

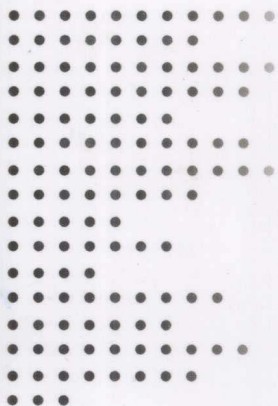


◎ 张佳华 张国平 王培娟 等 著



植被与生态遥感

Vegetation and Ecological Remote Sensing



科学出版社

植被与生态遥感

Vegetation and Ecological Remote Sensing

张佳华 张国平 王培娟 等 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一部系统介绍植被和生态科学与遥感科学交叉领域研究的学术专著,在内容和结构上力求反映国际前沿和热点。主要内容包括:植被与生态遥感原理与信息源,植被和生态参数遥感反演,植被水分和生态干旱遥感,农业植被面积估算与植被生物量遥感,植被与土地分类遥感,气候-植被生态相互作用遥感,植被退化与土壤风力侵蚀定量模型,土壤风力侵蚀遥感与影响。

本书可供从事遥感、植被、生态、气候、水文、环境、规划、气象和防灾减灾等专业的科研人员和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

植被与生态遥感 / 张佳华等著. —北京:科学出版社, 2010
ISBN 978-7-03-029685-6

I. ①植… II. ①张… III. ①遥感技术-应用-植被-生态学-研究
IV. ①Q948.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 237776 号

责任编辑:赵 峰 赵 冰 / 责任校对:郑金红
责任印制:钱玉芬 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

北京佳信达版艺术印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 11 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010 年 11 月第一次印刷 印张:23 1/4 插页:4

印数:1—2 000 字数:571 000

定价:69.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

前 言

植被生态系统研究的是生态系统中植物与环境的相互作用关系,包括生物与大气圈、水圈、土壤圈的能量交换与物质循环过程。植被生态系统是连接地球圈层(大气-陆地-海洋等)的重要部分,在影响全球变化中扮演着重要角色,且对粮食安全、社会健康发展等具有不可替代的支撑作用,开展植被与生态遥感研究是遥感和资源环境领域的重要前沿课题。深入研究植被结构和参数遥感反演技术、植被第一性生产力遥感、植被水分与干旱过程遥感以及植被生态与气候的相互作用具有重要的学术价值和现实意义。

当今全球的植被覆盖受到人为活动的严重破坏,土地覆盖/土地利用的动态变化迅速,打破了地表的生态平衡,使得生态安全受到严重挑战,部分地域已造成不可逆转的退化过程。因此,从人类的生存环境看,由于影响气候变化的地表过程越来越复杂,有必要对植被覆盖、土地利用/变化、生态退化和荒漠化进行大范围、长期、动态、综合的监测。

粮食安全是关系人类生存和经济可持续发展的重要条件,由于我国耕地面积不断减少,保护18亿亩^①耕地红线尤为重要,迫切需要开展卫星遥感的农业用地监测和提取技术研究。而大面积、动态、及时遥感作物估产技术将为各级政府的农业生产管理、粮食安全政策等提供重要的参考。

当前,空间遥感技术的发展为植被和生态过程研究提供了强有力的工具。目前全球主要的卫星系列包括陆地、资源、气象、海洋卫星等。它们已用于分析植被过程中的地表辐射能量收支、地表温度和湿度的变化、植被覆盖和土地退化、植被生物量和净初级生产量(net primary productivity, NPP)、植被结构和生态参数、地表生态过程、土地利用和农用植被提取等。其中遥感反演的植被生态的许多参数不仅为气候模式提供了精确的陆面特征参数,也为模型模拟预测结果的验证提供了依据。全球陆地观测系统(GTOS)、国际地圈生物圈计划(IGBP)、全球气候观测系统(GCOS)等卫星观测手段处于十分突出的地位。随着遥感技术的进一步发展,它在植被生态过程研究中将发挥越来越重要的作用。利用多种遥感数据获取植被生态参数和空间信息,进而可对陆面植被生态过程进行系统研究。

本书共分9章:第1章介绍多源遥感研究在植被与生态应用和信息源;第2章阐述利用遥感技术、地理信息系统结合生态模拟对植被结构参数中叶面积指数(LAI)反演,作物三维结构和遥感虚拟建模,植被气孔导度反演;第3章阐述了利用高光谱和多角度遥感,结合辐射传输模型对植被水分的定量提取以及植被干旱的空间分布;第4

