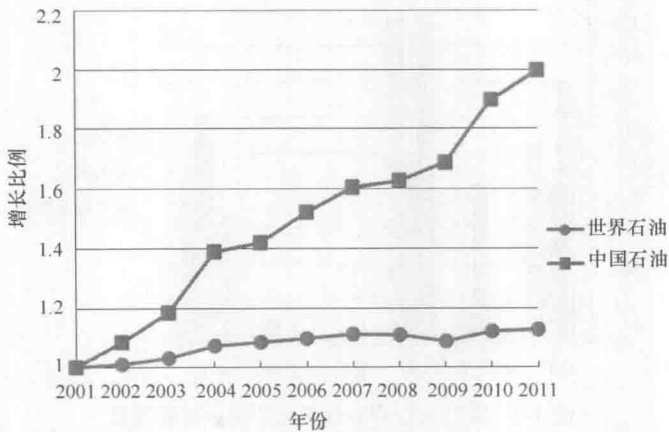


图 1-8 2001~2011 年世界和中国石油消耗增长比例图

世界天然气 2001~2011 年期间,除了 2009 年有所下降以外,总体的趋势是增长的,增幅为 31%,而中国天然气 2011 年的消耗量是 2001 年的 4.4 倍,增长趋势远超过世界总体增长(图 1-9~图 1-11)。

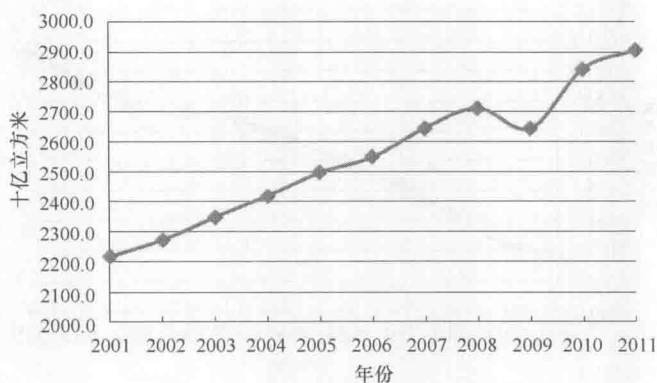


图 1-9 2001~2011 年世界天然气消耗量

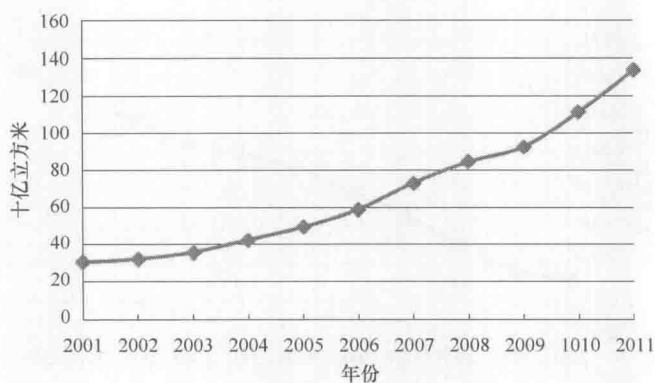


图 1-10 2001~2011 年中国天然气消耗量

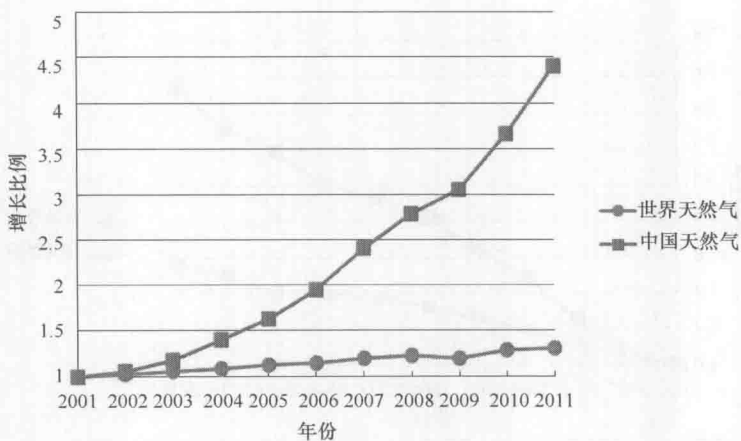


图 1-11 2001~2011 年世界和中国天然气消耗增长比例图

世界煤炭的消耗量 2011 年与 2001 年比较，增幅为 60%，是所有化石燃料增幅最快的。中国煤炭的消耗量 2011 年是 2001 年的 2.55 倍（图 1-12~图 1-14）。

