

# 气候变化对内蒙古温带草原的 影响及其响应

李晓兵 等著



科学出版社

# 气候变化对内蒙古温带草原的 影响及其响应

李晓兵 等 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

气候变化对陆地生态系统的影响及其响应一直是全球变化研究的焦点之一。本书总结了植被对全球变化响应的国内外研究进展,在分析内蒙古草原地区气候变化趋势的基础上,利用多源遥感影像结合地面观测,模拟了内蒙古温带草原植被盖度、净初级生产力、植被生长季、蒸散量、地表反射率和地表温变等诸植被与环境参数,并建立其变化过程;探讨了它们与气候的关系或与地表覆盖状况的关系。最后分析了气候对草原的综合影响,得出草原对气候变化的响应结论。

本书可供生态学、地学、资源与环境管理等领域中的科研人员、管理工作者和在校本科生、研究生阅读、参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气候变化对内蒙古温带草原的影响及其响应 / 李晓兵等 著. —北京:科学出版社, 2011

ISBN 978-7-03-030266-3

I. ①气… II. ①李… III. ①气候变化 - 影响 - 草地 - 植被 - 研究 - 内蒙古 IV. ①S812.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 021931 号

责任编辑:彭胜潮 赵 冰 / 责任校对:李 影

责任印制:钱玉芬 / 封面设计:王 浩

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

2011 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 3 月第一次印刷 印张:17 1/4 插页:18

印数:1—1 000 字数:397 000

定价:68.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

全球气候变暖对全球许多地区的自然生态系统已经产生了影响,如生长季节延长、动植物分布范围向极区和高海拔区延伸、某些动植物数量减少、一些植物开花期提前等。自然生态系统由于适应能力有限,容易受到严重的,甚至不可恢复的破坏。气候变化已经并将继续地改变植被的组成、结构及生物量。因此,全球变化研究是地学、生态学的前沿和热点,其核心问题之一是探讨人类活动引起的全球变化对人类赖以生存的陆地生态系统的作用及其响应,其中气候变化对陆地生态系统的影响及其响应一直是研究的焦点之一,这方面的研究也成为全球变化研究中最活跃的方向之一。

草原是地球上主要的生物群落之一,覆盖了陆地表面近 1/5 的区域,在全球变化研究领域占据非常重要的地位。内蒙古草原是欧亚大陆草原的重要组成部分,是我国北方温带草原中最具代表性的植被类型,由于地处干旱半干旱地区,区域环境脆弱、易变、降水波动明显、对全球变化敏感,是研究植被对全球气候变化响应的典型区域。该地区也是我国重要的畜牧业基地,由于不同类型草原的空间分布受气温和降水模式控制,气温的升高将改变生态系统中的蒸散、分解和光合作用等生态过程,对生物群落的生产力将产生显著影响,并且存在大面积退化草地的内蒙古草原对极端气候事件的抵抗能力变得更弱,存在极为敏感的气候脆弱性。在全球气候变化影响下,研究内蒙古温带草原变化及其对气候的响应,有助于了解草原生态系统主要变化过程,深入理解影响草原变化的关键因子,对评价内蒙古地区草原生态系统的环境质量、调节生态过程具有极其重要的意义,对区域草地资源的保育和利用及可持续发展有重要的指导作用。

遥感影像在大区域上监测气候变化与生态系统变化的相互关系具有很大的优势。传统的野外实地调查周期长且费时费力,所得到的资料也只是基于气象站点或者某些研究点的数据,难以在大区域内详尽地反映植被信息。遥感具有覆盖面广、时间规律性强、周期短等特点,适合于进行大尺度上气候与植被关系的研究。同时,与地面调查相比,利用遥感技术研究气候与植被的关系,速度要快得多,地理意义上的精度也高得多。因此,遥感影像自 20 世纪 80 年代起得到了广泛应用,可以提供极有价值的区域、大洲及全球植被研究的重要数据源,使得在较大尺度上研究气候变化对植被的影响有了长足的发展。地球大部分地区被自然植被所覆盖,而植被是连接大气圈、土壤圈、水圈的纽带,气候的变化会反映在植被的覆盖度、第一性净生产力(NPP)、生物量、叶面积指数等参数上,引起参数值的变化。植被在全球变化研究中起着“指示器”的作用,对植被的动态监测可以在一定程度上反映气候的变化,揭示全球气候变化的规律。因此,在植被动态监测研究中,可以通过对地表植被覆盖的研究来揭示气候变化与陆地生态系统的关系。