^① 1亩≈666.7m²

章研究了多源遥感技术对农用植被面积提取技术；第5章研究了植被生物量 and 生产力估算的遥感技术，基于生态过程模型对植被（森林、农田、草地）进行了 NPP 估算；第6章针对宏观土地覆盖遥感分类的现状，研究利用 TM、MODIS、ASTER 和 NOAA/AVHRR 等遥感数据并且结合多光谱多时相和地表反射率等开展土地覆盖遥感分类和特征提取；第7章研究了在全球和东亚季风区域植被与气候变化（降水、温度）的关系，分析了大尺度植被-大气相互作用，特别强调季风东亚区域和高寒生态区植被动态的气候响应；第8章详细研究中国植被退化和风力侵蚀的卫星遥感建模和评估技术，利用遥感技术、GIS 和土壤风力侵蚀模型，开展了青藏高原和内蒙古植被退化与土壤风力侵蚀遥感研究；第9章介绍了基于遥感与 GIS 的中国绿洲生态地区的耕地和沙地动态变化的监测和评估等。

本书编写分工如下：第1章为张佳华、姚凤梅、徐祥德；第2章为张佳华、姚延娟、谢东辉、王长耀；第3章为张佳华、李莉、姚凤梅；第4章为张国平、许文波；第5章为王培娟、张佳华；第6章为姚凤梅、张佳华、李莉、张景、郭文娟；第7章为张佳华、姚凤梅、郑凌云、符淙斌、Limin Yang；第8章为张国平、张佳华；第9章为张国平。由张佳华、王培娟、邵小路负责统稿，并得到符淙斌院士、李小文院士、丁一汇院士、徐祥德院士、王长耀研究员、刘纪远研究员、赵英时教授、田庆久教授等的指导和帮助，在此一并感谢！

本书是一部较为完整的植被生态科学与遥感科学交叉领域的学术专著，在内容和结构上力求反映国际前沿和特点。内容除基本原理和方法介绍外，还给出具体的应用。本书是作者及其研究团队多年的科研积累，体现了对植被和生态遥感的总体理解和把握，并得到“863”计划项目课题“遥感光合-地面观测的高光谱多角度技术提取冬小麦/夏玉米作物水分胁迫信息研究”（2006AA10Z213）、国家自然科学基金“遥感联合地面试验定量反演不同覆盖条件下作物水分信号”（40771147）、全球变化研究国家重大科学研究计划课题“全球变化影响下主要作物的脆弱性及评价指标”（2010CB951302）等项目的部分资助。

植被与生态遥感是生态学与遥感科学的重要交叉领域，对全球变化、生态环境动态和植被-大气相互作用的前沿科学问题具有重要参考价值。期待本书的出版对推进我国植被和生态科学与遥感科学交叉领域的发展作出更大的贡献。

由于作者的能力和掌握的材料有限，本书难免会有不妥之处，敬请专家和同行批评指正。

作者

2010年8月于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 植被生态系统在全球气候系统的作用	1
1.2 植被与生态遥感研究	10
参考文献	17
第 2 章 陆地植被参数遥感	23
2.1 植被叶面积指数遥感	23
2.2 植被三维结构遥感建模	41
2.3 植被气孔导度遥感	52
参考文献	57
第 3 章 植被水分和干旱遥感	62
3.1 引言	62
3.2 高光谱与多角度野外作物水分观测	70
3.3 辐射传输模型及多角度分析	77
3.4 去除土壤背景影响的植被水分指数	88
3.5 卫星遥感数据反演植被水分分布	104
参考文献	112
第 4 章 农业植被面积遥感估算	116
4.1 农业植被种植面积遥感进展	116
4.2 融合多源遥感和地面观测的农业植被面积遥感	119
4.3 典型区农业植被面积遥感估算	128
参考文献	136
第 5 章 陆地植被生产力遥感	139
5.1 陆地植被生产力研究意义	139
5.2 陆地植被生产力研究进展	140
5.3 森林植被生产力遥感	144
5.4 森林植被 NPP 尺度转换方法	159

5.5 作物产量遥感估算	175
5.6 高原草地生物量遥感	184
参考文献	189
第6章 植被与土地覆盖分类及动态评价	194
6.1 陆面植被覆盖分类遥感	194
6.2 基于 MODIS 遥感数据的土地覆盖分类与评价	202
6.3 基于 TM 数据的土地覆盖分类——以城市为例	210
6.4 基于 ASTER 遥感数据的土地利用分类	217
6.5 小结	223
参考文献	224
第7章 气候-陆面植被相互作用遥感	227
7.1 陆面过程参数化遥感	227
7.2 全球生态-气候响应遥感	231
7.3 区域生态对东亚季风的响应	235
7.4 青藏高寒生态区植被-气候相互作用	239
7.5 小结	255
参考文献	255
第8章 土壤风力侵蚀因子遥感定量模型	258
8.1 中国土壤风力侵蚀强度定量遥感	258
8.2 中国风场强度因子定量分析	268
8.3 中国土壤可蚀性因子定量遥感	277
8.4 中国土壤结皮因子定量分析	280
8.5 中国积雪因子定量遥感	286
参考文献	296
第9章 土壤风力侵蚀遥感与影响	300
9.1 中国沙地空间分布及其变化监测	300
9.2 中国绿洲区耕地和沙地变化	309
9.3 青藏高原土壤风力侵蚀与影响	327
9.4 内蒙古土壤风力侵蚀动态遥感与影响	334
参考文献	359

