



# 地球系统科学 与可持续发展

毕思文 著



地质出版社

# 地球系统科学与可持续发展

毕思文 著

地质出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

怎样使人类社会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严重挑战。本书作者正是站在这一高度上,构建出地球系统科学与可持续发展的理论基础和模式。书中强调将地核、地幔、土壤-岩石圈、大气圈和生物圈(包括人类社会)作为地球系统来看待;指出地球系统科学是跨越一系列自然科学与社会科学的总汇,而其核心是统一构造理论;其任务是研究在该系统中发生的动力学过程及演化,全球变化及地球各圈层之间的相互作用,特别是人类活动诱发的全球变化,以揭示地球系统过程的规律,提高人类认识和预测地球系统变化的能力。将地球系统科学与可持续发展融为一体是本书的一大特色。著者在上述理论论述的基础上,对环境、资源、减灾、经济、社会等与可持续发展的关系,可持续发展的指标体系及实施方法等进行了多方位探索。

本书的出版发行,无疑将引起我国地球科学工作者、政府管理和决策人员、广大科技人员与教育工作者对地球系统科学与可持续发展研究的兴趣和重视,为保护人类生存的地球环境和可持续发展做出应有的贡献。

## 图书在版编目(CIP)数据

地球系统科学与可持续发展/毕思文著. —北京:地质出版社, 1998.4

ISBN 7-116-02564-2

I. 地… II. 毕… III. 全球环境-研究 IV. X24

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 08864 号

## 地质出版社出版发行

(100083 北京海淀区学院路 29 号)

责任编辑:谭惠静 陈军中

责任校对:关风云

\*

北京印刷学院实习工厂印刷 新华书店总店科技发行所经销

开本:787×1092 1/16 印张:16.875 字数:407000

1998 年 4 月北京第一版·1998 年 4 月北京第一次印刷

印数:1—800 册 定价:42.80 元

ISBN 7-116-02564-2

P·1891

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社发行处负责调换)

# 序

近年来，全球环境与社会可持续发展问题对地球科学提出了新的挑战，而诸多高新技术在地学上的应用又促进了地球科学研究的发展，为地球科学带来了新的机遇。本书作者正是站在这一高度上立足创新、探索与研究，构建出地球系统科学与社会可持续发展理论基础与模式，明确地提出了地球系统科学是可持续发展的科学基础；指出地球系统科学跨越一系列自然科学与社会科学，是大地球科学，是固体和流体的地球科学所有作用与演化的总汇，而其核心是统一构造理论；其任务是研究在地球系统中发生的动力学过程、演化和全球变化以及它们与地球各圈层之间的相互作用的关系，特别是人类活动对全球变化的影响，以揭示地球系统过程的规律，提高人类认识和预测地球系统变化的能力。将地球系统科学与社会可持续发展融为一体进行系统研究是本书的一大特色。作者在上述理论论述的基础上，对环境、资源、减灾、社会等与可持续发展的关系，可持续发展的指标体系及实施方法等进行了多方位探索。

地球系统科学是一门涉猎面广泛，大跨度多学科相互渗透交叉的新兴学科。可以预料，今后 20 年是地球系统科学发展的黄金时代。本书是作者近年来潜心钻研、努力不懈的成果。相信本书的出版将在地球科学及其相关学科，如生命科学、环境科学等方面和人类社会可持续发展方面起到很好的推动作用，作出它应有的贡献。