长期以来,笔者在内蒙古草原开展了大量的野外测量工作,利用遥感(RS)、地理信息

系统(GIS)和全球定位系统(GPS)技术,结合野外测量数据,对内蒙古草原进行了长时间序列的动态变化监测:利用遥感数据进行大尺度植被宏观分类和小尺度的土地利用/覆盖分类及其变化规律研究、多尺度遥感综合研究植被盖度、草原生长季变化规律、草原生产力变化及其对气候的响应、土地利用变化与生态安全评价等。笔者总结了多年积累的内蒙古草原生态系统对气候变化影响的研究成果,作为本书的核心内容,在以前研究的基础上,对研究成果加以丰富和扩展。全书内容共分为7章:第1章,总结了植被对全球变化响应的国内外研究进展,系统地描述了植被盖度、草原生产力、生长季变化、陆面蒸散量各地表参数的研究模型和方法及气候变化对植被综合影响;第2章,利用降水量、气温和太阳辐射数据,深入分析了内蒙古气候变化趋势;第3章,发展了野外利用数码相机测量植被盖度的新方法,采用地表实测和多尺度遥感综合测量的方法测量植被盖度,建立基于地表实测与多尺度遥感数据综合测量的植被盖度尺度转换模型,分析了内蒙古温带草原区植被盖度变化与气候变化的关系;第4章,利用改进的光能利用率模型,估算了内蒙古草原NPP,分析了该时段内NPP的时空格局,在年、季节和月三个时间尺度上,分析了NPP与气候变化之间的关系;第5章,对草原生长季进行了动态监测,分析了草原生长季的时间变化趋势和空间变化格局,探讨了生长季与气候之间的关系;第6章,估算了草原地表反射率、地表温度和蒸散量,并深入分析了蒸散量和各地表参数及气候变化之间的关系;第7章,对草原和气候参量之间的关系进行深入研究,分析气候对植被的综合影响。

由于气候变化对植被的影响研究受到理论不完善、研究方法和模型应用的局限性、研究手段不足、数据缺乏或精度不高等方面的限制,许多研究成果需要进一步论证和深入分析。随着研究技术的革新和发展,草原生态系统对全球变化影响和响应研究的不断深入,必将对全球变化响应的理论体系和研究成果起到积极的推动作用。

在本书撰写过程中,参与编写人员的分工如下:第1章,张云霞、李霞、王宏、余弘婧、张立、李超、魏丹丹、李晓兵;第2章,黄玲梅、包云;第3章,张云霞、李晓兵、许旭、梁燕;第4章,龙慧灵、张程;第5章,王宏、李晓兵;第6章,余弘婧、李晓兵、魏丹丹;第7章,李霞、李晓兵、盖永芹、王宏。全书由李晓兵、王宏审校与定稿。

本书的部分内容已经以论文的形式正式发表,或属于笔者指导的研究生的学位论文内容。在此,对他们的贡献表示感谢。此外,还要感谢史培军教授对此项工作的大力支持和悉心指导。在此书完成之际,还要表达对已故导师李博院士的怀念之情,是他把我带入内蒙古草原区的生态学、地理学研究领域。本书是在多年来笔者执行的国家自然科学基金“41030535”、“30970513”、“30370265”等几个项目的研究成果基础上总结而成,并得到了教育部科学技术研究重点项目“108020”和国家高技术研究发展计划(“863”)“2006AA120108”项目的资助。

