

# 地球系统科学导论

毕思文/编著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

## 内 容 简 介

21 世纪,地球系统科学将以全球性、统一性的整体观、系统观和多时空尺度,研究地球的整体行为。地球系统科学理论的构建,将使人类更好地认识所赖以生存的环境,更有效地防止和控制可能突发的灾害对人类所造成的损害,更有利于人类与地球的和谐发展。

全书共 13 章。第 1 章至第 4 章主要介绍了地球系统科学提出的背景和地球系统的全球化;地球系统科学的特征与趋向;地球系统科学的基本概念和研究方法。第 5 章至第 10 章重点介绍了地球系统科学的基础理论。第 11 章至第 12 章详细介绍了地球系统科学子系统与学科分支和地球系统各圈层相互作用;第 13 章对地球系统的数字表达——数字地球做了概要介绍。

本书主要作为全国普通高等学校文、理、工、商、政、法、农、医 各专业(包括地球科学类)的基础课教材使用,也可以满足社会各方面进行素质教育的需要。

### 图书在版编目(CIP)数据

地球系统科学导论/毕思文编著. —北京:科学出版社,2003.10

ISBN 7-03-011949-5

I. 地… II. 毕… III. 地球科学—导论 IV. P

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 067936 号

策划编辑:彭 斌/文案编辑:李久进/责任校对:钟 洋

排版制作:科学出版社编务公司/责任印制:白 羽

封面设计:黄华斌

**科学出版社** 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2003 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2003 年 10 月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—3 000 字数:401 000

**定价:32.00 元**

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

# 序

地球系统科学是综合地研究地球系统的科学。是在对地球科学领域中，众多分支学科深入分析的基础上，进一步开展高度综合性研究的新兴领域之一。

天人合一的哲学思想在中国源远流长。水利学家谢家泽院士倡导天、地、生、水、人的协同发展，精辟阐述了地球各圈层之间的相互作用与相互制约的关系。20世纪后半叶，由于覆盖全球的卫星遥感、定位系统和通信网络的高度发展，对地球观测的时空分辨率空前提高，为地球科学的系统研究提供了难能可贵的支撑技术。对于全球化经济发展，特别是可持续发展的思想的实施，创造了有利的条件。地球系统科学应运而生，并不是偶然的，它是社会进步的需求与科学进步可能性的结合。

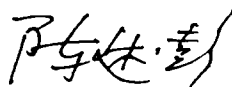
钱学森院士指出，地球是一个开放而又复杂的巨系统。地球各圈层之间存在着内在的与外在的相互作用与相互制约的关系；在地球的发生、发展演变过程中，又交织着物理、化学过程和生命过程的机理，微观与宏观现象矛盾的统一。人类就生活在这个复杂的巨系统之中，同时又在其中产生特殊的作用和影响。我们迫切需要从统一的、系统的观点，从多时空的角度，认识地球的整体行为。从而有效地调控人与自然的关系，促进自然资源、生态环境与社会经济的可持续发展。最大限度减少自然灾害、环境污染、生态破坏所造成的损失，繁荣全球化贸易，优化资源配置，缩小国家或地区间数字鸿沟与信息化、现代化的差距，摆脱战争与贫穷。这是全人类的共同愿望，也是中国全面实现小康社会的不可忽视的大前提。

应该承认，虽然时空距离已经不断地在缩小，人们称自己居住的这个美丽的蓝色星球为“地球村”，且21世纪人类社会已进入了信息时代和太空时代，人类开始探测月球和火星。但是，对于地球行为的机理的综合认识，对地球本身自然与社会现象的预测、预报能力，我们还有许多百慕大式的盲区！

毕思文教授是一位孜孜不倦地探索与构建地球系统科学理论的地球科学家，长期从事地质科学、遥感应用与数字地球的研究，多年辛勤笔耕，著作丰硕。在《数字地球——地球系统数字学》、《地球系统科学》等专著的基础上又撰写这部《地球系统科学导论》。有幸先睹为快，启迪良多。书中除阐述地球系统科学的理论体系、研究方法之外，着重介绍了“数字地球”与地球系统科学的互动作用，以及青藏高原研究对地球系统科学的示范意义。此类研究将是中国地球科学家们

得天独厚、大有作为的突破口，也是中国地球科学家们可以为地球系统科学作出世界性贡献的新领域之一。如果能够引起青年学人的注意，也许正是作者撰写这部教材的初衷。

中国科学院院士

Handwritten signature in black ink, appearing to read '陈兴利' (Chen Xingli).

