

W. Steffen A. Sanderson P. D. Tyson J. Jäger P. A. Matson B. Moore III
F. Oldfield K. Richardson H. J. Schellnhuber B. L. Turner II R. J. Wasson

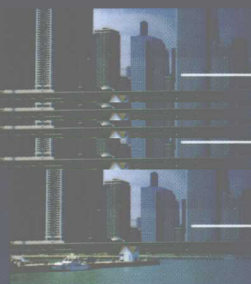
Global Change and the Earth System

A Planet Under Pressure

全球变化与 地球系统

——一颗重负之下的行星

W. Steffen 等著



符淙斌 延晓冬 马柱国 温 刚 等译
丹 利 张仁健 贾根锁 董文杰

符淙斌 贾根锁 延晓冬 郭彩丽 审校
丹 利 马柱国 张仁健 何晓欢



Springer



气象出版社
China Meteorological Press

W. Steffen A. Sanderson P. D. Tyson J. Jäger P. A. Matson B. Moore III
F. Oldfield K. Richardson H. J. Schellnhuber B. L. Turner II R. J. Wasson

Global Change and the Earth System

A Planet Under Pressure

全球变化与 地球系统

——一颗重负之下的行星

W. Steffen 等著

符淙斌 延晓冬 马柱国 温 刚 等译
丹 利 张仁健 贾根锁 董文杰

符淙斌 贾根锁 延晓冬 郭彩丽 审校
丹 利 马柱国 张仁健 何晓欢



Springer



气象出版社
China Meteorological Press

Translation from the English language edition:

Global Change and the Earth System by W. Steffen, A. Sanderson, P. D. Tyson, J. Jäger, P. A. Matson, B. Moore III, F. Oldfield, K. Richardson, H.-J. Schellnhuber, B. L. Turner II, and R. J. Wasson

Copyright©Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2004

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

Chinese translation copyright©China Meteorological Press 2010

All Rights Reserved.

英文版版权©施普林格出版社·柏林·海德堡 2004

2004 年第一版

中译本（简体中文）版权©气象出版社 2010

保留所有权利

图书在版编目（CIP）数据

全球变化与地球系统：一颗重负之下的行星 / （澳）斯蒂芬（Steffen, W.）等著，符淙斌等译．—北京：气象出版社，2010.1

（IGBP 全球变化系列丛书；4）

书名原文:Global Change and the Earth System; A Planet Under Pressure

ISBN 978-7-5029-4346-2

I. 全… II. ①斯…②符… III. 全球环境—研究 IV. X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 227196 号

北京市版权局著作权合同登记：图字 01-2005-2043 号

全球变化与地球系统——一颗重负之下的行星

Quanqiu Bianhua yu Diqiu Xitong——Yike Zhongfu Zhixia de Xingxing

出版发行：气象出版社

地 址：北京海淀区中关村南大街 46 号

网 址：<http://www.cmp.cma.gov.cn>

总 编 室：010-68407112

责任编辑：郭彩丽 何晓欢

封面设计：王 伟

责任校对：时 人

印 刷 者：北京佳信达恒智彩印有限公司

开 本：889 mm × 1 194 mm 1/16

字 数：709 千字

版 次：2010 年 1 月第 1 版

印 数：1—2 000

定 价：100.00 元

邮 编：100081

E-mail: qxcbs@263.net

发 行 部：010-68409198

终 审：周诗健

责任技编：吴庭芳

印 张：26.5

印 次：2010 年 1 月第 1 次印刷

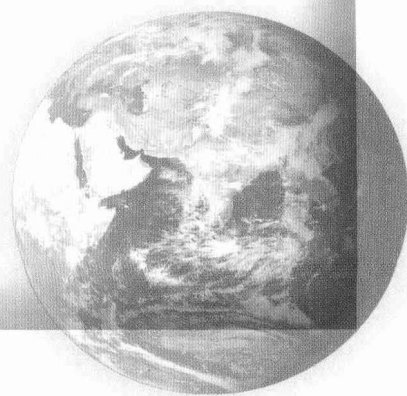
本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等，请与本社发行部联系调换