由于笔者在全球变化对草原生态系统影响与响应的研究方面仍处于不断探索阶段,研究成果中,难免存在不妥之处,敬请不吝批评指正。



2010年12月于北京师范大学

# 目 录

## 前言

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第 1 章 研究背景                  | 1   |
| 1.1 研究背景和意义                 | 1   |
| 1.2 国内外研究进展                 | 5   |
| 1.2.1 植被盖度的测量及其与气候关系研究进展    | 5   |
| 1.2.2 NPP 的测量与模拟及其与气候关系研究进展 | 16  |
| 1.2.3 生长季的监测及其与气候关系研究进展     | 21  |
| 1.2.4 蒸散量的监测及其与气候关系研究进展     | 33  |
| 1.2.5 气候变化对植被 NDVI 影响的研究进展  | 43  |
| 参考文献                        | 47  |
| 第 2 章 内蒙古气候变化诊断             | 60  |
| 2.1 数据来源和分析方法               | 60  |
| 2.2 内蒙古降水时空变化特征分析           | 63  |
| 2.2.1 降水时间变化特征              | 63  |
| 2.2.2 降水空间分布特征              | 69  |
| 2.3 内蒙古气温时空变化特征分析           | 78  |
| 2.3.1 气温时间变化特征              | 78  |
| 2.3.2 气温空间分布特征              | 84  |
| 2.4 内蒙古典型区域太阳辐射变化特征分析       | 88  |
| 2.5 小结与讨论                   | 91  |
| 参考文献                        | 93  |
| 第 3 章 温带草原植被盖度的遥感监测及其与气候的关系 | 94  |
| 3.1 地面实测植被盖度                | 94  |
| 3.2 基于遥感影像估测植被盖度            | 106 |
| 3.2.1 遥感数据获取与预处理            | 106 |
| 3.2.2 基于遥感数据的两阶段植被盖度经验模型的建立 | 111 |
| 3.3 温带草原植被盖度与气候之间的关系        | 130 |
| 3.3.1 研究区和数据                | 130 |
| 3.3.2 结果与分析                 | 133 |
| 3.4 小结与讨论                   | 139 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 参考文献                                     | 141 |
| <b>第4章 温带草原生产力的遥感监测及其与气候的关系</b>          | 143 |
| 4.1 净初级生产力遥感估算方法                         | 143 |
| 4.1.1 NPP 的遥感估算                          | 143 |
| 4.1.2 NPP 的遥感估算结果验证                      | 145 |
| 4.2 草原生态系统净初级生产力的时空格局                    | 146 |
| 4.2.1 NPP 的时间变化特征                        | 146 |
| 4.2.2 NPP 的空间变化特征                        | 152 |
| 4.2.3 不同类型草原区 NPP 的分布及变化趋势               | 154 |
| 4.3 草原生态系统净初级生产力与气候的关系                   | 156 |
| 4.3.1 NPP 与气候因子的关系                       | 156 |
| 4.3.2 NPP 与气候因子的时滞效应                     | 161 |
| 4.4 小结与讨论                                | 175 |
| 参考文献                                     | 177 |
| <b>第5章 温带草原生长季变化及其与气候的关系</b>             | 179 |
| 5.1 数据来源及预处理方法                           | 179 |
| 5.1.1 数据来源                               | 179 |
| 5.1.2 数据处理                               | 179 |
| 5.2 不同草原类型的生长季动态监测                       | 181 |
| 5.2.1 植被生长季的先验知识                         | 181 |
| 5.2.2 不同草原类型的生长季遥感动态监测                   | 182 |
| 5.3 温带草原生长季时空变异规律                        | 188 |
| 5.4 温带草原生长季的变化与降水、温度的关系                  | 194 |
| 5.4.1 数据处理和分析方法                          | 194 |
| 5.4.2 不同草原类型生长季与气候变化的关系                  | 195 |
| 5.4.3 草原植被生长季与气候变化的空间关系                  | 199 |
| 5.5 小结和讨论                                | 201 |
| 参考文献                                     | 201 |
| <b>第6章 地表反射率、地表温度、蒸散量变化与地表覆盖及气候变化的关系</b> | 203 |
| 6.1 数据采集与预处理                             | 203 |
| 6.2 基于 SEBAL 模型的蒸散量计算及其空间差异分析            | 207 |
| 6.2.1 SEBAL 模型                           | 207 |
| 6.2.2 数据处理                               | 208 |
| 6.3 地表反照率、地表温度和蒸散量与地表覆盖的关系研究             | 220 |
| 6.4 内蒙古温带草原陆面蒸散量与气候因子的关系分析               | 226 |
| 6.5 小结与讨论                                | 231 |
| 参考文献                                     | 233 |

