

北京现代产业新区发展研究基地 资助



Energy and the New Reality 1

**ENERGY EFFICIENCY AND THE
DEMAND FOR ENERGY SERVICES**

能源与新的现实 1

——能源效率和能源需求服务

[美] L.D.Danny Harvey 著 索晨霞 译

中國石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM](http://www.sinopec-press.com)

登錄名內

能源与新的现实 1

——能源效率和能源需求服务

Energy and the New Reality 1

Energy Efficiency and the Demand for Energy Services

[美] L. D. Danny Harvey 著

索晨霞 译

中國石化出版社

内 容 提 要

本书探讨了降低能源需求增长或减少能源需求量的前景,系统研究了化石燃料发电和所有重要的终端能源使用部门(建筑、交通运输、工业、农业、市政服务)。概述了各部门的能源利用方式和近期的发展趋势,描述了使用能源所涉及的基本物理过程,并讨论了通过更有效的设备和系统减少能源使用的潜力。还讨论了一些潜在的重要问题,如环境影响和效益以及其他各种衍生效益等。适合能源研究人员和大专院校能源专业人员参考。

著作权合同登记 图字:01-2012-6671号

Energy and the New Reality Volume 1 - Energy Efficiency and the Demand for Energy Services /1 edition (April 4, 2010)/L. D. Danny Harvey

Copyright © CL. D. Danny Harvey 2010. The moral right of the author has been asserted. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, except as expressly permitted by law, without the prior, written permission of the publisher. 本书中文简体翻译版授权由中国石化出版社独家出版并在限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签,无标签者不得销售。

中文版权为中国石化出版社所有。版权所有,不得翻印。

图书在版编目(CIP)数据

能源与新的现实. 1, 能源效率和能源需求服务/
(美)哈维(Harvey, L. D. D.)著;索晨霞译.—北京:
中国石化出版社,2015.6
ISBN 978-7-5114-3253-7

I. ①能… II. ①哈… ②索… III. ①能源效率—研
究②能源需求—研究 IV. ①TK01②F206

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第137004号

未经本社书面授权,本书任何部分不得被复制、抄袭,或者以任何形式或任何方式传播。版权所有,侵权必究。

中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街58号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com

北京富泰印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经销

*

787×1092毫米16开本38.75印张863千字

2016年1月第1版 2016年1月第1次印刷

定价:110.00元

目 录

第 1 章 未来的气候变化、影响和限制	(1)
1.1 以往的气候变化	(2)
1.2 预计未来的气候变化	(4)
1.3 能源使用的驱动因素和化石燃料的二氧化碳排放量	(7)
1.4 联合国气候变化框架公约	(10)
1.5 大气中二氧化碳浓度的稳定性	(17)
1.6 本书和第二卷的宗旨和结构	(21)
第 2 章 能源基础、使用模式与趋势,及相关温室气体与污染物排放	(23)
2.1 能源与效率概念	(23)
2.2 能源使用和成本的发展趋势	(25)
2.3 能源供给与需求现状概览	(27)
2.4 能源资源和能源储备	(43)
2.5 化石燃料采收率峰值	(44)
2.6 温室气体和气溶胶排放,辐射效应和目前全球变暖承诺	(58)
2.7 使用化石燃料的非气候环境成本	(69)
2.8 过去 100 年来的技术变化概览	(77)
第 3 章 化石燃料发电	(79)
3.1 电力和发电基本知识	(80)
3.2 化石燃料发电	(83)
3.4 发电成本	(108)
3.5 热电厂的用水需求	(115)
3.6 总结	(116)
第 4 章 建筑物中的能源使用	(119)
4.1 物理原理	(121)
4.2 外保温层以及建筑物形状、构造、朝向和尺寸	(130)
4.3 采暖系统	(142)
4.4 热泵	(147)
4.5 制冷负荷和制冷设备	(154)
4.6 采暖、通风和空调系统	(184)
4.7 生活热水	(193)
4.8 照明	(196)

4.9	电器、电子消费品和办公设备	(205)
4.10	内含能源和运行能源	(225)
4.11	先进新建筑物的能源节约和设计过程的作用	(233)
4.12	翻新改造既有建筑的能源节约	(249)
4.13	总结	(263)
第5章	交通运输使用	265
5.1	概论	265
5.2	城市形态在客运能耗中的作用	274
5.3	车辆选择在客运能耗中的作用	281
5.4	减少汽车和轻卡能耗的技术方案	283
5.5	长途客运、铁路快线及市区和长途巴士	335
5.6	客机	339
5.7	货运	346
5.8	本章总结	356
第6章	工业能源消耗	(359)
6.1	当今工业能源使用模式	(359)
6.2	主要工业品概述	(360)
6.3	钢铁	(365)
6.4	铝	(378)
6.5	铜	(387)
6.6	锌、不锈钢和钛	(400)
6.7	水泥	(406)
6.8	玻璃	(418)
6.9	纸浆和纸张	(424)
6.10	塑料	(435)
6.11	石油精炼	(440)
6.12	化学工业	(442)
6.13	海水淡化	(443)
6.14	热电联产和热能管理	(445)
6.15	电机与电机驱动系统	(448)
6.16	总结	(451)
第7章	农业和粮食系统能耗	(455)
7.1	引言	(455)
7.2	氮肥和氮循环	(456)
7.3	磷肥和潜在供给制约因素	(458)