中国科学院院士 陈芸生

1998 年 3 月 北京

# 前言

怎样使人类社会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严重挑战。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，即地球系统各组元相互作用产生的。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。仅在10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组元或子系统——主要是地核、地幔、土壤-岩石圈、大气圈、水圈、生物圈（包括人类社会）组成的统一系统，即地球系统来研究，才能回答人类所面临的一系列地球系统行为的重大问题。这样一种观念性的转变，标志着从传统的子观念向地球系统科学的观念转变。这种转变的实现有双重背景：一是地球科学各分支深入发展的必然；二是近30年来空间技术和新发现与新思想的突飞猛进开拓了人类的眼界，大大提高了人类认识地球的能力。如板块体系、板块运动还停留在假设的水平上，很难得到证实，发现了许多与板块构造理论不协调的现象。从上述情况我们既可看到地球科学从传统地学脱胎的印迹，又可以体察到20世纪的最后几年正处于地球科学发生飞跃和突破的前夕，而地球系统科学正是这个突破口。从研究对象、方法和要解决的问题诸方面看，地球系统科学与传统的地学相比具有许多全新的特色和更高的层次，是本世纪末和下世纪最受人们重视的新兴科学之一。研究它的意义体现在地球系统科学与传统地学、固体与流体地球科学的关系及其在中国的产生、地球系统科学的社会性、大陆地质学的基本问题、板块构造理论、全球未来的研究和走向21世纪的中国地球科学等方面。

加强地球科学、天文科学、生命科学以及数、理、化基础科学之间的交叉渗透，进一步探讨地球系统，朝着建立行星-地球统一理论的共同目标发展，并以此探讨社会可持续发展问题，这正是作者撰写本书的目的。

本书共二十二章。第一章重点介绍全球性的挑战和地球系统科学与可持续发展提出的背景，以及国内外研究现状；第二章探讨地球系统科学的主体核心内容统一构造理论基础；第三章侧重论述地球系统科学的方法学与方法论；第四章论述地球系统科学的时间尺度；第五章阐述日-地系统；第六章重点阐述地核和地幔系统；第七章剖析岩石圈系统；第八章介绍地球流体系统；第九章、第十章和第十一章重点介绍地球系统科学的信息系统、观测系统和技术支撑系统；第十二章重点论述地球系统模拟的非线性和复杂性及模型；第十三章以中国为例，分析了中国地球系统科学的基本特征；第十四章概述可持续发展理论基础；第十五章探讨可持续发展理论模式；第十六章重点介绍可持续发展的指标体系；第十七章、第十八章、第十九章、第二十章和第二十一章重点论述环境与可持续发展、资源与可持续发展、减灾与可持续发展、经济与可持续发展和社会与可持续发展；第

二十二章以中国为例，重点阐述中国可持续发展战略。

书中的有关研究工作得到何国琦教授、马宗晋院士的指导和帮助，尚分别得到陈庆宣院士、赵越研究员、肖序常院士、陈颢院士、於崇文院士、郭令智院士、李德仁院士、孙鸿烈院士、黄秉维院士、章申院士、叶笃正院士、陈泮勤研究员、朱广田研究员、贾复研究员、聂松媛高级工程师、刘振兴院士、林海研究员、钟大赉研究员、李继亮研究员、潘裕生研究员、郭召杰副教授、殷景欣副研究员、朱征桃副研究员和中国科学院学部联合办公室等专家的关心与指点。有关图件由尚玲工程师清绘。对于上述老师、专家、同行与朋友们的关心和帮助，作者在此致以深深的谢意！

希望能通过本书引起我国地球科学工作者，政府、管理、决策部门人员，广大科技和教育工作者对地球系统科学与可持续发展研究的兴趣和重视，为保护人类的地球环境和未来作出应有的贡献。不妥与错误之处，欢迎专家们批评、指正。

