

国家科技支撑计划重大项目
“全球环境变化应对技术与示范”之
“全球环境变化人文因素的检测与分析技术研究”
课题 (2007BAC03A11) 资助

中国**碳**排放的 历史与现状

葛全胜 方修琦 等 编著

Past and Present
Carbon Emission
in China

国家科技支撑计划重大项目“全球环境变化应对技术与示范”之

“全球环境变化人文因素的检测与分析技术研究”课题(2007BAC03A11)资助

中国碳排放的历史与现状

葛全胜 方修琦 等 编著

内容简介

本书从气候系统稳定和社会发展双重需求的视角,对我国历史土地利用/覆盖变化及化石燃料消费引起的碳排放量进行了国际对比分析,并从生产和需求关联的角度,分析了当前我国在生产、消费和国际贸易等方面所产生的碳排放,评估了我国对全球碳排放的责任、未来碳排放需求和减排潜力,提供了相应对策建议。本书可供全球变化、地学、能源和环境经济等领域的研究人员、管理者和学生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中国碳排放的历史与现状/葛全胜等编著. —北京:气象出版社,2011.1

ISBN 978-7-5029-5142-9

I. ①中… II. ①葛… III. ①二氧化碳-排放-研究-中国 IV. ①X511

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 249820 号

Zhongguo Tanpaifang de Lishi yu Xianzhuang

中国碳排放的历史与现状

葛全胜 方修琦 等 编著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇 林 海

责任技编:吴庭芳

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:334 千字

版 次:2011 年 1 月第 1 版

印 数:1~2000 册

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

印 张:12.5

印 次:2011 年 1 月第 1 次印刷

定 价:40.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

全球环境变化 (Global Environmental Change) 是由自然和人为因素引起的, 影响地球系统功能的全球尺度的变化。全球环境变化在改变人类赖以生存的资源环境的同时, 也对社会经济产生深刻的影响。在人类—自然耦合系统 (或称社会生态系统) 中, 人文因素 (包括人口、制度、文化、经济和人类行为等) 中的许多方面是构成人类社会发展的基本要素, 它们既深刻地影响气候变化, 也受气候变化的制约。阐明个体与社会群体如何驱动局地、区域和全球尺度上发生的环境变化, 这些变化的影响, 以及如何减缓和响应这些变化, 是全球环境变化的人文因素 (Human Dimensions of Global Environmental Change: HDGEC) 研究的宗旨和任务所在。

在全球环境变化研究中, 碳、水、食物和健康是事关全球可持续发展的四大研究主题, 因此, 由国际地圈—生物圈计划 (IGBP)、国际全球环境变化人文因素计划 (IHDP)、世界气候研究计划 (WCRP) 和生物多样性计划 (DIVERSITAS) 四大国际全球环境变化研究科学计划联合成立的“地球系统科学联盟” (ESSP) 推出了 4 大联合研究计划: 即“全球碳计划 (GCP)”、“全球环境变化与食物系统” (GECAPS)、 “全球水系统计划” (GWSP) 和“全球环境变化与人类健康” (GECHH)。

作为四大研究主题之一的碳对地球系统和人类系统均是至关重要的。碳在海洋和陆地生命系统与大气、水圈和地圈之间的运动与转换是地球上生命活动的基本过程之一, 也是连接地球各个圈层的一个主要环节。碳循环是调节地球系统的状态和功能的一个关键过程。另一方面, 当今人类系统是一个靠巨大的物质和能量流动支撑的系统, 为维持现代人类社会的正常运转, 就不可避免地要造成一定数量的碳排放 (主要来源于人类大量使用化石燃料和土地利用变化), 因此, 人为碳排放是社会发展过程中的一个副产品, 发达国家的发展历史表明, 任何国家在其从不发达到发达的发展过程中, 均会不可避免地出现一个人均能耗和 CO_2 排放快速增长的时期, 例如, 20 世纪世界各国人均 CO_2 累计排放与 GDP 值呈较高的正相关关系。工业革命以来的 200 年间, 加速的工业化 (化石燃料的燃烧和工业过程) 和土地利用变化使全球碳循环过程变得复杂化, 特别是大量的化石碳进入了全球碳循环过程, 自然状态下全球碳循环过程中的收支平衡遭到破坏。工业革命以来全球大气 CO_2 浓度已从工业化前约

280 ppmv^{*}，增加到 2009 年的 387 ppmv，增幅达 38.21%。在当前人类活动所导致的碳排放中，化石燃料的燃烧和工业过程约占 80%~85%，土地利用变化占 15%~20%。

为维持人类社会运转而产生的大量碳排放不仅造成了碳的生物地球化学过程的改变，而且可能在改变全球环境。以政府间气候变化专门委员会（IPCC）为代表的国际主流观点认为，人为排放的 CO₂ 等温室气体导致大气的温室效应增强，很可能是 20 世纪的全球变暖的主要原因，且若不及时采取有效措施控制温室气体排放，21 世纪全球平均气温将上升 2℃ 以上，可能给人类带来非常严重的不利影响，甚至是灾难性的后果。尽管上述认识在科学上还有很大的不确定性，但从 1992 年的《联合国气候变化框架公约》，到 1997 的《京都议定书》，再到 2009 年的哥本哈根气候变化大会，这一尚存争议的科学认识已部分地被转化为政治共识，并通过各种传播媒介为社会公众广泛接受，成为国际社会及各国制定气候政策和处理气候变化国际事务的出发点，同时也成为一部分政治家在国际政治、外交博弈中使用的工具，气候变化由此从一个科学问题演变为当今世界面临的主要政治和经济问题之一。

基于人类活动导致全球气候变化的科学认识及政治共识，当前国际社会主张采取“无悔”行动，减少温室气体排放以减缓全球变暖进程，即在一定时段内将大气温室气体浓度控制在某个适当的浓度水平之内，以避免全球气温超过危险的“阈值”水平。根据《联合国气候变化框架公约》所确定的“共同但有区别的责任”的原则和《京都议定书》所确定的第一承诺期减排目标，部分发达国家已率先开始采取减排行动。虽然围绕减排问题，特别是 2012 年第一承诺期结束后的减排义务的国际政治、外交博弈从未停止，且有愈演愈烈之势，但国际社会减排的行动还是在艰难地向前推进，其总体趋势不会逆转。