2003年9月6日

# 前 言

地球系统科学理论的构建主要取决于地球科学、信息科学与可持续发展三大背景和挑战。首先，地球已有 46 亿年的演化历史。从开始科学探索起，人类就在寻求有关地球的知识。人类对地球的开发利用、探索研究活动由来已久。在很久以前，人们已认识到地球是一个圆球，并以此来预报日食、月食。公元前 3 世纪，Eartosthenes 通过比较相距 800km 的两个地方中午的太阳角度，估算出了地球的圆周。16 世纪，哥白尼日心说使得对地球及其在宇宙中的位置，有了相当准确的描述。人们的好奇心和经济活动驱使人类遍布世界各地，很多国家的航海家在全球航行，并对地球进行测量。17 世纪，牛顿建立了加速度与特定力的关系方程式，从而阐明了包括地球转动、月潮和日潮在内的行星动力学。18 世纪，富兰克林研究了大气电并确定了电流的路径，赫顿建立了地质时间概念并推断了地球内部热机的存在。19 世纪初，莱伊尔建立了一个动力学研究方法，达尔文将莱伊尔的方法与生物变化的原始观测相结合，建立了生物进化论。20 世纪初，魏格纳提出了大陆漂移学说。由于上述背景，以及物理学、化学和数学方面新思想的飞速发展，使 20 世纪成为对地球进行定量研究的发展阶段。

其次，地质学、地理学、气象学、海洋学和生态学等都有悠久的学科历史。然而迄今对地球的研究，多是针对地球的某一组成部分分门别类地进行的，形成了各种带有各自门类特色的传统研究方法及知识体系的专门学科。仅在 10 余年前，科学家才普遍认识到必须把地球作为一个由相互作用着的各个子系统——主要是地核、地幔、岩石圈、大气圈、水圈、生物圈（包括人类社会）组成的地球系统来研究，只有如此才能真正深化对地球的研究，才能回答一些人类所面临的一系列地球行为的重大问题。这样一种眼界和观念的转变，标志着从传统地球科学观念向地球系统科学的转变。这种转变的实现有两重背景，一是地球科学各分支的深入发展；二是 40 年来空间技术和信息科学的突飞猛进开阔了人类的眼界，大大提高了人类认识地球的能力。由上我们既可看到地球系统科学从传统地球科学脱胎的印迹，又可以体察到 20 世纪末和 21 世纪的今天正处于地球科学发生飞跃和突破的前夕，而地球系统科学将正是这个突破口。从研究对象、研究方法和要解决的问题诸方面看，地球系统科学与传统地球科学相比，具有许多全新的特色，是 21 世纪最受人们重视的新兴学科之一。

现代人以地球系统科学的新地球观从整体上来认识地球，以圈层相互作用为

主线来认识地球上的一切运动变化,了解其动力学机理,对未来进行预测,所以,怎样对待可持续发展是全世界共同关心的重大问题,也是人类生存与自然的基本矛盾,更是地球科学面临的挑战。当前,人类正面临着一系列前所未有的重大而紧迫的全球环境问题,人口爆炸、土地荒漠化、资源短缺、环境污染加剧、“温室效应”与全球变暖、臭氧屏蔽的破坏、森林锐减和物种加速灭绝、淡水资源短缺等成为人们的热门话题。从科学角度看,这些紧迫的环境问题实质上是由地球各圈层组成的统一系统,即地球系统各圈层相互作用引发的。可以预见,21世纪将是人类明智地管理和维护地球的新纪元。