7.4	减少化肥能耗	(460)
7.5	农药	(470)
7.6	农场使用的直接能源	(472)
7.7	常规投入系统和低投入系统能源使用量和产量比较	(473)
7.8	渔业的能源使用	(478)
7.9	消费者转向低能源密度饮食的影响	(479)
7.10	全球化与本土化农业的影响	(500)
7.11	总结	(502)
第8章	市政服务	(505)
8.1	供水	(505)
8.2	废水处理	(507)
8.3	固体垃圾	(509)
8.4	娱乐设施	(524)
8.5	总结	(527)
第9章	社区综合能源系统	(529)
9.1	介绍	(529)
9.2	区域供暖	(529)
9.3	区域制冷	(533)
9.4	区域能源系统的优势和经济性	(534)
9.5	热电联产和热电冷三联产	(536)
9.6	总结	(543)
第10章	能源需求情景分析	(545)
10.1	引言	(545)
10.2	未来二氧化碳排放量的驱动因素	(546)
10.3	降低物理能源强度的潜力	(551)
10.4	总结:以积极有效的措施构建未来能源需求情景	(555)
第11章	降低能源需求的政策	(577)
11.1	限制未来人口数量	(577)
11.2	限制经济增长	(579)
11.3	提高能源价格	(583)
11.4	促进能源效率	(584)
11.5	减少食用肉类与降低内含能源	(588)
11.6	能源效率和可再生能源的研究和发展	(589)
11.7	反弹效应	(592)
11.8	关于经济增长主要作用的反思	(595)

附录 A 单位和转换系数	(599)
附录 B 燃料热值和能源当量	(601)
附录 C 国家组织的定义	(603)
附录 D 财务参数	(605)
附录 E 交通运输燃料效率的替代计量单位	(607)
附录 F 更多网站信息	(609)

第1章 未来的气候变化、影响和限制

地球的平均温度取决于从太阳吸收的短波辐射和从地球散发的长波辐射(也称红外线)之间的平衡关系。当地球吸收的短波辐射多于散发出的长波辐射时,将会引起气候变暖,而地球散发的长波辐射超过从太阳吸收的短波辐射时,则会引起气候变冷。地球散发的长波辐射主要来自地球表面和云层,同时还有一小部分来自大气本身。地球向外散发长波辐射的效果取决于其穿透大气层的比例。大气某些自然发生的气体,首先是水蒸气,其次是二氧化碳(CO_2)、臭氧(O_3)、甲烷(CH_4)等,它们吸收从地表发射的长波辐射,从而在大气中保留能量并使气候变暖。这个变暖的效应通常称为“温室效应”,相关的气体称为温室气体(GHGs)。

和没有温室效应的情况相比,自然发生的温室效应使得地球的气候升高 33°C 。然而在过去200年里,人类活动使得一些重要的温室气体浓度大幅增加:二氧化碳浓度增加超过36%(从 $280\mu\text{L/L}$ 到2010年的 $387\mu\text{L/L}$),甲烷浓度增加了2.5倍(从 $0.7\mu\text{L/L}$ 到 $1.75\mu\text{L/L}$),氮氧化物浓度增加了大约15%(从 $275\mu\text{L/m}^3$ 到 $315\mu\text{L/m}^3$),在北半球的低层大气(或对流层)臭氧浓度增加了2~5倍(依据地理位置)。同样,多种完全人为造成的温室气体,如氯氟烃(CFC)及其替代品:含氢氯氟烃(HCFC)和氢氟烃(HFC)已经进入到大气层。

这些增加的气体通过捕获红外线辐射增强了自然的温室效应,从而扰乱了地球先前在吸收太阳辐射和发射红外辐射之间的平衡。对辐射平衡的干扰称为强制辐射。在这种强制或驱动下产生了气候变化(这是一种强制或驱使的气候变化)。如果二氧化碳浓度增倍(20世纪中期的常态下可能发生),强制辐射可达到 4W/m^2 。这相当于地球表面上每平方米都有两盏圣诞小彩灯散发的热量。目前为止,由于温室气体增加的集体效应,强制辐射强度达到 3.0W/m^2 。其中一半由二氧化碳产生,另一半由其他各类气体产生。

图1.1给出了过去200年的二氧化碳和甲烷的增加量,及其过去40万年的自然变化情况(由冰层中的气体成分所决定:南极洲的雪转化成冰,困在雪里的气泡成分被释放并保存在冰层中)。从中可以看出,最近这两种温室气体的浓度增加极快(与自然波动相比),远远超出过去40万年自然变化率的波动范围。

排放到大气中的二氧化碳,一部分是由化石燃料(包括煤、石油、天然气)燃烧产生的,一部分是水泥生产过程中和各类化学品不当泄漏产生的,其余部分是森林被大量砍伐引起的(通常称为土地使用变化)。化石燃料燃烧和水泥生产产生的排放量(以后被称为工业排放)从1995年的 6.4Gt 碳/a增长到2005年的 8Gt 碳/a,在20世纪90年代,由于土地利用变化导致了 $1.6 \pm 1.1\text{Gt}$ 碳/a的进一步排放。21世纪,工业排放的增长速度将会成倍增长,同时,受现存森林面积的限制,目前看来,在森林面积继续下滑之前吸收二氧化碳不可能有所增加。所以,从长期来看,关于大气中二氧化碳的形成,工业排放比土地

利用排放具有更高的关注度。此外,常态下,预计未来二氧化碳体积分数的增加将主导温室效应。大气对二氧化碳的自然移除过程非常缓慢(移除业已排放的二氧化碳至少需要几千年),因此利用现有可实现的任何方法都很难将现有和未来二氧化碳排放量进行逆转^①。基于以上原因,由于化石燃料燃烧所带来的工业二氧化碳排放在未来会成为引起气候变暖的最重要的因素。

