

尖端可持续性

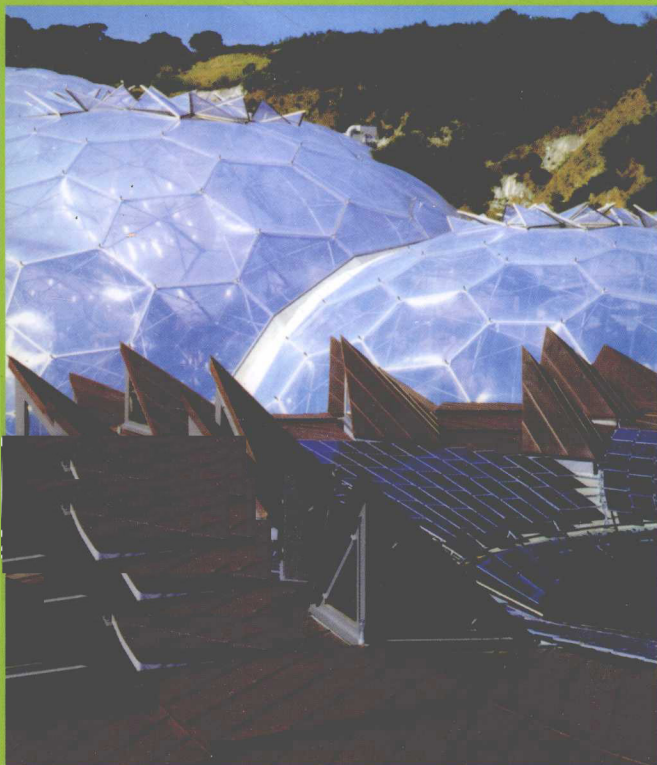
Sustainability at the Cutting Edge

——低能耗建筑的新兴技术

Emerging technologies for low energy buildings

(原著第二版)

[英] 彼得·F·史密斯 著
邢晓春 郁漫天 沈小钧 等译



中国建筑工业出版社

绿色建筑系列译丛

尖端可持续性

——低能耗建筑的新兴技术

(原著第二版)

[英] 彼得·F·史密斯 著
邢晓春 郁漫天 沈小钧 等译

中国建筑工业出版社

著作权合同登记图字：01-2007-6158号

图书在版编目 (CIP) 数据

尖端可持续性——低能耗建筑的新兴技术 (原著第二版) / (英) 史密斯著; 邢晓春等译. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010.12
(绿色建筑系列译丛)

ISBN 978-7-112-12423-7

I. ①尖… II. ①史…②邢… III. ①建筑-节能-研究 IV. ①TU111.4

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第196037号

Copyright © 2007, Flora Samuel
All rights reserved

This Second edition of Sustainability at the Cutting Edge by Peter Smith is published by arrangement with ELSEVIER LTD, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1 GB, England.

The moral right of the author has been asserted
Translation © 2010 China Architecture & Building Press

本书由英国 Elsevier 出版社授权翻译出版

译丛策划: 程素荣 尹珺祥
责任编辑: 程素荣
责任设计: 赵明霞
责任校对: 王颖 赵颖

绿色建筑系列译丛

尖端可持续性

——低能耗建筑的新兴技术

(原著第二版)

[英] 彼得·F·史密斯 著
邢晓春 郁漫天 沈小钧 等译

*

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
北京嘉泰利德公司制版
北京中科印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14½ 字数: 360 千字
2010年12月第一版 2010年12月第一次印刷

定价: 68.00 元

ISBN 978-7-112-12423-7

(19685)

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)

PREFACE

A report of July 2010 by the Netherlands Environment Assessment Agency has highlighted the rapid growth of carbon dioxide emissions over the past 40 years. It indicates that emissions are 25% higher than in 2000 and nearly 40% higher than in 1990.

Despite its phenomenal economic growth, China's annual per capita emissions are still well below those of the west at 6 tonnes per person. This compares with 17 tonnes in the US and 10 tonnes in the Netherlands. Nevertheless, this economic growth rate has resulted in a doubling of its emissions in nine years. According to the Agency, China has now overtaken the US as the World's leading emitter of carbon dioxide.