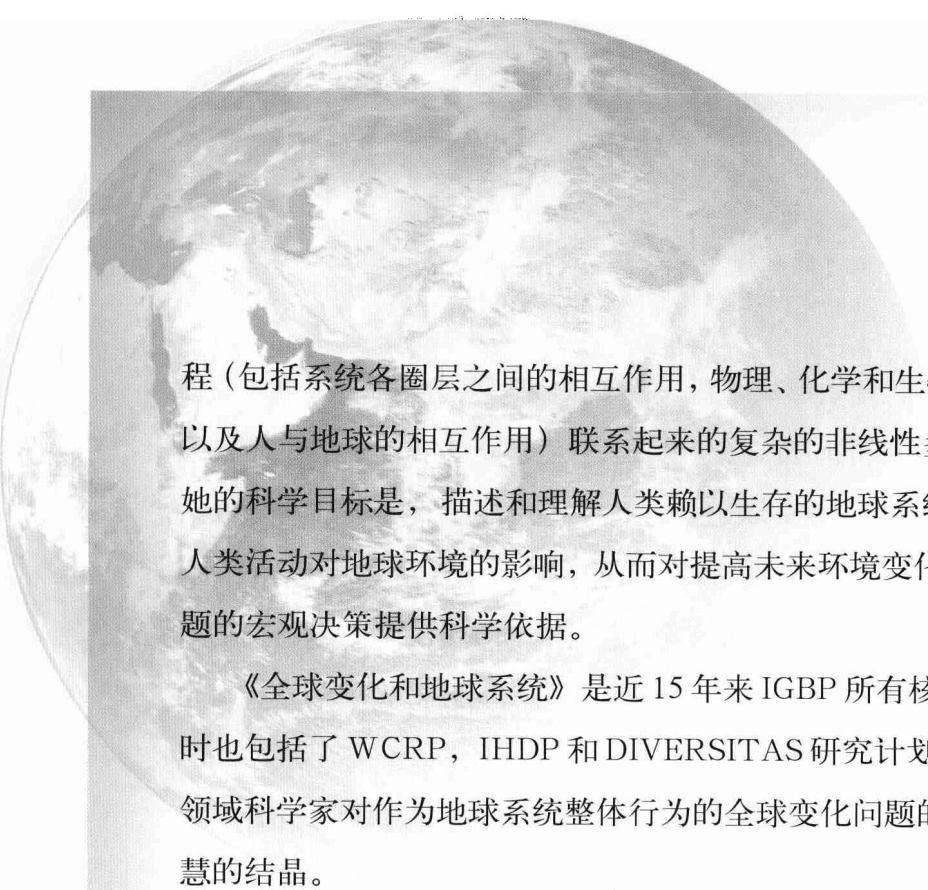
中译本序

全球变化是 20 世纪 80 年代开始形成的新兴科学领域。1984 年第一次全球变化国际会议，确定了全球变化领域的研究对象和目标。经过 20 多年的努力，她已经成为发展最迅速、最活跃的前沿科学领域之一。有四大国际计划——世界气候研究计划 (WCRP)、国际地圈—生物圈计划 (IGBP)、全球变化人类因素计划 (IHDP) 和生物多样性计划 (DIVERSIA) ——和数百个国际合作研究项目，数以万计的科学家，每年数十亿美元的投入，并被称为 21 世纪人类社会可持续发展的重大科学投资。

全球性重大环境问题超越了传统自然科学分支学科的界限、自然科学和社会科学之间的界限，导出了地球系统和地球系统科学的新概念，成为全球变化科学的理论基础。早在 20 世纪 80 年代，科学家开始认识到，全球性的重大环境问题是地球系统的整体行为的异常，是物理—化学—生物过程相互作用的结果。“今天，我们有理由来完整地理解影响我们的地球和它的周围环境之间的联系，其奥秘在于揭示物理过程、生物体，包括人类本身的相互作用。它不仅要求自然科学的所有分支，而且还需要人文和社会科学的卷入。”我们需要“从交叉科学的角度来研究整个地球系统，以理解陆地环境和它的生命系统中的全球变化”；需要“建立研究太阳—地球系统中复杂的协同的物理、化学和生物过程的交叉学科国际计划”。

全球变化和地球系统科学的研究对象就是，由大气圈、水圈、岩石圈、冰冻圈和生物圈（包括人类圈）所组成的作为整体的行星地球。它是由一系列相互作用过





程（包括系统各圈层之间的相互作用，物理、化学和生物三大基本过程的相互作用，以及人与地球的相互作用）联系起来的复杂的非线性多重耦合系统，即地球系统。她的科学目标是，描述和理解人类赖以生存的地球系统运转的机制、变化规律以及人类活动对地球环境的影响，从而对提高未来环境变化的预测能力，为全球环境问题的宏观决策提供科学依据。

《全球变化和地球系统》是近 15 年来 IGBP 所有核心计划研究成果的集成，同时也包括了 WCRP，IHDP 和 DIVERSITAS 研究计划的相关研究成果，反映了该领域科学家对作为地球系统整体行为的全球变化问题的最新认识，是国际科学界智慧的结晶。

全球变化对我国的影响是显著的、多方面的和深刻的。加强全球变化和地球系统科学的研究，对实现建设“可持续发展能力不断增强，生态与环境得到改善，资源利用效率显著提高，促进人与自然的和谐，推动整个社会走上生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展之路”的小康社会的宏伟目标具有重要意义。希望《全球变化和地球系统》中译本的出版能进一步推动我国全球变化和地球系统科学的研究。

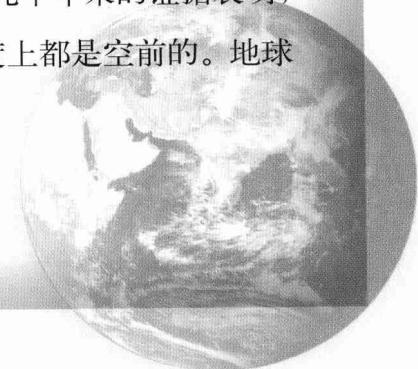
在本书翻译出版过程中，高荣、冯锦明、封国林、赵天保、张英娟、李应玲、范丽军、赵秀兰、姜纪峰、王超、张宁宁等同志也做出了一定的贡献，在此表示由衷的感谢！

