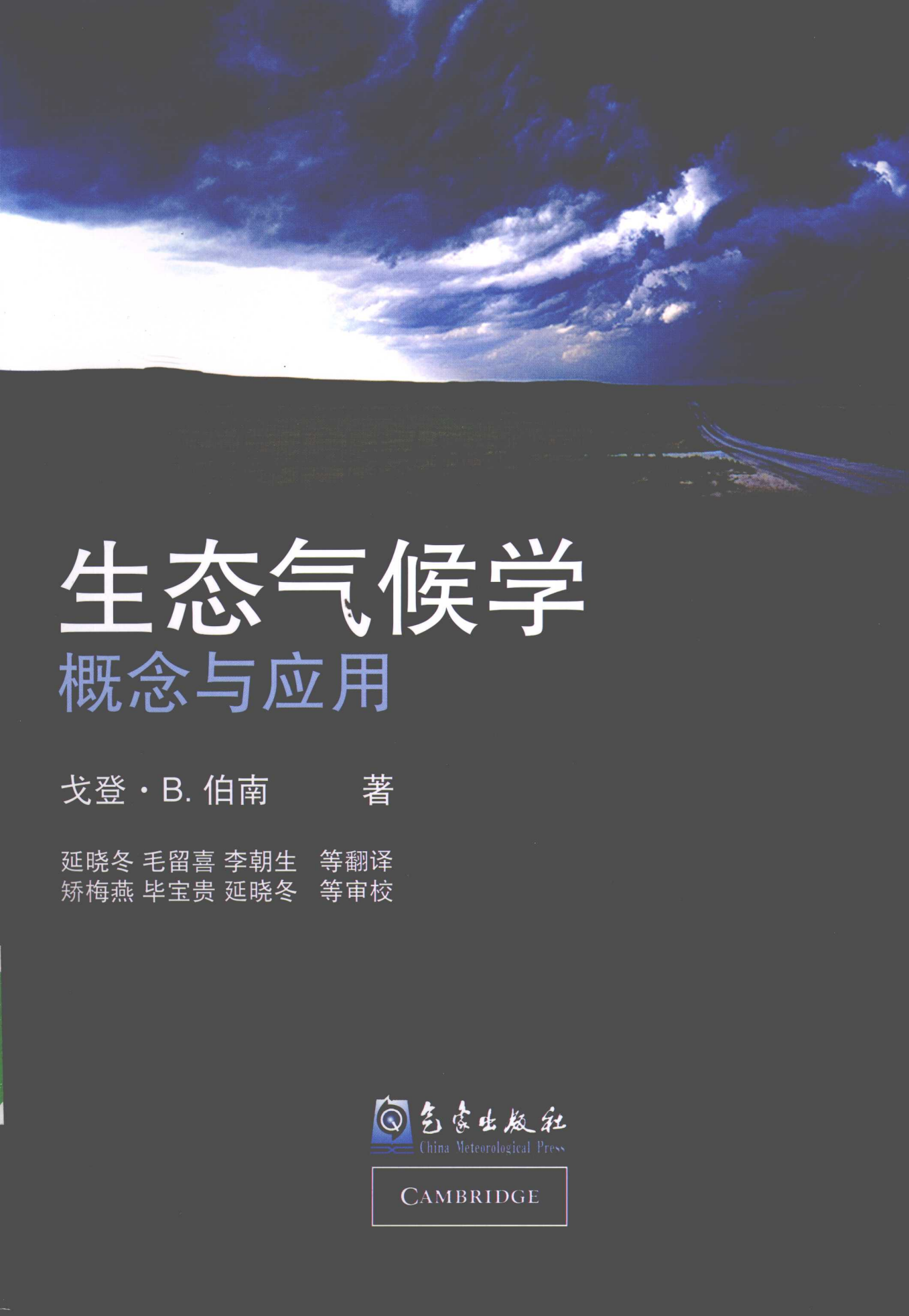




# 生态气候学

## 概念与应用

戈登·B. 伯南 著

延晓冬 毛留喜 李朝生 等翻译  
矫梅燕 毕宝贵 延晓冬 等审校

 气象出版社  
China Meteorological Press

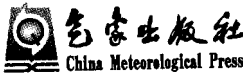
CAMBRIDGE

Ecological Climatology:  
Concepts and Applications

生态气候学  
概念与应用

戈登·B. 伯南 著

延晓冬 毛留喜 李朝生 钱 拴 翻译  
吴门新 徐玲玲 侯英雨 曹 云



*Ecological Climatology: Concepts and Applications*, 1st edition (ISBN 978 0 521 01955 2)

by Gordon B. Bonan first published by Cambridge University Press 2002

All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© China Meteorological Press & Cambridge University Press 2009

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of China Meteorological Press and Cambridge University Press.

This edition is for sale in the People's Republic of China (excluding Hong Kong SAR, Macau SAR and Taiwan Province) only. 此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括香港、澳门特别行政区及台湾省)销售。

### 图书在版编目(CIP)数据

生态气候学:概念与应用/(美)伯南(Bonan G. B.)著;延晓冬等译.

北京:气象出版社,2009.6

ISBN 978-7-5029-4774-3

I. 生… II. ①伯…②延… III. 气候变化-影响-生态环境-研究 IV. P46-05

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 098199 号

北京市版权局著作权合同登记:图字 01—2009—4681 号

Shengtai Qihouxue Gainian yu Yingyong

生态气候学 概念与应用

---

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>

策划编辑:李太宇

责任编辑:林雨晨

封面设计:翟劲松

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1092 mm 1/16

字 数:750 千字

版 次:2009 年 9 月第 1 版

印 数:1—1500 册

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: [qxcbs@263.net](mailto:qxcbs@263.net)