On the other hand, China has led the way in installing wind power, which, globally, increased by ~30% in 2009. China's share was about one third of the total. It also leads the world in large scale hydropower, accounting for 19% of global production. In the same year solar electricity installations increased by 46% compared with 2008 and China is one of the leading manufacturers and exporters of photovoltaic cells.

Maintaining a 9% economic growth rate poses enormous challenges in terms of the demand for energy. According to *China Energy Market Outlook from 'Energy Business Reports, July 2010*, this rate of growth and industrial development requires higher energy consumption per unit compared with the west. One consequence of this is that it is increasingly dependent on imported oil. At present China's energy utilization efficiency is only 33.4% which is almost 10% lower than the advanced international level. The unit energy consumption of major products from China's main industries is much higher than the international average. Consequently, there are huge opportunities to boost energy efficiency in buildings, transport and industry.

China is already experiencing early impacts of climate change and it is likely to be one of the hardest hit if the international community fails to collaborate to prevent global warming exceeding 2 degrees C compared with the 1990 level. This book provides some guidance as to how a combination of energy efficiency in buildings and clean energy production could alleviate the problems that will be the inevitable consequence of climate change.

Peter F Smith

July 2010

中文版序言

2010年7月，荷兰环境评估署（Netherlands Environment Assessment Agency）发表了一份报告，强调了在过去40年中二氧化碳排放量的快速增长。该报告指出，排放量比2000年增加了25%，比1990年增加了近40%。

尽管中国的经济在迅猛增长，其人均年排放量仍然大大低于西方国家，仅为人均6吨。相比之下，美国的排放量是人均17吨，荷兰是10吨。但是，这种经济增长率已经导致中国在9年之内，排放量翻了一番。根据该评估署的报告，目前中国已经取代美国，成为世界上二氧化碳的排放大国。

另一方面，中国在风电机的装机容量方面居世界领先，在2009年，增长了大约30%。中国在世界风电总量中占据大约三分之一。中国居世界领先地位的还有大型水力发电，占了世界水电产量的19%。在同一年，中国的太阳能发电装机容量比2008年增长了46%。同时，中国也是光伏电池的主要制造国和出口国之一。

中国保持着9%的经济增长率，意味着在能源需求方面必须面对巨大的挑战。根据2010年7月由“能源业务报告”（Energy Business Reports）机构发表的《中国能源市场展望》（China Energy Market Outlook），这种速率的增长和工业发展，相比西方国家，需要更多的每单位能源消耗量。后果之一是，中国将越来越依赖石油进口。目前，中国的能源利用率只有34%，这比先进的国际水平低了几近10%。中国主要行业的主要产品的单位能耗大大超出国际平均水平。因此，在建筑、交通和工业领域有着巨大的改进能效的机遇。

中国已经感受到气候变化的早期影响。如果国际社会未能就阻止全球变暖超过1990年水平2℃而达成协议的话，将成为最大的打击之一。本书提供了一些建议，阐述了建筑节能与清洁能源生产的结合，如何能够减缓那些将成为气候变化不可避免的后果的问题。

彼得·F·史密斯
2010年7月

序 言

随着人们对气候变化以及能源问题的远景越来越忧心忡忡，可再生能源所发挥的作用正显得越来越重要。本书正是应对这些关注点，致力于探究多种不同的技术，其范围从适合独户住宅的微型发电技术、到容量以兆瓦计的基底负荷电力（base-load electricity）技术^①。本书再版之后，内容更为丰富，不仅增加了案例研究，而且回顾了技术的最新进展。

随着本世纪的发展进程，这个世界将日益受制于诸如全球变暖、人口激增，以及部分发展中国家的快速经济增长等所带来的压力。从社会和经济意义上来说，我们这颗星球的生死存亡，最终将取决于能够在多大程度上以碳中性能源系统取代对化石燃料的依赖。本书为我们提供了有助于满足这些不断变化的需求的技术指南。