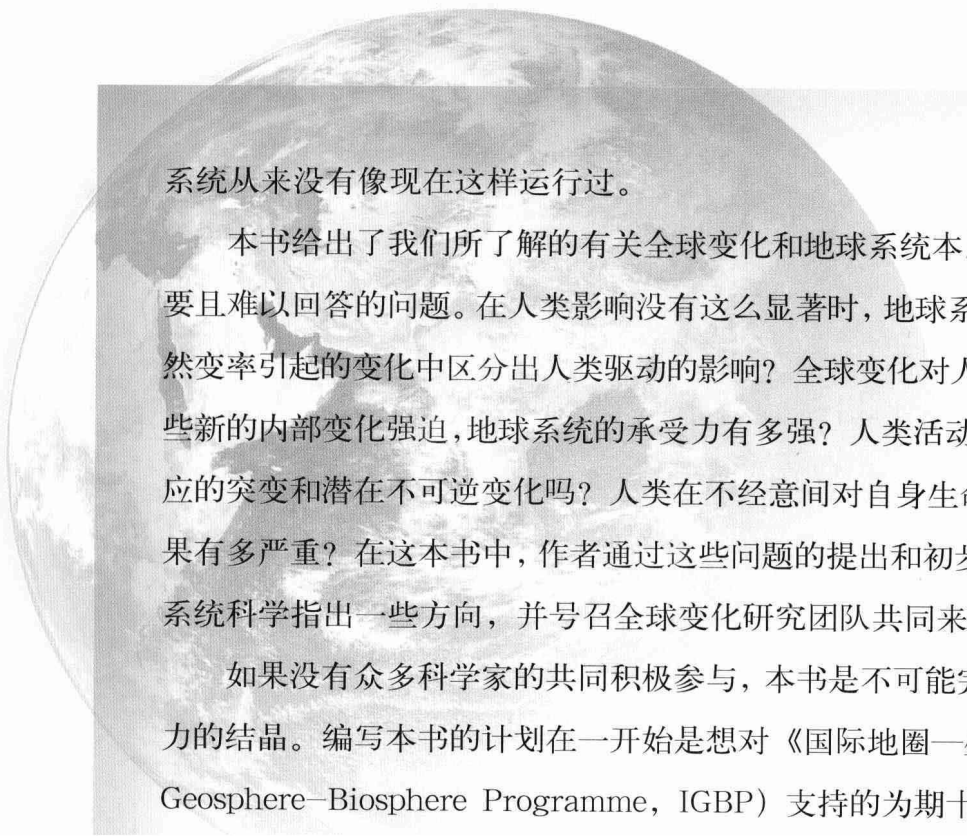
李应玲

原版序

人类与地球环境之间的关系在人类演变和社会发展的过程中一直都在发生着变化。事实上，地球上的所有人类以及人类与环境的相互作用，都发生在局地尺度，或者至多是区域尺度上，也许有一种情形算是例外，即区域尺度上的人类活动不断重复进行，从而产生了与气候变化相呼应的全球性影响——全新世大型哺乳类动物的大灭绝。除了这一可能出现的情形之外，地球在全球尺度层面的总体环境——季节的更替、天气气候的变幻无常、河流和冰川的消长和流动，以及各种生命形式的丰富多样——已经成了人类不断繁衍和发展社会结构的基本框架，它们仅仅服从于强大的自然力和偶尔来自宇宙的各种扰动。地球环境已经成为了资源的巨大源泉和一个具有很高调节功能的生命支持系统，使人类文明得以发展和繁荣。

本书关注的是地球环境已经发生的深刻变化，这一变化——全球变化现象——不是缘于强大的自然力或宇宙，而是缘于人口的数量和人类的活动。这一变化始于几百年之前，但在20世纪后半叶又经历了一个显著的加速过程。在过去100年里，全球人口数量从10亿多一点激增到60亿，1950—2000年间的经济活动几乎增加了10倍。经济和信息流的全球化，使得世界人口之间的联系比以往任何时候都更为密切。地球上有一半的陆地表面已经直接为人类改造利用，并且几乎所有陆地表面都通过这样那样的方式而处于人类的管理之中。世界上大多数的渔场被完全开发或过度开发，在高纬度以外的地区几乎找不到未开发的海岸线。当前的大气成分——温室气体、反应性气体、气溶胶粒子——已经明显不同于100年前。地球生物区正在经历着第六次大灭绝事件，这也是首次由另一个物种——人类——引起的灭绝事件。这些变化正在影响着地球系统的基本功能，特别是气候，这种影响的证据逐年递增。几千年来的证据表明，当前因人类驱动而造成的全球环境变化，无论在数量上还是速度上都是空前的。地球





系统从来没有像现在这样运行过。

本书给出了我们所了解的有关全球变化和地球系统本质的主要内容,研究了很多重要且难以回答的问题。在人类影响没有这么显著时,地球系统是怎样运行的?如何在自然变率引起的变化中区分出人类驱动的影响?全球变化对人类福祉有哪些影响?面对这些新的内部变化强迫,地球系统的承受力有多强?人类活动能够引发那些系统不可能适应的突变和潜在不可逆变化吗?人类在不经意间对自身生命支持系统所做的实验,其后果有多严重?在这本书中,作者通过这些问题的提出和初步研究,希望能为未来的地球系统科学指出一些方向,并号召全球变化研究团队共同来寻求这些问题的答案。

如果没有众多科学家的共同积极参与,本书是不可能完成的。的确,本书是集体努力的结晶。编写本书的计划在一开始是想对《国际地圈—生物圈计划》(International Geosphere—Biosphere Programme, IGBP)支持的为期十年的研究进行综合,但是它很快就得到了来自各主要全球变化研究团队——特别是IGBP的国际合作伙伴计划:《国际生物多样性科学计划》(International Programme of Biodiversity Science, DIVERSITAS)、《国际全球环境变化人类因素计划》(International Human Dimensions Programme on Global Environmental Change, IHDP)和《世界气候研究计划》(World Climate Research Programme, WCRP)——的更广泛的支持。我们对那些为本书做出各种各样贡献的科学家、团队和组织表示衷心的感谢。书中所有疏漏之处均由作者负责,并为此深表歉意。

最后,本书的目的是为了支持地球上人类事业的长期、可持续存在而构建一个知识基础。它的问世是想说明,为了应对当下的挑战,我们需要真正意义上的全球化的科学系统。

Will Steffen, Angelina Sanderson, Peter Tyson,

Jill Jäger, Pamela Matson, Berrien Moore III,

Frank Oldfield, Katherine Richardson, H. John Schellnhuber,

B. L. Turner II, Robert Wasson

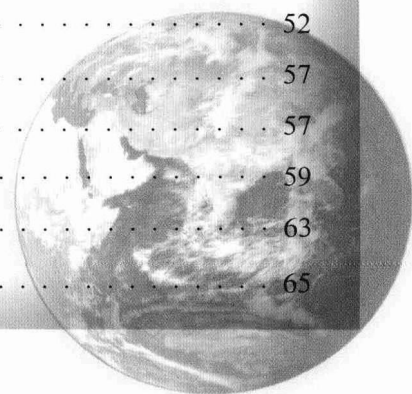
2003年8月于斯德哥尔摩

目 录

中译本序

原版序

第1章 集成的地球系统	1
1.1 为应对未来挑战的研究议程	1
1.2 把地球作为一个系统	2
1.3 全球变化的本质	4
1.4 本书的目的和结构	8
参考文献	10
第2章 行星机制：在人类活动主导世界之前的地球系统动力学	13
2.1 地球系统的自然动力学	13
2.2 对地球系统时间变率的新认识	14
2.2.1 自我调节的自然振幅	14
2.2.2 千年尺度的振荡和突变	17
2.2.3 间冰期气候变率	20
2.2.4 生物群系的时间变率	25
2.3 地球系统功能中生物学作用的新认识	28
2.3.1 生物地球物理过程	28
2.3.2 生物地球化学过程	31
2.3.3 生物多样性的作用	37
2.4 地球系统空间变化的新探索	41
2.4.1 土地覆盖的空间分布型	41
2.4.2 碳源与碳汇的空间格局	44
2.4.3 地球表面和大气之间痕量气体的交换	52
2.5 对地球系统时空连通性的新认识	57
2.5.1 通过海洋及其洋流的连通性	57
2.5.2 通过大气输送的连通性	59
2.5.3 通过水文输送的连通性	63
2.5.4 通过生物群系的连通性	65