彩图

Contents

Preface

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Vegetation ecological role in the global climate system	1
1.2 Remote sensing of vegetation and ecological research	10
References	17
Chapter 2 Remote sensing of terrestrial vegetation parameters	23
2.1 Remote sensing of vegetation leaf area index	23
2.2 Three-dimensional structure of vegetation remote sensing modeling	41
2.3 Remote sensing of vegetation stomatal conductance	52
References	57
Chapter 3 Remote sensing of vegetation moisture and drought	62
3.1 Introduction	62
3.2 Crop water with hyperspectral and multi-angle observation	70
3.3 The radiative transfer model and multi-angle analyses	77
3.4 Vegetation water index removing the soil background effect	88
3.5 Vegetation moisture spatial distribution based on remote sensing	104
References	112
Chapter 4 Cropland area remote sensing	116
4.1 Progress of crop land area remote sensing	116
4.2 Cropland area remote sensing integrated multi-source and ground observations	119
4.3 Typical cropland area remote sensing	128
References	136
Chapter 5 Vegetation primary productivity remote sensing	139
5.1 Research significance of vegetation primary productivity	139
5.2 Research progress of vegetation primary productivity	140
5.3 Remote sensing of forest vegetation primary productivity	144
5.4 Scale transfer of forest vegetation NPP	159

5.5	Crop yield remote sensing estimation	175
5.6	Grassland biomass remote sensing estimate in Qinghai-Tibet Plateau	184
	References	189
Chapter 6 Land cover classification remote sensing and evaluation		194
6.1	Remote sensing of land surface vegetation classification	194
6.2	Land cover based on the MODIS and evaluation	202
6.3	Urban land cover change based on the TM data and evaluation	210
6.4	Land use classification based on ASTER data	217
6.5	Summery	223
	References	224
Chapter 7 Remote sensing of climate-vegetation interactions		227
7.1	Land surface processes parameters remote sensing	227
7.2	Analysis of global ecosystem in response to climate	231
7.3	Remote sensing of regional ecology in response to the East Asian monsoon	235
7.4	Analysis of the Qinghai-Tibet alpine vegetation-climate interaction	239
7.5	Summery	255
	References	255
Chapter 8 Quantitative remote sensing of soil wind erosion model in China		258
8.1	Chinese soil wind erosion intensity quantitative remote sensing	258
8.2	Chinese wind intensity factor quantitative remote sensing	268
8.3	Chinese soil erodibility factor quantitative remote sensing	277
8.4	Chinese soil crust factor quantitative remote sensing	280
8.5	Chinese snow cover factor quantitative remote sensing	286
	References	296
Chapter 9 Remote sensing of soil wind erosion and impact assessment		300
9.1	Remote sensing of Chinese sand changes in spatial distribution	300
9.2	Remote Sensing of arable land in China's oasis and sandy land change	309
9.3	Remote sensing of Qinghai-Tibet Plateau soil wind erosion and assessment	327
9.4	Remote sensing of soil wind erosion in Inner Mongolia and assessment	334
	References	359

Colour graph

第 1 章 绪 论

1.1 植被生态系统在全球气候系统的作用

广义的陆地生态系统包括大气圈、生物圈、水圈、土壤圈和岩石圈，是地球生态系统中的重要组成部分。而植被生态系统研究的是生态系统中植物与环境的相互作用，包括生物与大气圈、水圈、土壤圈的能量交换与物质循环的过程。其中能量交换是植被生态系统中一切植物、动物和微生物生命活动的动力。植被生态系统的能量在各组分中稳定地流动，在初级生产力、次级生产力、消费者等的各营养级呈能流金字塔（energy flow pyramid）分布。植被生态系统的物质循环主要是生物地球化学循环（biogeochemical cycles），包括水循环、碳循环、氮循环、磷循环、硫循环等。生态系统各要素通过生物地球化学循环相互联系、相互作用。

当今全球尺度的植被覆盖受到人为活动的严重破坏，土地覆盖/土地利用动态变化迅速，打破了地表原有的生态平衡，超过了生态系统恢复的阈值，部分地域已形成不可逆转的退化过程。因此从人类的生存环境看，由于影响气候变化的陆面过程越来越复杂，有必要对植被生态过程进行大范围、动态、长期综合的监测，进而深入研究植被生态过程与气候的相互作用机理。