罗杰斯勋爵（Lord Rogers of Riverside）

理查德·罗杰斯合伙人事务所创办者

^① 基底负荷，即电网的最小负荷，满足在凌晨三点左右消费者用电最低峰时的电力需求。——译者注

绪 论

2001年10月，英国皇家建筑师学会（Royal Institute of British Architects—RIBA）主办了一次主题为“尖端可持续性”（Sustainability at the Cutting Edge）的会议，这一议题给笔者以灵感，成就了本书。约翰·霍顿（John Houghton）爵士作为气候变化问题方面的世界级权威人物，在大会开幕式上致辞。本次会议的主旨在于，对可再生能源资源背后所包含的科学与技术，提供概略性纵览，当然，我们首先假设在未来十年内，可再生能源占据主导地位。这样的回顾是基于人们越来越关注气候变化所造成的影响这样的大环境中，并且基于这样的事实，即在诸如英国这样的国家，建成环境是二氧化碳排放方面最恶劣的罪魁祸首。

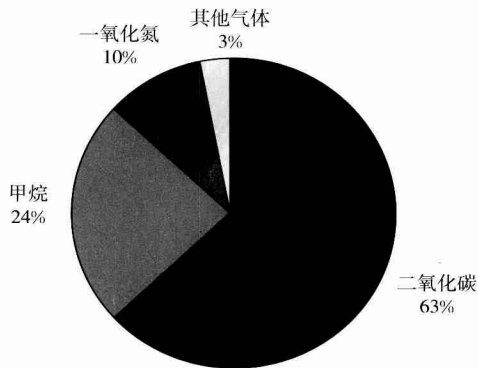
在2003年本书第一版发行之后发生了什么样的变化呢？

科学家们一直对与全球变暖相关的灾害性事件的发生频率感到震惊。南北两极的冰层正以前所未有的速度融化，同样地，高山冰川也在快速融化；永久冻结带的融化正在给建筑物和道路带来可怕的后果；四级和五级飓风^①发生的次数越来越频繁。关于全球变暖对于远期温度的影响方面的预测正在不断刷新。

人类应当对全球变暖负大部分的责任，这一观点目前已经得到共识。即便是美国白宫也已承认这一科学事实，但是，美国仍然不能与大多数国家就解决措施达成一致。另一方面，随着俄罗斯加入《京都议定书》（Kyoto Protocol），这一协议最终得以通过。令人遗憾的是，显然没有几个缔约国正在采取措施兑现自己的承诺。

英国政府在2006年3月发表的一份报告中指出，在未来100年中，如果目前的排放水平不能得到控制的话，CO₂在驱动全球变暖的进程中将会起怎样的作用。CO₂的排放量仍在增长，即使在有着雄心勃勃的减排目标的英国也是如此。中国和印度的经济分别以9%和7%的增长率快速发展。这种经济扩张中的大部分成果是基于燃烧化石燃料的，主要是煤炭。图1表明，到2100年时，目前这些与CO₂相关的温室气体，在全球变暖过程中所起作用的相对

^① 飓风分为1~5个不同的等级，标准有两个：最大持续风速和可能导致的风暴潮程度。这一等级分类叫做萨菲尔-辛普森（Saffir-Simpson）或SS等级分类法，是20世纪70年代制定的。——译者根据作者解释注



政府间气候变化专门委员会 (IPCC) ^③第三次评估报告中关于部分气体的全球变暖潜能 (Global Warming Potentials)

图 1 目前的温室气体在未来 100 年中，对全球变暖所起作用的相对比例
数据来源：英国环境、食品和乡村事务部 (DEFRA) ^②

比例。每一种温室气体，根据其辐射特性、分子质量和在大气层中的寿命不同，对气温的上升有着不同的作用。

第二次伊拉克战争^①的爆发，导致石油供应安全性方面存在着巨大的不确定因素，这是由于中东地区集中了大部分的石油储量。在 2005 年，由于俄罗斯对天然气实行垄断，导致邻国乌克兰出现严重的供应问题，这又波及欧洲的大部分地区。在接近 2005 年底的时候，石油价格超过了历史最高纪录，达到每桶 70 美元，据预测，在一年之内还将超过每桶 100 美元。天然气的批发价格在一年之内上涨了 60%。这些事件正在改变着关于可再生能源的舆论观点。