著 者

1998年2月

# 目 录

|                                                                    |      |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| 第一章 全球性的挑战——地球系统科学与可持续发展提出的背景                                      | (1)  |
| 1.1 人类面临全球性的重大问题                                                   | (2)  |
| 1.2 地球系统科学与传统地学                                                    | (6)  |
| 1.3 固体地球科学的目标和发展方向                                                 | (7)  |
| 1.4 地球系统科学与可持续发展的提出及其在中国的产生                                        | (8)  |
| 1.5 地球系统科学的社会性                                                     | (9)  |
| 1.6 国内外研究现状                                                        | (11) |
| 第二章 地球系统科学统一构造理论基础                                                 | (17) |
| 2.1 大地构造学发展史                                                       | (17) |
| 2.2 地球科学理论的新挑战                                                     | (30) |
| 2.3 当前对行星地球的总体认识                                                   | (36) |
| 2.4 全球构造研究的新思维                                                     | (38) |
| 2.5 统一引力场表示理论                                                      | (38) |
| 2.6 全球构造运动与地球自转统一相关性                                               | (44) |
| 2.7 板块的统一动力源                                                       | (50) |
| 2.8 大陆岩石圈的统一热模式                                                    | (53) |
| 第三章 地球系统科学的方法学与方法论                                                 | (57) |
| 3.1 地球系统科学中的非线性和复杂性                                                | (57) |
| 3.2 地球系统科学是传统地学发展的必然                                               | (58) |
| 3.3 地球系统科学的研究思路                                                    | (60) |
| 3.4 地球系统科学的基本框架                                                    | (62) |
| 3.5 地球系统过程                                                         | (64) |
| 3.6 地球系统科学的研究步骤                                                    | (66) |
| 第四章 地球系统科学的时间尺度                                                    | (69) |
| 4.1 几千年至几百万年 ( $n \times 10^3 \sim n \times 10^6 \text{a}$ ) 的时间尺度 | (69) |
| 4.2 几十年至几百年 ( $n \times 10 \sim n \times 10^2 \text{a}$ ) 的时间尺度    | (71) |
| 4.3 几千年至几百万年 ( $n \times 10^3 \sim n \times 10^6 \text{a}$ ) 的全球变化 | (73) |
| 4.4 几十年至几百年 ( $n \times 10 \sim n \times 10^2 \text{a}$ ) 的全球变化    | (75) |
| 第五章 日-地系统                                                          | (76) |
| 5.1 日-地系统的整体行为                                                     | (76) |
| 5.2 火星科学探索                                                         | (78) |
| 第六章 地核和地幔系统                                                        | (80) |
| 6.1 地核                                                             | (80) |
| 6.2 地幔                                                             | (81) |
| 第七章 岩石圈系统                                                          | (83) |
| 7.1 板块构造                                                           | (83) |

|             |                       |              |
|-------------|-----------------------|--------------|
| 7.2         | 板块构造的证据               | (84)         |
| 7.3         | 太阳驱动过程                | (86)         |
| 7.4         | 国际计划                  | (87)         |
| <b>第八章</b>  | <b>地球流体系统</b>         | <b>(88)</b>  |
| 8.1         | 物理气候系统                | (89)         |
| 8.2         | 水的全球变化                | (93)         |
| 8.3         | 生物地球化学循环              | (94)         |
| 8.4         | 系统的相互作用               | (99)         |
| 8.5         | 地球内部流体系统              | (102)        |
| <b>第九章</b>  | <b>地球系统科学的信息系统</b>    | <b>(107)</b> |
| 9.1         | 地球固体系统长(早)期演化与全球场信息系统 | (109)        |
| 9.2         | 地球流体信息系统              | (112)        |
| 9.3         | 古气候信息系统               | (116)        |
| <b>第十章</b>  | <b>地球系统科学的观测系统</b>    | <b>(118)</b> |
| 10.1        | 地球系统科学的观测计划           | (118)        |
| 10.2        | 仪器的研制技术               | (122)        |
| 10.3        | 观测平台                  | (122)        |
| 10.4        | 测量系统的整体性              | (124)        |
| <b>第十一章</b> | <b>技术支撑系统</b>         | <b>(125)</b> |
| 11.1        | 观测能力                  | (125)        |
| 11.2        | 发射能力和宇宙飞船             | (129)        |
| 11.3        | 计算能力                  | (130)        |
| <b>第十二章</b> | <b>模拟</b>             | <b>(133)</b> |
| 12.1        | 地球系统模拟的非线性            | (133)        |
| 12.2        | 地球系统模式的提出             | (139)        |
| 12.3        | 模式的检验                 | (140)        |
| 12.4        | 现有的模式                 | (140)        |
| 12.5        | 模式的组装                 | (141)        |
| 12.6        | 预报的可行性                | (141)        |
| <b>第十三章</b> | <b>我国地球系统科学的基本特征</b>  | <b>(143)</b> |
| 13.1        | 我国生存环境的基本特征           | (143)        |
| 13.2        | 我国的幔柱构造特征与动力学模型       | (150)        |
| 13.3        | 青藏高原及邻区大地构造特征与地质过程    | (157)        |
| 13.4        | 若干重大地球科学问题            | (167)        |
| 13.5        | 重点发展的研究领域             | (168)        |
| 13.6        | 重点发展的支撑技术与重大科学工程      | (169)        |
| 13.7        | 优先开展的区域性综合研究          | (170)        |
| <b>第十四章</b> | <b>可持续发展理论基础概述</b>    | <b>(172)</b> |
| 14.1        | 可持续发展理论建设             | (172)        |