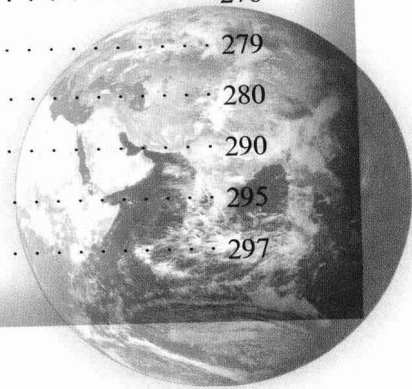


2.5.5 气候系统的遥相关	66
2.5.6 通过时间的连通性：过去扰动的遗迹	70
2.6 关于地球系统的非线性、突发性和阈值的新观点	71
2.6.1 冰期的终结	71
2.6.2 海因里希 (Heinrich) 事件和 Dansgaard-Oeschger 事件	73
2.6.3 大范围干旱和其他极端事件	73
2.6.4 撒哈拉的沙漠化过程	75
2.7 人类活动占主导地位之前的地球系统	76
参考文献	81

第3章 人类世时代：人类如何改变地球系统	96
3.1 一颗人类主宰的星球?	96
3.2 变化的驱动力	97
3.2.1 作为变化驱动力的各行业活动	99
3.2.2 地球系统变化驱动力的一种系统方法	105
3.3 地球系统的变化特征	109
3.3.1 人类活动对地球陆地的改变	109
3.3.2 人类活动对大气圈的改变	118
3.3.3 人类活动对水文循环的改变	131
3.3.4 人类活动对海岸带和海洋环境的改变	135
3.3.5 人类活动对生物多样性的改变	137
3.3.6 碳、氮、磷、硫通量的变化	140
3.4 人类活动驱动的地球系统变化	145
3.4.1 社会经济和文化之间的遥相关	145
3.4.2 人类驱动的变化和自然变率的相互作用	151
3.4.3 全球变化：人类活动变化的量级、速度和显著性	153
参考文献	157

第4章 变化的反响：地球系统对人类活动的响应	170
4.1 变化的反响	170
4.2 地球系统对矿物燃料燃烧的反应	176
4.2.1 非反应性气体	176

4.2.2 反应性气体	190
4.2.3 气溶胶	196
4.3 地球系统对土地利用和土地覆盖变化的响应	202
4.3.1 转化过程	202
4.3.2 土地覆盖变化的影响	207
4.3.3 集约化农业	216
4.4 多重与相互影响的变化	223
4.4.1 东南亚大火	224
4.4.2 珊瑚礁	225
4.5 地球系统对人类强迫的综合响应	227
4.5.1 碳循环	227
4.5.2 氮、磷和硫的循环	229
4.5.3 水文循环	230
4.5.4 气候系统	230
参考文献	231
第5章 与全球变化共存：地球系统变化对人类福祉的影响	243
5.1 全球变化的结果	243
5.2 预测全球变化影响的综合方法	243
5.2.1 情景驱动方法	243
5.2.2 基于脆弱性的影响评估	246
5.2.3 利用古资料进行脆弱性评估	249
5.3 人类福祉关键资源的风险	255
5.3.1 食物的质量和充足性	256
5.3.2 水资源	264
5.3.3 空气质量	272
5.3.4 病虫害	274
5.3.5 放大效应、衰减效应和多重效应	276
5.4 地球系统整体面临的风险	279
5.4.1 灾难性事件	280
5.4.2 过去的变化、极端事件和突发事件	290
5.4.3 人类对全球变化的认识	295
参考文献	297



第6章 走向地球系统科学与全球可持续发展	308
6.1 从气候变化到地球系统科学	308
6.2 知识基础	309
6.2.1 地球系统中的生物	310
6.2.2 全球变化的本质	312
6.2.3 全球变化的级联效应	312
6.2.4 阈值和突变	314
6.2.5 一种没有先例的状态	316
6.3 构造地球系统科学	318
6.3.1 前沿问题	318
6.3.2 复杂性和不规则性的处理	320
6.4 地球系统科学研究的工具包	322
6.4.1 古科学	322
6.4.2 当代的观测和监测	325
6.4.3 地球系统试验	332
6.4.4 全球网络	332
6.4.5 区域集成研究	334
6.4.6 模拟地球系统动力学	336
6.4.7 全球集成、综合与交流	342
6.5 走向全球可持续发展	343
6.5.1 前进中的行业智慧	343
6.5.2 对地球系统的管理	344
6.5.3 变化着的地球所面临的挑战	360
参考文献	360
译名对照表	368

第 1 章 集成的^①地球系统

环境变化与人类社会的相互作用有着跨越几千年漫长而复杂的历史,而这种相互作用在不同时间和不同地点差别很大。尽管存在这种时空差异,但近年来仍有一个全球性的观点开始崭露头角,并在环境科学内部成为一个不断壮大的研究体系的基本框架。这一观点形成的关键之处在于对地球系统机能的两个方面形成了初步的认识。一方面,地球本身是一个完整的系统,在这个系统内部,生物圈是一个活跃的、基本的分量。另一方面,目前,人类活动通过复杂的、交互的而且明显是不断加速的方式在全球范围的尺度上广泛而深刻地影响着地球;而现今的人类又具有改变地球系统的能力,但其改变的方式正威胁着人类自身赖以依存的生物及非生物过程及组成成分。本书描绘了当前我们对地球系统的科学认识以及影响地球系统的本质——人类驱动的变化。本书还探讨了地球系统的响应、这些响应对系统的稳定性及人类福祉所产生的后果,以及为实现全球可持续发展目标的一些地球系统科学方法。