陆地表面（land surface）占整个地球表面的 29%，是气候系统不可分割的重要部分。陆面不仅包括陆面覆盖类型，同时也包括其分布的地域特征、气候类型和地形地势等。陆面的面积虽然很小，但在地球的北半球却有较高比例。虽然在全球尺度上，陆面对大气的加热比海洋小，但是因陆面是直接加热本地的大气，故它对陆地表面气候的影响作用较之海洋表面更大、更直接。目前，气象、气候学家对陆面过程的研究越来越多，一方面陆面在调节大气组成和影响气候变化方面起着十分重要的作用，另一方面由大气组成、气候或土地利用变化引起的陆面过程的变化会反过来影响大气和气候变化。利用全球大气环流模式（general circulation model, GCM），如果不采用陆面过程-大气耦合的方案就难以对未来气候的高分辨率、高精度进行预测。而陆面过程就是指发生在地表面和土壤圈中控制地-气之间的能量、水分、动量和物质交换的过程。在能量交换中主要包括发生在土壤-植被-大气之间的辐射过程（短波直射、散射、反射、透射和长波辐射）， CO_2 、 CH_4 、 N_2O 和 SO_2 等温室气体的释放和吸收（孙菽芬，2005；张强等，2009）。

陆面过程和植被生态系统分属于不同的科学范畴，但又互相涵盖，事实上研究和建立气候系统中的陆面过程模式，大部分是和研究地球系统中植被生态系统的能量交

换和物质循环相互关联。研究植被生态系统中能量、水分交换和物质循环机理,对研究陆面过程的土壤-植被-大气的相互作用起重要的推动作用。植被生态系统中植被对气候的响应以及与气候系统的相互关系研究,可以改进陆面模式,更真实地模拟地表的状况和与大气圈的相互作用(丁一汇等, 2005; Zeng et al., 2008)。

1.1.1 植被生态与气候系统的关系

1. 植被对气候系统的反馈效应

在植被影响气候系统的反馈效应中有三个特征最为明显,分别为潜热和显热之间净辐射的分配、反射率影响辐射能的净吸收及表面粗糙长度影响 SVAT 的动量、热量和物质交换。

首先,植被影响地-气的潜热和显热交换。植被-土壤系统控制地面蒸腾蒸发,影响区域水文循环、大气湿度和气候条件。陆地蒸腾蒸发占全球降水量的 15% 和地面降水量的 65%。在巴西亚马孙河流域,50% 以上的降雨依靠植物蒸腾,若除去森林,降雨可减少 30%。植被的蒸腾蒸发可减少辐射向显热的转化,增加空气湿度,提高最低气温,降低最高气温,利用 GCM-NCAR 模型模拟结果也证明了这一点。这样可有效地起到稳定气候的作用。

一般情况下,大气孔阻力为空气动力学阻力的 10 (气孔开张)~50 倍 (气孔闭合) 时,植物通过叶片气孔腔的开闭调节蒸腾和水分散失。植物利用辐射能将底物 CO_2 和 H_2O 合成糖类,并释放出 O_2 。 CO_2 通过湍流运动进入气孔,在这一个过程中,要保证气孔的开放,一是要使叶片总的水分保持平衡,二是要气孔各细胞渗透压有梯度。前者表现为气孔的开张必须保证有足够的植物组织水分,若水分亏缺,则引起气孔关闭,这是由于蒸腾需求超过植株对土壤水分的吸收,因而使叶片含水量下降,气孔为能维持其紧张度所致。热量交换包括土壤-植被-大气连续体 (soil-vegetation-atmosphere continuum, SVAC) 之间的潜热和感热交换 (也即净辐射的再分配)。地表的动量交换包括地面对风的摩擦和植被的阻挡作用等。其他如地面水文过程中包括大气降水、植被水分的蒸腾、凝结、地表蒸发和径流以及冰雪的融化和冻结等过程。地下水文过程包括地面水的渗流和深层水的上吸、植物根系吸水和壤中流等。地表 (土壤-植被) 与大气的物质交换,包括气体、气溶胶和烟雾的向上输送、大气悬浮物和温室气体的沉降。植被-土壤-大气之间通过生物地球循环过程实现了 C、N、P、S 等元素的交换、吸收、固定和流失等。

2. 植被生态对陆面过程的影响

陆地植被生态系统通过与大气之间的能量、物质和水汽交换,与气候系统相互作用、相互影响。首先,气候变化改变了植被生长发育的物理环境,导致生态系统的生产力、格局分布以及生态系统中物流、能流的改变。这些变化影响了地表辐射收支、蒸腾蒸发和各种温室气体的释放,反过来又改变了气候状况。植被生态系统对气候过