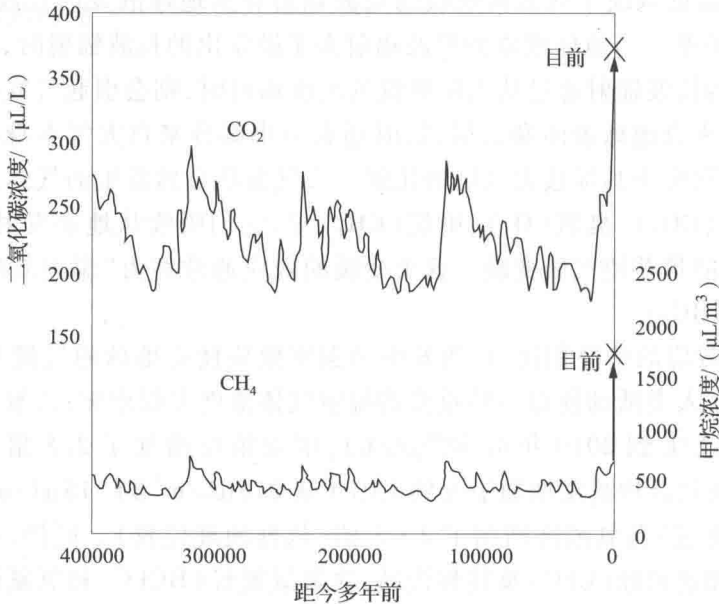


图 1.1 过去 200 年中大气及其体积分数的变化曲线

说明:Petit 等(1999)讨论了沃斯托克冰核;细线表示过去 40 万年的数据,粗线表示过去 200 年的数据

数据来源:美国国家海洋与大气管理局(NOAA)的网站(www.ngdc.noaa.gov/paleo)

1.1 以往的气候变化

1856~2009 年全球平均地表温度的变化量如图 1.2 所示。图中的曲线是由海面温度变量(海洋占地球的比例)和地表温度变量(陆地占地球的比例)组成的(这个曲线的具体形成方法可见《哈佛》,2000,第 5 章)。由图 1.2 可知,在过去大约 140 年里,气温平均上升了 0.6~0.8℃。

可以通过分析极地冰盖年层的化学成分(每年形成的冰层化学成分不相同)、树木年轮宽度(主要是在中纬度地区)变化、珊瑚礁年层(低纬度地区)的化学成分来重构温度变化等信息获得这些记录数据。公元 1000~1980 年,北半球或全球平均温度的几次重现变化如图 1.3 所示,也显示了图 1.2 中所直接测量的全球平均温度变量。所有具有可信性

^① 如第二卷(第 4 章 4.8,9.3.6~9.3.8)讨论,掩埋用于取代化石燃料的生物质气化过程中所产生的二氧化碳,所产生的负排放是有限的。如果二氧化碳浓度超过了安全水平的话,要减少大气中二氧化碳浓度的可能性非常小。

和科学性的重现变化依据都一致表明,在过去的1000年中,20世纪后期是最暖的时期。主要是由于在这段时间内同时积累的温室气体浓度使气候变暖。此外,还有其他的因素,如太阳变异性,这已经经过全面、反复地评定,同时也发现在过去的一个世纪,它只是影响气候变量的一个很小的因素(Forster等,2007,2.7.1;Hegerl等,2007,9.4.1)。

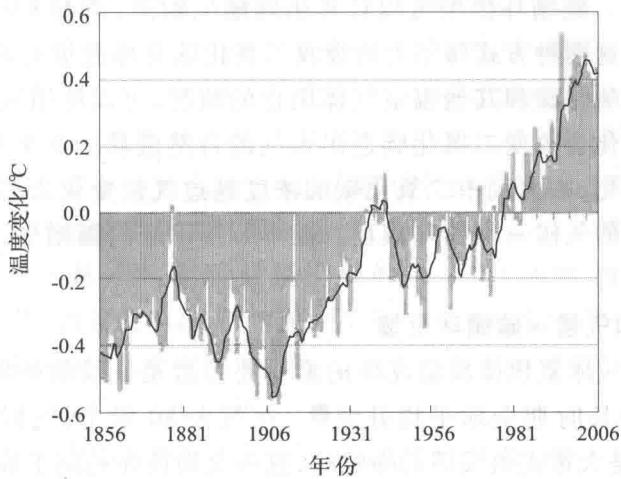


图 1.2 1856~2009 年全球平均地表温度变化情况

数据来源:英国气象办公室网站(www.met.gov.uk)