|             |                             |              |
|-------------|-----------------------------|--------------|
| 14.2        | 目标与途径·····                  | (176)        |
| 14.3        | 基础与特点·····                  | (176)        |
| 14.4        | 必要条件与核心·····                | (176)        |
| 14.5        | 研究内容·····                   | (176)        |
| 14.6        | 区域持续发展评价·····               | (177)        |
| 14.7        | 支撑可持续发展的七大体系·····           | (177)        |
| <b>第十五章</b> | <b>可持续发展理论模式研究·····</b>     | <b>(178)</b> |
| 15.1        | 可持续发展理论与宏观调控模式·····         | (178)        |
| 15.2        | 可持续发展是发展中国家的必然选择·····       | (182)        |
| 15.3        | 增长极限与持续发展·····              | (184)        |
| 15.4        | 可持续发展的资源观·····              | (186)        |
| 15.5        | 可持续发展的目标·····               | (188)        |
| <b>第十六章</b> | <b>可持续发展的指标体系·····</b>      | <b>(191)</b> |
| 16.1        | 衡量方法与指标·····                | (191)        |
| 16.2        | 生态系统整合性指标体系研究·····          | (192)        |
| 16.3        | 区域持续发展研究·····               | (194)        |
| 16.4        | 区域可持续发展决策支持系统研究·····        | (196)        |
| <b>第十七章</b> | <b>环境与可持续发展·····</b>        | <b>(198)</b> |
| 17.1        | 环境经济学与可持续发展·····            | (198)        |
| 17.2        | 可持续发展的环境影响评价·····           | (200)        |
| 17.3        | 可持续发展与环境规划·····             | (202)        |
| 17.4        | 大气环境与可持续发展·····             | (204)        |
| 17.5        | 水资源与可持续发展·····              | (206)        |
| 17.6        | 水土保持在可持续发展中的地位·····         | (209)        |
| 17.7        | 生态环境功能评价研究·····             | (211)        |
| <b>第十八章</b> | <b>资源与可持续发展·····</b>        | <b>(214)</b> |
| 18.1        | 我国面临的资源、环境问题及其对策·····       | (214)        |
| 18.2        | 我国矿产资源勘查与可持续发展·····         | (216)        |
| 18.3        | 土地可持续利用研究·····              | (217)        |
| 18.4        | 我国森林资源的可持续发展·····           | (219)        |
| 18.5        | 全球气候变化影响下我国农业产量的可持续性发展····· | (221)        |
| 18.6        | 生物多样性与生物资源可持续利用对策·····      | (223)        |
| <b>第十九章</b> | <b>减灾与可持续发展·····</b>        | <b>(226)</b> |
| 19.1        | 灾害是持续发展的重要制约因素·····         | (226)        |
| 19.2        | 短期行为是导致灾害的重要原因·····         | (226)        |
| 19.3        | 减灾防灾是建设可持续发展社会的任务和保证·····   | (228)        |
| 19.4        | 我国重大灾害的特点和对策·····           | (229)        |
| 19.5        | 我国自然灾害风险、管理对策·····          | (230)        |
| <b>第二十章</b> | <b>经济与可持续发展·····</b>        | <b>(232)</b> |