为维持气候系统稳定，避免全球气候系统出现危险的变化，使人类免受气候变化的危害，需要对未来的碳排放量进行限制，也是当代人的权利和责任。然而，气候变化问题的复杂性在于，人类—自然耦合系统的稳定是自然和社会的双重稳定，人们在应对气候变化过程中不能损害或剥夺人类的生存权与发展权，气候变化问题既是环境问题，更是发展问题。从人类系统的角度来看碳排放与全球变暖问题，必须正视人类生存和发展对碳排放的客观需求，正确认识和理解碳在人类经济系统中的流动过程及其影响因素。基于气候系统稳定目标所确定的排放标准与基于满足社会生存需求目标所确定的排放标准需要彼此兼

* 1 ppmv=1×10⁻⁶

顾，正视并妥善处理两者之间的矛盾，过分地强调其中的任何一方都是不可取的，无限制地强调社会系统的需求同样可能使得地球系统难以承受，同样过分地强调满足气候稳定的排放空间而牺牲社会发展的需求也可能会危害社会系统的维持和发展。

对碳排放目标的不同设定，决定着未来的碳排放空间及发展空间。在国际气候变化谈判中，围绕如何确定具体的控制目标浓度、如何确定各国具体的减排目标问题上的激烈斗争，核心是如何对未来排放和发展空间进行界定和分配。基于“共同但有区别的责任”原则，发达国家在减排问题上需要承担更大的责任，其目前的减排承诺和所采取的减排措施可以看做是其履行历史责任和降低现代超量排放的具体体现；而对发展中国家，其经济的快速增长所需要的碳排放增长空间应得到保障。

基于以上认识，本书对我国碳排放的历史和现状进行了分析。全书共分为 6 章。第 1 章从人类系统的角度探讨了全球气候变化与碳排放的关系，评价了国际上主要温室气体排放评价指标，估算了气候系统稳定目标下的碳排放水平和未来社会发展需求的人均社会生存碳排放水平。第 2 章分别评估了我国过去 300 年土地利用与土地覆被变化引起的碳排放量和过去 150 年化石燃料消费引起的碳排放量，并从不同角度将我国的历史碳排放进行了国际对比。第 3、4、5 章从满足人类个体或社会消费需求出发，分别从产业活动、居民生活消费和进出口贸易的角度分析了我国碳排放的现状，探讨了导致我国碳排放总量快速增长的主要影响因素。第 6 章预估了我国经济发展的碳需求，分析了实现 2020 年减排 40%~45% 的主要路径及其减排潜力，归纳了 36 项全民节能减排行为。鉴于各章因讨论问题侧重点的不同，而在数据分类和相关参数的使用过程中存在一定差异，本书在附录部分提供了相关的换算和对比表。此外，附录还提供了主要国家碳排放指标、减排承诺情况，以及 36 项全民节能减排行为等信息，以供参考。

本书是国家科技支撑计划重大项目“全球环境变化应对技术与示范”之“全球环境变化人文因素的检测与分析技术研究”（2007BAC03A11）课题的研究成果，其中的部分内容已在相关的刊物上发表。各章的作者均为课题相关专题的主要成员，彭希哲、刘卫东、方修琦、程邦波、曲建升和魏本勇在书稿的组织和编辑过程中做了大量具体工作，刘俊整理了附录中的部分数据。

葛全胜*
2010 年 11 月

* 葛全胜，中国科学院地理科学与资源研究所副所长，研究员，博士生导师。

目 录

前 言

第 1 章 全球气候变化与碳排放	(1)
1.1 气候变化的科学认识与政治共识	(1)
1.2 人类活动影响下的全球碳循环过程	(7)
1.3 碳排放责任认定与排放权分配.....	(13)
1.4 气候系统稳定目标下的碳排放空间.....	(19)
1.5 富裕生活水平的人均基本生存碳排放需求.....	(23)
主要参考文献	(35)
第 2 章 中国碳排放的历史演变	(38)
2.1 过去 300 年土地利用与土地覆被变化引起的碳排放.....	(38)
2.2 1900 年以来化石燃料消费引起的碳排放	(46)
2.3 碳排放历史的国际对比.....	(49)
2.4 主要结论.....	(59)
主要参考文献	(60)
第 3 章 中国的产业活动与碳排放	(62)
3.1 中国产业结构的演变.....	(62)
3.2 能源消费与碳排放的影响要素评价.....	(71)
3.3 我国工业能源活动碳排放的因素分解.....	(75)
3.4 中国的主要高耗能与高排放部门生产链.....	(81)
3.5 国内产业碳排放的区域差异.....	(86)
主要参考文献	(90)
第 4 章 中国城乡居民消费碳排放	(93)
4.1 我国居民生活用能碳排放测算与分析.....	(93)
4.2 我国居民消费品载能碳排放测算与分析	(103)
4.3 西部欠发达地区农村居民碳排放的案例研究	(115)
主要参考文献.....	(120)
第 5 章 中国进出口贸易中的隐含碳排放	(121)
5.1 中国进出口贸易发展概况	(121)
5.2 中国进出口贸易碳排放的变化	(128)
5.3 国际产业分工对中国国际贸易碳排放的影响	(146)
主要参考文献.....	(155)

第 6 章 中国减排的途径与潜力	(157)
6.1 未来中国社会经济发展的碳排放需求	(157)
6.2 影响减排的各个方面	(163)
6.3 实现我国 2020 年减排目标的主要路径及其减排潜力.....	(167)
6.4 36 项全民节能减排行为及其减排潜力	(174)
6.5 主要经济体减排温室气体途径及其启示	(177)
主要参考文献.....	(183)
附录	(184)
附录 1 本书中若干单位和系数的换算	(184)
附录 2 人均累积碳历史排放的两种计算方法	(185)
附录 3 部门分类的合并对比表	(187)
附录 4 36 项全民节能减排行为的单体效益与全国总体效益.....	(190)