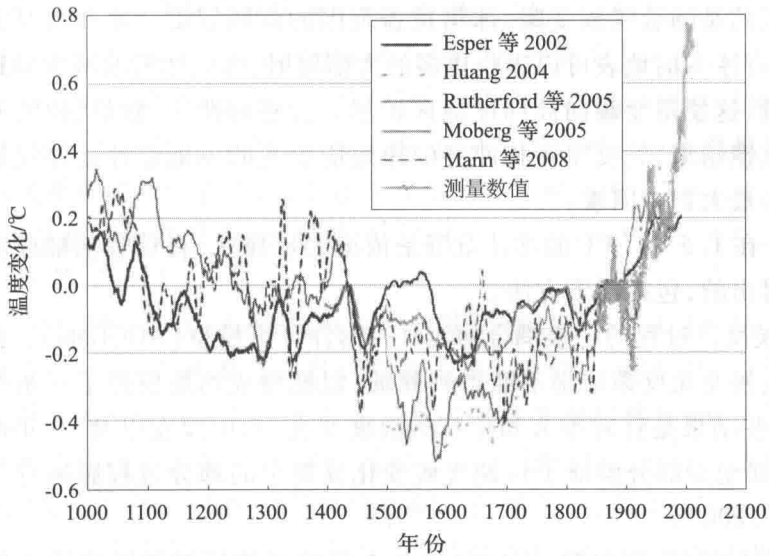


图 1.3 基于对冰芯、树轮以及珊瑚研究所得,并根据多种资料改善的 NH 的变化趋势,

或全球平均地表温度变化趋势,与图 1.2 中测量所得的变化趋势对比

说明:汇总数据显示的是 25 年的移动平均值,而仪器数据显示的为 5 年的移动平均值

资料来源:美国国家海洋和大气管理局(NOAA)网站(www.ngdc.noaa.gov/paleo)

1.2 预计未来的气候变化

通过假定一个二氧化碳累积排放量,利用碳循环模型可以相当精确地计算出大气中积累的二氧化碳浓度。碳循环模型可以计算出陆地生物圈(森林)及海洋吸收的部分排放的二氧化碳。目前这两种方式每年大约吸收二氧化碳总排放量的 50%,而其余的累积在大气中。考虑到二氧化碳和其他温室气体组合的情况,可以使用气候模型来计算未来气候变化。气候的变化会改变二氧化碳进出大气的自然流动。由于人类的直接排放,这又导致了进一步的变化,即大气中二氧化碳的浓度超过气候变化之前的浓度。这些变化的计算需要一个耦合的气候-碳循环模型。在本节接下来的篇幅里,概述了确定未来气候变化的一些关键过程。

1.2.1 气候敏感度和气候-碳循环反馈

决定气候对温室气体累积排放量反应的最重要参数是气候敏感度,即大气中二氧化碳浓度倍增所导致的长时期全球平均升温^②。在过去 30 年中,气候敏感度介于 1.5 ~ 4.5℃。气候敏感度是大量正负反馈的净效应,这些反馈往往趋向于放大或缩小由最初辐射强度触发的气候初始变暖。其中最重要的反馈涉及水蒸气,即当气候变暖时,大气中就会有更多的水蒸气,由于水蒸气本身就是一种温室气体,这就进一步导致了气候变暖。水蒸气对气候变化构成了正反馈,它使气候加倍变暖(同没有水蒸气作用的情况相比较)^③。另一种反馈涉及的是随着气候变暖,冰雪覆盖范围的削弱程度。冰和雪对太阳辐射有很高的反射性,没有冰雪的地表可以吸收更多的太阳辐射,所以冰雪的减少导致了地表吸收更多的太阳热量,这使得变暖向高纬度地区扩展。云层的性质、数量、位置和时间变化产生各种正负反馈结果,其反馈互相冲突的净效应引发的不确定性是使气候敏感度不确定性增加 3 倍的最大影响因素。

气候敏感性在 1.5 ~ 4.5℃ 的估计范围是依据大量独立、有观察基础或者是有限观察限制的评估方法得出的,包括以下方法。

① 模拟气候反馈过程的三维耦合的大气-海洋环流模型(AOGCMs)。虽然环流模型所预测的长期气候变化反馈结果不能得到验证,但模型成功地模拟了一系列短期观测到的反馈结果,这些结果是针对季节和年度的温度变化、火山爆发以及 10 年的气候趋势所做出的反馈,从而至少部分验证了短期气候变化反馈中的部分过程影响着气候长期反馈结果(Randall 等,2007)。

② 过去一个世纪气候变暖、温室气体与非温室气体辐射强度的估计数据所带来的制约性。在过去一个世纪观测到的全球平均变暖(0.6 ~ 0.8℃)可以被认为是 3 个因素的乘积:

^② 更严格地说,气候敏感性是气候变暖每 W/m^2 的辐射强度。

^③ 化石燃料燃烧释放水蒸气,但这种排放对大气中的水蒸气浓度的直接效果完全可以忽略不计。相反,变暖本身引起水蒸气的较大变化。由此,水蒸气浓度增加不是由辐射强度引起的,而是由气候反馈引起的。

$$\text{净辐射强度}(\text{W}/\text{m}^2) \times \text{气候敏感性}^\circ\text{C} / (\text{W}/\text{m}^2) \times \text{海洋滞后因子} = 0.6 \sim 0.8^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

对于目前净辐射强度的增加速度,海洋滞后因子为0.7~0.8。净辐射强度是温室气体浓度的增加,大气中的气溶胶浓度增加,以及太阳辐射和火山活动变化较小影响的净效应。气溶胶是悬浮在大气中的小颗粒,人类排放的一些化合物产生的气溶胶对气候有净降温效果,从而抵消了部分由于温室气体积累产生的热效应。如果不是这种气溶胶的降温效果,过去100年的气候将会更快变暖。净辐射涉及的最大不确定因素是气溶胶抵消的由温室气体产生的辐射强度。气溶胶抵消得越多,净辐射强度越小,以便更好的适应气候的敏感性,同时还能观测到变暖的气候,如方程(1.1)所示。