作者自1991年以来,从事地球系统科学理论的探索研究,试图构建地球系统科学理论体系。至目前为止,已发表学术论文百余篇,已出版及已付梓专著10部。

在撰写全书的过程中,始终得到陈述彭院士、刘东生院士、童庆禧院士、李小文院士、孙枢院士、马宗晋院士、陈运泰院士、陈颀院士、钟大赟院士、肖序常院士、郭华东研究员、王超研究员、黄润秋教授、许强教授、郑兰芬研究员、王长耀研究员、田国良研究员、牛铮研究员、张兵研究员、王长林副研究员和柳钦火研究员的关心和支持;同时也得到朱重光研究员、李秀云高级工程师、赵忠明研究员、杨崇俊研究员、马建文研究员、聂跃平研究员、蔺启忠研究员、董树文研究员和张荣华研究员的大力支持,作者向上述对本书的出版给予关心、支持和帮助的所有同志一并表示衷心的感谢!书中部分插图引自相关文献,在此对其作者表示感谢!

由于地球系统科学是一个全新的、大跨度多学科相互交叉渗透的学科领域,加之编著时间仓促,书中可能有许多不足之处,欢迎专家和读者们批评指正。

作者

2003年4月

# 目 录

序

前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 人类面临全球性的重大问题 .....	2
1.2 地球系统的全球化 .....	9
1.3 地球系统科学与可持续发展.....	23
1.4 地球系统科学与传统地球科学.....	24
1.5 国内外研究现状.....	26
思考题 .....	32
<b>第 2 章 地球系统科学特征与趋向</b> .....	33
2.1 科技十大领域发展趋势.....	33
2.2 科技发展面临的十大挑战.....	40
2.3 地球系统科学七大特征.....	41
2.4 地球系统科学五大趋向.....	44
思考题 .....	46
<b>第 3 章 地球系统科学的概念</b> .....	47
3.1 地球系统科学研究思路.....	47
3.2 地球系统科学基本概念.....	49
3.3 地球系统科学基本框架.....	61
3.4 地球系统科学时间尺度.....	63
3.5 地球系统科学研究步骤.....	75
思考题 .....	77
<b>第 4 章 地球系统科学的方法论</b> .....	78
4.1 全球及区域信息获取.....	78
4.2 海量信息处理和分析.....	78
4.3 地球系统模型.....	79
思考题 .....	85
<b>第 5 章 地球系统的连续动态系统</b> .....	86
5.1 线性动态地球系统.....	86

5.2	非线性动态地球系统	88
5.3	轨道、暂态、定态	91
5.4	地球系统的稳定性	94
5.5	吸引子与目的性	101
5.6	周期运动与回归性	105
5.7	地球系统的分岔	108
5.8	地球系统的突变	115
5.9	连续混沌	118
5.10	过渡过程特性	121
	思考题	122
<b>第6章</b>	<b>地球系统的离散动态系统</b>	<b>123</b>
6.1	离散映射与离散动力学	123
6.2	离散混沌	125
6.3	几种自动器网络模型	129
6.4	遗传算法	137
	思考题	141
<b>第7章</b>	<b>地球系统的随机性</b>	<b>142</b>
7.1	随机过程与随机涨落	142
7.2	随机网络模型	147
	思考题	154
<b>第8章</b>	<b>地球系统的自组织</b>	<b>155</b>
8.1	自组织与他组织	155
8.2	两种有序原理	159
8.3	自组织理论	165
8.4	自组织的几种形式	170
	思考题	173
<b>第9章</b>	<b>地球系统的简单巨系统</b>	<b>174</b>
9.1	简单系统与简单巨系统	174
9.2	熵——简单巨系统的基本概念	178
9.3	数学模型	183
	思考题	187
<b>第10章</b>	<b>地球系统的复杂巨系统</b>	<b>188</b>
10.1	关于复杂性	188
10.2	把复杂性当作复杂性处理	189
10.3	开放的复杂巨系统	191