1.1 为应对未来挑战的研究议程

加深环境的科学认识已成为十分迫切的要求,这种迫切性源于许多动机,而这些动机的相对重要性也随着时间的推移而发生了变化。这其中比较容易辨识的包括一种对已察觉的自然规则需要更明晰地揭示其性质和特点的企望,一种满足简单好奇心的冲动,一种解决人类与环境相互作用中所产生问题的需要,或者至少是对这些问题的一种响应。在过去的 20 年当中,一种新的观念已经在环境问题上占据了主导地位,即人们逐渐认识到,人类活动对地球系统运转的影响正不断增强,而人类自身的福祉以及人类社会的未来均取决于地球系统的运转。

这种认识中最熟悉、最有代表性的例证便是人类活动对大气温室气体浓度的影响(图 1.1)。这些温室气体具有吸热的特性,同时,以往资料表明,在过去的 40 万年里,大

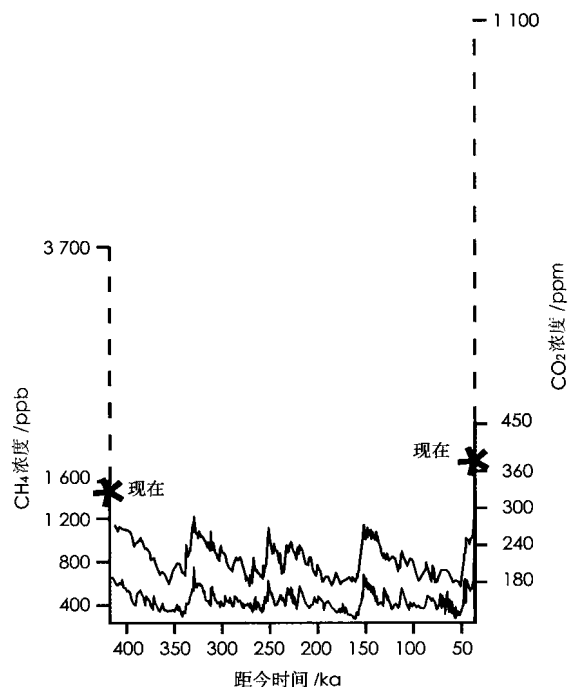


图 1.1 从东方站[俄;南极洲](Vostok)冰芯记录所获得的关于过去 4 个冰期与间冰期旋回二氧化碳(CO_2)和甲烷(CH_4)这两种温室气体在大气中浓度的测量结果,当前测量结果,以及基于政府间气候变化专门委员会(IPCC)2000 年的模式所预估的未来 CO_2 和 CH_4 的水平(Petit 等 1999, IPCC 2001)。纵向坐标轴上的虚线显示的是 IPCC 对 CO_2 和 CH_4 在 2100 年的浓度预测值(ppm 指干空气中的温室气体浓度为百万分之一,即在 100 万个空气分子中有 1 个温室气体分子;ppb 指干空气中的温室气体浓度为 10 亿分之一)。

① 本书将 Integrated 译为“集成的”,因其含有不同分量间客观存在相互作用的意义,从而将其与主观的“综合的”区别开来。

气温室气体浓度的变化同气候变化有着紧密的联系,这两点结合起来对未来提出了一系列紧迫的问题。人类活动对地球系统还具有广泛的其他影响,它们已经产生并将继续产生显著而深远的累积效应。这些人类活动的影响和后果结合起来,并不断增长,促使环境学家和其他科学家把目前研究的重点放在了这些问题的性质和特点上。

处理这一侧重于未来的研究议程所需要的科学必须超越传统的学科界限,因为它所涉及的问题超越了任何单一学科领域的研究。所有复杂的系统都抵制单纯的机理分析。人类的生存和生活依赖于地球系统的机能,为获得对此系统的理解而需要采取的系统层面的研究方法必须包含复杂的交互作用、系统成分间的协同配合、非线性反应以及多重反馈。这些研究还必须包括生物物理和人类活动这两个紧密交织并且相互影响的驱动因素。

传统的分析科学将各个变量孤立起来,其影响也是单一的。这种方法无法适应地球系统科学所带来的挑战。在如下情况下这一点通常表现得尤为明显:即假定对环境问题的响应是处理某框架内具体的、被狭隘定义的一些问题,而此框架根本无法考虑到全面的影响和后果,而这些影响和后果在一个复杂的、相互影响的系统内却是固有的。就更普遍的意义而言,由系统内的组成成分相互影响而产生的行为是无法通过孤立地研究系统内的分量来理解的。因果关系的辨识仍然是有用的,但是这些关系应该根植于复杂的系统之中。在这种复杂系统中,协同与配合、交互作用、还有非线性关系,它们与传统的分析方法是不同的。

系统思想及其在环境科学中的应用不是新生事物。生态系统的概念可以追溯到 20 世纪 30 年代(Tansley 1935),系统规划在 30 年前便已在一些领域(如河流地貌学)取得了显著成绩(Chorley 等 1971)。20 世纪 70 年代的学者对更具一般性的系统思想作了详细解释(Laszlo 1972)。全球生物地球化学这一思想是本书的主旨,其一般原则在大约 50 年前即被讨论和阐述过(Hutchinson 1944, 1954)。然而,这些例子中的每一个都仅仅只考虑到了地球系统机制中的一个部分。在过去 10~15 年内,关于地球系统真正的新认识是对地球系统的观察角度的发展,即把地球系统作为一个整体来观察。以下几个方面的进展导致了科学洞察力的这种触及根本的并且正在不断加速的变化:

——从宇宙飞船中所看到的地球是一个漂浮在黑暗中的蓝绿色球体。这个观察角度触发了一些颇带有感情色彩的情绪,即将地球视为一个无生命空间中充满生命的家园。地球也被视为一个物质上有限但却自给自足的存在,这是一种更具理性的观点(图 1.2)。