自从 2003 年本书出版以来，在全世界范围内，对于清洁能源技术的研发投资正在不断增加，重大的研究进展层出不穷。与此同时，有些曾经是边缘领域的技术正在进入主流行列。

很快我们将看到新一代光电电池 (PV) 进入市场，这有可能是基于纳米技术的电池，比基于硅的电池要便宜得多。在德国和日本，光伏技术已经实现了规模经济，这是由于得到了政府的支持。在未来，比方说，到 2020 年，目前的数百万幢住宅和办公楼将成为微型发电站，所生产的电力可以供应到电网，或者用来制取氢，用于燃料电池。英国政府也正在开始认识到这一趋势，体现在 2006 年政府报告中一个叫做“我们的能源策略——来自人民的电力” (Our Energy Strategy-power from the people) 的微型发电计划。这份计划涉及微型燃料电池。

建筑物很有可能在未来的能源图景中发挥重要的作用。通过屋顶和立面上安装光光电

① 2003 年 3 月 20 日，美英等国以伊拉克隐藏有大规模杀伤性武器并暗中支持恐怖主义为借口，绕开联合国安理会，公然单方面决定对伊拉克实施大规模军事打击。——译者注

② DEFRA，即 Department of Environment, Food and Rural Affairs。——译者注

③ IPCC，即 International Panel on Climate Change。——译者注

池 (PV), 以及建筑物中安装的微型热电联供设备, 使其在白天成为能源站。英国节能基金会 (Energy Saving Trust) 认为, 到 2050 年, 英国电力的 30% ~ 40% 将出自住宅安装的发电设备。目前, 与基于化石燃料的常规发电设备相比, PV 电池并不具备成本效益。但是, 情况正在变化之中, 因为化石燃料的安全性已经成为问题。因此, 我们在考虑 PV 电池的成本效益时, 不仅应当将阻止气候变化方面所获得的益处考虑在内, 而且也应该考虑在安全性方面的获益。将这些益处量化, 以弥补其价格方面的竞争劣势, PV 电池很快就可以成为具有可行性的选择。

燃料电池技术是另一个将要发生重大技术突破的领域。许多分析家相信, 燃料电池在未来将成为建筑和交通两个领域的主要能源资源。其燃料来源于空气中的氢和氧, 而出产品的产品是: 水、热量和电力。燃料电池一旦实现了标准化组件生产, 其生产规模就可以任意调适, 几乎能够满足所有规模的用电需求, 从供应独立住宅, 到与电网相连的燃料电池发电站。在未来 20 年左右, 静态燃料电池将从重整天然气中获取所需要的氢。据专家预测, 到 2050 年, 我们将完全接纳氢能经济。氢的制取将成为与能源相关的首要产业。请注意德士古技术风险投资公司 (Texaco Technology Ventures) 总裁在向美国众议院科学委员会 (Science Committee) 发表的演讲中的一段话:

市场推动力、产业的绿色化, 以及技术创新正在塑造我们行业的未来, 并且迫使我们无可阻挡地迈向氢能源。那些跟不上时代脚步的人……将追悔莫及。

高能物理的理想是实现商业化的核聚变, 这种核反应据说比核裂变安全得多, 而且不像核裂变反应那样产生大量的核废物。既然大量的国际研究基金正在投向这一领域, 其中大部分的资金都投入在日本的一套大型设备中, 那么, 我们越来越有信心认为, 到本世纪中叶, 核聚变产能的技术将进入市场化阶段。