气溶胶使气候变冷的幅度是有限的,因为大部分气溶胶的降温效果发生在北半球。如果气溶胶冷却程度大规模地平衡着气候敏感性,北半球气候的变暖趋势将低于所观测到的结果(即使恰当的全球平均变暖只是模拟的)。在此基础上,Harvey和Kaufman(2002)得出这样的结论,到目前为止,气溶胶抵消超过一半的温室气体加热效果,气候敏感度可能是2~3°C,可能的极端范围在1~5°C。这与基于各种不同观察方法所得的大多数估计结果是一致的(Hegerl等,2007)^①。

③ 通过对不同地质时期辐射强度和全球平均温度变化估算数据的比较。在最后一个冰河时代的高峰期(约2万年前),辐射强度的冷却范围为4.6~7.2W/m²,从而推断出全球平均气温下降3~5°C。这意味着二氧化碳增加一倍,气候敏感性为1.2~4.3°C(Hegerl等,2007)。

④ 过去大气中二氧化碳浓度变化所带来的制约性。由于不同的板块构造活动和相关的山脉隆起,导致火山气体泄漏和风化速率的不平衡,因此,在超过百万年的时间里,大气中二氧化碳浓度不断发生变化。二氧化碳的变化幅度部分取决于通过化学风化二氧化碳浓度和清除率之间的负反馈,据此,大气中较高的二氧化碳浓度会导致气候变暖,从而加速化学风化,导致更快的去除大气中的二氧化碳,这种反馈结果取决于气候敏感性的大小程度。模拟全球碳循环的时间表明,如果数百万年的气候敏感度太小(<1.5°C),在某些时段里,二氧化碳可能达到峰值;而如果气候敏感度太大(>3°C),某些时段里二氧化碳值就过低(Royer等,2007)。

总之,各种各样的独立证据显示,气候敏感性很可能在1.5~4.5°C间。大气中二氧化碳浓度每连续倍增一次,全球温度会平均变暖1.5~4.5°C。据估计,二氧化碳和其他温室气体的增加对气候产生的影响仅仅取决于所有气体的净聚热量,而不是取决于造成温室效应的各种具体气体。因此,二氧化碳等同物浓度,即仅仅二氧化碳浓度就可以产生与大气中现有气体混合物所产生的聚热效应相同。在常态下,到2100年,温室气体浓度上升会超过相当于4倍工业革命前大气中的二氧化碳浓度(Prentice等,2001,图3.12)。即使在严格控制所有温室气体排放量的情况下,其浓度也会升高到接近二氧化碳同等排放浓度的两倍。

假定二氧化碳浓度每增加一倍,全球性气候将平均变暖1.5~4.5°C,二氧化碳有效

^① 确实,有许多建立在个体观测基础的对气候敏感度的推测表明:二氧化碳浓度倍增,气候变暖远超过5°C的可能性是不容忽视的。不过,综合这些推测情况考虑,4.5°C非常有可能为气候敏感度的上限。

浓度翻两番,将导致气候最终变暖 $3.0\sim 9.0^{\circ}\text{C}$ 。然而,早在气候变暖到这个程度以前,升温就会引发更多二氧化碳自动流入大气层(如来自富含有机物的北极冻土的融化和分解,或在中纬度地区或热带森林的顶梢枯萎而产生的二氧化碳),从而导致大气中二氧化碳浓度进一步升高,气候变暖加剧。当前气候-碳循环耦合模型显示了气候与碳循环之间的交互反应,会使大气中二氧化碳浓度与以其他方式所导致的二氧化碳浓度相比多增加 $5\%\sim 20\%$,尽管这些气候-碳循环耦合模式避免了很多鲜为人知,且会导致二氧化碳浓度加大的过程(Denman 等,2007)。

1.2.2 未来全球平均温度变化

给定过去的温室气体和气溶胶辐射强度估计值及将来的辐射强度估计值,可以使用简单的气候模式(一维或二维)(Harvey 等,1997)计算过去和未来的全球平均温度变化。在这种模式中,气溶胶辐射强度可作补偿调整,气候敏感度可以被定为如人们期望的任何合理值,从而可得出到目前比较准确的全球平均升温数值。在让模拟气候变化贴近所观测到的气候变化时,也要考虑火山活动和太阳光度变化的影响。

气溶胶粒子只能在被雨水冲刷后的前几天里留存在大气中,所以需要不断地补充。气溶胶的形成和硫酸与酸雨有关,许多地方正在用减少硫的排放以减少酸雨造成的损害。减少排放,气溶胶的冷却效果会减弱,导致暂时加速全球变暖。气溶胶排放也会随使用化石燃料所产生的副产品的减少而下降。加速的大小取决于目前气溶胶的冷却效果大小,而这一点具有很大的不确定性。然而,短暂的温室气体(如甲烷、卤代烃和对流层臭氧)热效应也会随化石燃料使用的减少而快速消失。这些相互的竞争效应都可以很容易地纳入到简单模型中。

图 1.4 显示了公元 2000 年之前的全球平均变暖趋势,并预测了未来全球平均变暖趋势,它应用的是简单的气候-碳循环模式,该模式的气候-碳循环相互作用力较小,在常态下,温室气体排放量增加,而气溶胶的排放量下降,使气候敏感度在 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 之间。在常态下,化石燃料二氧化碳排放可以从 2005 年的 $7.7\times 10^8\text{t/a}$ 增长到 2100 年 $20.8\times 10^8\text{t/a}$ 。到 21 世纪末,全球变暖平均的温度范围是 $3.5\sim 6.5^{\circ}\text{C}$ 。即使在乐观情况下(气候敏感度相当低为 2°C),到 21 世纪末所形成的升温与最后的冰河时代和随后的间冰期气候两者之间的温差相当,此温差全球平均为 $4\sim 6^{\circ}\text{C}$ 。然而,最后一个冰河时代末期的气候升温幅度大部分都集中在 7000 年这段时期里,而温室气体所引发的同等程度气候变暖则只需在未来 100 年里发生,速度加快了 70 倍。图 1.4 还显示了到 2100 年化石燃料排放减少到 0 时的状况,在气候-碳循环正反馈作用下(1.4.2),这可能足以使大气层中二氧化碳浓度稳定在 $450\mu\text{L/L}$ 。再加上其他温室气体的大量减排,这基本相当于二氧化碳排放倍增所产生的效果。因此,当气候灵敏度为 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 时,2100 年全球平均升温会达到 $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