10.4 从定性到定量综合集成方法·····	196
10.5 综合集成研讨厅体系·····	198
思考题·····	199
<b>第 11 章 地球系统科学子系统与学科分支</b> ·····	<b>200</b>
11.1 行星系统·····	200
11.2 地核和地幔系统·····	216
11.3 岩石圈系统·····	223
11.4 水圈系统·····	237
11.5 大气圈系统·····	238
11.6 生物圈系统·····	249
11.7 地球系统科学学科分支·····	265
思考题·····	267
<b>第 12 章 地球系统各圈层相互作用</b> ·····	<b>268</b>
12.1 多体系统动力效应·····	268
12.2 非完整系统动力效应·····	272
12.3 变质量系统动力效应·····	273
12.4 碰撞动力系统效应·····	276
12.5 破坏动力系统效应·····	282
12.6 流体动力系统效应·····	285
12.7 极端动力系统效应·····	290
12.8 爆炸(发)动力系统效应·····	292
思考题·····	296
<b>第 13 章 地球系统的数字表达——数字地球</b> ·····	<b>297</b>
13.1 数字地球提出的背景·····	297
13.2 数字地球研究方法·····	298
13.3 数字地球原型——地球系统·····	301
13.4 地球系统场理论基础·····	302
13.5 数字地球物理模型·····	303
13.6 数字地球力学模型·····	305
13.7 数字地球数学模型·····	306
13.8 数字地球信息模型·····	306
13.9 数字地球信息获取技术与模拟·····	307
13.10 数字地球空间信息基础设施·····	307
13.11 数字地球技术方法·····	308

13.12 数字中国与数字工程 .....	311
思考题 .....	312
<b>参考文献</b> .....	<b>313</b>

# 第1章 绪 论

地球自诞生以来，就以自身的规律造就并主宰着地球上的生灵。与此同时，地球上的人类在漫长的历史岁月中，为了自身的生存和发展，不断地影响并改造着地球环境，逐渐成为地球环境中不可缺少的组成部分。今天，人类对地球环境的影响已从罗马时期的局部影响步入了全球影响的时代。正因为如此，使得人类正面临着一系列前所未有的、重大而紧迫的全球性环境问题。环境污染、温室效应、气候异常、植被破坏、土地荒漠化等已成为人们的热门话题。从科学的角度看，这些紧迫的环境问题，涉及地球各部分、各圈层的相互作用，涉及地球作为一颗行星的可居住性问题。认识并预言地球环境的变化，是世界科学家们面临的严峻挑战。

长期以来，人们一直在寻求对于地球及其组成部分、地球构造和演化规律的科学认识。形成地球的某些过程是由那些剧烈的地球物理作用力而引起的；而另一些过程则反映出全球生物（包括人类社会）的较大影响。在很多情况下，对这些过程的研究会对人类产生大有裨益的实际效用。当今，一个新的挑战激励着人们去探索有关地球的知识。对于地球演化的戏剧性事件，人类已不再是消极的旁观者了。人类的经济和技术活动正在对地球上重要的全球变化做出贡献，并已成为地球系统的一个组成部分和影响地球变化的因素之一。正是这些因素促使着环境发生变化。对此，我们却知之甚少，而这些变化对我们及我们的子孙后代却有着潜在的严重后果。因此，人类面临的全球变化的挑战，已成为研究地球特别重要的促动因素。

人类在全球变化中的明显作用要求地球科学家尽快地提出全球研究的综合计划。这个计划应超越传统的学科界限，以便探索那些使地球产生演变的大气、海洋、冰以及生物系统之间的相互作用。这种探索还必须包括那些具有完全不同时间尺度过程之间的相互作用。这些相互作用共同决定了地球的历史，并将决定地球的未来。不管我们能否最终认识那些自然规律，我们都必须努力了解它们。一方面是为了更好地认识我们的地球，另一方面也是为了更全面地了解人类活动的后果。为此，我们提出了一个新的目标：通过描述地球系统各部分、各圈层及其相互作用的演化、运行，以及在所有时间尺度范围内将会怎样持续演化等，获得对整个地球系统的科学认识。同时，我们面临一个新的直接挑战：发展预报未来十年到百年内将发生的、由自然和人类活动引起的全球变化的能力。我们最大的

关心莫过于这个星球的未来以及依赖于它的生命。对太阳系的其他星球的探索已经证实了我们这个世界在它们中间所占有的非常特殊的地位：目前已知惟一有生物圈的星球；惟一有充裕的氧气和液态水的星球；惟一有板块构造过程不断更新地表结构，使生命所必需的营养物质反复循环的星球。为保护地球，以便未来人类还得以居住，我们必须对全球过程有一个更深刻的科学认识。现在是研究地球系统科学的人们提出地球系统科学研究计划并予实施来响应这一挑战的时候了。