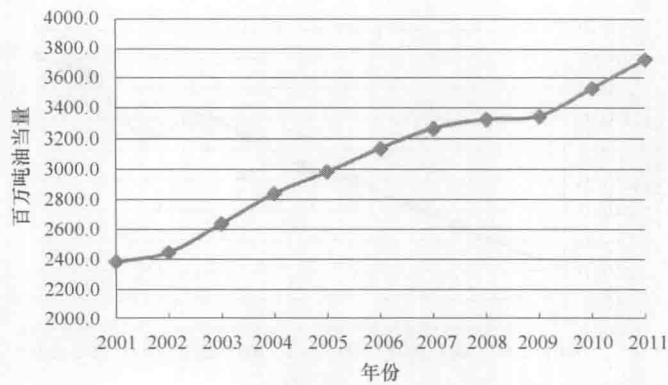


图 1-12 2001~2011 年世界煤炭消耗量

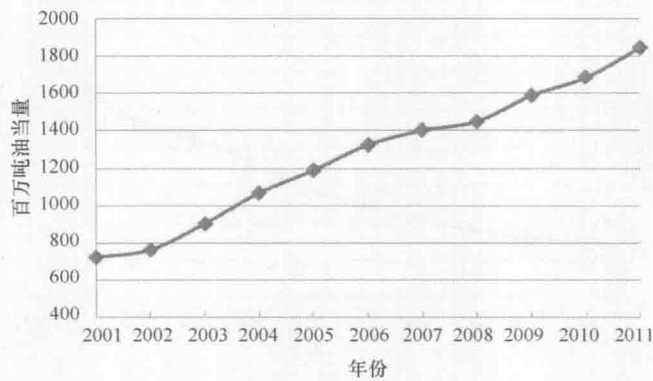


图 1-13 2001~2011 年中国煤炭消耗量

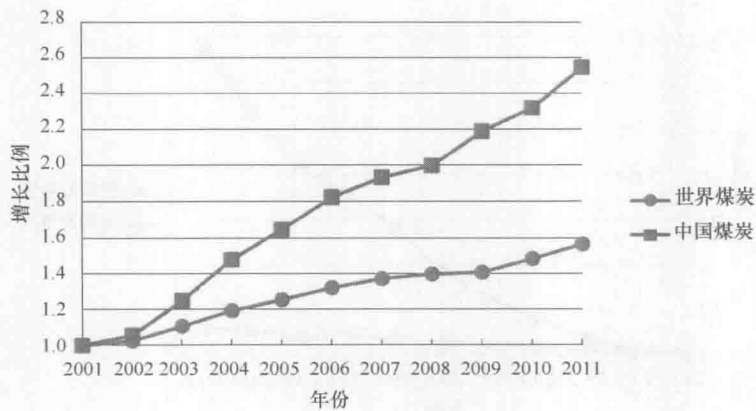


图 1-14 2001~2011 年世界和中国煤炭消耗增长比例图

化石燃料在燃烧过程中大部分碳转化为 CO_2 ，其中煤的排放量最大，石油次之，天然气最小。目前化石燃料仍然在能源消耗中占绝对比重。而我国煤炭的消耗量占总能源消费的 75%，因此开发新能源，节能减排是关乎国家可持续发展的关键。在利用核能、水电和可再生能源方面，各个国家也都致力于这些新能源新技术的开发和应用，2001 年~2011 年的消耗量见图 1-15。