图 1.4 中,假定在 2°C 的灵敏度时,气溶胶的冷却效果在 1990 年为温室气体效应的 30%;在 4°C 的灵敏度时,为温室气体效应的 50%。通过这种方式,在两种假定的气候灵敏度下,我们所得的变暖趋势都同实际观测到的升温趋势非常贴近。模拟试验延伸到 2100 年的设想状况,化石燃料的二氧化碳排放量增加 4 倍,而总气溶胶冷却降低两倍(标记为“BAU”,即常规情况下),且二氧化碳体积分数稳定在 $450\mu\text{L/L}$ 。

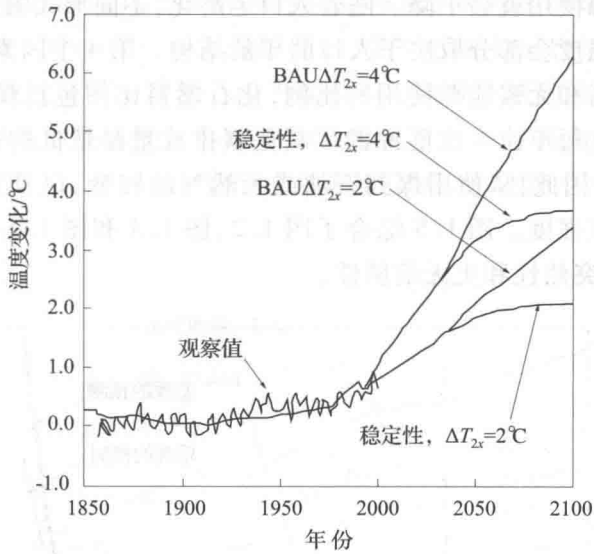


图 1.4 图 1.2 中实际测量得到的气温记录(至 2002 年),与用设定好的二氧化碳成倍增加 (ΔT_{2x})、气温上升 2°C 或 4°C 时的气候敏感度进行运算的简单气候模型来模拟全球平均温度变化(至 2100 年)的对比展示

1.3 能源使用的驱动因素和化石燃料的二氧化碳排放量

若以每年碳的质量表示,可以认为未来二氧化碳的排放量是以下因素的乘积:

$$\text{人口} \times \text{年人均 GDP} \times \text{一次能源强度} \times \text{单位一次能源碳排放量}$$

或者:

$$\text{每年总排放量} = \text{人口数量} \times (\text{美元/a}) / \text{人口数量} \times \text{MJ/美元} \times \text{kg 碳/MJ} \quad (1.2)$$

式中, MJ/美元(每单位 GDP 所使用一次能源)为经济的能源强度; kg 碳/MJ(单位能源碳排放量)为能源系统中的碳强度^⑤。该二氧化碳排放的分解式以首次提出这个等式的日本科学家 Kaya 命名。

上面的等式是一个简单的数学恒等式,但却隐藏了一系列复杂的相互影响关系。如人口和人均 GDP 并不是完全相互独立的,经济快速增长会导致出生率的大幅下降和未来人口数量的缩减,所以式中前两项的变化并非我们所想。也就是说,可能会有大量穷困的人口或小部分很富裕的人口。经济的快速增长会加快能源效率的创新和改进,从而引起能源强度的快速降低。能源强度不仅反映能源利用效率的改变,而且反映经济结构和购买行为,以及生活方式的快速变化。随着国家经济发展,其资源较少用于基础设施建设(管道、下水道、电力系统、道路建设)和建筑,而较多用于生产或者购买计算机或 CD 光

^⑤ 第 2 章(2.1)中有更充分的讨论,一次能源是指它在自然界中被发现时的能源形式,也就是说,在它被人类转化成其他形式的能源(如电力或汽油)之前的能源形式。

盘,平均每美元的能源使用就会下降。随着人口老龄化,不同形式的消费方式组合体也会发生变化,所以能源强度会部分取决于人口的年龄结构。第 4 个因素,碳强度反映能源资源的使用,即化石燃料和无碳能源使用的比例,化石燃料比例包括煤、石油、天然气比例。在化石燃料中,天然气每单位一次能源的二氧化碳排放量是最低的,然后是石油,最高是煤(第 2 章,2.7.1)。因此,从使用煤到石油或天然气的转变,以及非化石能源使用比例的增加,会减少平均碳强度。图 1.5 综合了图 1.2、图 1.3 和图 1.4 的数据,显示了在 21 世纪未来气候变化的突然性和史无前例性。