人类只有一个地球。它不仅为人类提供了一个生存空间，而且还为人类生存提供了一切不可再生和可再生的物质源泉。因而，地球既承受着人类社会物资需要的索取，也承受着人类在社会发展进程中所进行的一切改造。特别是科学技术高速发展的今天，怎样使人类社会可持续发展，是人们共同关心的重大问题，也是人类生存与自然的基本矛盾，更是地球科学面临的严峻挑战。

## 1.1 人类面临全球性的重大问题

地球是人类赖以生存和发展的物质源泉和环境，因而人类总是把自己的命运与地球的演变和太阳对地球环境的影响紧密地联系在一起。一般认为，地球演变的主要因素源于自然变化，如日、地间距离变化，大气和海洋湍流，大陆板块漂移，造山运动，火山爆发，冰川伸缩，以及河流变动等过程。但是，在近几个世纪的时间里，人类社会的经济和技术活动却对全球变化产生了明显的影响。无论如何，人类自身已成为地球系统的一部分，并且直接对全球变化施加影响。人类的能源生产、集约农业和强化技术已经改变了地球的反射率，改变了土壤和水体的组成、大气化学成分、森林面积，以至全球生态系统平衡。因此，当前人类的生存和社会发展已面临着一系列严重的问题。

人类的生存离不开空气、水、食品和土地。从地球系统科学的观点看，人类赖以生存的地球环境是由大气圈、水圈（含冰冻圈）、土壤-岩石圈和生物圈组成的地球系统——一个相互作用的整体。自地球诞生以来，在其演化的漫长岁月中，地球环境经历了翻天覆地的变化。近代科学研究表明，46亿年前，从太阳系中分离出来的星云——地球，在其形成的初期主要是被以氢气为主的气层所包围。而后，随着它的迅速消散，气层逐渐为以氮气和二氧化碳为主的气体所取代，非常类似于今天所观测到的金星和火星大气。直到大约38亿年前，地球环境才逐渐变得适合于生命的生存。

根据化石记录推断，最低等的生命形式——单细胞藻类水生植物的存在已有35亿年了。而藻类以及以后出现的各种植物，通过其光合作用逐渐改变了大气的成分，使得大气中二氧化碳的含量减少到目前的状态，约占大气总含量的0.03%左右，而氧气增加到20%左右。生物在其进化中逐渐适应了地球环境，

并在自然竞争中导致了人类的产生。

众所周知,虽然人类的起源只是近百万年的事,然而它的出现却对地球环境产生了深远的影响。人类在生物进化的自然竞争中,已开始影响到局地环境。随着工业革命的到来,人类学会了更多的技能,他们的活动已逐渐对整个地球环境构成影响,成为全球环境变化的又一扰动因素。人口爆炸、土地荒漠化、“温室效应”与全球变暖、臭氧屏蔽的破坏、森林锐减和物种灭绝、淡水资源短缺等已成为人们的热门话题。

### 1.1.1 人口爆炸

联合国人口基金《2001年世界人口状况》报告指出,世界人口增长仍趋两极分化。人口增长对环境的压力是人类面临的最大挑战。

#### 1. 世界人口增长统计

公元前400年的世界总人口1.53亿,公元200年世界人口2.57亿;公元700年世界人口降至2.06亿,1000年2.53亿(800年内人口没增反降),1200年突破4亿,1800年第10亿个人诞生,1900年16.5亿,1930年第20亿个人诞生,1950年25.2亿,1960年第30亿个人诞生,1970年37亿,1975年第40亿个人诞生,1980年44亿,1987年第50亿个人诞生,1990年52.7亿,1999年第60亿个人诞生。

#### 2. 中国人口增长统计

中国人口在1949年已超过5亿,1960年达到6.5亿,1970年达8.3亿,1980年人口总数近10亿,1989年达11亿,1995年达12亿,2000年近13亿。