至于具有能量密度高这一特点的可再生能源, 英国独具优势, 可以说英国几乎拥有最强大的潮汐和幅度最大的潮汐落差。目前, 已经建造了一些示范项目, 这就能够鼓励即使是最谨慎的政府, 即的确存在着可靠且经得住检验的技术, 能够从海洋环境中获取数以吉瓦计的可预测电力。

在英国, 能源政策都集中于风力发电, 以实现到 2020 年的 CO₂ 减排目标。然而, 自从 2003 年以来, 对于风能是否能够实现预期目标, 产生了越来越多的不确定性。例如, 詹姆斯·拉伍洛克 (James Lovelock)¹ 援引丹麦工业联合会 (Danish Federation of Industries) 的尼尔斯·格拉姆 (Niels Gram) 之言: “我们很多人认为风力发电可以解决未来 100% 的能源需求, 但是, 我们错了。事实上, 如果考虑所有的能源需求的话, 风能只能满足 3%。” 拉伍洛克还引用来自德国的证据, 即只能在 16% 的时间段内利用风力发电。按照他的计算方法, 为了满足目前英国的电力需求, 将需要 138000 组容量为 2 兆瓦的风电机组, 即每平方英里需要 3 个风电机组, 总计占据的面积比威尔士还大。尽管可以听到警

告的呼吁，但是，英国政府仍然一往无前，新建了一些大型近海风电场，最著名的是在肯特郡海岸线上安装的 270 组、容量为 1000 兆瓦的风电机组。

还有一种专业的观点认为，电网能够承受的、不至于失去输电稳定性的、最不可预测的输出电力为 10 吉瓦²。除了这些在能源供应方面的创新技术，重要的是我们应当严肃看待需求方面的削减。现在已经没有借口在居住建筑中不采用超级保温的设计标准了。现在是时候应当放弃对空心墙体构造方式的迷信般依恋了。在欧洲大陆，他们并不存在这样的问题。

在商业建筑中，主要的能源消耗常常在于电力，大部分是用于照明需求。随着能够发出白色光的发光二极管（LED）技术的发展，这一状况将产生重大的改变。一个大约 1 ~ 2 厘米的 LED 发出的光相当于一只 60 瓦的灯泡，而耗电量只有 3 瓦，使用寿命可达到 10 万小时。

光纤技术的发展也将减少商业领域的能源需求。光子革命几乎迫在眼前，一旦光子转换的技术难题得以解决，光子革命就将完全实现。到那时，全光子计算机将消耗更少的电力，而且几乎不产生热量。

毫无疑问，信息技术将以几何级数的速度发展下去。光子材料将在这一革命中起重要的作用。全世界的未来图景可以描述为，整个世界都连接在基于光子材料的光纤高速公路上。纳米技术的发展也是如此，目前这一技术已经引导着新一代光电电池的发展。

在 2006 年 3 月，英国政府承认，该国将无法实现到 2010 年 CO₂ 减排 20% 的目标。具有讽刺意味的是，这一声明恰好与下述事实同时发生，2006 年 4 月一份由下议院议员提出的、名为“气候变化与可持续能源议案”（Climate Change and Sustainable Energy Bill）的提案获得御准（Royal Assent），同年同月，新的《建筑规范》（Building Regulations）L 部分（关于节约燃料和电力）也付诸实施。上述这些巧合的事件使我们能够整体地看待建筑物，而不是将之分隔为一个个的构件。这是一个重要的开端，将鼓励建筑师和设计师在项目初始阶段，就组建团队进行协作。此外，由于设计师们善用 3D 建模软件创作丰富多样的作品，由此带来的有利于设计师的方面，就是与软件配套的“简化建筑能源模型（simplified building energy model - SBEM）”，使得设计过程更趋简便。

本书第一版的开头采用的是约翰·霍顿爵士在英国皇家建筑师学会会议上所做的主题报告文字稿，我也正是受这篇文稿的启发而撰写本书的。本书再版时，霍顿爵士善意地同意将这篇文字替换成他于 2005 年 5 月在皇家艺术学会（Royal Society of Arts）上所做的菲利普亲王演讲（Prince Philip Lecture）^①，题为“气候变化与可持续能源”（Climate