第 1 章 全球气候变化与碳排放*

地球正在经历以全球变暖为突出标志的全球变化。以政府间气候变化专门委员会(IPCC)为代表的国际主流观点把 20 世纪的全球变暖与人类的碳排放联系在一起,认为人类活动所导致的地球系统碳循环变化是导致全球变暖的原因。丁仲礼等(2009a)归纳这一理论由三个主要环节组成:(1)大气 CO₂ 浓度从工业革命前的 280 ppmv 升至 450~550 ppmv 后,全球平均气温可能将上升 2~3℃;(2)若全球平均气温上升 2℃ 以上,将可能给人类带来重大影响;(3)世界各主要国家必须立即采取各种行动,减缓全球变暖,使 2050 年 CO₂ 排放量降低到 1990 年排放水平的 50%,且越早采取行动,损失越小(IPCC,2007a;Stern,2007)。

上述理论的核心基础是气温对大气 CO₂ 浓度的高度敏感性,以及地球表层系统在适应气温变化时的极度脆弱性,其最终目标是通过减少或控制化石能源的使用量减缓全球增暖的速度。尽管科学界对这一理论还存在一定的争议,但从 1992 年的《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC),到 1997 年的《京都议定书》(KP),再到 2009 年的哥本哈根气候变化大会,上述科学认识已被部分地转化为政治共识,并为社会公众广泛接受和传播,同时也成为一部分政治家在国际政治、外交博弈中使用的工具,气候变化由此从一个科学问题演变为当今世界面临的主要政治和经济问题之一(丁仲礼等,2009a;葛全胜,方修琦,2010)。

温室气体排放主要来源于社会经济发展过程中的能源消费和对土地覆盖的改变。因此,减排温室气体问题本质上是经济社会如何发展的问题,需要从人文发展的角度看待碳排放需求,区分碳排放责任。

1.1 气候变化的科学认识与政治共识

1.1.1 全球变暖的主流科学认识

IPCC 第四次评估报告(AR4)指出,最近 100 a(1906—2005 年)全球平均地表温度上升了 $0.74 \pm 0.18^{\circ}\text{C}$,近 50 a 的线性增温速率为 $0.13^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$,过去 50 a 升温率几乎是过去 100 a 的 2 倍(图 1.1),1850 年以来最暖的 12 个年份中有 11 个出现在近期的 1995—2006 年。1961 年以来的观测结果表明,全球海洋温度的增加已延伸到至少 3000 m 深度,海洋已经并且正在吸收 80% 以上增加到气候系统的热量,这一增暖引起海水膨胀,并造成海平面上升。在大陆、区域和海盆尺度上已观测到气候系统的长期变化,包括北极温度与冰的变化,降水量、海水盐度、风场以及干旱、强降水、热浪和热带气旋强度等极端天气方面的变化(IPCC,2007;秦大河等,2007)。

世界 12 位科学家在 2009 年 12 月哥本哈根气候变化大会前夕撰写的《气候变化:全球风

* 执笔:葛全胜、方修琦、程邦波、殷培红、戴君虎、曲建升。

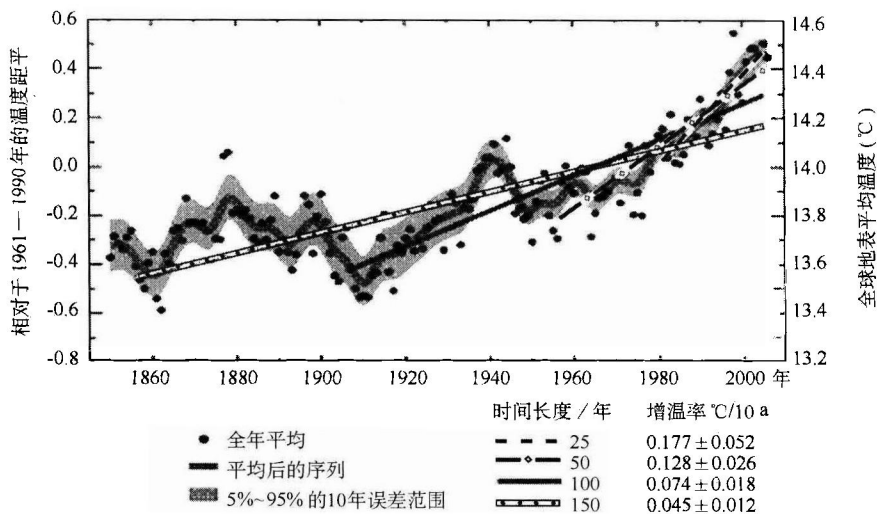


图 1.1 工业革命以来全球地表平均温度变化(IPCC,2007a)

险、挑战与决策》的综合报告称(Richardson et al. ,2009),最近的观测表明,一些气候指标的变化已经接近 IPCC 预测范围的上限;许多关键的气候指标,已经超越了当代社会与经济发展所允许的自然变异范围。这些指标:包括全球平均地表温度、海平面上升速度、全球海洋温度、北极海冰面积、海洋酸化程度和极端气候事件频次。其中,海平面的上升速度远快于 IPCC 的预测,而海洋吸收的热量也高出之前 IPCC 第三次评估报告(TAR)的 50%(图 1.2)。