|                                          |     |
|------------------------------------------|-----|
| 第 7 章 气候变化对温带草原生态系统的综合影响·····            | 235 |
| 7.1 数据来源、预处理及综合数据平台构建·····               | 235 |
| 7.1.1 数据来源 ·····                         | 235 |
| 7.1.2 综合数据平台构建及数据处理 ·····                | 235 |
| 7.2 气候变化对温带草原生态系统 NDVI 的影响 ·····         | 241 |
| 7.2.1 温带草原生态系统 NDVI 动态变化 ·····           | 241 |
| 7.2.2 温带草原 NDVI 与气象因子的相关、偏相关、复相关分析 ····· | 243 |
| 7.3 草原生态系统 NDVI 与气象因子时滞分析 ·····          | 247 |
| 7.3.1 草原生态系统 NDVI 与气象因子空间时滞分析·····       | 247 |
| 7.3.2 基于气象站点的草原生态系统 NDVI 与气象因子时滞分析 ····· | 247 |
| 7.3.3 草原生态系统对气候变化的敏感区 ·····              | 256 |
| 7.4 草原生态系统对气候干旱的响应 ·····                 | 257 |
| 7.4.1 分析方法 ·····                         | 258 |
| 7.4.2 结果分析 ·····                         | 260 |
| 7.5 小结和讨论 ·····                          | 266 |
| 参考文献·····                                | 267 |

彩图



# 第1章 研究背景

本章介绍了植被对气候变化响应的研究背景和意义,详细描述了实地和基于遥感测量植被盖度、净第一性生产力(net primary production, NPP)、植被生长季和陆面蒸散的方法和模型,并综述了植被盖度、NPP、植被生长季和陆面蒸散与气候变化关系及气候变化对植被影响的国内外研究进展。

## 1.1 研究背景和意义

日益加剧的人类活动使大气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  等温室气体的含量大幅度上升,自工业革命以来的 200 多年,它们分别增加了约 30%、145% 和 15%,其结果是对气候产生正的辐射强迫,导致地表增暖和其他气候变化(张志强和孙成权,1999)。植被作为生态系统的主要组分,是生态系统存在的基础,也是联结土壤、大气和水分的自然“纽带”,它在陆地表面的能量交换过程、生物地球化学循环过程和水文循环过程中扮演着重要的角色,不仅在全球物质与能量循环中起着重要作用,而且在调节全球碳平衡、减缓大气中的  $\text{CO}_2$  等温室气体浓度上升以及维护全球气候稳定等方面具有不可替代的作用,既是气候变化的承受者,同时又对气候变化产生积极的反馈作用,在全球变化研究中充当着“指示器”的作用。为了加强对环境过程的了解,必须对地表的生物和物理特征进行测量,将这些测量值提供给水文、气象、生态和其他模型(Purevdorj et al., 1998; 张炜银等, 2001; 方修琦和余卫红, 2002)。植被-气候相互作用是国际地圈-生物圈计划(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)的核心内容之一。陆地生态系统的变化研究主要集中在全球变化对植物的影响(生态系统的生理学)、对生态系统结构与功能的影响以及气候-植被相互作用的微观至宏观范畴(张志强和孙成权, 1999)。植被对于全球变化的响应应具有显著的地域分异并表现出不同的时间尺度。因此,植被对全球变化响应越来越受到关注(Cramer and Leemans, 1993)。

目前,气候变化对植物个体的影响主要以生理生态学的实验研究为基础。气候变化导致的陆地生态系统的变化出现在斑块、景观和区域尺度上(张新时等, 1997)。关于气候变化对陆地生态系统影响的研究大多集中于气候变化对净第一性生产力、植被分布的影响等几个方面,而近年来气候变化对植被盖度和生长季等影响也受到诸学者的重视。

利用遥感影像在大区域上监测气候变化与生态系统变化的相互关系具有很大的优势。传统的野外实地调查周期长且费时费力,所得到的资料也只是基于气象站点或者某些研究点的数据,难以在大区域内详尽地反映植被信息。遥感具有覆盖面广、时间规律性强、周期短的特点,适合于进行大尺度上气候与植被关系的研究,同时,与地面调查相比,利用遥感技术研究气候与植被的关系,速度要快得多,地理意义上的精度也高得多。当