——全球观测系统使得科学家能够将以前仅用于子系统、区域或局地尺度的观念运用于地球这个整体。地球自身被视为一个系统。

——全球数据库获得的数据具有较好的一致性,这些数据在全球尺度上可以进行对比和同化,因而能够处理全球尺度的现象。

——推断地球过去活动特点的能力得到显著加强,这样就使当前的观测成为时间连续体中的一个快照。同时,

——先进的计算机技术不仅使基本的数据处理成为可能,而且还使模式的诞生成为现实。随着这些模式复杂性的不断增加,对相互作用功能及系统敏感性的认识也不断提高。

从人类与环境间的关系来看,科学正处于一个潜在的深刻变化的起点处。它将人类视为一个整体,将地球视为一个单一的系统。

1.2 把地球作为一个系统

全球尺度的循环是作为系统来运行的,这种观念也不是新生事物。以水循环和碳循环为例,两者都是作为地球系统在运行。这一事实在 100 多年前就已被揭示出来。然而,这些地球循环



图 1.2 从太空看地球(图像来源:美国航空航天局在线图片库)

本身是紧密联系的,同时,在地球动力学当中,生命本身也扮演着一个积极而必要的角色。这些事实是在很久以后才被意识到的[如盖娅(Gaia)假说; Lovelock 1979]。

在近代地质历史时期,地球是一个单一的、内部联系的、自我调节的系统,其活动的范围和程度在 1999 年随着东方站[俄]冰芯 420 000 年记录的发表而成了关注的焦点(Petit 等 1999)(图 1.1 和 1.3)。虽然在 20 世纪全球变化科学界所发表的最重要的研究成果当中,这些数据尚存在争议,但是它为一个完整的地球环境系统提供了强有力的时间背景及有力的观测证据。

东方站[俄]冰芯记录数据为人类认识地球系统提供了丰富的信息。在本书的许多地方都将使用这些信息来更为细致地检验系统动力学的各个方面。当前,已很快表现出 3 个显著的特征。它们不容置疑地共同表明,地球是一个系统,其特征和行为具有一个集成系统的特点。具体说来,这 3 个特征是:

——由局地气温的代用资料($\delta^{18}\text{O}$)序列所代表的气候变率以及由冰芯气泡中的 CO_2 及 CH_4 这两种痕量气体的大气浓度所代表的全球

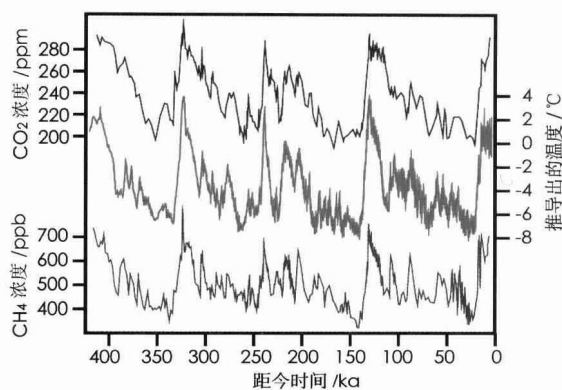


图 1.3 东方站冰芯 420 000 年记录,它给出了在 4 个冰期和间冰期旋回内 CO_2 和 CH_4 有规律的大气浓度分布及据此推导出的当时的气温(据 Petit 等 1999 改绘)

碳循环的变化在整个时间序列上都表现出相当高的同步性。事实上,东方站[俄]的记录证实了气候代用资料与痕量气体之间以及与气溶胶(灰尘和硫酸盐)浓度之间都存在密切的关系,而这一切又部分地同生物过程相关联。

——温度和痕量气体浓度的极大值和极小值表明了冰期和间冰期交替出现的状况,它们随时间表现出有规律的、循环的节奏,每个循环的时间跨度大约是 100 000 年。地球轨道偏心率的稳定的变化被认为是造成这种周期性的首要驱动机制,但是这种变化太微弱、太平缓,如果没有内部反馈的有力调节,是无法产生可被记录下来的变化的。这一点在每个冰期的末期突然向间冰期转化时表现得尤为明显。地球系统这种对外部强迫的极度非线性响应必然涉及生物、化学及物理各分量间的相互作用。

——用同位素推测出的气温及痕量气体浓度变化的范围非常有限。在 4 个冰期一间冰期的旋回中,每个间冰期都有类似的峰值;每个冰期所达到的最小值也类似。这表明,在东方站冰芯所记录的整个时间段内,地球系统内有很高的自调节能力。

正如第 2 章将要说明的,地球环境这种系统性的行为缘于其外强迫(主要是地表附近太阳辐射水平的变化)同地球环境自身大量而复杂的反馈及内强迫的共同作用。事实上,毫无疑问,正是其内部的动力学使得地球成为一个适合生命生存的地方。例如,如果高层大气没有那个稀薄的臭氧层,那么将会有更多的有害紫外辐射透射到地球表面;如果低层大气没有那些能够吸收热量的稀薄痕量气体层,那么地球的平均地表气温将比现在低大约 30 °C。

在过去的几十年里,有越来越多的证据表明,行星尺度的变化正在对以地球系统内部动力学为特征的强迫和反馈作出快速响应。如图 1.1 所示,关键指标(如大气中痕量气体的浓度)正在发生着显著的变化;同时,在很多情况下,这些变化同人类活动息息相关。显然,地球系统正在受到越来越多的人类活动引起的新的行星尺度作用力的影响。从根本上说,就是这些人类活动引起了本书所探讨的全球变化现象。

1.3 全球变化的本质

全球变化并不仅仅是气候变化,人们直到最近才认识到它所涉及的范围及复杂性。这个概念在很大程度上起源于夏威夷的冒纳罗亚(Mauna Loa)观象台对大气中 CO₂ 浓度仔细而可靠的观测(Keeling 等 1995, 2000)。这些观测首次明确地显示出,人类活动能够对环境造成直接的、全球性的影响(图 1.4)。冒纳罗亚观象台的记录表明,在过去 40 年里,大气中的 CO₂ 浓度正稳步上升,这样便把东方站冰芯资料所提供的自然变率同图 1.1 中的未来预测值联系了起来。结合其他有关证据和线索,如大气中 CO₂ 中碳同位素的构成以及 CO₂ 的纬度分布(Prentice 等