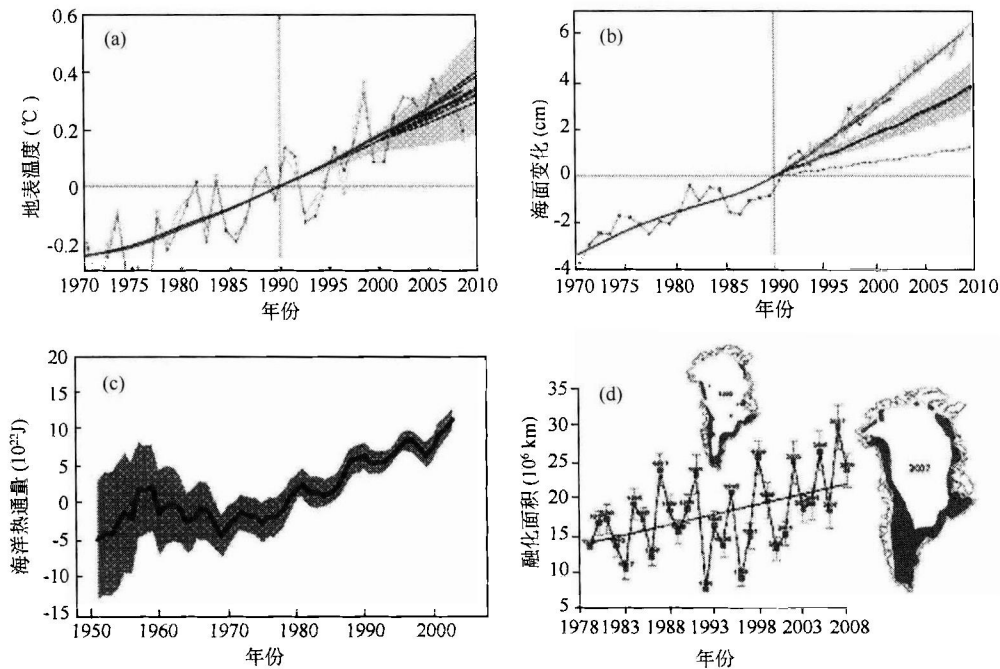


图 1.2 全球平均地表温度变化(相对于 1990 年)(a)、海平面变化(相对于 1990 年)(b)、1951 年以来的海洋热通量变化(c)以及格陵兰冰盖的表层融化面积变化(d)(引自 Richardson et al. ,2009)

人类活动导致大气 CO_2 等温室气体浓度的不断升高,被认为“很可能”是全球气候变暖的主要原因(IPCC,2007a),最近 50 a 气候变化主要是由人类活动驱动这一结论的可信度已由原来 66% 的最低限提高到目前的 90%(图 1.3)。IPCC 第四次评估报告指出,1750 年以来,由于人类活动的影响,全球大气二氧化碳(CO_2)、甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)浓度显著增加,目前总浓度已远远超出了根据冰芯记录得到的工业化前几千年内的浓度值(图 1.4)。 CO_2 是最重要的人为温室气体,全球大气 CO_2 浓度已从工业化前约 280 ppmv,增加到 2008 年的 385.2 ppmv(WMO,2009),2009 年达到 387.35 ppmv(Tans,2010);自工业化以来,化石燃料的使用是大气 CO_2 浓度增加的主要原因(IPCC,2007a)。同时,全球大气中 CH_4 浓度值已从工业化前的 715 ppb* 增加到 2008 年的 1797 ppb(WMO,2009),是距今 650 ka 以来的最高值,观测到的 CH_4 浓度的增加很可能源于人类活动,农业和化石燃料的使用是其重要来源。全球大气中 N_2O 浓度值也已从工业化前约 270 ppb 增加到 2008 年的 321.8 ppb(WMO,2009),约超过 1/3 的 N_2O 源于人类活动,农业活动是其主要的来源之一(IPCC,2007a)。

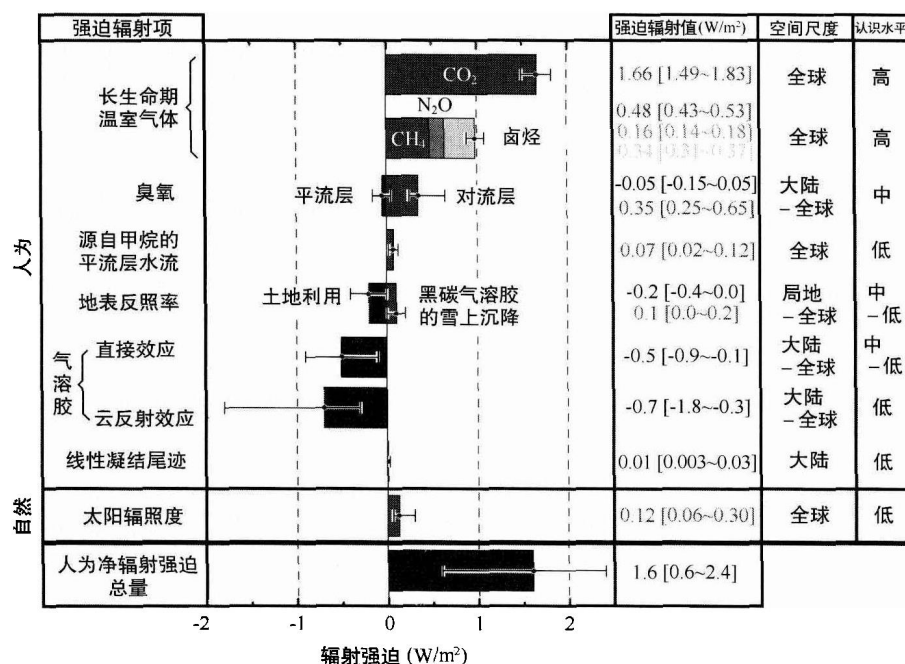


图 1.3 2005 年各种因子和物理构成的全球平均的辐射强迫(RF)和它们 90% 的信度区间。右边一栏说明最佳估计和信度区间(RF 值)、强迫的典型地理范围(空间尺度)和表明科学信度水平的科学认识水平(LOSU)。图中给出了 CH_4 、 N_2O 和卤烃的误差,也给出了净的人为辐射强迫及其范围。由于一些因子的非对称的不确定性范围,通过每一项的直接相加得不到最佳估计和不确定性范围;这里给出的值是用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法得到的。这里没有包括其他的强迫因子,这些因子被认为只有非常低的科学认识水平。火山气溶胶尽管是一种另外的自然强迫形式,但由于它们的突发性质而没有在这里予以考虑。线状飞机尾迹云范围没有包括飞行对云的其他可能影响(IPCC,2007a)。