程的反馈首先是通过植被生物物理过程如地-气之间的辐射、热量、动量和水汽交换对气候系统产生影响；其次是通过生物地球化学循环过程如 C、N、P、S 等元素在 SVAT 之间的转换，同时它们又控制着 CO₂ 释放。空气干旱，但土壤水分供应良好时，由于气孔周围蒸腾作用强，失水速度快，也将引起气孔关闭。事实上，气孔在叶肉细胞尚未明显失水的前提下及时关闭，对保持叶内水分平衡十分重要。

大气 CO₂ 的浓度可影响气孔的开闭，增加 CO₂ 浓度可显著降低气孔水汽传导率和蒸腾速率。全球 GCM 模式预测，大气 CO₂ 浓度增加一倍可使植被气孔导度降低 20%，蒸腾速率降低 5%，陆面平均温度升高 0.2℃。

植被冠层通过潜热和感热交换引起地表净辐射重新分配的公式为

$$R_n - H - \lambda E - G - D = S \quad (1.1)$$

式中： R_n 为植被冠层截获的净辐射 (W/m^2)； H 为冠层层顶垂直向上的感热通量 (W/m^2)； λE 为冠层层顶垂直向上的潜热通量 (W/m^2)； G 为由地表进入土壤层的热通量 (W/m^2)； D 为因平流作用而在水平方向上净输出的能量 (W/m^2)； S 为植被冠层内净储存的能量 (W/m^2) (包括光合作用和热存储量)。

在一般情况下，取 $R_n = C + \lambda E$ 是合理的。其中， λ 为汽化潜能， E 为垂直方向水汽通量。

3. 地表植被反射率的反馈效应

虽然近年来，由于气候学家的高度重视，地表植被反射率的研究日益增多。但就反射率与气候模式的联结以及对气候变化响应方面的研究还不够深入。

地表反射率 α 是反映陆面对太阳短波辐射反射特性的物理量。一般定为白色光的半球空间的入射与反射通量的比率。它对地表的净辐射通量及陆面的能量收支极为重要。地面反射率受多种因素影响，并依赖于波长，如太阳天顶角、植被种类及季相、植被结构和叶特性等、土壤的颜色温度和水分、冰雪的结构、状态和压实度。此外陆面的反射率还有较大的纬度和季节变化，1 月它由在高纬度的 0.8 可降到低纬度的 0.2，沙漠地区约为 0.3，而 7 月北半球的反射率变化不明显，最大值在沙漠地区，最小值则在针叶林区。此外地形因素也影响着反射率的变化。反射率在陆面辐射收支的作用以下式表示为

$$R_n = (1 - \alpha)S \downarrow - \sigma \varepsilon_s T_s^4 + \sigma \varepsilon_a T_a^4 - \sigma(1 - \varepsilon_s)T_s^4 \quad (1.2)$$

式中： R_n 为冠层上方向下的净辐射通量； S 为向下的太阳短波辐射通量； α 为地表反射率； σ 为斯特藩常数； ε_s 为地表比辐射率； T_s 为地表温度； ε_a 为空气比辐射率； T_a 为空气温度。

植物叶片的反射、透射和吸收与种类、生育期、病虫害和入射波长有关。Ross (1975) 求出平均绿叶在光合有效辐射 (PAR) 波段、近红外辐射 (NIR) 波段和总短波辐射波段内的反射、透射和吸收系数 (表 1.1)。

冠层内的净辐射通量可由下式给出：

$$R_n(L) = R_n(0)\exp(-kL) \quad (1.3)$$

式中： $R_n(L)$ 为冠层内 L 处的净辐射通量； k 为消光系数，变化范围为 0.2~0.6； L 为叶面积指数。

表 1.1 平均绿叶在可见光近红外区和总短波辐射中的反射、透射和吸收系数

过程	可见光区	近红外区	总短波辐射区
反射 α_L	0.09	0.51	0.30
透射 t_L	0.06	0.34	0.20
散射 w	0.15	0.85	0.50
吸收 a	0.85	0.15	0.50

表 1.2 为不同地面的反射率特征和比辐射率。

表 1.2 不同地面的反射率特征和比辐射率

地表类型	特性	反射率	比辐射率
土壤	暗的、湿润 明的、干燥	0.02 ~ 0.40	0.90 ~ 0.98
沙漠	明的、干燥	0.20 ~ 0.45	0.84 ~ 0.91
草地	长的 (1.0m) 短的 (0.02m)	0.16 ~ 0.26	0.90 ~ 0.95
农作物		0.18 ~ 0.25	0.90 ~ 0.99
果树		0.15 ~ 0.20	0.90 ~ 0.99
森林			
落叶树	落叶时 长叶时	0.15 ~ 0.20	0.97 ~ 0.98
针叶树		0.05 ~ 0.15	0.97 ~ 0.99
水面	天顶角小 天顶角大	0.03 ~ 0.10 0.10 ~ 1.00	0.92 ~ 0.97 0.92 ~ 0.97
雪	旧雪 新雪	0.40 ~ 0.95	0.82 ~ 0.99
冰面	海冰 冰河	0.30 ~ 0.45 0.20 ~ 0.40	0.92 ~ 0.97