人类利用科学技术打破了自身高出生率和高死亡率的平衡。产业革命以来的300年中,世界人口从5亿剧增至50亿。1999年达到60亿,预计2050年将达到近90亿。随着城市化的扩大,居住在城市的人口骤增,1987年世界城市人口占总人口的42%;预计2050年城市人口将占总人口的60%。现今地球上每分钟增加170人,每年增加9000万人。占全球80%人口的发展中国家的人口继续以较高的速度增长,由于贫困、营养不良和粮食不足,有近10亿人挨饿,加之环境污染的加重,每年由于水污染而致死近千万人。今后增加的人口主要集中在发展中国家,特别是最不发达国家。49个最不发达国家在今后50年中,人口将增长2倍。在世界人口发展中,两极分化仍然十分严重。占全球20%的富国人口的私人消费量占全球私人消费量的86%;而占全球最贫困的20%人口消费只占全球的1.3%。

人口的激增加剧了资源的消耗与生存环境的恶化。为了获取必要的食物和水,为了改善生活,人类必然在更大的广度和深度上干扰地球系统自然稳定的势态,造成一连串问题。

### 1.1.2 土地荒漠化

为获取食物,耕地面积在近300年间从4亿 $\text{hm}^2$ 扩展至15亿 $\text{hm}^2$ ,耕地和牧场占陆地面积的30%以上。而另一方面,森林面积急剧减小,5000年前约为76亿 $\text{hm}^2$ ,1860年为55亿 $\text{hm}^2$ ,1975年减至26亿 $\text{hm}^2$ ,1986年减为23亿 $\text{hm}^2$ 。目前,森林正以1100万 $\text{hm}^2/\text{a}$ 的速度从地球上消失。其直接结果是土地荒漠化。

从1991年底联合国环境规划署为联合国环发大会所准备报告的评估结果来看,全球荒漠化面积为3592万 $\text{km}^2$ ,约占世界表土面积的1/4,影响着约9亿人民的生活。20世纪80年代初期,在全世界32.57亿 $\text{hm}^2$ 的生产旱地中,约有19.86亿 $\text{hm}^2$ 遭到荒漠化和严重荒漠化,约占生产旱地的61%。土地荒漠化极大地改变了陆地表面的物理特征,破坏了地表辐射收支平衡,诱发气候和环境变化。而气候和环境变化的反馈作用又将进一步影响土地荒漠化的进程,如此循环往复,从而对地球环境产生深远影响。可见土地荒漠化已成为又一重大的全球性环境问题。

### 1.1.3 资源趋于枯竭

全球耕地面积锐减,土地退化和水土流失严重,每年地表土壤流失约200亿t;盐碱化土地日益增多;森林面积减少,特别是热带森林减少速度明显加快,1950年以来,全球森林覆盖面积减少了一半,至1978年森林仅覆盖陆地面积的1/5。根据联合国粮农组织2001年报告,全球森林从1990年的39.6亿 $\text{hm}^2$ 下降到2000年的38亿 $\text{hm}^2$ 。全球每年消失的森林逾千万公顷;干旱地区60%的草地荒漠化,过度放牧使草地日益退化;淡水资源危机已成为最为严重而紧迫的全球性问题,过去的50年来全球淡水用量增加近四倍,目前占全球陆地面积60%的43个国家和地区缺水;每年石油消耗量33亿t,并以每年3%的速度增长;多种金属矿产资源趋于匮乏甚至枯竭;世界各主要渔场的捕捞量均已达到或超过极限,太平洋、大西洋、黑海、地中海的所有渔场,鱼产量都在下降,海洋资源出现明显的危机。