* 1 ppb= 1×10^{-9}

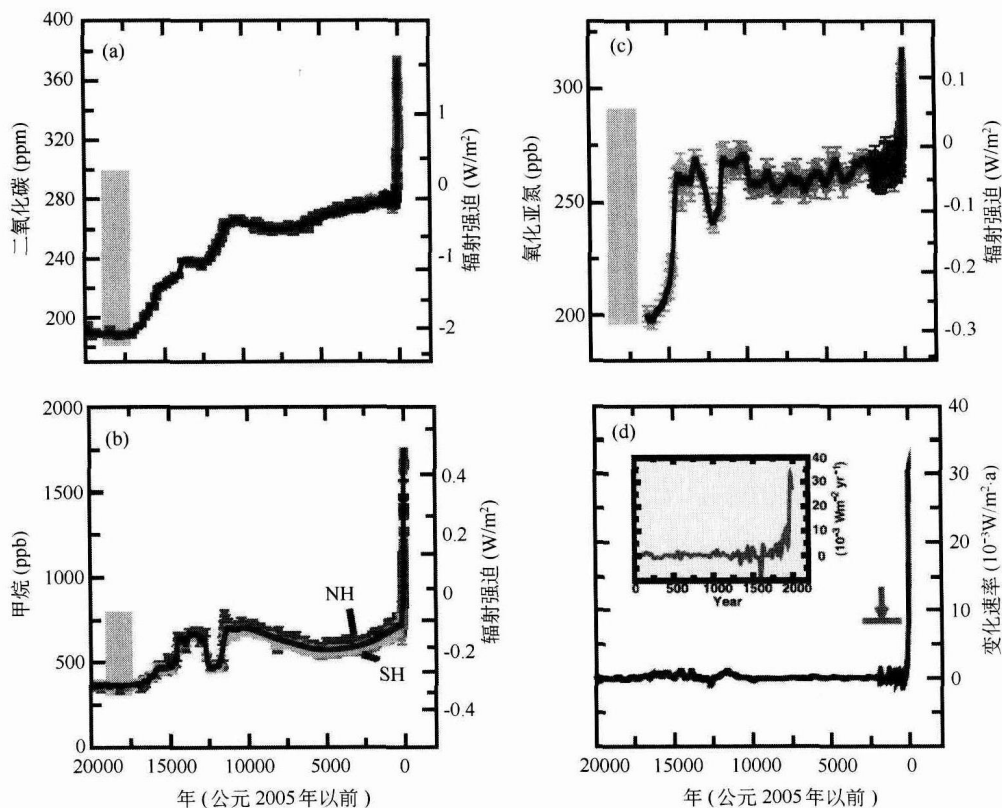


图 1.4 温室气体浓度和辐射强迫变化:(a)二氧化碳(CO_2);(b)甲烷(CH_4);(c)氧化亚氮(N_2O);(d)根据南极和格陵兰冰和积雪资料及直接的大气观测资料重建的过去 2 万年里这些温室气体总辐射强迫的变化率。灰色柱表示重建的过去 65 万年的自然变率范围。辐射强迫变化率(d)是通过浓度资料的样条拟合来计算的。冰芯资料所覆盖的年代际范围从快速积雪地点(如南极洲的 Law Dome)的 20 年变化到缓慢积雪地点(如南极洲的 Dome C)的 200 年。箭头表示 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的人为信号被相应于缓慢积雪地点 Dome C 的条件平滑掉后所产生的辐射强迫变化率的峰值。(d)中出现在 1600 年左右的辐射强迫负变化率可能是源自 Law Dome 记录中大约 10ppm 的 CO_2 浓度降低(IPCC, 2007a)。

IPCC(2007a)的评估认为,如果就目前气候变暖的趋势不加以有效控制,未来全球变暖将进一步加剧,到 21 世纪末温度将上升 $1.1\sim 6.4^\circ\text{C}$ 。如果未来全球平均气温升高超过 2°C 的阈值,人类社会可能面临灾难性的危险(图 1.5),突出地表现为海平面上升、物种灭绝、极端天气事件频率增加、热带传染病北上、全球粮食短缺、水资源供应不足、地区冲突增加等。Richardson 等(2009)认为,发生这些风险的可能性在增大。

1.1.2 作为政治共识的科学认识

1990 年以来,IPCC 的四次评估报告不断地强化以上对全球变暖的科学认识,成功地使其成为国际社会的主流观点。鉴于气候变化可能导致的危险,在联合国主导下,在欧盟等发达国家不遗余力的推动下,上述科学认识已被部分地转化为政治共识。

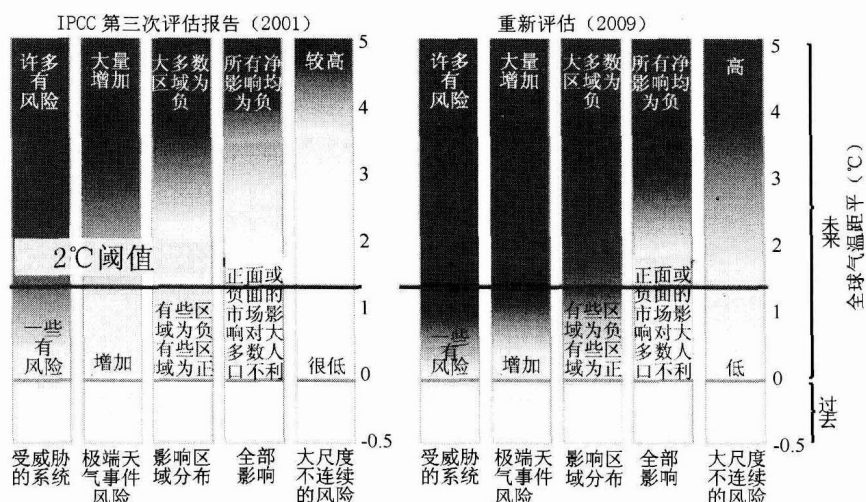


图 1.5 全球平均温度升高的潜在影响(引自 Richardson et al., 2009)