|                                     |              |
|-------------------------------------|--------------|
| 20.1 生态环境成本论.....                   | (232)        |
| 20.2 论农业可持续.....                    | (235)        |
| <b>第二十一章 社会可持续发展.....</b>           | <b>(238)</b> |
| 21.1 我国 21 世纪人口问题和社会持续稳定发展 .....    | (238)        |
| 21.2 我国的粮食问题与可持续发展.....             | (238)        |
| 21.3 提高我国人口文化素质的关键.....             | (241)        |
| 21.4 环境与持续发展中的人口和健康问题.....          | (243)        |
| 21.5 科教兴国与可持续发展.....                | (245)        |
| 21.6 区域可持续发展的研究.....                | (247)        |
| <b>第二十二章 我国可持续发展战略.....</b>         | <b>(249)</b> |
| 22.1 我国可持续发展战略框架.....               | (250)        |
| 22.2 优先开展的区域性综合研究.....              | (250)        |
| 22.3 我国已开展或拟开展关于实施可持续发展战略的咨询项目..... | (250)        |
| <b>结束语.....</b>                     | <b>(252)</b> |
| <b>参考文献.....</b>                    | <b>(253)</b> |

# 第一章 全球性的挑战

## ——地球系统科学与可持续发展提出的背景

自地球诞生以来，它就以其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。

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几百万年以前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。对地球进行研究历来有两个推动因素：将地球作为行星来认识和寻求实际效益。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。通过人类的经济和技术活动，人们正在对地球上重要的全球变化做出贡献，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，已成为研究地球的特别重要的促动因素。

人类在全球变化中的明显作用要求我们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、固体地球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的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：唯一有生物圈的星球；唯一有充裕的氧气和液态水的星球；唯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重挑战。

## 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,在几个世代的时间里,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,人类自身已变成了地球系统的一部分,并且直接成为全球变化的影响力。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。这样,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,40多亿年前,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3800Ma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3500Ma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”与全球增暖、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

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300a中,世界人口从5亿剧增至50亿。1996年6月底达到57.7亿,预计1999年将达到60亿,2050年将超过82亿。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。人口的激增加剧了资源的消耗与生态环境的恶化。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 300a 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，5000a 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。其直接结果是土地沙漠化。目前，沙漠面积已占陆地总面积的 10%，还有 43% 的土地正面临沙漠化的威胁。

据联合国环境规划署初步估计 (IIED1987)：荒漠化威胁着 4800 万  $\text{km}^2$  的土地，约占世界表土面积的 1/3，影响着至少 8.5 亿人民的生活。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；沙漠化逐步扩大，威胁着全球 1/3 面积约 4800 万  $\text{km}^2$  的土地和 8.5 亿人口的生存；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，1978 年森林覆盖陆地面积的 1/5，估计到 2000 年将减少到 1/6；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 4 倍。目前占全球陆地面积 60% 的 43 个国家和地区缺水和约 20 亿 t 石油，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，海洋资源呈现明显的危机。

### 1.1.4 “温室效应”与全球增暖

化石燃料的燃烧，森林的破坏及其它工业活动，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  $\text{CO}_2$  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 18000a 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、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（如氯氟烃浓度仅为  $\text{CO}_2$  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。

此外,其它温室气体如  $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  等,浓度也在明显增加(表 1-1)。而且人类活动还向大气排入了一些新的温室气体,如氯氟烃等,尽管它们在大气中的含量很低,但由于其年生长率高,温室效应强(GWP 值大)而倍受人们重视。

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增暖。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增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 30a 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%,推算 2000 年将达到  $380\times 10^{-6}$ ;大气中  $\text{CH}_4$  的浓度在工业革命前为  $0.7\times 10^{-6}$ ,现今增加到  $1.8\times 10^{-6}$ ,预计 2000 年将增加到  $3.1\times 10^{-6}$ ;大气中氯氟烃的浓度,在工业革命后增长极为迅速(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<br>$10^{-6}$ | 2000 年浓度<br>$10^{-6}$ | 对全球气候增<br>暖的贡献/ $^\circ\text{C}$ | 2030 年浓度<br>$10^{-6}$ | 对全球气候增<br>暖的贡献/ $^\circ\text{C}$ |
|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| $\text{CO}_2$        | 280                 | 380                   | 0.96                             | 470                   | 1.19                             |
| $\text{CH}_4$        | 0.7                 | 2.1                   | 0.30                             | 2.94                  | 0.42                             |
| $\text{N}_2\text{O}$ | 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 多万个观察记录证明,全球平均气温确实增高了。尤其是本世纪 80 年代以来,变暖的速度很快,全球平均气温增加了  $0.5^\circ\text{C}$ 。根据表 1 的测算,2000 年全球平均气温将上升  $1.53^\circ\text{C}$ ,2030 年将上升  $2.08^\circ\text{C}$ 。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,将对全球的生态环境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;海平面将以 6cm/10a 的速度上升,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 $\text{CO}_2$ 的加倍,则全球平均温度将上升 $1\sim 2^\circ\text{C}$ ;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( $\text{O}_3$ )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态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离解,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。自本世纪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、各层圈的相互作用,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问题。