### 1.1.4 “温室效应”与全球变暖

化石燃料的燃烧、森林的破坏及其他工业活动，使得大气化学成分发生了明显的变化。连续 30 年的测量表明，大气中二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ ) 的含量以每年 0.4% 的速率递增，按现有的绝大多数气候模型估计，在不太远的将来可能使全球平均温度上升  $2^\circ\text{C}$ ，这样的温度变化可以和最近一次冰期以来 18 000a 间的温度变化相比拟。而对湖泊中花粉和海底深游生物骨骼沉积物的考察表明，全球范围这样的温度变化，必将导致全球陆地植被类型和海洋生物物种分布的显著改变，而这又必然反过来影响全球气候。应该指出，除了  $\text{CO}_2$  以外，导致温室效应的痕量气体还有甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氯氟烃 (CFCs)、一氧化二氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 等。它们在大气中的含量虽微，但增温效应强（如 CFCs 浓度仅为  $\text{CO}_2$  的百万分之一，增温作用却为  $\text{CO}_2$  的  $1/4$ ； $\text{CH}_4$  浓度仅为  $\text{CO}_2$  的 0.5%，增温作用却为  $\text{CO}_2$  的  $1/3$ ），增长率高（如  $\text{CH}_4$  年增长率为 1.0%，而  $\text{CO}_2$  年增长率为 0.4%），作用时间长（如  $\text{N}_2\text{O}$  增温作用虽然只有  $\text{CO}_2$  的  $1/12$ ，但它在大气中的寿命为  $\text{CO}_2$  的 7~10 倍），因而引起的效应相当可观（大致与  $\text{CO}_2$  相当）。这些气体含量的增加，亦起因于人类的工业和农业生产活动。

大气中温室气体的增加，必然导致温室效应增强，从而有可能引起全球变暖。观测表明，1880 年以来北半球地面平均温度升高了约  $0.3\sim 0.6^\circ\text{C}$ 。虽然目前还不能识别这一全球变暖现象中温室气体的贡献有多大，但大多数科学家认为大气中增强了的“温室效应”对全球平均温度的增加是有促进作用的。

随着经济和社会的发展，人类活动排放的  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体逐年增加，温室气体能无阻挡地让太阳的短波辐射射向地球，并部分吸收地球向外发射的长波辐射，使整个地球成为庞大的“温室”，使“温室”的气温上升。

根据 1958~1988 年 30 年大气中  $\text{CO}_2$  浓度的测定， $\text{CO}_2$  浓度逐年增长，由 1958 年的  $314 \times 10^{-6}$  增加到 1988 年的  $349 \times 10^{-6}$ 。根据树轮所测定的近 2000a 来大气中  $\text{CO}_2$  的浓度变化，在工业革命后大气中  $\text{CO}_2$  浓度增长极为迅速。根据冰岩心的记录，200 多年来  $\text{CO}_2$  的浓度由工业革命前的  $280 \times 10^{-6} \pm 10 \times 10^{-6}$  增加了  $70 \times 10^{-6}$ ，年增长率为 0.4%；大气中  $\text{CH}_4$  的浓度在工业革命前为  $0.7 \times 10^{-6}$ ，2000 年增加到  $2.1 \times 10^{-6}$ ；大气中 CFCs 的浓度，在工业革命后增长也极为迅速（表 1.1）。

表 1.1 全球温室气体的增长与气候变暖\*

气体	工业化前浓度 /10 <sup>-6</sup>	2000 年浓度 /10 <sup>-6</sup>	对全球气候变 暖的贡献/℃	2030 年浓度 /10 <sup>-6</sup>	对全球气候变 暖的贡献/℃
CO <sub>2</sub>	280	380	0.96	470	1.19
CH <sub>4</sub>	0.7	2.1	0.30	2.94	0.42
N <sub>2</sub> O	0.21	0.31	0.12	0.33	0.17
F-11	0	0.41	0.06	1.03	0.15
F-12	0	0.55	0.08	1.93	0.14
F-13	0	0.08	0.01	0.32	0.05
总计			1.53		2.08

\* 据欧阳自远, 1997。

近一个多世纪以来的全球陆地和海洋大约 100 多万万个观察记录证明, 全球平均气温确实增高了。尤其是 20 世纪 80 年代以来, 变暖的速度很快, 全球平均气温增加了 0.5℃。根据表 1.1 的测算, 2000 年全球平均气温上升 1.53℃, 2030 年将上升 2.08℃。由于全球变暖, 1880~1980 年观察到的平均海平面上升了 14cm。以 1980 年海平面为基准, 2050 年海平面将上升 30~50cm。气候变暖, 海平面上升, 将对全球的生态系统和人类社会的发展带来严重的影响: 干旱区更为干旱, 多雨区更多洪涝; 海平面逐年上升, 海水盐度变小, 岛国难以生存, 地势低洼的沿海区域将被淹没; 海水污染淡水, 地下水污染加剧; 全球干旱频率增大, 中纬度地区更为干旱、酷热, 森林失火, 湖泊干涸, 水资源更为紧张; 土壤盐渍化和沙漠化加剧。