(0 度值相当于 1990 年的平均温度, -0.6 度代表工业革命前的平均温度; 直线是 2°C 阈值)

1992 年,《联合国气候变化框架公约》将气候变化主要归因于人类活动,同时明确提出工业化发达国家应负主要责任,并基于共同但有区别的责任原则,确定发达国家率先减排,而对发展中国家没有提出量化的减排要求。

1997 年,《京都议定书》进一步明确了附件一国家在第一承诺期的减排量和时间表。

此后,“2°C 阈值”,即将全球增暖幅度控制在较工业革命前高 2°C 以内,成为 IPCC 继“人类活动导致全球变暖”之后,强力提出的又一标志性观点(IPCC, 2007a)。近年来,以欧盟为代表的国际力量不遗余力地推崇和倡导“2°C 阈值”的理念,广泛营造“维护这一阈值就是对人类负责,挑战这一阈值就是对人类犯罪”的舆论环境,虽然国际气候学领域对这一问题远未达成共识,但这并没有阻挡住其被作为政治共识列入 2009 年的《哥本哈根协议》中,并作为全球减排努力的参考目标。该协议虽没有法律约束力,但“2°C 阈值”道德标杆已经树立起来,难以撼动(葛全胜等, 2010a)。

在哥本哈根大会已初步使 2°C 阈值从科学结论转化为政治共识之后,下一个可能被推动成为政治共识的科学认识将是 IPCC 给出的升温 2°C 对应的 450 ppmv 的温室气体 CO₂ 浓度控制目标。IPCC(2007a)综合了诸多研究结果后,给出了 CO₂ 浓度增加导致的地表温度增加的区间值和最佳估值(表 1.1),并认为,为了避免升温可能对人类和生态系统带来的灾难性影

表 1.1 CO₂ 浓度变化对应的全球地表温度增幅(IPCC, 2007a)

平衡 CO ₂ 当量(ppmv)	最佳估值(°C)	区间(°C)
350	1.0	0.6~1.4
450	2.1	1.4~3.1
550	2.9	1.9~4.4
650	3.6	2.4~5.5
750	4.3	2.8~6.4
1000	5.5	3.7~8.3
1200	6.3	4.2~9.4

响,需要在 21 世纪内将工业革命以来的全球平均温度升高幅度控制在 2°C 以内。为此,需要使 2050 年大气 CO_2 当量浓度不超过 450 ppmv。为达到此目标,人类活动产生的碳排放放在 2050 年必须较 1990 年减半。

1.1.3 科学认识上的不确定性

20 世纪后期全球气候变暖是不争的事实,但由于气候变化数据的不完备和对气候变化机制认识的有限性,对气候变化的科学认识尚远未达到如 IPCC 所描述的确定程度,其不确定性仍很大。尽管对气候变化政治议题的高度关注大大淡化了对气候变化科学认识不确定性的争论,但作为国际社会及各国制定气候政策和处理气候变化国际事务的出发点,这种科学认识上的不确定性是不容被轻视的。有关气候变化科学认识的不确定性可归纳为以下几个主要方面(葛全胜等,2010a,2010b)。

第一,与 20 世纪全球变暖相关的气候变化事实。它影响到关于自然变化和人类活动对 20 世纪变暖贡献的判断。主要的不确定性表现为:(1)过去 2000 年是否存在“中世纪暖期”(MWP)和“小冰期”(LIA),即 20 世纪暖期是否可能为百年尺度或千年尺度暖期的重现(图 1.6A);(2)20 世纪温暖程度是否为过去千年最大,即其是否超过了过去千年自然变化的幅度;(3)20 世纪增温趋势是否停滞,即如何看待不同研究对过去 10 年全球温度变化做出的“全球变暖停滞”和“依然呈明显上升”两种不同的判断(图 1.6B)。前两点主要与历史气候变化重建结果的不确定性有关,第三点则反映了即使现代观测数据也存在着不确定性。

第二,对温室效应机理的认识。它关系到将全球变暖归因于人类活动的理论基础,即“气温对 CO_2 浓度的敏感性”, 2°C 阈值能否与 450 ppmv 大气 CO_2 浓度挂钩也与此有关。主要的不确定性表现在:(1)温室效应机理,即大气中 CO_2 等温室气体浓度增加(增强的温室效应)对增温贡献的显著程度;(2)温室气体排放与气温变化的关系,即从辐射强迫变化到温度变化气候敏感度参数的不同取值对定量评估温室气体排放对气温变化贡献的影响。(3)水汽对温室效应及增温的贡献,即如何评价气温增加与水汽含量的反馈作用。

第三,气候模式的模拟能力。作为气候变化研究的主要工具,模式的模拟能力直接影响到对气候变化归因的判断,同时也影响到未来预估情景的可靠性。主要的不确定性表现在:(1)目前模式的模拟结果与实际观测结果比较,仍存在较大差距(图 1.6C)。(2)模式本身的缺陷,由于科学认知水平有限,目前人类对于气候系统中各种物理、化学和生物过程的参数化的认识仍存在较大不确定性,对地球辐射能量平衡、云、降水等模拟所用参数的理解有待提高。

第四, 2°C 阈值。与 2°C 阈值对应的容许温室气体浓度决定着人类未来减排的上限目标。主要的不确定性表现在:(1) 2°C 阈值的物理意义是什么, 2°C 是否为气候系统发生质变的一个临界点(tipping point),超过 2°C 阈值对人类社会的影响是否是灾难性的;(2)控制达到 2°C 阈值对应的大气峰值 CO_2 浓度是否为 450 ppmv,这与气温对 CO_2 浓度敏感性有关,也与自然变化的影响有关。