##### (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。排放有害金属铝 200t、砷 7.8 万 t、汞 1.1 万 t、镉 5500t, 超出自然背景值的 20~300 倍。 $\text{SO}_2$  的排放, 诱发的酸雨的频度在增加, 面积在扩大; 空气质量严重下降, 全球有 6.25 亿人生活在空气污染的城市中; 江河湖海的污染日趋严重, 淡水匮乏使 12 亿人口生活在缺水城市, 14 亿人口在没有废水处理设施下生活; 水质污染引发的疾病死亡率已成为人体健康最主要的危害; 城市垃圾、污水、船舶废物、石油和工业污染、放射性废物等大量涌入海洋, 每年有 200 亿 t 污染物从河流进入海洋, 约 500 万 t 垃圾被抛进海洋, 在入海口处数万平方公里的臭氧层正在扩大。

### (2) 森林锐减和物种灭绝

生物多样性的世界正发生着严重的危机。研究表明 (IIED, 1987), 在人类活动干扰以前, 全世界约有森林和林地 60 亿  $\text{hm}^2$ 。到 1954 年世界森林和林地面积减少到 40 亿  $\text{hm}^2$ , 其中温带森林减少了 32%~33%, 热带森林减少了 15%~20%。近 30 年来, 世界森林, 特别是热带森林的减少速度明显加快, 平均每年减少 800 万  $\text{hm}^2$ 。中美洲由 1950 年的 1.15 亿  $\text{hm}^2$  减到 1983 年的 0.71 $\text{hm}^2$ 。非洲森林减少更快, 从 1950 年的 9.01 亿  $\text{hm}^2$  减至 1983 年的 6.9 亿  $\text{hm}^2$ 。

世界森林的不断减少直接导致生物品种多样化的消失和物种灭绝。据估计, 地球上曾经有 5 亿个物种, 目前尚有 500~1000 万个物种, 其中占压倒多数的是无脊椎动物和植物 (IIED, 1987)。一些专家推测, 当前每年消失的物种已达数千种之多。

森林锐减和生物物种的大量减少对人类社会和经济发展将产生巨大影响。特别是森林植被的大量减少, 大大改变了碳、氮等微量元素的源、汇分布, 使得微量元素在地球系统中的循环遭到破坏, 并迫使其从原有的平衡态向新的平衡态过渡, 从而给人类社会和自然生态系统带来巨大影响。

### (3) 淡水资源短缺

据 IIED 提供的数据 1987 年, 全球约 140 亿  $\text{m}^3$  的水量中, 大约有 4.2 亿  $\text{m}^3$  淡水, 约占全球水量的 3%, 其中约 77.2% 被冷储在冰盖和冰川中, 22.4% 是地下水和土壤水, 约 0.4% 为湖泊、沼泽和河水。

由于水循环的结果, 全球水量分布极不均匀。从作物需水量的角度出发, 非洲中东和中亚大部分地区, 美国西部, 墨西哥西北部, 智利和阿根廷的部分地区以及澳大利亚全部都是贫水区, 其年蒸发量超过年降雨量。另一方面, 20 世纪以来, 世界用水量大幅度增加, 年用水量从 1990 年的约 4000 亿  $\text{m}^3$  增加到 1995 年的 3 万亿  $\text{m}^3$ , 增长了 6.5 倍。预计到 2000 年, 全球淡水用量可达 6 万亿  $\text{m}^3$ 。目前, 世界上已有 43 个国家和地区缺水, 占全球陆地面积的 60%, 约 20 亿人用水紧张, 10 亿人得不到良好的饮用水。