^① Prince Philip Lecture——菲利普亲王即英国女王的丈夫。他每年资助一个演讲，称为菲利普亲王演讲。2005 年的演讲人是约翰·霍顿爵士。——译者根据作者解释注

Change and Sustainable Energy)。除此之外，我无法找到比这更适合成为本书新版导言的文字了。

彼得·F·史密斯

注释

1. James Lovelock (2006), *The revenge of Gaia*, Penguin/Allen Lane, p. 83
 2. 'Why UK wind power should not exceed 10 GW, Hugh Sharman, *Civil Engineering* 158, November 2005, pp. 161–69
- For more information on the ecological role of buildings see *Architecture in a Climate of Change*, 2nd edition, 2005 and *Eco-refurbishment – a guide to saving and producing energy in the home*, 2004, both Peter F. Smith and Architectural Press.

致 谢

我要感谢那些允许我在本书中引用他们的作品的研究人员和建造领域的专家。其中包括英国剑桥大学建筑研究所的 Koen Steemers 博士、提供贝丁顿零能耗住宅项目 (BedZED) 示意图的 Arup 工程顾问公司、提供马尔默城市案例图片的 Christopher John Hancock、提供英国金斯林议会办公楼的 Jeremy Stacy 西建筑师事务所、提供位于英国斯温登国民信托有限公司 (National Trust) 办公楼的 Fielden Clegg Bradley 事务所、提供三股螺旋状风电机图片的 XCO₂ 能源顾问公司以及提供德国黑尔讷·索丁根政府培训中心图片的 Pilkington 上市公司。我还要感谢 Max Fordham 及合伙人公司的 Randall Thomas 博士和设菲尔德大学机械工程系的 Robin Saunders, 他们帮我审阅了原稿, 使我从他们在可再生能源领域的专业知识中获益。我还要感谢我的夫人 Jeannette 严格的校对工作, 为我弥补了可能的不足之处。最后, 我要特别感谢约翰·霍顿爵士允许我在本书的开头引用其于 2005 年在英国皇家艺术学会中所做的菲利普亲王演讲文字稿, 并且感谢罗杰斯勋爵一如既往的支持。

目 录

PREFACE	vii
中文版序言.....	viii
序 言.....	ix
绪 论.....	xi
致 谢.....	xvi
第 1 章 气候变化与可持续能源	1
政府间气候变化专门委员会 (IPCC)	6
致 谢	17
关于演讲者	17
第 2 章 太阳热能	18
太阳能供热	18
太阳能热发电	28
太阳热能利用——未来发展趋势	32
第 3 章 制冷的低能耗技术	35
以空气为媒介的地源辅助系统	35
利用地下水 / 蓄水层的制冷和采暖系统	35
蒸发冷却系统	37
相变冷却系统	39
日间运作模式	40
干燥除湿和蒸发冷却系统	41
带有空调的太阳能辅助干燥除湿系统	42

冷冻	42
氨吸收制冷	43
热电制冷 (Thermionic cooling)	44
夜间降温	45
中空楼板	46
冷梁和冷吊顶 (Chilled beams and ceiling) 系统	46
第 4 章 地热能源	48
地热发电	48
热泵	50
第 5 章 风能	58
小规模风力发电机的种类	61
建筑一体化系统	63
第 6 章 光电电池	74
非晶硅电池	75
基于染料的电池 (Dye-based cells)	76
级联式聚光太阳能电池 (Monolithic tandem concentrator cells)	77
柔性太阳能板	77
塑料太阳能电池	78
光伏发电: 成本预测	79
光伏发电和城市设计	80
第 7 章 燃料电池	86
聚合物电解质膜燃料电池 (PEMFC)	88
磷酸燃料电池 (PAFC)	90
固态氧化物燃料电池 (SOFC)	90
碱性燃料电池 (AFC)	91
熔融碳酸盐燃料电池 (MCFC)	92
氢——社会变革的动力	93
燃料电池与英国	95
核聚变	97