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:29 插 页:28

印 次:2009 年 9 月第 1 次印刷

定 价:78.00 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

# 序 一

当前,在全球气候变暖的背景下,极端天气气候事件增多和增强,显著影响着人们的生产生活。气候是决定植被类型及其分布特征的重要因素。日益显著的气候变化,已导致许多冰川退缩、干旱加重、草地退化、生物多样性减少等,使得许多地区的生态环境恶化。因此,气候变化与生态环境问题越来越广泛地受到国际社会的关注,成为影响人类可持续发展的重要问题。

应对全球气候变暖对生态环境的影响,加强天气、气候与生态环境之间相互作用的规律研究,最大限度地保护地球生态系统的多样性及其对人类福祉安康,不断提高人们减缓与适应气候变化的能力,已成为全社会共同面临的挑战。我们应当注意到,天气、气候条件影响着物种间竞争、植物物候、植被生产力、群落结构、生态系统功能等,而生态系统结构和功能及类型的变化又会影响着气候变化。生态气候学正是将生态学和气候学这两个独特的学科紧密地联系在一起,催生出生态气候学这一新兴学科。研究生物与其周边环境气候型态的相互作用,涵盖了气候条件生物个体的生理过程、种群的分布格局和生态系统的结构、功能的变化特征,以及通过能量、水分和化学循环等过程生物活动对气候变化的反馈作用,涉及气候学、生态学、气象学、水文学、土壤学、植物学、生物学等多个学科。

由戈登·B. 伯南(Gordon B. Bonan)教授编著,英国剑桥大学出版社出版的《Ecological Climatology: Concepts and Applications》(2002年),内容丰富,涉及多学科领域,从个体、种群、群落到生态系统、景观的不同层次,从微观到宏观角度,深刻阐述了天气、气候与生物间的相互影响、相互作用,揭示了不同尺度下生物对气候变化的响应及其适应对策,探讨了生态系统组成、结构和功能变化对气候、水资源和生物地球化学循环的影响。可以说,这是一部生态与气候领域的杰作。

由延晓冬、毛留喜等专家翻译,矫梅燕、毕宝贵等专家审校的此书中文版,为读者系统、全面地了解 and 掌握生态气候学方面的知识和研究动态,科学应对气候变化和做好生态环境的气象监测与评估业务等提供了很有价值的教材。我谨向读者推荐此书,并借此机会,向译者和审校专家表示衷心的感谢!

郑国光

2009年5月于北京

## 序 二

近 30 年来,以气候变暖为主要特征的全球环境变化问题日益严重,不仅成为一个热点科学问题,同时也成为国际政治和外交的重要议题。这种科学与政治的共同关注构成了一幅前所未有的科学奇观,也迫使认识全球变化规律、评估其影响、提出适应和缓解对策成为人类面临的重要而迫切的任务。因此,全球变化科学应运而生。

全球变化科学以学科交叉与综合作为宗旨和特征。这并不令人意外,因为以气候变暖为代表的全球变化问题,都是以人类活动的影响叠加在自然变化之上为基本特征,通过社会经济过程、生物过程、物理过程、化学过程以及它们之间的相互作用,引起人类生存环境的变化。所以,单一学科的传统问题解决模式在全球变化问题上不能奏效了,必须借助于社会科学和自然科学的科学支撑,通过多边外交的政治解决的模式才能成功。例如,由全球氟利昂排放引起的平流层臭氧层破坏问题,首先由地球科学家发现,并同化学家合作认知其形成机理,进而生物学家发现其重大危害,随后由化学家和地球科学家等找到替代方案,从而为解决这一问题的联合国“蒙特利尔议定书”奠定了基础。学科交叉和综合不仅仅是为解决全球变化问题的权宜之策,而是学科发展的必然。事实上学科交叉和综合往往带来一个或多个学科认识上的提高乃至飞跃。生态气候学的发展就是一个很好的例子。传统上,气象学把地表生态系统作为只有物理性质的没有变化的下边界条件,忽视气象条件变化会引起地表生态系统的变化及其引起大气下边界条件的变化;生态学则把气象只是作为影响生态系统分布和生理的纯物理的上边界条件,忽视关心生态系统变化对天气气候过程的反馈作用。而生态气候学的发展,正是打破了气象学和生态学各自的学科界限,把过去忽视的过程放在重要的位置上来研究,从而加深了人们对人类活动与气候变化之间的关系的理解,形成了许多新的认识。现在人们知道,气候的变化引起地表生态系统的变化,会对气候本身产生强大的反馈作用;人类活动除了通过排放 CO<sub>2</sub> 和气溶胶影响气候外,还可以通过土地利用变化,改变地表生态系统及其与大气之间的能量和物质交换,进而影响天气气候。

《Ecological Climatology: Concepts and Applications》是美国国家大气科学研究中心高级研究科学家戈登·B. 伯南(Gordon B. Bonan)博士撰写的一部生态气候学专著,在国际学术界具有很大的影响。这本书的最大特点是,论述了如何在交叉科学框架下理解气候变化与陆地生态系统的相互作用的机制,特别是针对人类活动对陆地生态系统的改变的几个主要方式,如森林砍伐、土地垦殖、城市化和温室气体排放如何影响全球和区域气候及其反馈进行了精彩的阐述,说明生态学与气候学的学科交叉不但必要,而且也具备了可能性,并已经产生了许多新的科学认识和成果。

有意思的是,Bonan 博士本身也是一个成功的交叉科学的受益者。他最早是研究生态学的,后来对陆面过程产生了浓厚的兴趣,从而进入了气候和生态的交叉学科领域,现在则成为国际上知名的气候学家。

延晓冬等在研究工作中接触到这本书,觉得有必要介绍给中国的广大读者,把它翻译成中文出版,以期有更多的读者产生兴趣,是一件很有意义的事情。本书的出版对于进一步推动生态学与气候学的交叉、综合和集成研究具有积极意义。我殷切期望,通过对本书的学习,有更多的科学工作者迈进全球变化科学领域,为我国开展气候变化研究,促进这一前沿科学领域的发展,为应对气候和全球变化做出更大的贡献。