从上面分析看,植物叶片的吸收光谱与叶间的多重辐射使植被冠层在可见光范围内有很高的吸收峰,在近红外波段,反射率主要受胞间水分和结构的影响。不同植物的吸收光谱也不同,常绿叶对辐射有较强的吸收,随着落叶的增加、植被的减少,反射率会大幅度下降。森林对辐射的反射率一般为 0.15,而草地和农作物则高达 0.25。湿润、富含有机质的土壤反射率为 0.1 左右,而沙漠土壤平均为 0.33 左右。研究表明,在热带地区,由于森林砍伐,反射率每增加 0.1,蒸发和降水量减少 20%,同时近地面空气温度升高,湿度下降。气候变暖使森林向北极冻原扩展。森林反射率大大小于冻原,尤其在冰冻的季节,因此森林向北极推移的结果会反过来加速气候变暖。Platridge

利用年平均降水量和植被类型之间的关系以及每一类型反射率的范围分析了降水－反射对气候的反馈。假设温度增加4℃而降水增加10%，他计算出了植被和全球反射率的变化。结果也表明，增大反射率对全球变暖有十分明显的正反馈作用。

在GCM和RCM中，地面反射率经常是给定的，但不同方案的陆面过程是不一样的。现在比较好的方法是利用遥感信息来反演陆面的地表反射率，但存在着卫星和地面的标定问题，精度也有待进一步提高。

4. 粗糙长度 (Z_0) 对气候的反馈效应

粗糙长度可以认为是冠层从气流中吸收动量的效率尺度。可采用冠层高度 H 来计算， Z_0 估算的经验公式见表 1.3。

表 1.3 Z_0 估算的经验公式

经验公式	植被类型	参考文献
$Z_0 = 0.31(H - d)$ $d = 0.56H$	小麦	Legg 和 long (1975)
$Z_0 = 0.33(H - d)^{1.3}$ $d = 0.63H^{1.3}$	玉米	Jacobs 和 van Boxel (1988)
$Z_0 = 0.30(H - d)$ $d = 0.59H$	松树林	

注：表中的 d 为零平面位移高度。

另一个重要公式是

$$Z_0 = \begin{cases} Z_{0s} + 0.28Hx^{1/2} & 0 \leq x \leq 0.2 \\ 0.3H(1 - d/H) & 0.2 < x \leq 2 \end{cases} \quad (1.4)$$

$$x = 0.2L$$

式中： H 为作物高度； Z_{0s} 为土壤表面粗糙度； L 为叶面积指数。

植被能显著提高地面粗糙度和对界面气流和阻滞力，降低热量和水汽交换通量。植被阻滞力与其高度和密度成正比。由于植物的粗糙性，植被冠层具有拦截降水的作用，从而减少地面得到的降水，这样可减少感热通量，增加蒸发量。此外，植物的根系可以接触较多的水分，通过叶冠—茎—根—根尖—土壤的水势梯度，把土壤水分向地面和近冠层运输，这样也使得蒸腾增加，而地表蒸发减少。

植物根系的厚度和密度决定着土壤水分的蒸发量，经验模式也显示了根部密度、土壤水分密度和蒸发率之间的联系。

一个土壤水运动方程加上植物根系吸水项，即会得到根系吸水的土壤水运动方程为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot (K \nabla \Phi) - S \quad (1.5)$$

式中： S 为植物根系吸水速率，表示单位时间内根系从单位体积土壤中吸收的水量 [$\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]。影响 S 的因素包括土壤和植物两个方面，其中单位体积土壤的根长是

根系吸水特性的一个主要因子。另外,由于土壤、植物和大气间处于动态的、相互联系的过程中,大气条件也决定了植物吸水速率的最大值。

在土壤水分未成为限制因素时,根系吸水速率的大小由大气条件决定。植物因素主要决定植物持续吸水的时间和控制吸水速率在土壤剖面上的相对强度。

5. 植被-大气-土壤间物质交换的反馈效应

首先大气本身就是生物地球化学循环的产物,它与生态系统之间存在活跃的气体 and 微粒交换。植被生态系统又是 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体的源和汇。全球植被和土壤共储存 2200Gt 有机碳,是大气碳储量的 3 倍。植被光合作用每年固定 55Gt CO_2 ,土壤微生物分解释放大致相当的 CO_2 到大气中。全球湿地每年将释放 150Tg 的甲烷,占每年大气总甲烷来源的 25%,陆地生态系统每年还释放 50~60Tg 氮氧的 NH^+ 化合物,它们在大气中产生复杂的化学反应,并影响大气辐射平衡。森林采伐每年释放到大气中 1.5Gt CO_2 。