第 8 章	生物能源	99
	生物燃料的利用	100
	垃圾的厌氧消化	103
	生物燃料应用于交通运输	106
	小结	108
第 9 章	微型发电和热电联供	109
	微型发电和热电联供 (CHP)	109
	斯特林热电联供	112
	自由活塞式斯特林发动机 (FPSE)	117
第 10 章	小规模水力发电	120
	微型水力发电	123
第 11 章	海浪能和潮汐能	127
	点式波能吸收器 (Point absorber)	127
	大规模潮汐能利用	133
	近海蓄水发电	135
	潮流发电	136
第 12 章	能源基础设施的前景	141
	迈向氢能经济	144
	前方的道路	144
	氢的储存	145
	电力储存	146
	热电联供 (CHP)	147
	前进的障碍	148
	结论	149
第 13 章	材料	151
	混凝土	151
	玻璃	152
	保温材料	153

智能材料	155
智能流体	156
第 14 章 光子革命	157
发光二极管 (LED)	157
通信中的光子学	159
第 15 章 建筑一体化的可再生能源: 案例研究	162
马尔默——未来之城	162
德国政府培训中心	165
英国斯温登国民信托有限公司办公楼 (National Trust Offices)	167
英国曼彻斯特 CIS 塔楼	168
伊甸室内植物园第 4 期: 教育资源中心——“大果核”	169
金斯林议会办公楼	171
“零能耗摩天楼” (SkyZed)	172
贝丁顿零能耗住宅开发 (Beddington Zero Energy Development—BedZED)	173
第 16 章 尖端可持续性	182
能源忧虑	183
天然气	186
煤	186
英汉词汇对照	192
译后记	214

第 1 章 气候变化与可持续能源

——约翰·霍顿爵士 [高级英帝国爵士 (CBE)、皇家学会会员 (FRS)] 于 2005 年在皇家艺术学会上所做的菲利普亲王演讲

尊敬的殿下：

我感到非常愉快和荣幸，能够在今晚发表以您的名义命名的演讲。您始终是一位可持续发展领域的伟大的支持者。尤其是，您在温莎城堡也致力于实施采用创新技术的可持续能源项目，这为我们提供了绝佳的案例，展现了在能源领域中多种多样的途径。

眼下泰特美术馆 (Tate Gallery) 正在展出特纳 (Turner)、惠斯勒 (Whistler) 和莫奈 (Monet) 的精美作品。100 年前，莫奈旅居伦敦，创作出描绘光线穿越浓雾的精美绝伦的画作。当时的伦敦周围被工业区和住宅区包围着，饱受烟囱排放造成的“地区性污染” (local pollution) 的蹂躏。由于在 20 世纪 50 年代开始生效的《清洁空气法令》 (Clean Air Acts)，这些恼人的烟雾才成为了历史，尽管伦敦的空气还应该更加清洁。

然而，我今天将要谈到的是“全球性污染” (global pollution) ——诸如二氧化碳之类的气体排放，这是一种我们每个人都在排放的气体，散布到整个大气层，影响着每一个人。全球性污染需要全球性的解决途径。

首先，让我们快速概括一些关于全球变暖的科学知识。通过从地球表面吸收红外辐射和“热”辐射，大气层中的“温室气体”——例如水蒸气和二氧化碳——就像覆盖地球的毛毯一样，使地球的温度不断上升，超过假使没有这一效应时地球本该呈现的温度。人们早在近 200 年前就了解到这一自然的“温室效应”；这对我们目前的气候起到关键的作用，而生态系统和我们人类也已经逐渐适应了这样的气候条件。

自从 1750 年左右开始的工业革命，这些温室气体中的一种——二氧化碳的排放量已经增加了超过 30%，目前在大气层中的含量已经超过了数千年以来的浓度 (图 1.1)。化学分析表明，这种增长主要归因于化石燃料，例如煤、石油和天然气的燃烧。如果不采取措施来控制这些气体的排放，在 21 世纪之内，二氧化碳的浓度将会比工业革命前的水平增长两倍或三倍。