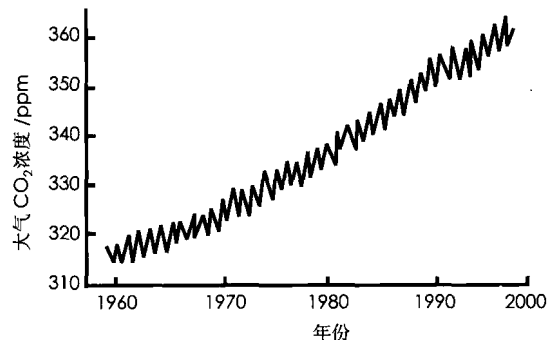


图 1.4 夏威夷岛冒纳罗亚观象台所观测到的过去 40 年大气中 CO₂ 浓度的上升情况(据 Keeling 等 2000 改绘)

2001),冒纳罗亚观象台的记录表明,矿物燃料的燃烧正是额外 CO₂ 的主要来源。尽管此发现非常惊人,但是冒纳罗亚观象台的记录本身对于揭示地球系统的功能并没有给出多少线索。要认识地球系统的功能,我们还需要其他两条证据。

如图 1.1 所示,东方站冰芯对过去 420 000 年内大气中 CO₂ 浓度的记录表明,在此时间段内,大气中 CO₂ 浓度的正常波动范围是 180~280 ppm。冒纳罗亚观象台的记录把东方站的资料延续到最近时段,它同时表明,地

球大气成分变化的尺度同总体的自然变率(如气温变化——译者注)在数量级上是相同的。长期的古代记录把现代器测结果纳入到了一个时间连续体内,从而为揭示近期人类对地球系统的扰动规模提供了一个清晰得多的视角。

第二,东方站冰芯的详细记录(在图 1.3 中表示得更全面)还指出,大气中 CO_2 和 CH_4 的浓度与气候有关,这一点至少能由南极洲附近区域的温度来说明。许多来自海洋和陆地沉积物的记录(Alverson 等 2000, 2003)证实,东方站时间尺度上的主要气候变化的顺序——冰期与间冰期间的振荡——在全球范围内是大致同步的。此外,近期来自冰芯记录的资料具有更高的时间分辨率(Alverson 等 2003),这些记录所强调的观点是,即使是在每个冰期终结时快速升温的间隙,大气中温室气体的浓度同气候变化仍有紧密的联系。虽然每个冰期—间冰期转化的相位调整及可能的延迟还没有得到准确确认,但是通过仔细分析仍然能够说明,在大气中 CO_2 和 CH_4 浓度增加之后,紧接着的便是太阳辐射的变化,而这又与地球轨道偏心率的变化有关。地球轨道偏心率的变化看起来似乎是造成冰期向间冰期转换的原因,但实际上在这种变化发生数千年前便发生了强烈的冰川消退作用(Petit 等 1999, Pépin 等 2002)。这同以下观点是一致的,即在由冰期向间冰期转换的过程中,温室气体起着一个早期的、周期性的、关键的反馈作用。

再看看近代,越来越多的证据表明,地球的气候正在快速地变化着(图 1.5),因人类活动而引起的 CO_2 , CH_4 及其他温室气体浓度的升高正是造成这一变化的一个重要原因(Mann 等 1999, Crowley 2000, IPCC 2001)。

自然变率与过去几百年因人类活动而引起的变率(它又导致了全球变化)之间关系是复杂而深刻的。这在地球历史上几乎可以确定是史无前例的。人类无论是在数量上的扩张,还是人均开发地球资源上的增长,都是非常显著的。在过去 300 多年,世界人口数量增长了 10 倍,达到了 60 亿。与人口增长相伴随的是人类的消费水平在以更快的速度增长。人类社会的其他变化也是非常快速而深刻,其中许多变化都是通过全球化(图 1.6)过程来完成的。仅仅就过去的 50 年而言,事实上,人类活动在每个领域内的增长都是相当可观的,例如:

——世界人口目前是 61 亿,这是 1960 年的 2 倍,1930 年的 3 倍,而且到 2050 年预计将超过 90 亿(UNFPA 2001)。

——自 1950 年以来,全球经济增长超过了 15 倍;全世界的国内生产总值(GDP)从 1965 年的 20 000 亿美元增长到了 1995 年的 280 000 亿美元(UNDP 2000, UNFP 2000)。

——经济发展的不平衡性正在增加。富裕国家的人口占世界总人口的 15%,但其 GDP 却占世界的 50%;从 1960—1994 年,世界上 20% 最富裕国家与 20% 最贫穷国家的收入之比从 30:1 扩大到了 78:1 (Word Bank 2002, UNDP 2000)。

——世界石油消耗自 1960 年以来已增长了 3.5 倍;全球薪材使用量在过去 50 年内翻了一番(EIA 2002, UNEPA 2001)。

——交通运输业占用了世界能源总消耗量的 25%,其中机动车占用了能源消耗的 80%。机

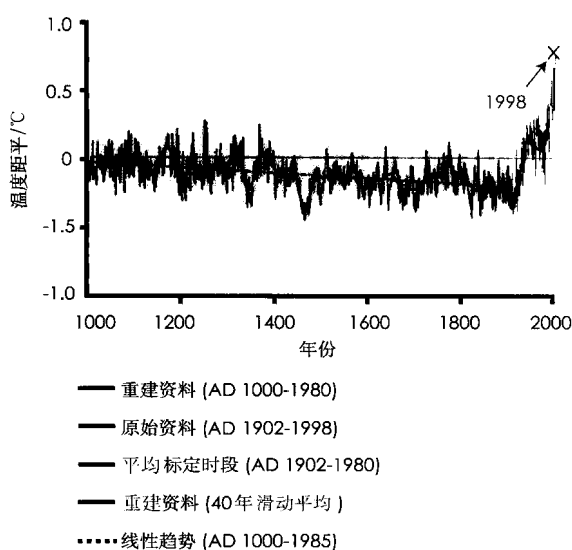


图 1.5 过去 1 000 年内北半球的年平均地表温度 (Mann 等 1999)