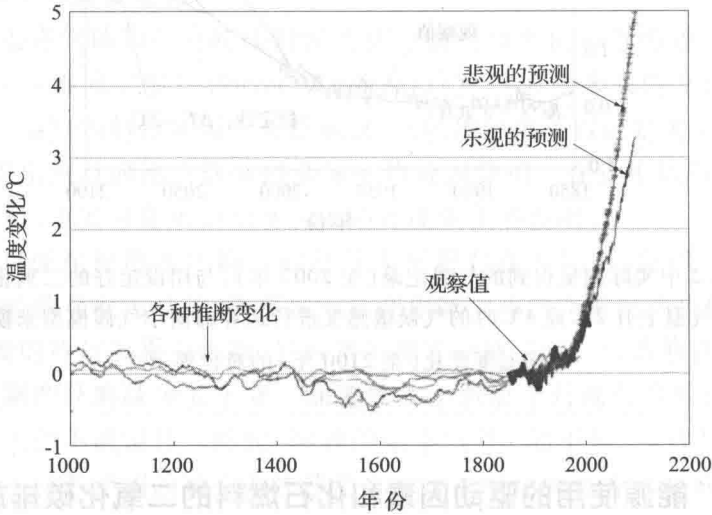
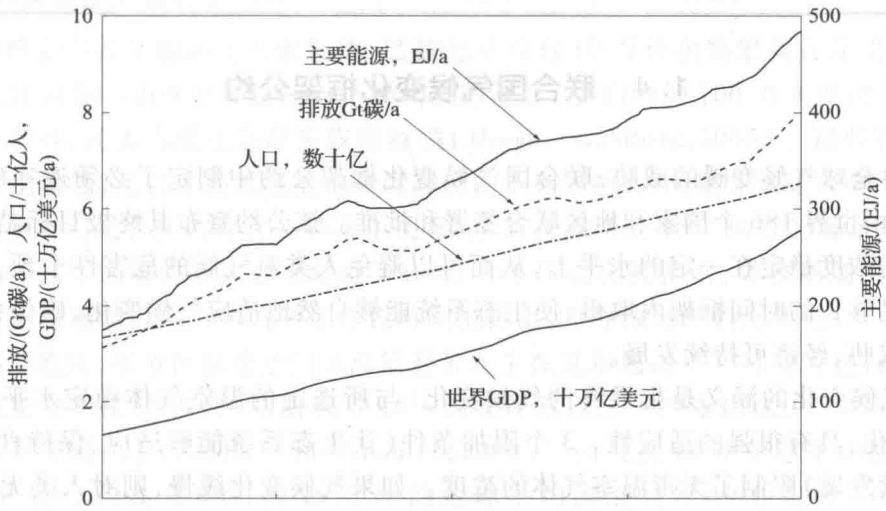


图 1.5 图 1.2、图 1.3 和图 1.4 各温度变化的汇总图

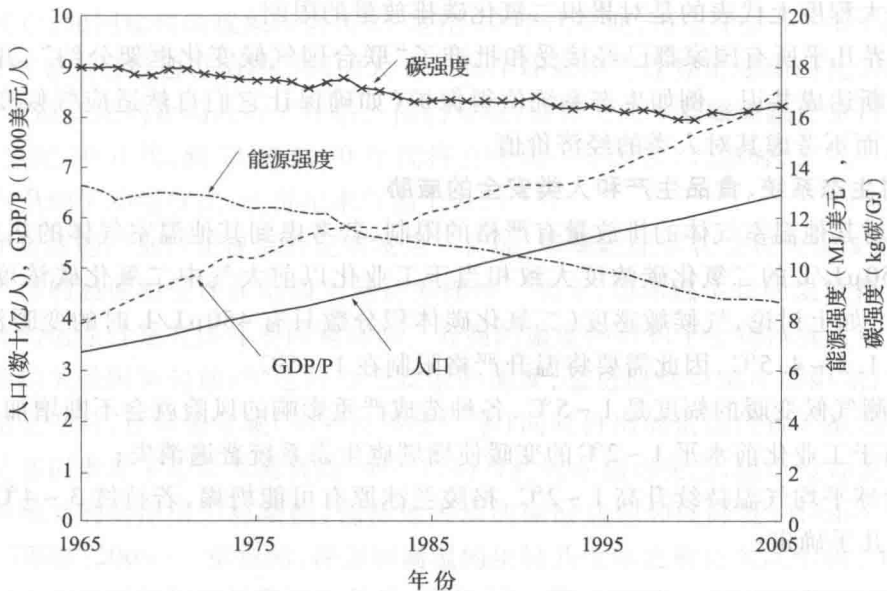
2005 年,世界人口达到 64.7 亿(美国人口普查局,2008),在购买力平价基础上,世界 GDP 达到 55.7 万亿美元(IMF,2008),一次能源的需求是 483EJ 其他的能源和电力单位定义见附录 A)(第 2 章,表 2.3),全球化石燃料排放量为 7.7Gt 碳(Marland 等,2008)。所以,全球人均平均 GDP 是 8609 美元,能源强度是 8.68MJ/美元(0.00868GJ/美元),碳强度是 15.9kg 碳/GJ。图 1.6 显示的是 1965~2005 年的世界人口、GDP、一次能源使用以及总化石燃料二氧化碳排放量走势图。也显示了人均 GDP、能源强度和碳强度的趋势。表 1.1 为 Kaya 恒等式中 4 个因素的 10 年平均变化率以及总平均变化率。人口增长的速率开始下降,同时人均 GDP 在头一个 30 年里也在下降(分别为 1965~1975 年的每年 2.9%、1975~1985 年的每年 1.6%、1985~1995 年的每年 1.2%),但在 1995~2005 年,由于中国经济的快速增长,人均 GDP 增加到每年 2.2%。在 1965~2005 年,人均 GDP 增长的平均速率为每年 2.0%。能源强度稳步下降,1965~2005 年下降的平均速率为每年 1.07%,1995~2005 年下降的平均速率是每年 1.34%,同时碳强度在 1965~1995 年每年只下降 0.35%,1995~2005 年每年只下降了 0.01%,下降结果不易察觉。