1990 年 5 月政府间气候变化委员会 (IPCC) 第一工作组提供的最新报告预测, 到 2030 年, 若温室效应等于 CO<sub>2</sub> 的加倍, 则全球平均温度将上升 1~2℃; 由于气候的区域性差异, 陆地比海洋增温快, 南欧和北美比全球平均增温幅度大; 夏季降水和土壤湿度减小, 亚洲季风将加强; 海平面将升高 20cm 左右。这将给全球生态系统和人类的社会经济活动带来巨大影响。因此, “温室效应” 问题成了全人类共同关心的重大全球性环境问题。

### 1.1.5 臭氧屏蔽的破坏

臭氧 (O<sub>3</sub>) 是氧的衍生物。自然大气中有微量的臭氧存在, 其浓度是随高度变化的。平流层 (距地面 20~25km 的大气层) 臭氧浓度最大。分布于同温层中的臭氧吸收了太阳光中 99% 的对地球生物圈有极大伤害作用的高能紫外线。测量表明, 1978~1987 年, 全球臭氧浓度平均降低了 3.4%~3.6%; 1985 年便



在南极上空观测到了臭氧空洞。有证据表明,造成臭氧屏蔽破坏的主要原因是人类活动排放到大气中的氟氯烃的光化学反应。而臭氧屏蔽的破坏,必将对地球生命系统和人类生存环境造成灾难性的影响。

英国南极调查局哈利湾观测站的资料表明,从20世纪70年代中期以来,每年10月(南极极夜刚结束的月份)臭氧总量减小40%,卫星图片则进一步揭示了南极上空所谓“臭氧洞”的存在。

上述观测事实的发现,大大促进了始于20世纪70年代初期的平流层化学的研究。目前的实验室模拟结果表明,平流层臭氧对氯氟烃和氮氧化物非常敏感,通过光化学反应将使臭氧减少,且当氯气浓度(含氯氟烃物质在平流层中,紫外线的照射下发生光化分解,产生活跃的氯气)超过平流层奇数氮( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ 等)的浓度时,臭氧破坏的速度加快。

大气层中臭氧的浓度随高度变化,平流层中距地面20~25km间的大气层臭氧浓度最大。工业革命前氯氟烃的浓度为0,现今约为 $1 \times 10^{-9}$ 。人类活动排放的含氟氯烃的物质和氮氧化物在平流层中通过光化学反应将使臭氧减少。自20世纪70年代以来,北半球的臭氧减少了3%~5.5%,出现臭氧空洞。南极臭氧空洞正以每年相当于一个美国陆地面积的速度增长,不仅在南极上空,最近在北极和西藏高原上空也发现了臭氧层减薄,甚至出现臭氧空洞。预计到2014年,臭氧将减少53%以上。臭氧层出现空洞,将使地面紫外线辐射增强,皮肤癌发病率上升,还将带来幼鱼死亡率和家畜瘟疫增加,谷物减产,气候变化等一系列的影响。

从科学的角度看,这些紧迫的环境问题涉及地球各部分、各圈层的相互作用,涉及到地球作为一颗行星的可居住性问题。认识并预言地球环境的变化,是世界科学家们面临的严重挑战。目前,大气化学家和气象学家们对“臭氧洞”的形成提出了多种推测和假设,但都不能圆满解释“臭氧洞”的形成机理。不少科学家正在致力于从大气化学与大气动力学的结合上寻求新的理论解释。

### 1.1.6 生态环境的破坏

人口爆炸和人类活动以直接或间接的形式,从多方面破坏了地球的生态系统,许多种生物已濒临灭绝。物种分布改变以及具体物种的灭绝对人类的影响究竟如何,虽然还不十分清楚,但作为一种标志,它表明地球作为人类生命活动的场所,其可居住性正面临着越来越严重的考验。

#### 1. 环境污染加剧

全球每年排放进入大气层的气体,  $\text{CO}_2$  为 57 亿 t,  $\text{CH}_4$  约 2 亿 t。排放有害