在氮循环中增加固定氮的植物,土壤氮汇和氮矿化明显增加,此外木本植物产生的木质素和半纤维素含量高的叶子具有若干年的半衰期,而草本和叶片的半衰期不到一年。结果林区土壤有很高的有机质含量,有较高的离子交换力,使得 N、K、Ca、Mg 等矿质元素增加。

植被与大气之间最主要的物质交换是碳循环,植被冠层碳同化过程是 CO_2 和 H_2O 合成生成有机碳的过程,植被的呼吸过程包括光呼吸和暗呼吸(用以生长和维持生命)。

由确定植物的 NPP(净初级生产力)可以了解不同植被类型的 NPP 的差异,如果减去土壤呼吸,便可以计算生态系统的 NEP(净生产系统生产力),植被 NEP 因植被类型、季相、经向、纬向差异和地形条件所产生的差异十分明显。

6. 陆面植被和气候相互作用

陆面植被和气候的相互作用包括长期和短期相互作用。

1) 陆面植被和气候的短期相互作用。日间大气边界层的垂直结构依赖于净辐射在显热和潜热的分配以及地热条件。一个较深的边界层,当辐射能量的大部分被认为是感热通量时,因为感热通量在陆面产生湍流,将增加对流边界层(CBL)的流动量,允许其发展用以抵抗大气干扰的稳定度。当植被存在时,叶导度对大气状态的响应可以在生物圈和大气圈中呈快速反馈。在白天,云量显著地降低短波辐射时,这种情形对于气孔来说,可以在几分钟内得到开放/闭合。当地表土壤变干时,深层的土壤由于土壤水向上输送也逐渐变干,这种过程在大气圈的反馈时间可能在数天到几个星期。但当植被水分缺乏受胁迫时,为了减少水分丧失,气孔将关闭,所以大部分的净辐射被认为是感热通量,降水则代表了短期反馈而且能迅速补充土壤水分,同时为植被提供水分。

2) 陆面和气候的长期相互作用。若从季节尺度来考虑,陆面和气候的长期相互作用包括从春天到夏天增加叶面积指数,并将调整显热和潜热的比例。一个重要的陆面

对大气的作用是陆面反照率的改变。如 Sahel 地区的干旱化会使大部分的太阳辐射被反射进入天空。对于数年的变化可包括有物种竞争和土壤各库有机物质的转运, 这将在和长期的大气变化相关联。这种关联可通过自然植被演替、人类活动的干扰以及突变的气候事件如森林火灾和飓风的袭击而发生。

综上所述, 陆面对气候的基本反馈分为以下三类。①辐射反馈: 通过地表温度对向上长波辐射的影响, 改变可利用能量; ②物理反馈: 包括植被生态生理过程和近地层相互作用, 通过地表温度、湿度和土壤水的可利用性反映出来; ③空气动力反馈: 稳定大气的湍流输送, 改变水热交换。

1.1.2 陆面过程模式发展历程

全球大气环流模式和区域气候模式都需要以陆-气的能量交换作为近边界条件 (lower boundary condition), 这一条件可以用陆面过程模式 (LSM) 来实现。LSM 能提供诸如温度、湿度、土壤湿润度、雪盖和径流等陆面信息。最早开始陆面过程研究的是 Manabe (1969) 和 Deardorff (1978), 结合 Budyko (1956) 的简单的 “Bucket” 模式, Manabe 首先在 GCM 中加入了陆面的水动力过程。基于 Monteith (1965) 的微气象理论, Deardorff (1978) 提出了更为详细的能代表陆面过程的模式, 这一工作是基于每日陆面能量平衡和地表植物与近地面大气相互作用的影响而展开的。

在此之后国际上开展了更为复杂的 LSM 研究工作, 如 Dickinson 等 (1986) 的 BATS 模式 (Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme)、Sellers 等 (1986) 的 SiB 模式 (the Simple Biosphere Model) 以及后来的 BEST 模式 (The Bare Essentials of Surface Transfer) (Cogley et al., 1990; Pitman et al., 1991)、CLASS 模式 (Canadian land surface scheme; Verseghy, 1991; Verseghy et al., 1993)、GISS (Goddard institute for space studies; Abramoponlos et al., 1988)、LSX (land-surface-transfer scheme, Bonan, 1994; Pollard and Thompson, 1995)、LSM (Bonan, 1996)、BASE (the best approximation of surface exchanges; Desborough and Pitman, 1998) 相继出现, 但它们在结构和机理上几乎与 BATS 和 SiB 相似。