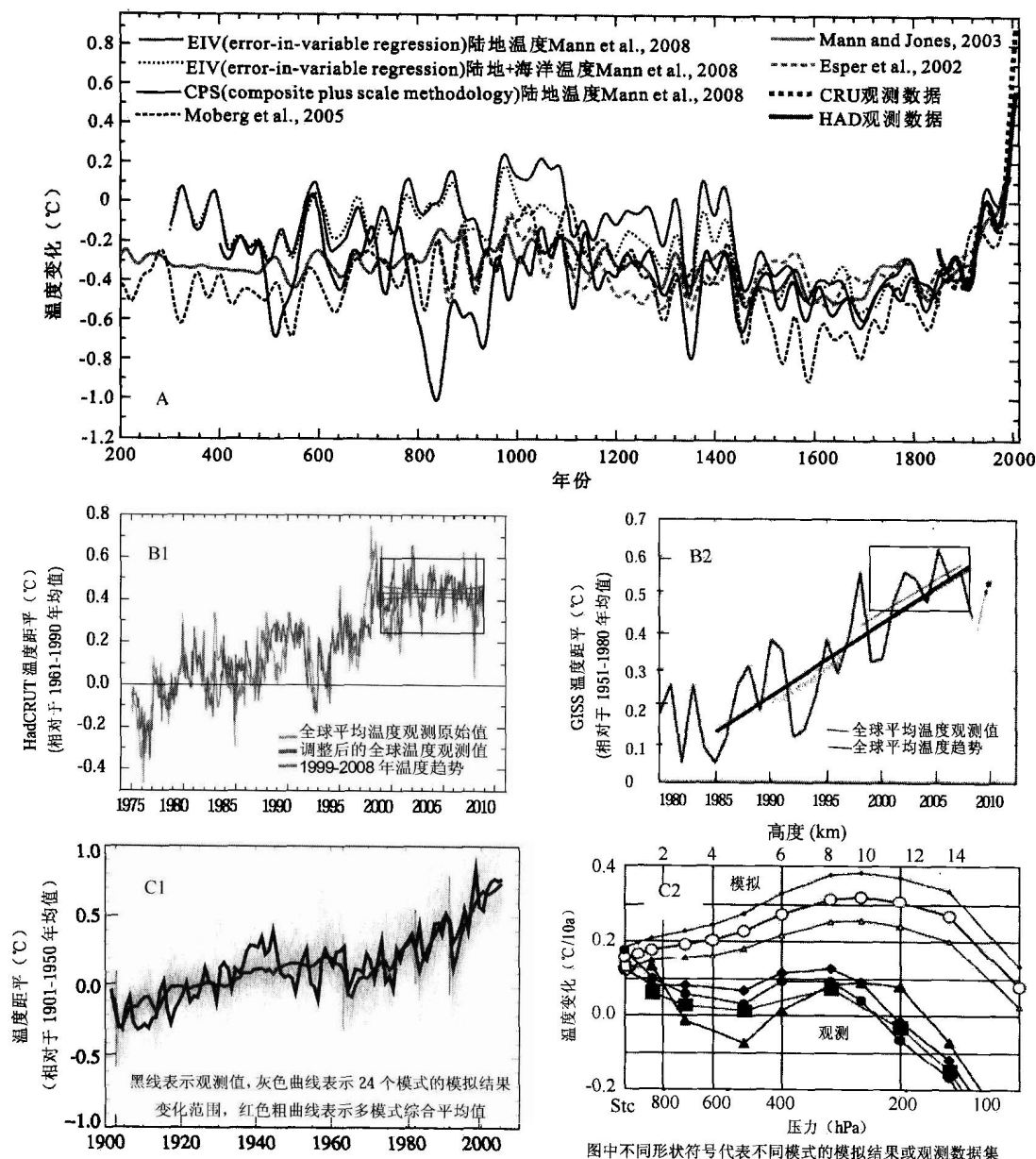


图 1.6 气候变化认识不确定性举例

A, 过去 2000 年是否存在“中世纪暖期”或“小冰期”(Allison et al., 2009); B: 过去 10 年全球温度“变暖停滞”(B1)(Knight et al., 2009)和“依然呈明显上升”(B2)(Allison et al., 2009); C: 模式模拟与观测结果的差异(C1 为全球温度距平(IPCC, 2007a), C2 为气温随高度变化(Douglass et al., 2007))

1.2 人类活动影响下的全球碳循环过程

基于人类碳排放与气候变化的因果联系, 认识和解决气候变化问题需要更好地理解各种人类活动的碳排放及其产生的原因。

1.2.1 自然碳循环

碳是地球上最重要的生命元素之一,是生命体的主要组成部分。碳也是地球上最重要的环境地球化学元素之一,在地球演化的历史长河中,扮演着十分重要的角色。全球碳循环是指碳在岩石圈、水圈、大气圈和生物圈之间,以 CO_3^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_2 、 CH_4 、 CH_2O (有机碳)等形式相互转换和运移的过程。

大气、陆地和海洋是地球系统中自然碳循环的三个主要子系统(图 1.7)。在冰期—间冰期时期或人类活动明显干预之前,全球碳循环仅仅存在于陆地、海洋和大气组成的有机系统中,受气候变化和其自身内部动力控制或驱动。如海洋碳循环中最重要的两个过程是物理泵和海洋生物泵。物理泵使得海气界面的气体得以交换,并将 CO_2 从海表向深海输送,通过气体交换从大气进入海洋的 CO_2 的多少取决于风速和穿越气海界面的分压差;生物泵则反映了浮游生物通过光合作用吸收碳及其向深海和海底沉积物的输送过程(陈泮勤,2004)。