动车的数量从 20 世纪 40 年代末期的 4 000 万辆增长到了 1996 年的 67 620 万辆(IRF 1997)。

——全球通信业随着因特网的发展而被迅速增长。仅仅从 1993 年到 1999 年这 6 年间,全球通过因特网联系的人口数量就从 300 万增长到了 2 亿多(Internet Economy Indicators 2002)。

——城市化在 20 世纪增长了 10 倍。从 1950 年到 2000 年,世界城市人口占总人口的比例从 30% 增长到了 47%,到 2020 年则预期将增长到 56%。大城市(1 000 万以上居民)的数量从 1975 年的 5 个增长到了 2000 年的 19 个(FAOSTAT 2002, UNEPA 2001)。同时,

——随着通信业、旅游业及经济全球化的增长,世界不同文化间的联系和交融正飞速发展。

地球在资源以及对不断增长的人类活动所带来的废弃物吸纳能力上所面临的压力也在急剧增长(Crutzen 2002, McNeill 2001)(图 1.7)。人类活动引起变化的方式包括如下几种:

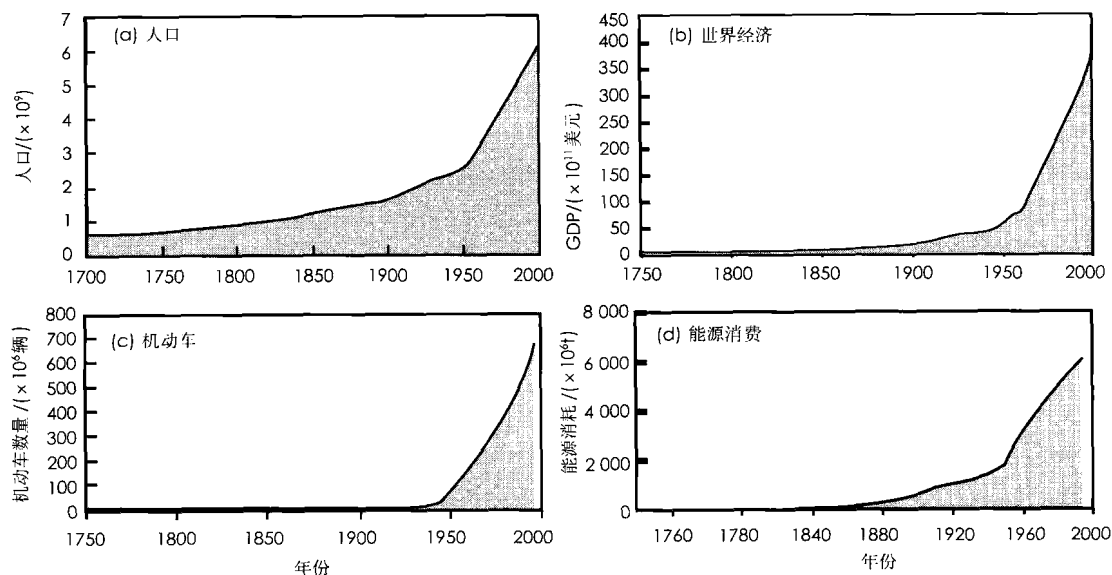


图 1.6 过去 300 年内人类活动在许多方面的增长率(a)人口(US Bureau of the Census 2000);(b)世界经济(Nordhaus 1997);(c)机动车(UNEP 2000);(d)能源消耗(Klein Goldewijk 等 1997)

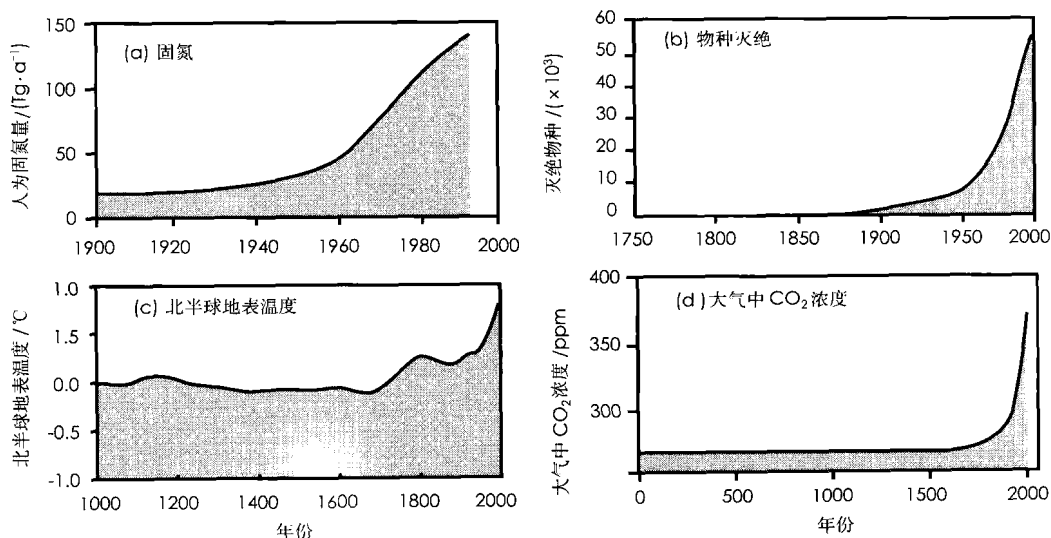


图 1.7 地球系统对不断增长的人类活动压力的响应(a)固氮(Vitousek 1994);(b)物种灭绝(Smith 2002);(c)北半球地表温度(Mann 等 1999);(d)大气中 CO_2 浓度(据 Keeling 等 2000 改绘)