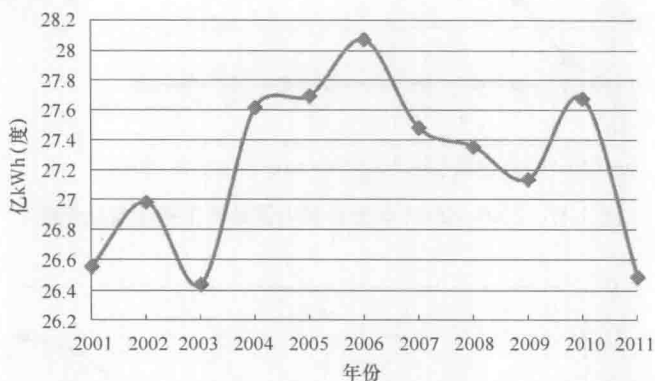


图 1-15 2001~2011 年世界核能消耗量

在 2001~2011 年期间，世界核能的消耗量几乎没有变化，基本保持在 26 亿千瓦时的消耗量；中国核能消耗量在 2001~2011 年期间增长了 5 倍。核能是最具希望的未来能源。虽然核能的安全性仍然存在，但是较化石能源具有很大优势。如果能够解决好核能的安全运行及核废料的处理，核能可以解决世界的能源危机问题（图 1-16、图 1-17）。

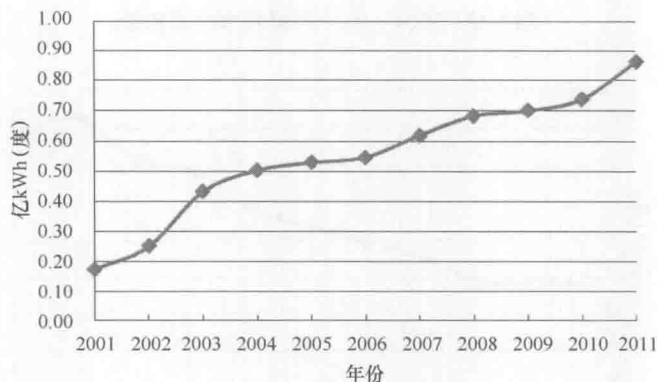


图 1-16 2001~2011 年中国核能消耗量

石油、煤炭、天然气和核能发电，都需要消耗不可再生的燃料资源，而水电，并不消耗水资源，而是利用江河流动所具有的能量，是一种十分清洁的能源。因此世界水电消耗量在 2001~2011 年期间增长了 1.35 倍，2011 年的消耗量为 35 亿千瓦时（图 1-18、图 1-20），是非石化能源中消耗量最多的，由此也说明各个国家已经开始开发和利用水电能源。中国水电能源的消耗在 2001~2011 年期间也增长了 2.5 倍（图 1-19、图 1-20）。我国是世界上水电能源最丰富的国家之一，如果能有效解决目前水电能源开发中的重点难点问题