符淙斌

2009年6月6日

# 目 录

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| 序一 .....                | 郑国光    |
| 序二 .....                | 符淙斌    |
| <b>第 1 章 引言</b> .....   | ( 1 )  |
| 1.1 生态气候学——概念 .....     | ( 1 )  |
| 1.2 生态气候学——应用 .....     | ( 8 )  |
| 1.3 全书概述 .....          | ( 15 ) |
| <b>第 2 章 全球气候</b> ..... | ( 17 ) |
| 2.1 引言 .....            | ( 17 ) |
| 2.2 地球年平均能量收支 .....     | ( 17 ) |
| 2.3 大气环流 .....          | ( 19 ) |
| 2.4 大陆和海洋 .....         | ( 25 ) |
| 2.5 季节 .....            | ( 28 ) |
| 2.6 气候带 .....           | ( 34 ) |
| 2.7 气候和植被 .....         | ( 38 ) |
| <b>第 3 章 气候变率</b> ..... | ( 39 ) |
| 3.1 引言 .....            | ( 39 ) |
| 3.2 洪涝,干旱和热浪 .....      | ( 39 ) |
| 3.3 气团 .....            | ( 42 ) |
| 3.4 季节、年际变率的机制 .....    | ( 44 ) |
| 3.5 极端气候事件 .....        | ( 51 ) |
| 3.6 陆面过程 .....          | ( 55 ) |
| <b>第 4 章 气候变化</b> ..... | ( 56 ) |
| 4.1 引言 .....            | ( 56 ) |
| 4.2 过去 25 万年的气候历史 ..... | ( 56 ) |
| 4.3 气候变化的机制 .....       | ( 59 ) |
| 4.4 人为气候变化 .....        | ( 74 ) |
| 4.5 气候反馈 .....          | ( 78 ) |
| <b>第 5 章 水循环</b> .....  | ( 80 ) |
| 5.1 引言 .....            | ( 80 ) |

|               |                         |              |
|---------------|-------------------------|--------------|
| 5.2           | 全球水平衡 .....             | ( 80 )       |
| 5.3           | 水分相变 .....              | ( 81 )       |
| 5.4           | 陆地水循环 .....             | ( 82 )       |
| 5.5           | 小流域 .....               | ( 95 )       |
| 5.6           | 全球流域 .....              | (102)        |
| <b>第 6 章</b>  | <b>土壤 .....</b>         | <b>(104)</b> |
| 6.1           | 引言 .....                | (104)        |
| 6.2           | 土壤质地与结构 .....           | (104)        |
| 6.3           | 土壤形成 .....              | (107)        |
| 6.4           | 侵蚀 .....                | (112)        |
| 6.5           | 土壤温度 .....              | (115)        |
| 6.6           | 土壤水 .....               | (118)        |
| 6.7           | 土壤营养物质 .....            | (124)        |
| <b>第 7 章</b>  | <b>地表能量通量 .....</b>     | <b>(131)</b> |
| 7.1           | 引言 .....                | (131)        |
| 7.2           | 地表能量收支 .....            | (131)        |
| 7.3           | 叶片温度和通量 .....           | (136)        |
| 7.4           | 地表温度和通量 .....           | (142)        |
| 7.5           | 植被冠层 .....              | (147)        |
| 7.6           | 地表气候 .....              | (151)        |
| <b>第 8 章</b>  | <b>地表气候学 .....</b>      | <b>(157)</b> |
| 8.1           | 引言 .....                | (157)        |
| 8.2           | 丘陵和山地 .....             | (158)        |
| 8.3           | 湖泊和海洋 .....             | (168)        |
| 8.4           | 土地覆盖 .....              | (170)        |
| 8.5           | 水文 .....                | (181)        |
| 8.6           | 小气候和土地利用规划 .....        | (184)        |
| <b>第 9 章</b>  | <b>叶片与植物 .....</b>      | <b>(185)</b> |
| 9.1           | 引言 .....                | (185)        |
| 9.2           | 碳同化 .....               | (185)        |
| 9.3           | 叶片特性 .....              | (196)        |
| 9.4           | 植物碳平衡 .....             | (199)        |
| 9.5           | 分配 .....                | (207)        |
| 9.6           | 生活史类型 .....             | (209)        |
| <b>第 10 章</b> | <b>种群、群落与生态系统 .....</b> | <b>(218)</b> |
| 10.1          | 引言 .....                | (218)        |
| 10.2          | 生态位和物种丰度 .....          | (218)        |

|                              |                    |              |
|------------------------------|--------------------|--------------|
| 10.3                         | 环境梯度与群落            | (223)        |
| 10.4                         | 生态系统               | (225)        |
| 10.5                         | 景观                 | (242)        |
| 10.6                         | 全球植被               | (244)        |
| <b>第 11 章</b>                | <b>植被动态</b>        | <b>(258)</b> |
| 11.1                         | 引言                 | (258)        |
| 11.2                         | 种群动态               | (258)        |
| 11.3                         | 演替                 | (262)        |
| 11.4                         | 生物地理学和气候变化         | (281)        |
| 11.5                         | 动态植被模型             | (284)        |
| <b>第 12 章</b>                | <b>气候—生态系统动态过程</b> | <b>(286)</b> |
| 12.1                         | 引言                 | (286)        |
| 12.2                         | 生物地球物理学            | (288)        |
| 12.3                         | 碳循环                | (298)        |
| 12.4                         | 矿尘                 | (305)        |
| 12.5                         | 气候—生态系统耦合模式        | (306)        |
| <b>第 13 章</b>                | <b>农田生态系统</b>      | <b>(315)</b> |
| 13.1                         | 引言                 | (315)        |
| 13.2                         | 旱地                 | (317)        |
| 13.3                         | 热带森林砍伐             | (325)        |
| 13.4                         | 欧洲森林砍伐             | (328)        |
| 13.5                         | 美国森林砍伐             | (330)        |
| 13.6                         | 美国中部大平原            | (339)        |
| <b>第 14 章</b>                | <b>城市生态系统</b>      | <b>(343)</b> |
| 14.1                         | 引言                 | (343)        |
| 14.2                         | 城市气候               | (344)        |
| 14.3                         | 城市水文               | (356)        |
| 14.4                         | 生物地球化学循环           | (359)        |
| 14.5                         | 生物多样性              | (361)        |
| 14.6                         | 生态城市               | (363)        |
| <b>参考文献</b>                  |                    | <b>(367)</b> |
| <b>译后记</b>                   |                    | <b>(440)</b> |
| <b>附录 1: 第一版与第二版的对照</b>      |                    | <b>(441)</b> |
| <b>附录 2: 本书出现的有关专业名词中英对照</b> |                    | <b>(447)</b> |