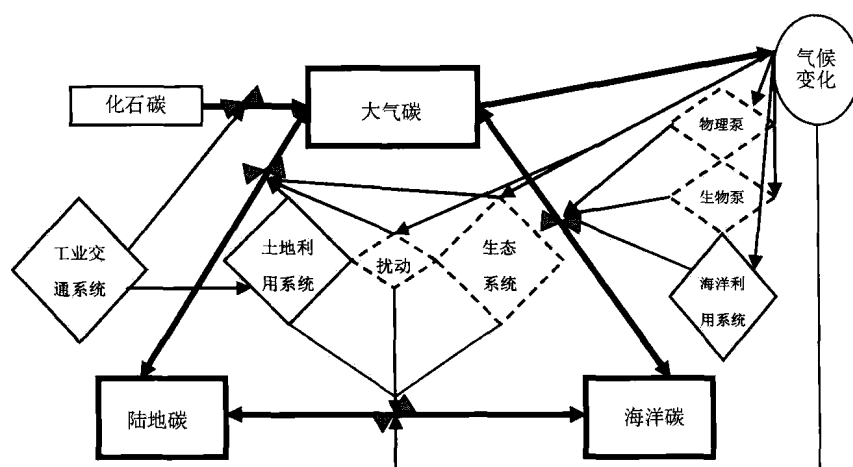


图 1.7 全球碳循环简图(GCP,2003)

陆地碳循环主要受生态系统生理过程与结构间的相互作用影响。植物吸收大气 CO_2 和 H_2O 经光合作用形成总初级生产力,为生态系统提供能量。经过植物自身呼吸消耗部分有机物并释放 CO_2 ,剩余的有机物构成生态系统净初级生产力(NPP),NPP 的积累形成陆地植被生物量碳库。生物量在异养呼吸的作用下分解部分有机物并释放 CO_2 ,剩余的有机物和土壤,及凋落层的碳库积累,构成生态系统净生产力(NEP)。NEP 在自然和人类活动的干扰下导致陆地生态系统的碳排放。光合作用对碳的同化和呼吸作用(包括植被呼吸和土壤呼吸)对碳的释放之间的平衡决定陆地生态系统与大气之间碳的净交换(陈泮勤,2004)。

在万年时间尺度上,地球系统的上述三个子系统之间的碳交换量呈周期波动,大气的 CO_2 浓度随着全球冰期—间冰期的变化在 180~280 ppmv 之间呈周期性规则变化。在几十年至千年尺度上,大气 CO_2 浓度相当稳定,平均为 280 ppmv,变幅仅 10 ppmv(图 1.4)。

1.2.2 人类活动对碳循环的影响

人类活动使自然状态下的碳平衡遭到破坏。一般认为,化石燃料的燃烧及工业过程和土

地利用方式的改变是人类改变全球碳循环的两种主要途径。工业革命以来的 200 年间,加速的工业化(化石燃料的燃烧和工业过程)和土地利用变化使全球碳循环过程变得复杂化,人类活动导致的碳排放破坏了自然状态下的碳平衡,已经严重影响了全球碳循环过程(图 1.8)。目前,燃烧化石燃料和工业排放产生的 CO_2 占排入大气中 CO_2 总量的 80%~85%,人类土地利用方式变化占 15%~20%。人为碳排放使全球大气 CO_2 浓度从工业化前的约 280 ppmv 增加到 2009 年的 387.35 ppmv。

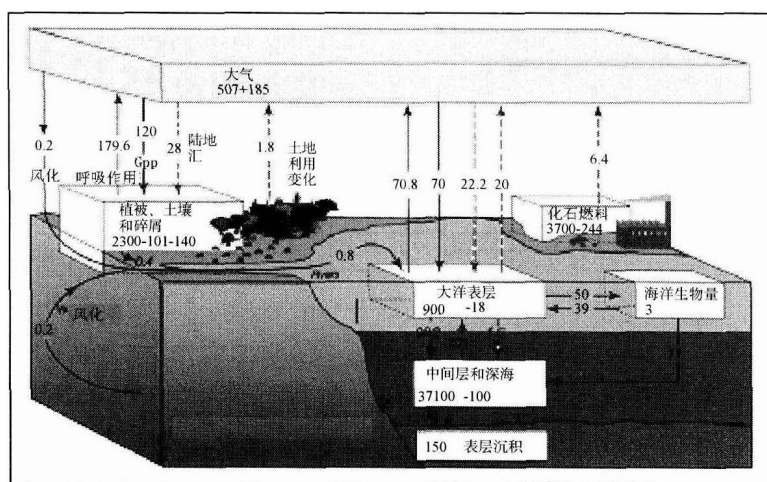


图 1.8 1990 年代全球碳循环(年通量 $\text{GtC}/\text{年}$)(实线代表工业革命前的自然通量,虚线代表人为通量)。说明:陆地系统净损失-39 GtC 是根据化石燃料燃烧排放的总量减去大气中的增量再减去海洋的储存量推算而得,植被、土壤和碎屑物部分的-140 GtC 损失代表土地利用变化排放的总量,而陆地生物圈碳汇为 101 GtC (61~141 GtC)。与大气的净人为交换量来自 IPCC AR4 表 7.1 的第五列,总通量一般有 $\pm 20\%$ 以上不确定性,而在包含河流输送、分化和海洋埋藏等项之后,各分量的通量数值则保持平衡。GPP 是陆地总初级生产量,自 1750 年以来的大气碳含量和所有的通量截止到 1994 年(IPCC,2007a)。

1.2.3 碳在人类经济系统中的流动

人类燃烧化石燃料和改变土地利用所导致的温室气体排放,都是在社会经济发展过程中产生的。为维持人类社会的正常运转,不可避免地要造成一定数量的碳排放,正是这些排放,维持着现今人类社会的正常运转,因此,需要从人类需求的角度,认识碳在人类经济系统中的流动过程及其影响因素。

如果将人类经济系统看做一个封闭系统,不考虑国际进出口贸易,可得到简化的人类经济系统中非土地利用活动的碳排放流过程(图 1.9)。

人类经济系统中的碳排放主要来源于能源活动和工业过程两个方面。能源活动(化石燃料燃烧)是人类经济系统中最主要的碳排放源,其中水能、核能、太阳能等属于清洁性能源,基本没有碳排放,与碳排放相关的能源流主要是煤炭、石油和天然气三种化石燃料的燃烧。工业生产过程的 CO_2 排放主要来源于水泥、石灰、钢铁、铝、硝酸、己二酸等生产,其中水泥生产(制造水泥熟料过程中产生的 CO_2)是工业生产过程中最大的非能源 CO_2 排放源。