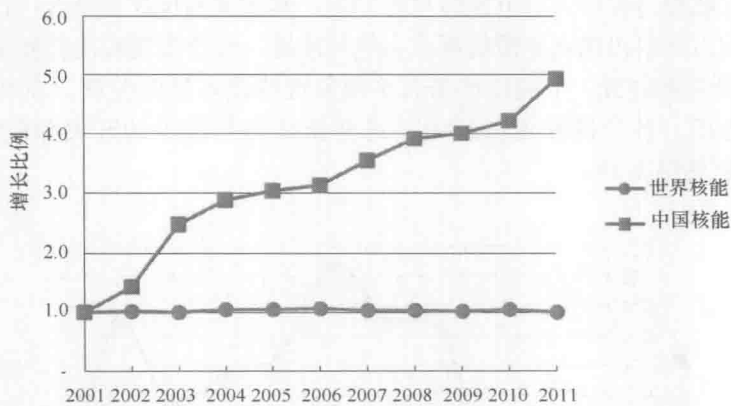


图 1-17 2001~2011 年世界和中国核能消耗增长比例图

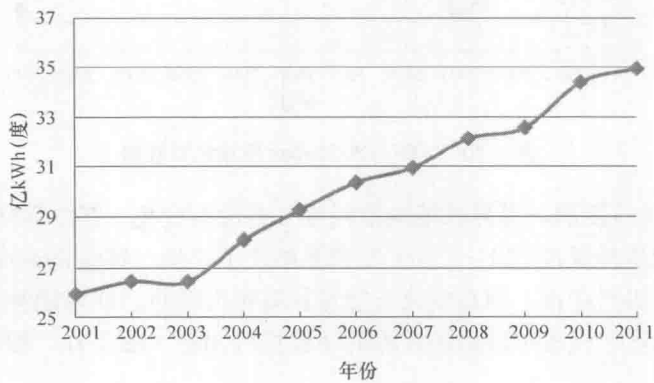


图 1-18 2001~2011 年世界水电消耗量

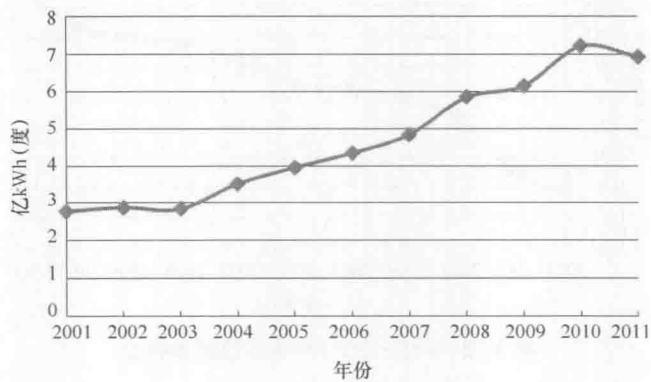


图 1-19 2001~2011 年中国水电消耗量

题，使水电能源建设能够全面、协调、可持续发展，能够有效调整我国能源的消费结构，保证经济持续快速发展。

可再生能源主要包括风能、太阳能、地热能等，由于石化能源的大量消耗，而且随之带来的严重环境污染问题，世界各国也都开始开发和利用可再生能源，从图 1-21~图1-23