# 第 1 章 引 言

## 1.1 生态气候学——概念

### 1.1.1 共同的起源,学科的发展

生态学是研究生物体之间和生物体与环境之间相互作用的一门学科。它着重理解自然界中的各种格局(例如:生物的空间和时间分布)以及调控这些格局的过程。气候学是研究大气物理状态的一门学科:气候的瞬时状态或者天气过程,气候的季节和年际变化——气候的长期平均状态,以及气候如何随时间发生变化。这两个独特的研究领域——生态学和气候学——可以认为具有类似白天与黑夜之间的区别。一个是生物科学,另一个是地球物理科学。一个的基本法则是自然选择,另一个基本法则是物理学和流体动力学。但是,两者都有着共同的历史。

这两门学科的起源要归因于亚里士多德(大约公元前 350 年)和西奥弗雷特斯(大约公元前 300 年),以及他们的著作《气象学》(Lee 1962)和《植物探秘》(Host 1968,1980)。生态学和气候学的现代起源可以分别追溯到自然历史学和植被地理学。17,18 和 19 世纪,探索地球的博物学家和地理学家在开拓新的区域时发现了植被的差异;为这些植被的地理分布格局寻找解释的过程也奠定了生态学和气候学发展的基础(McIntish 1985;Colinvaux 1986, p 323—327;Olive 1996a,b;Shugart 1996)。19 世纪初,洪堡(Alexander von Humboldt),认识到植被群落的外貌和主要特征与气候相关。他注意到,如果气候相似的话,即使相隔遥远的区域也存在结构和功能上相似的植被。后来,德堪多(Alphonse de Candolle)在研究主要植被型时注意到基本上存在着纬度分布带,如热带、温带、极地植被。他认为这种带状分布是由温度引起的,并于 1874 年正式提出用温度界定植被分布带,这为划分气候区提供了一个客观基础。1884 年柯本(Wladimir Köppen)根据植被分布图做出气候图。他的五个主要的气候区域与德堪多的植被类型有着共同的温度界限(表 1.1)。主要气候带与主要植被带之间密切相关,许多气候带亚代,如热带草原、热带雨林、冻土地带也都是依植被命名的。虽然在现代气候制图中不再用植被命名,但是温度、降水量与树木年轮宽度(Jacoby 和 D'Arrigo 1989;Cook 等 1991, 1998,2000;D'Arrigo 和 Jacoby 1993,1999;Cook 1995;D'Arrigo 等 1996,1998,1999,2000a, b,2001;Jacoby 等 1996,2000;Villalba 等 1998;Wiles 等 1998;Pederson 等 2001),孢粉的丰度(Prentice 等 1991a,1998;Huntley 和 Prentice 1993;Webb 等 1993,1998;Wright 等 1993;Cheddadi 等 1997;Bartlein 等 1998),叶子的形态(Wolfe 1995;Wilf 1997,2000;Wolfe 等 1998;Wilf 等 1998)之间的关系仍是重建过去气候的一个主要方法。根据 CO<sub>2</sub> 浓度上升时气

孔密度的下降可以用来推断出过去大气中的  $\text{CO}_2$  浓度 (McElwain 等 1999; Wagner 等 1999; Royer 等 2001)。植被地理经常可用来解释和检测气候模式的模拟结果 (Webb 等 1993; Kutzbach 等 1996, 1998; Ruddiman 等 1997; Jolly 等 1998a; Prentice 等 1998; Kleidon 等 2000)。

表 1.1 德堪多植被类型与柯本气候类型之间的关系

| 德堪多植被类型 | Köppen 气候类型 | 主要植被种类                     |
|---------|-------------|----------------------------|
| 高温植物    | 热带湿润气候      | 热带雨林<br>热带草原               |
| 旱生植物    | 干燥气候        | 沙漠<br>草原                   |
| 中温植物    | 亚热带中纬度湿润气候  | 温带落叶林<br>温带针叶林<br>地中海植被    |
| 低温植物    | 陆地湿润气候      | 低温地带落叶林<br>低温地带针叶林<br>北方森林 |
| 寒温植物    | 极地气候        | 苔原                         |

来源: 由 Olinvaux (1986, p326) 和 Oliver (1996a) 的资料改写。

尽管生态学和气候学的起源相同,但是他们还是以典型的学科发展模式发展成具有各自特色的研究领域。生态学可细分为动物生态学和植物生态学。植物生态学又进一步细分为生理生态学,种群生态学,群落生态学,生态系统生态学和景观生态学研究。天气和气候的研究则依据不同的空间尺度分为微气象学,中尺度气象学和全球气候学,及依据大气过程分为边界层气象学,水文气象学,大气辐射学,云物理学和全球动力学。

由于科学家的研究方法和研究兴趣不同,导致他们对同一信息和对象,可能具有不同的认识。Pieter Bruegel, Elder 的名画“雪地里的狩猎者”可以很好地说明这一点 (图 1.1)。卓越的英国气候学家 H. H. Lamb 在他的气候学著作中用这幅画来说明气候变化 (Lamb 1977, p275—276; Lamb 1995, p233—235)。这幅画绘于 1565 年冬天,根据 Lamb 的记录,Bruegel 对那个冬天的体会是前所未有的严寒。Lamb 注意到,对荷兰冬天风景的长期艺术兴趣开始