其他几类模式基于 Deardorff 的思路, 但引入了更为简单的经验模式, 如 SSiB (simple SiB; Xue et al., 1991)、ISBA (Interactions between soil biosphere atmosphere; Noilhan and Planton, 1989)、CSIRO (Common wealth scientific and industrial research origination; Kowalczyk et al., 1991)、CAPS (Coupled atmosphere plant snow; Kim and Ek, 1995)、SECHIBA (Ducoudre et al., 1993) 和 ECMWF (Viterbo and Beljaars, 1995) 等。

1. 第一代模式

第一代陆面模式称为简单的 Bucket 模式 (Manabe, 1969), 通过降水来填充, 通过蒸发来排空。由于未考虑植被因素, 所以在蒸腾和蒸发之间没有区别。当水桶满了之后, 多余的降水则以径流/排水形式损失, 由于它的简单性和可模拟性, 这种陆面模

式一直被沿用。如 Delworth 和 Manabe (1989)、Manabe 和 Stouffer (1996) 等。

研究表明, 由于这类方案产生直接的土壤湿度贡献, 所以模拟会过高估计蒸发, 不能对由于降水差异引起的地表湿度变化 (体积含水量) 做出快速的响应, 因此对过早变干土壤的模拟结果均比观测结果大。

这样看来, 这类陆面模式仅使用少量的地面特征参数, 如反射率、粗糙度和土壤温度 (平均值)。这些参数的使用虽然改善了气候模式对地面蒸发、显潜热交换、水汽水平汇集和对流降雨的估计, 但这些方案仅把地面与大气之间的能量和水汽交换作为彼此独立的纯物理过程。因此, 它们虽然显示了这些地面特征对辐射平衡、热量交换和蒸发的重要影响, 但却不能真实地估计它们的反馈效应。

2. 第二代模式

进入 20 世纪 80 年代以来, 陆面过程方案最重要的变化是在大气和土壤层之间增加了植被层, 即生物学过程, 用以研究生物物理过程对显、潜热交换和蒸腾、蒸发的作用, 即这种模式包括植被对不同波段辐射的吸收和反射。

第二代模式研究降雨的截留和湍流动量交换的影响, 同时利用气孔传导和水势动力理论描述 SVAT 的水动力过程。地理科学的发展、大规模的资源调查和生态学研究, 提供了较为精确的土地利用、植被分布和土壤类型的数据库。这些数据包括地表植被覆盖类型、地表反射率、粗糙长度和土壤的理化特性等。

有关植被的能量和湿度平衡包括植被对降水的截留、再蒸发、下滴、根物对水的向上抽吸、上层和整层土壤中的湿度分布、气孔阻力和蒸腾等。

最典型的工作是 BATS (Dickinson and Henderson-Sellers, 1988) 和 SiB (Sellers et al., 1986) 的工作。从数值试验表明, 两个方案都能较好地模拟陆面的感热、潜热、辐射量等情形, Henderson-Sellers 等 (1993) 利用 GISS - GCM 模拟研究了巴西亚马孙热带雨林变成草原的情形, 结果表明, 地表反射率、粗糙度、土壤含水量的改变将使降水减少 $0.5 \sim 0.7 \text{ mm/d}$, 蒸发和天空云量也有明显减少。Dickinson 和 Henderson-Sellers (1988) 利用 BATS 和 NCAR 的通用气候模式 (CCM) 对热带森林砍伐作了进一步模拟, 结果显示, 若将热带雨林改为草原, 地表空气温度和土壤湿度变化幅度为 $4 \sim 5^\circ\text{C}$, 降水异常近 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm/d}$ 。

第二代模式通过引入植被层使能量收支和水量平衡的过程更合理。但植被生态系统除生物物理过程外, 还包括物质吸收、同化、分解等生理生化过程, 而且 SVAT 中明显地有生物地球化学循环过程, 这些过程的机理性更强, 而且产生不同系统的耦合。所以第二代模式有待进一步发展。

3. 第三代模式

20 世纪 80 年代末到 90 年代初, 由于对全球变化的普遍关注, 第三代模式得以迅速发展。首先发展的生物化学机理模型, 系统模拟了植物的光合生理过程, 建立了 CO_2 同化、气孔传导、蒸腾蒸发和光合作用等耦合过程。这在 Sellers 等 (1996b) 的 SiB₂ 模式中最为明显, Sellers 等吸取了 Farquhar 等 (1980) 和 Collatz 等 (1991) 对 C₃、C₄