然,从遥感影像中获得的地表植被的信息也需要地面观测信息的验证。遥感影像自 20 世纪 80 年代起得到了广泛应用,使得在较大尺度上研究气候变化对植被的影响有了长足的发展。NOAA/AVHRR(National Oceanic and Atmospheric Administration/advanced very high resolution radiometer)的数据具有周期短、覆盖范围广、成本低、波段宽等优点,已被证明是极有价值的区域、大洲及全球植被研究的重要数据源,在大、中尺度植被区域分布及动态变化研究中具有很大优势(李晓兵等, 2002)。

植被指数是遥感中最具明确意义的指数之一。归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)是基于植物叶肉结构反射近红外光线,以及叶绿素及其他色素吸收可见光的红光,通过红光与近红外波段的线性组合实现对植被信息状态的表达的植被指数。由于 NDVI 能够在大尺度上相当精确地反映植被的绿度和光合作用强度,较好地反映植被的代谢强度及其季节性变化和年际变化,因而该指数被广泛地运用于植被的监测、分类、物候分析、农作物估产(方修琦和余卫红, 2002)。应用 NDVI 数据集来研究宏观区域植被和气候的关系在国内外已有大量研究(Braswell et al., 1997; Richard and Pocard, 1998; Li et al., 2002; Ichii et al., 2002; Wang et al., 2003; 齐晔, 1999; 李晓兵等, 2000, 2002; 朴世龙和方精云, 2003)。利用 NDVI 研究气候和植被的关系的意义在于:由于现有遥感数据积累的时间较短,通过研究气象因子和 NDVI 的关系,基于气候变量实现对 NDVI 所表示的植被绿度信息的预测,反演过去或模拟未来地表植被状况及其动态变化的过程。

## 1. 植被盖度

植被盖度定义为观测区域内植被垂直投影面积占地表面积的百分比。它是刻画陆地表面植被数量的一个重要参数,也是指示生态系统变化的重要指标。在考察土壤水分蒸发和植物蒸腾总量以及光合作用的过程时,植被盖度都是作为一个重要的控制因子而存在。植被盖度也是影响沉积物侵蚀和增长机理的重要因子,而大面积草地植被盖度的测量对评估草地状况、土地退化和沙漠化有重要意义,在全球和区域变化监测的很多研究中都要用到定量化的植被盖度信息(Purevdorj et al., 1998)。

遥感影像以不同的时空分辨率记录了地表的覆盖特征。遥感影像的空间分辨率限制了遥感对地观测的最小单元。地理环境特征监测的基本时空尺度的适宜性对遥感提出了多分辨率的需求,同时,不同的全球变化模型对土地覆盖类型、空间分布特征需求的尺度也不同。因此,作为模型重要参数的土地覆盖特征的多分辨率遥感监测对满足不同模型的需求以及对利用实测数据进行尺度转换研究非常重要(Peter and Paul, 1997)。

多年来,尺度效应的问题一直被研究人类活动的空间特征、地球表面物理过程的科学家们所重视(Marceau and Hay, 1999)。特别是近年来,人类活动对全球变化的影响越来越深刻,全球尺度和区域尺度的研究越来越受到重视。空间数据的尺度转换已经被广泛地应用在从局部到区域甚至全球尺度的环境分析和建模(Ling and Rachael, 1999)。人类在空间和时间多尺度上对生态环境造成诸多影响,因此,在陆地生态系统

研究中需要建立从长期地面观测网络到卫星对全球地表观测系统,从每小时的日照变化到年际的净生物量变化监测甚至利用模型的长期预测,均需要对这些不同时间和空间尺度的数据进行有机的整合(Marceau and Hay, 1999)。在地学和生态学研究,研究尺度效应需要解答的问题主要包括:①在哪种尺度上,可以正确地表达特定的地理现象;②如何有效地将数据和信息从一种尺度转换为另一种尺度;③原始数据和信息经过尺度转换后,会出现何种信息的损失或效应,即不同尺度的数据反映相同的地物和现象时的差异如何。