## 1.2 地球系统科学与传统地学

地球系统科学是传统地学发展的必然。人类对地球的开发、利用、探索研究活动由来已久。地理学、地质学、气象学、海洋学、生态学都有悠久的历史。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, 形成了各种专门学科, 以及带有各自门类特色的传统研究方法和知识体系。仅仅是在十数年前, 科学家才普遍认识到必须

而且也可能如实地把地球作为一个由相互作用着的各个组元或子系统——主要是地核、地幔、土壤-岩石圈、大气圈、水圈、生物圈（包括人类社会）——组成的统一系统，即地球系统来研究。只有如此才能真正深化对地球的研究，也只有如此才能回答人类所面临的一系列地球系统行为的紧迫环境问题。这样一种眼界和观念性的转变，标志着从传统地学观念向地球系统科学的转变。这种转变的实现有双重背景。一是地球科学各分支深入发展的必然，例如近数十年大气科学的发展，就日益介入海气相互作用、陆气相互作用、大气痕量气体的化学过程及气候效应等；从海洋学角度，海气相互作用、冰川及冰盖变迁，海水与陆地及大气的淡水交换等的重要性及相应的研究工作日益得到重视等。另一方面，近30a来空间技术的突飞猛进开拓了人类的眼界，大大提高了人类认识地球的能力，这是向地球系统科学概念转变的另一重要背景。

表3-1列出了20世纪地球科学发展的重大事件。从这张表我们既可看到地球科学从传统地学脱胎的印迹，又可以体察到20世纪最后几年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。当然，地球系统科学并不能代替传统地学各学科自身的发展；相反，要求它们能更深入精确地研究和提供地球系统各组元自身的规律性知识。然而，从研究对象、研究方法、要解决的问题诸方面看，地球系统科学与传统地学相比具有许多全新的特色和更高的层次，是本世纪末和下一世纪最受人们重视的新兴科学之一。

### 1.3 固体地球科学的目标和发展方向

固体地球科学的发展已经到了一个非常关键的转折关口，既面临着极富挑战的复杂局面，又展现出前所未有的发展和突破的机会。面对资源开发、废物处理、环境保护、灾害减轻和土地利用等严峻的社会挑战，固体地球科学与社会发展的关系日益密切，并逐渐向环境科学方面迈进。一方面，人类要明智地利用地球，保护人类生存环境，这已成为固体地球科学家责无旁贷的责任。另一方面，从整体出发研究动态演化着的行星地球系统，建立行星地球统一理论并发展地球系统科学已成为固体地球科学发展的新目标。

大陆地质学自板块构造理论成为主导学术思想，用以讨论和阐述地壳地质构造演化以来，大陆地质学的研究在认识思想上有了重大变化，它不仅在空间上而且在时间上都有着根本性的差异。因此，若只强调表达为水平或垂直运动、活动论或固定论的说法，都不能充分说明这一差异。转换断层和三联点的概念，使岩石圈板块构造的运动模式从统计均一的刚体球面转动得以建立。而从中央海岭的扩张速率和实测陆块定向漂移速率都是地质史的证实和现实主义原则的体现。为地质学家所最熟悉的大陆地质学，在板块构造理论创立前后是以不同的理论和方法为基础的。板块构造理论创立前的地槽学说（Hall, 1859; Dana, 1873; Шатский, 1952; Kay, 1958）是以陆核增生、垂向运动、幕式运动概念和世界造山过程同时性为最突出的核心思想，这就是“经典大陆地质学”；而板块构造理论基础上的大陆地质学，则是世界陆区主要形成于早前寒武纪（Goodwin, 1986; Burke et al., 1989）。这些古陆块在普遍重力均衡作用下，在空间上表现为离散拼合的漂移，并成为地质史中环境变迁的主因（Suess, 1902; Wegener, 1915; Hess, 1962），缝合带古洋壳碎片用以确定消失的古大洋，但板块在时间上因球面转动速率变化不大而未表现出世界的同时