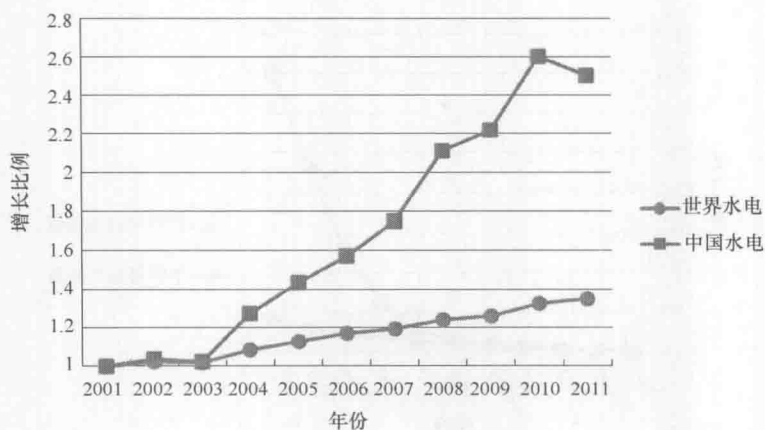


图 1-20 2001~2011 年世界和中国水电消耗增长比例图

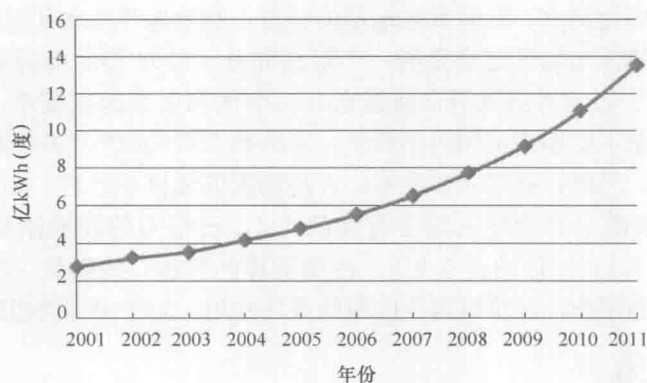


图 1-21 2001~2011 年世界可再生能源消耗量

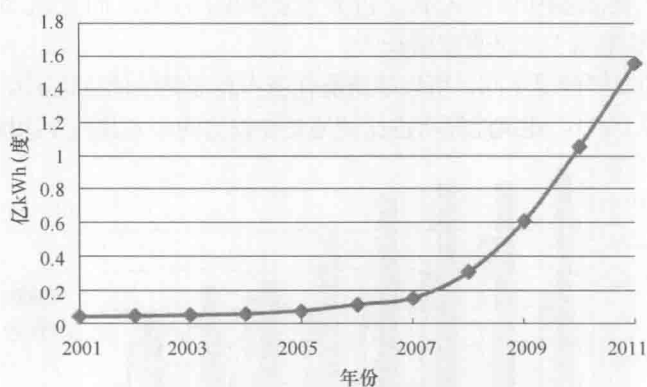


图 1-22 2001~2011 年中国可再生能源消耗量

可看出，世界可再生能源的消耗量在 2001~2011 年期间，增长了 4.9 倍；而我国的增长达到了 36 倍，由此可见，我国作为一个经济大国，也在不断加大可再生能源的利用。虽然增速可观，但是由于 2001 年我国的可再生能源消耗量只有 0.043 亿千瓦时，所以我国对可再生能源的利用总量仍然不够。国家仍需加大对可再生能源开发的投入，科研人员应

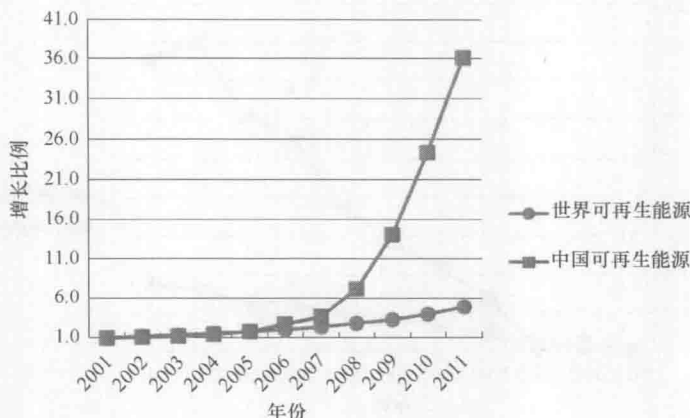


图 1-23 2001~2011 年世界和中国可再生能源消耗增长比例图

加快研发的速度，因地制宜，针对我国地域的特点，有效地开发和利用可再生能源。

中国作为全球能源市场日趋重要的一个组成部分，2008 年的能源消费已占世界能源消费总量的 17.3%^[2]，世界能源消费将越来越向中国和亚太地区聚集。未来几年内，中国煤炭国内生产量基本能够满足国内消费量，原油和天然气的生产则不能满足需求，特别是原油的缺口最大。另外，我国人口众多，人均能源资源相对匮乏。人均耕地只有世界人均耕地的 1/3，水资源只有世界人均占有量的 1/4，已探明的煤炭储量只占世界储量的 13.3%，天然气占 1.5%，原油占 0.9%。注重资源的节约，特别是一次能源的合理开发利用，提高能源的利用率，加快可再生能源的开发利用，对于中国来说既重要又迫切。

1.1.2 建筑能耗现状

根据美国能源部能源情报署《世界能源展望 2010》，建筑能耗已经占到世界总能耗的 1/5。2007 年，住宅建筑能耗已经占到全世界总能耗的 14%，而且从 2007 年至 2035 年，住宅建筑能耗将以每年 1.1% 的速度增长^[2]。

由于各个国家的发展情况不同，所以建筑能耗所占总能耗的比重也不尽相同。由部分国家的能耗数据显示（图 1-24），建筑能耗所占比例还是比较高的，尤其在发达国家比较明显。

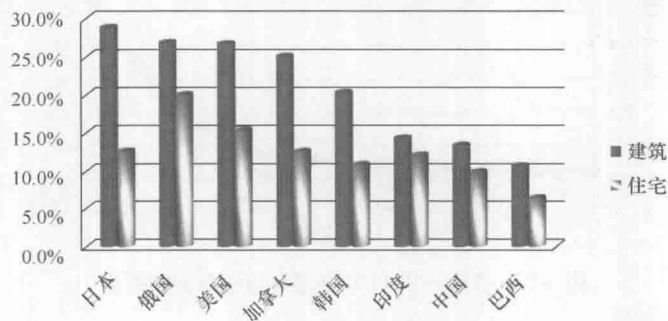


图 1-24 2007 年各国建筑能耗占社会总能耗的比例

中国是一个发展中的大国，也是一个建筑大国，我国的工业、建筑、交通是能源消耗最主要的三个部分。虽然中国的建筑能耗所占比例没有亚洲国家的日本、韩国和印度高，