## 2. NPP

自然植被的净第一性生产力是指绿色植物在单位面积和时间内所累积的有机物的数量,是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后剩余的部分,包括植物的枝叶和根等生产量及植物枯落部分的数量。NPP 代表从空气中进入植被的纯碳量,是表示植被活动的关键变量,是生态系统结构和功能的体现,可以反映植被结构和功能的变化(Kimmins, 1986)。作为植物自身生物学特性与外界环境因子相互作用的结果,NPP 同时也是表征陆地生态系统过程的关键参数,对理解地表碳循环过程有很重要的作用,是估算地球支持能力和评价陆地生态系统可持续发展的一个重要生态指标(Fang et al., 2000)。NPP 的空间格局会因人为因素造成的气候变化、CO<sub>2</sub> 浓度升高等发生变化,了解 NPP 空间格局的变化,评估它对全球环境变化的敏感性是估算陆地生态系统对全球环境变化反馈作用重要的第一步(Jiang et al., 1999)。因此,植被的 NPP 研究也成为国际地圈-生物圈计划、全球变化与陆地生态系统(global change and terrestrial ecosystem, GCTE)和《京都议定书》(Kyoto Protocol)等的核心内容之一。

## 3. 植被生长季

随着全球气候变暖,物候正在发生变化,许多植物通过改变与春天的到来和秋天的开始相关的同步活动以适应变暖而带来更长的生长季。物候变化不仅是生物圈对气候变暖响应的敏感且容易观察到的指示器,而且也会产生多方面的影响,如生态学方面(方修琦和余卫红,2002)。因此,植物物候现象的发生日期和生长季节长度的波动,在诊断生物的生长发育周期对气候季节和年际变化的适应与调整方面,具有其他生物变量无法替代的作用。

在季节和年际尺度上,植被物候事件,如发芽、开花、展叶、叶变色、落叶等,用来作为植被对气候变化响应的生态指示器(Shigehara, 1991)。因为,植被物候现象可以客观地描述陆地植被的季节性生长,所以,植被物候现象发生的日期能够表明生长季的开始和结束。此外,北半球大气中 CO<sub>2</sub> 的浓度冬天升高而夏天降低,主要是对陆地植被的季节性生长的响应(D'Arrigo et al., 1987)。物候生长季已成为全球陆地碳循环建模和净第一性生产力建模的重要参数。因此,植被物候现象发生的日期和生长季是评价季节和年际气候变化对陆地植被的影响及植被在季节 CO<sub>2</sub> 循环中作用的主要状态变量(Chen et al., 2001)。

在最近几年里,大尺度的植被生长季监测已经成为全球气候变化研究中的一个重

要科学问题(Myneni et al., 1997)。对于一些植物来说,为了适应气候变化、干湿的周期性变化,有效地利用水热条件,顺利完成季节性生长和一系列的活动,必须调整休眠期和生长期。因为,适应和调整能力有一定的限度和时滞性,当气候变化干扰了这种协调时,植被或提前发芽、展叶、开花,从而其抵御春季冻害能力下降,增加受害的概率,或推迟发芽、展叶、开花,从而使其不能充分利用生长季内的光、热、水资源。两种情况都会对多年的生物量产生直接的影响。当这种生活周期失调超过一定的阈值后,可能会导致植物物种的迁移和群落组成发生改变。因此,揭示植物生长季节对气候变化响应的机理和限度,对于诊断和鉴定植被较长时间尺度的演变趋势具有生态预警意义。

植被生态学研究表明,气候的季节变化是控制植被季节生长特征的一个重要因素(《中国植被》编写委员会, 1980)。在传统生态研究中,在区域尺度乃至全球尺度上,关于植被生长季节变化对气候响应,缺少定量的认识(温刚和符淙斌, 2000)。而卫星遥感数据提供了植被的许多特征信息,如季节性信息、植被光合能力的信息等,该数据可以进行长时间地积累,因此,还可以提供植被覆盖变化信息(史培军等, 2000)。因此,借助卫星遥感技术,通过卫星遥感获得的结果是以定量化的数据反映区域尺度以及全球尺度上植被的生态特征(温刚和符淙斌, 2000)。