图 1.1 雪地里的狩猎者 (Pieter Bruegel, Elder)。源自维也纳艺术史博物馆。

于此,这与欧洲漫长的异常严寒时期是一致的。而 Richard Forman 和 Michel Godron 在他们的景观生态学的书中却使用这幅画来说明景观生态学的概念(Forman 和 Godron 1986, p5—6)。他们不把这幅画看成是一个异常寒冬的记录,而是作为对景观生态学核心原则的展示:景观要素的异质性,空间尺度和跨景观的运动。

生态学和气候学专业的学生相互学习过程中就能发现这两个学科关注焦点的明显区别。传统生态学认为是气候控制了植被过程和植被地理(Begon 等 1986; Colinvaux 1986; Barnes 等 1998; Barbour 等 1999; Smith 和 Smith 2001)。以生物学的观点,认为气候是一个外在动力。陆地生态系统的植物区系组成、植物和生物量、植被生产力和有机物分解速率可对气候变化做出响应,但是其本身并不改变气候。另一方面,气候学家从地球物理学的角度认识大气,强调热量和水分传输(Peixoto 和 Oort 1991; Barry 和 Chorley 1992; Hartmann 1994)。在种观点认为,应该根据由温室气体、气溶胶、太阳辐射的变化带来的行星能量和大气环流的强迫(Jones 等 1996, 1999; Mann 等 1998; Hansen 等 1998b, 1999; Tett 等 1999)来认识气候。作为气候变化结果的陆地生态系统的结构和功能变化仅仅被看成是气候变化的影响,而不是在气候系统内部的反馈。

1980—1990 年代的全球环境变化研究的亮点是它改变了生态学和气候学研究的学科界限。尤其是,全球气候模型的发展需要对大气边界层,即大气与陆地景观界面以及陆地与大气间的能量、水分和动量的交换过程进行数学描述。但是,这些过程有一部分由植物通过自身的叶片、气孔和大量并不符合流体动力学的生命形式进行调节。因此,发展气候模型的大气科学家必须使他们的地球物理学框架扩展为生物地球物理框架(Deardorff 1978; Dickinson 等 1986; Sellers 等 1986)。这种发展与大气科学家把行星地球看成是气候系统或地球系统的趋势是平行的。(Trenberth 1992a; Schneider 1997; Kump 等 1999; Jacobson 等 2000)。地球过程不应仅限于单个独立的学科来研究,如物理气候学,大气化学,水文学,生态学,地质学和海洋学。我们现在已经认识到,这些相互作用的物理、化学、生物分量构成了一个完整的系统。包含有陆地和大气能量、水分、动量交换的气候模式已经显著地改变了我们对陆地在气候系统中的作用的认识。现在广泛认为陆地生态系统对气候具有显著的反馈作用,并且自然和人类引起的土地覆盖变化会改变气候、水循环和生物地球化学循环。这种认识已经体现在气候与生命协同进化的概念中,即气候调节生物活动,而反过来,生物活动也通过能量、水和化学循环来调节气候(Budyko 1974, 1986; Schneider 和 Mesirow 1976; Lovelock 1979, 1988; Schneider 和 Londer 1984)。

植被变化能够改变气候的观点并不新鲜。据说哥伦布(Christopher Columbus)曾经认为新大陆(New World)的强降雨是由繁茂的森林引起的(Kittredge 1948, p6; Thompson 1980; Shukla 和 Mintz 1982)。北美洲殖民扩张时期,大量森林被迅速破坏用于建设城镇和农田,这引起了对开垦土地会如何影响气候的关注(Kittredge 1948; Thompson 1980; Feldman 1992)。加勒比海群岛上,鉴于曾经皆伐森林用于种植甘蔗,人们为了促进降雨制定了保护森林的法令(Anthes 1984; Feldman 1992)。在美国,托马斯杰斐逊(Thomas Jefferson)注意到了随着土地开垦引起的气候变化,建议增加气候观测来测定变化(Landsberg 1970c; Thompson 1980)。对景观变化会如何改变气候这一问题的研究兴趣,19 世纪中期以普遍的认识“雨跟着犁耕走”达到极盛,这要归结于由于那时农耕和植树造林增加了大平原(Great Plains)的降水(Thompson 1980; Williams 1989, p379—386)。

1.1.2 学科框架

本书把生态学和气候学的相关领域综合凝练成生态气候学。生态气候学是一个旨在理解陆地景观在气候系统中的功能的交叉学科领域。它把物理气候学、微气象学、水文学、土壤学、植物生理学、生物地球化学、生态系统生态学,生物地理学和植物动力学等学科结合在一起,以便认识景观影响气候的物理、化学和生物过程。这使得生态学和气候学之间的界限不再明显,因此气孔生理学也变得像云和对流一样与理解气候密切相关。本书新出现的一个中心主题是陆地生态系统如何通过能量、水分、化学元素和痕量气体的循环成为气候的一个决定因素。由自然的植被的动态变化和人类对土地的使用和土地管理引起陆地生态系统变化是气候系统内部的一个重要反馈。

图 1.2 是一个传统分支学科的概念性框架。它们可归类为 5 个核心领域;以从分钟到小时尺度上调节与大气的能量、水分、动量及化学物质交换的生物地球物理和生物地球化学过程;调节这些交换的流域和水文过程;陆地生态系统与控制植物种类的丰度和分布以及其在群落和生态系统的地位的生态学过程;植被动态与生态系统结构和功能的时间变化。这些核心领域既有本学科专业的独特性,又通过共同的物理、化学、和生物学过程相联系。