如果世界人口高峰在 2100 年达到 90 亿,人均 GDP 就必须以每年 2% 的速度增长,世界经济在 2100 年将会比 2005 年高出 9.2 倍,如果能源系统不改变,二氧化碳的排放量就会相应的增加。到 2100 年,全球经济的能源强度以每年 1.07% 的速率连续降低,将会使

能源使用和二氧化碳排放降低几乎 3 倍 ($0.9893^{95} = 0.360$), 经济增长 9.2 倍, 排放量会增加 $9.2 \times 0.360 = 3.3$ 倍。然而, 在常态假设下, 由于石油和天然气的消耗, 煤在全球能源组合中的比重将会比现在有所增加。由于煤对于石油或天然气的每单位能源二氧化碳排放量更多, 这将会使排放量增加。全球平均能源强度未能维持每年 1.1% 的改善也会产生较高的排放量。总而言之, 假设煤的供应没有限制, 到 2100 年化石燃料二氧化碳排放将会比 2005 年高出 4 ~ 5 倍。



(a) 1965 ~ 2005 年, 世界人口本地生产总值变化, 初级能源的使用和化石燃料的二氧化碳排放量



(b) 1965 ~ 2005 年, 世界平均 GDP 人均变化, 能源强度和碳排放强度

图 1.6 1965 ~ 2005 年, 世界平均 DGP、能源强度、碳排放变化

资料来源: 世界人口数据来自 www.cecus.gov/ipc/www/worldpop.html; 世界 GDP 数据来自 WWI(2008); 世界一次能源使用数据来自 BP(2007), 世界化石燃料的二氧化碳排放量来自 Marland 等(2008)

表 1.1 Kaya 恒等式中 4 项数据每十年的趋势(年均百分比)

年代	人口	GDP/人	能源强度	碳强度
1965 ~ 1975	2.00	2.87	-0.73	-0.32
1975 ~ 1985	1.71	1.57	-1.16	-0.51
1985 ~ 1995	1.59	1.24	-1.05	-0.23
1995 ~ 2005	1.28	2.22	-1.34	-0.01
综合值	1.65	1.97	-1.07	-0.27

1.4 联合国气候变化框架公约

为应对全球气候变暖的威胁,联合国气候变化框架公约中制定了必须遵守的各项原则,此公约由世界 186 个国家和地区联合签署和批准。该公约宣布其终极目标是:大气中温室气体的浓度稳定在一定的水平上,从而可以避免人类对气候的危害性干预。这一水平应当在足够长的时间框架内取得,使生态系统能够自然地适应气候变化,确保食品生产不会受到威胁,经济可持续发展。

适应气候变化的涵义是指最终的气候变化(与所选定的温室气体稳定水平相关)很小,呈良性化,具有很强的适应性。3 个附加条件(让生态系统能够适应、保持食品生产、经济可持续发展)限制了无毒温室气体的浓度。如果气候变化缓慢,则对人类无害(即严格限制,使适应性成为可能);但如果气候变化太快,则其破坏性加剧(对人类有害)。因此,这些条件对所能允许的温室气体排放率进行了制约,非危险性温室气体浓度上限的总体目标很大程度上代表的是对累积二氧化碳排放量的限制。

全世界几乎所有国家都已经接受和批准了“联合国气候变化框架公约”,并对一系列的价值判断达成共识。例如生态系统值得保护(如确保让它们自然适应气候变化的速率和幅度),而不考虑其对人类的经济价值。

1.4.1 对生态系统、食品生产和人类安全的威胁

如果对其他温室气体的排放量有严格的限制,若考虑到其他温室气体的热效应,体积分数为 $450\mu\text{L/L}$ 的二氧化碳浓度大致相当于工业化以前大气中二氧化碳浓度 $280\mu\text{L/L}$ 的两倍^⑥。如上讨论,气候敏感度(二氧化碳体积分数只有 $450\mu\text{L/L}$ 时的变暖温度)很有可能下降 $1.5 \sim 4.5^\circ\text{C}$,因此需要将温升严格限制在 $1 \sim 5^\circ\text{C}$ 。

如预测气候变暖的幅度是 $1 \sim 5^\circ\text{C}$,各种造成严重影响的风险就会不断增加,特别是:

- ① 高于工业化前水平 $1 \sim 2^\circ\text{C}$ 的变暖使珊瑚礁生态系统普遍消失;
- ② 全球平均气温持续升高 $1 \sim 2^\circ\text{C}$,格陵兰冰原有可能坍塌,若持续 $3 \sim 4^\circ\text{C}$ 升温则使这种可能几乎确定;

^⑥ 二氧化碳浓度增加一倍会产生 3.75W/m^2 的辐射热, $450\mu\text{L/L}$ 的二氧化碳浓度产生 2.57W/m^2 的辐射热效果。这意味着,再增加 1.18W/m^2 热效应将会产生等同于二氧化碳浓度加倍的情况。目前非二氧化碳温室气体的辐射热约为 1.4W/m^2 ,为避免 $450\mu\text{L/L}$ 体积分数的二氧化碳产生二氧化碳浓度增加一倍的热效应,需将温室气体联合加热效应降低 15%。