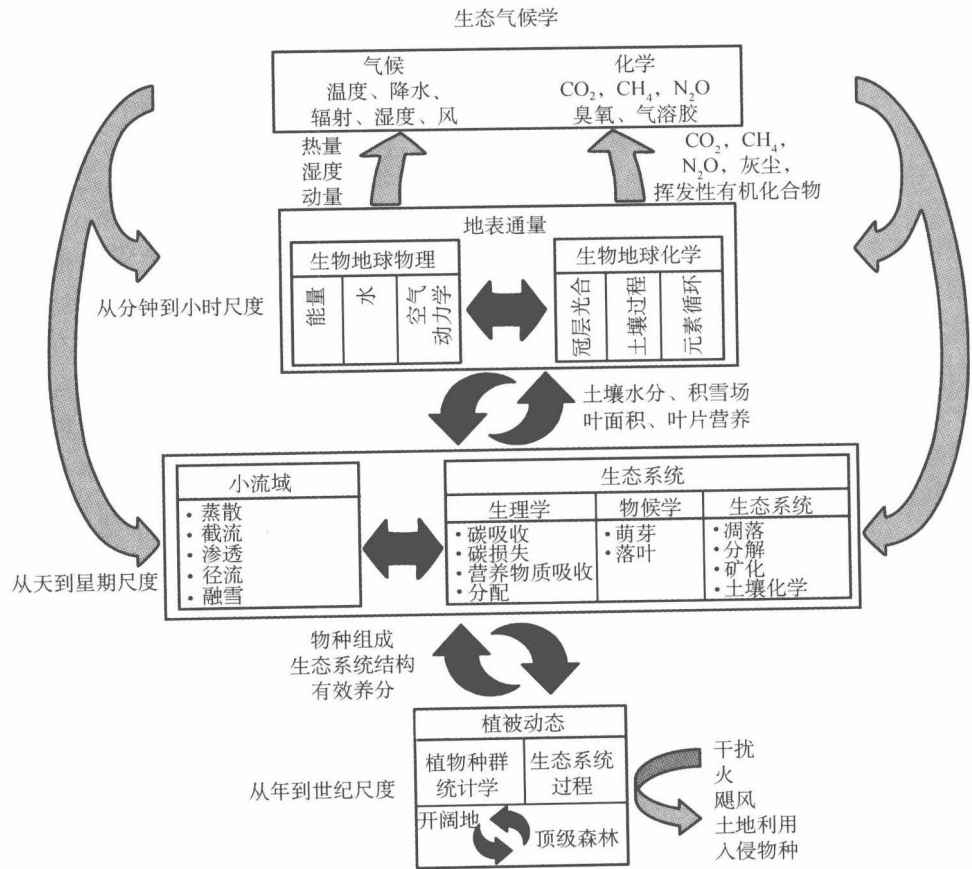


图 1.2 生态气候学的概念性框架

包括陆地生态系统影响天气和气候的生物地球物理学和生物地球化学过程,以及调节这些构成过程关系的流域和水文过程。源自 Sellerst 等(1995, 1997b)。

陆地生态系统与大气进行着热量、水分、动量和多种大气化学物质的交换。到达地球表面的净太阳辐射( $R_n$ )或者通过热量和水分交换作为感热( $H$ )、潜热( $\lambda E$ , 也称为蒸散)返回大气, 或者储存在地表( $G$ ), 因此地表能量平衡为

$$R_n = H + \lambda E + G$$

当地表的植物和其他粗糙的因素对风的流动形成干扰时会发生动量传递。二氧化碳( $\text{CO}_2$ ), 甲烷( $\text{CH}_4$ )和氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )是部分受陆地生态系统调节的重要温室气体。其他的物质包括粉尘、化学物质如挥发性有机化合物, 前者能影响太阳辐射的吸收、反射和输送; 后者则会对地表附近的臭氧造成影响。这些地表通量是在接近瞬时的时间尺度上发生的, 对从分钟到小时的不同时间尺度上的温度、风、湿度和太阳辐射做出响应。生物地球物理是对生物圈和包含大气圈的岩石圈的物理上相互作用的研究(Gates 1980; Monteith 和 Unsworth 1990; Campbell 和 Norman 1998)。它考虑了陆地和大气间的热量、水分和气体交换以及调节这些交换的气象过程。生物地球化学是对陆地植物、土壤、河流、海洋和大气间物质循环(例如, 碳、氮), 以及相关气体的相互交换和与大气的化学成分相互作用的研究(Schlesinger 1997; Jacobson等 2000)。它把生物循环成分和地球化学循环联系起来, 来理解化学物质在生物圈, 岩石圈, 水圈和大气圈的吸收、释放和转移。

热量、动量、水分和气体的交换与小气候、植物生理以及土壤过程互相调节。尤其是气孔, 即叶片表面上的微小毛孔, 进行光合作用时能张开吸收  $\text{CO}_2$ , 但是与此同时水分可以通过蒸腾作用扩散到叶片外面。因此, 蒸腾作用散失的水量( $T$ )通过气孔导度( $g_s$ )与光合作用的碳吸收量( $P$ )联系起来

$$g_s \propto P \propto T$$

气孔的生理受到冠层小气候、土壤含水量、叶片营养状况和植物生命史的调节。因此, 生物地球物理和生物地球化学的研究通过冠层物理学、土壤物理学和植物生理学联系起来。

### 流域

生物圈和大气圈间的水分、能量和化学物质的循环取决于景观的水文和生态状况。水文学中研究的基本系统是水域或者流域。一个流域是根据地形定义的, 因此降落到流域上的雨水被收集并经下坡流进一条溪流或者河流。在较长的时间尺度上(例如年际), 假定作为降水量( $P$ )进入一个流域的水以蒸发量( $E$ )的形式回到大气中或者流入溪流中( $R$ ), 长期的水平衡是

$$P = E + R$$

许多地形、土壤和生态的特征决定着一个流域的水文状况。重要的过程包括土壤水分蒸发蒸腾损失总量, 这是生物地球物理能量和水分交换的一部分, 这些交换发生在大气、融雪、植物叶和枝干对降雨的拦截、下渗成为地下水, 或者地下水进入溪流、湖泊的过程中。这些过程决定了土壤水含量、地表雪量以及在流域内的饱和地区——这些状况随天到周的时间尺度发生变化, 而且能反过来影响表面通量。

### 生态系统

陆地生态系统是生态系统的一种表达方法。所有的生态系统都有结构——各种贮库中蓄积的物质的排列以及功能——物质在这些库之间的流动和交换。例如碳, 碳库就是指树叶、茎秆、根系生物量和土壤中分解的有机物质。功能包括光合作用(即被称为总初级生产力 GPP)中的碳吸收, 植物自养呼吸的碳损耗( $R_a$ ), 分解作用中的碳损耗( $R_d$ ), 所以, 一个生态系统的碳的净存储增量就称为净生态系统生产力(NEP)

$$\text{NEP} = (\text{GPP} - R_a) - R_h = \text{NPP} - R_h$$

植物的净碳吸收量(即  $\text{GPP} - R_a$ )被称为净初级生产力(NPP)。从天到周不同时间尺度的多种生态过程影响着生态系统功能。生理过程,例如光合作用中的碳同化,呼吸作用中的碳损耗,氮吸收和生长策略的资源分配带来的短期的碳收益。现存的叶片数量是光合作用、太阳辐射吸收、与大气间的热量动量交换、土壤水分蒸发植物蒸腾损失总量和拦截等过程的重要决定因素。许多植物群落中的叶片生长随着温度和水分胁迫发生季节变化。其他过程,例如秋天叶落、分解和分解中器官表面营养物的矿化作用都影响着碳和营养物的储存、生态系统中碳和营养物的分配、光合作用和蒸腾作用等过程的速率。

#### 植被动态

生态系统不只是静态的景观要素,它们是动态的。植物物种的丰度和生物量从数年到数世纪的时间尺度上不断变化着。诸如洪水,火灾和飓风这样的干扰是景观的自然特征,可以导致生态系统发生短暂的变化,这一过程叫做演替。植物的生命史部分是反复扰动的结果。很多植物种类是景观的短暂成员,适应最近扰动的环境。其他植物种类则在处于演替最后阶段的较为成熟的生态系统中占统治地位。气候变化也改变生态系统。温度、降雨、大气  $\text{CO}_2$  以及化学沉降等方面的长期变化会改变生理过程发生的条件,例如:光合作用和呼吸;繁衍等人口过程;诸如可获取营养物质的生态系统过程。通过改变物种组成和生态系统结构,植被、动态在生态系统功能以及与大气的生物地球物理和生物地球化学通量不断发生变化。人类通过开垦农田、废弃土地和引入入侵物种等活动也改变着生态系统。

#### 1.1.3 气候—植被动态

气候和植被之间的相互关系在多种空间和时间尺度上是可见的。例如,我们来考虑一下叶片形状与微气候之间的关系(Parkhurst 和 Loucks 1972; Givnish 和 Vermeij 1976; Woodward 1993a)。叶片的温度受到周围空气中热量和水分交换的控制。晴天时,热量交换很大可以使叶片表面降温;热量交换小则会产生温暖的叶片微气候。蒸腾作用散失水分也会给叶片降温,因为水从液态到气态的转化需要大量的能量。叶片散失多少热量和水分部分地取决于叶片的大小和形状。小片叶子对热量和水分传输阻力较小,叶片表面的状况与空气密切相关,因而叶温与周围空气的温度相似。大叶片对热量和水分传输阻力较大,它与周围的空气相隔离,因而叶温比周围空气的温度高好几度。因此,环境与叶片尺寸(图 1.3)之间存在一种关系。大叶子喜好光照弱、湿度高的温暖或热的气候,温带和热带森林的林下叶层可能会有这种环境。小叶子喜好晴朗或者干燥的环境(例如上层林冠)以及寒冷的气候。

气候-植被动态可以在温带叶片季节性的生长和凋落中得到证实,对生态系统的净生产力具有重要作用,导致大气  $\text{CO}_2$  浓度发生季节性的变化(图 1.4)。在这些气候条件下,秋季落叶树随着日照变短和冬季的来临开始落叶;春季温度上升,白天变长,开始发芽萌叶。落叶林中这种物候特征是最明显的,但是针叶林中也存在这种情况。树叶季节性的生长和凋落是对温度响应的结果,这是碳吸收季节模式的驱动因子。生态系统在生长季节表现为净的碳吸收,在休眠期表现为净的碳排放。这种碳吸收和释放的年循环驱动了大气中  $\text{CO}_2$  浓度的年循环。 $\text{CO}_2$  浓度在生长季较低,在非生长季节较高。温度和降水的年际变化导致了大气中  $\text{CO}_2$  的年际变化。

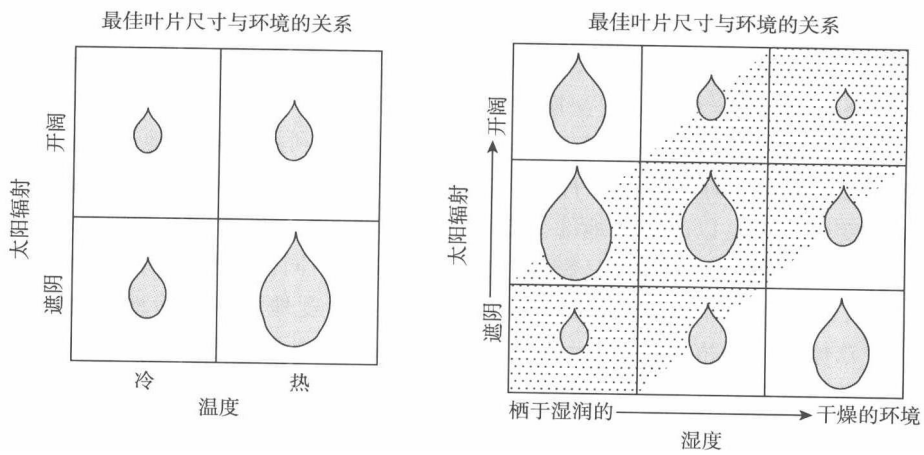


图 1.3 叶片尺寸与环境的关系

左图为叶片尺寸与太阳辐射和温度的关系。源自 Parkhurst and Loucks (1972)。右图为叶片尺寸与太阳辐射和湿度的关系,图上画点部分为上层林冠与林下叶层之间自然界最可能的栖息地。源自 Givnish and Vermeij (1976)。

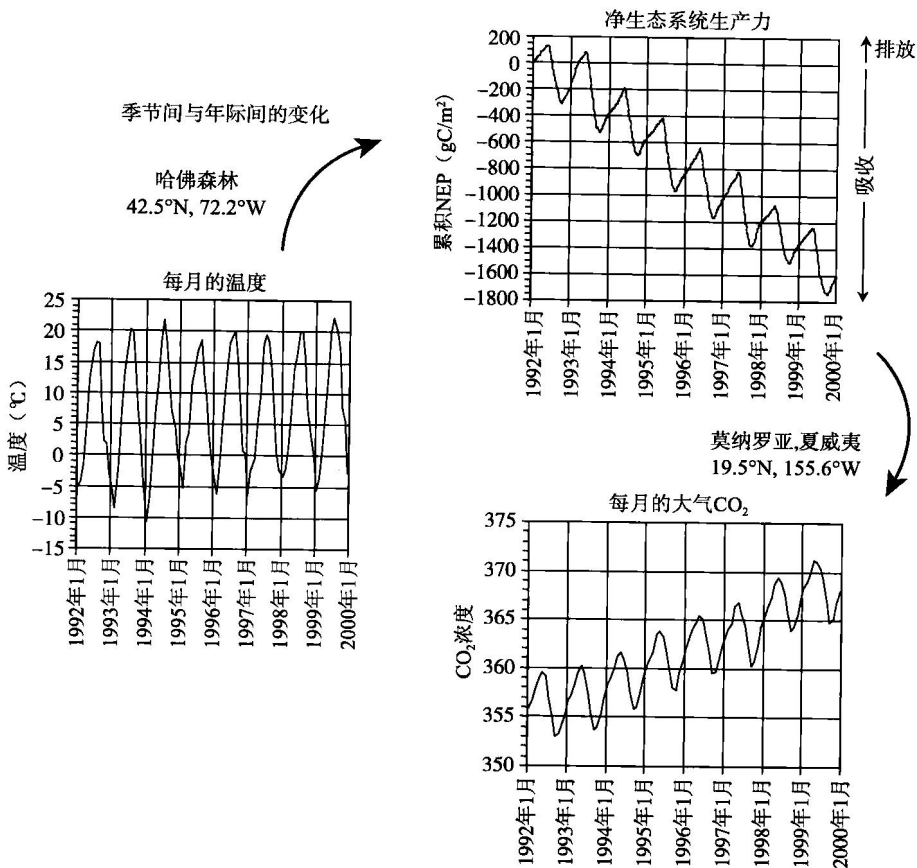


图 1.4 气候与植被在季节与年际时间尺度上的相互作用

哈佛森林是一个位于马萨诸塞州中心的常绿落叶混交林,净生态系统生产力指 1992—1999 年日碳吸收量的累计值(负值表示碳吸收),Goulden 等(1996a,1996b)描述了这些变化过程。斯克里普斯海洋研究所(La Jolla, California)的 C. D. Keeling 和他的同事每月都监测位于夏威夷岛莫纳罗亚山的大气二氧化碳浓度(ppm),这些数据可以从二氧化碳信息分析中心(橡树岭国家实验室,田纳西州的橡树岭)获得。

气候-植被动态的结果也可以在数十年到数世纪时间尺度上的植被结构和组成变化中显现。温度和降水是全球植被的生物地理分布格局的关键性决定因素。反之,植被的类型也对植被与大气间的能量、水分和动量的交换产生影响。对大约 21000 年前末次冰期的气候模式的研究表明了这些相互作用的本来面目(彩图 1.5)。一个利用改进的地球—太阳几何学模式、大气 CO<sub>2</sub> 低值和这个时期的较长冰期模拟的结果表明北半球的气候比现在低若干摄氏度。这种气候变化大得足以改变陆地的生态系统的地理分布。另外一个利用双向耦合的气候植被模式(即植被受气候影响,同时又影响气候)可模拟出不同的气候。树木在北半球较冷的气候和热带更干燥的气候里死亡。苔原植被在许多中高纬度地区占统治地位,而热带和亚热带主要覆盖着草原。这些植被改变的结果是,森林覆盖率降低的欧亚大陆的大部分温度降低,而草原替代森的热带和亚热带温度增加。中高纬度森林覆盖的减少导致了冬季和春季积雪覆盖的高反照率,这也减少了对太阳辐射的吸收。在低纬度地区,森林的减少降低了蒸腾,使气候变暖,降水变少。

1.2 生态气候学——应用

1.2.1 土地利用和土地覆盖的变化

植被对气候的影响的研究兴趣来自对陆地生态系统提供的产品和服务以及人类对土地的利用如何改变这种产品和服务的认识需求,(Costanza 等 1997;Daily 1997;Daily 等 1997)。其中服务涉及气候调节,水资源,废弃物再利用,维护生物多样性,食品生产,医药和工业产品,娱乐和文化价值(表 1.2)。人类的活动已经改变了这些服务。生态学家研究原始景观的兴趣变得愈来愈少,而对造成环境变化的人类活动,及其对气候、生物地球化学循环、水文循环和土地覆盖的影响的研究兴趣越来越增加(McDonnell 和 Pickett 1990,1993;Turner 等 1990;Lubchenco 等 1991;Meyer 和 Turner 1992;Vitousek 1994;Meyer 1996;Vitousek 等 1997a,b)。

表 1.2 陆地生态系统提供的产品和服务

|         |
|---------|
| 供给产品    |
| 食物      |
| 木材      |
| 燃料      |
| 药物产品    |
| 工业产品    |
| 服务      |
| 废物处理    |
| 净化水     |
| 分解和废物回收 |
| 水资源     |
| 水的储存和保持 |
| 减缓洪涝和干旱 |