#### 4. 陆面蒸散量

陆面蒸散既是地表热量平衡的组成部分,也是水量平衡的组成部分,在全球尺度上蒸散量可达降水总量 60% 以上。热量、水分收支状况在很大程度上决定着天气、气候的变化,进而决定地理环境的形成和演变、蒸散与气孔导度、碳交换与植物冠层水分利用效率的耦联,陆面蒸散成为生态系统的关键控制器(Woodward and Smith, 1994; Sellers et al., 1996a),陆地覆被的大面积变化造成蒸散量的减少,可能减弱水循环中降水和径流的再循环过程(Durbridge and Henderson-Sellers, 1993; Sellers et al., 1996a),作为陆面过程中地气相互作用的重要过程之一,蒸散信息在全球气候变化的认识和研究中的重要性日益得到重视,对陆面蒸散量的研究,一直是国内外地学、水文学关心的焦点问题之一(马耀明和王介民, 1997)。

土地覆盖特点对气候、全球生物地球化学循环、陆地生物种类的丰度和组成有重要的影响。自然与人工复合系统的不同类型生态系统,如城市生态系统、农田生态系统、森林生态系统、草地生态系统等,其生态系统内的小气候存在着差异(杜占池和杨宗贵, 1995; 董学军等, 1997; 台培东等, 2000; 张喜英等, 2000)。地表的特征(如粗糙度、反射率和影响水热通量的其他性质)改变着海洋驱动的大气环流的基本格局,并使区域和局地的气候和天气复杂化。气候研究者在土地利用对气候影响研究上已经做了长期的工作。土地利用/覆盖变化通过对下垫面性质,如地表反射率、粗糙度、植被叶面积等的改变,导致温度、湿度、风和降水等发生变化,因此,它是引起局地与区域气候变化的重要因素(Hungate, 1997)。全球变化将对陆地生态系统产生严重影响,而陆地生态系统的改变又将反馈于全球变化。不同的植被类型通过改变地表反射率、蒸发散、地表粗糙度等影响植被与大气之间的物质(如水和  $\text{CO}_2$ ) 和能量(如太阳辐射、动量和热量等)交换来影响气

候,改变的气候又通过大气与植被之间的物质和能量的交换作用对植被的生长产生影响(周广胜等, 2004)。陆面蒸散作为反映土地利用/覆盖变化所引起地表水热变化的敏感因子,在陆地生态系统变化对气候反馈影响研究中有着重要的意义,也是当今全球变化研究的焦点之一(Avissar, 1998)。

另外,在全球水资源日益匮乏的情况下,为了合理利用和分配水资源,愈加需要深入了解不同植被覆盖和土地利用条件下的耗水情况,在大气环流模式(GCM<sub>s</sub>)对全球气候变化的预测以及数值天气预报中,蒸发信息作为系统主要陆面过程和边界条件,对改善和提高预测结果至关重要。在水文和农业中,地表蒸发和植被蒸腾的准确数据对水资源动态监测和精准农业的实施都会产生巨大的经济、社会和生态效益。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 植被盖度的测量及其与气候关系研究进展

1. 植被盖度的测量方法

目前,测量植被盖度的方法可分为地表实测和遥感测量两类。

1) 地表实测植被盖度

地表实测是测量草地植被盖度的传统方法。按原理可将地表实测的方法分为三类:采样法、仪器法和目视估测法(表 1-1)。

表 1-1 地表实测草地植被盖度的方法

| 类别     | 原理                                          | 子类别   | 定义                                                         | 优缺点                                    |
|--------|---------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. 采样法 | 对选定的地块,按一定的方法等距不连续采样,其中出现植被的样数占总样数的比值即为植被盖度 | ① 样带法 | 在研究地拉一根实际的样带线,测量植物个体接触样带线的长度,该长度与样带线的总长度之比即为植被盖度           | 对于稀疏植被和高大植被,该方法较适宜,但对于密闭和交错分布的植被则不适宜   |
|        |                                             | ② 样点法 | 样点法通常用样针来完成:将一根根样针在植被中垂直投下,记录植物枝叶被样针击中的数目,该数目与总样针数之比即为植被盖度 | 适宜测量矮生植被中禾草、杂类草以及苔藓等的盖度;测量结果更准确,但费时、费力 |
| 2. 仪器法 | 利用传感器测量光通过植被层的状况计算盖度                        | ① 照相法 | 传统照相法是指垂直于植被拍照,从照片中解译植被类型,求取植被盖度                           | 传统照相法测得的结果虽然较为精确,但处理工作繁琐               |

续表

| 类别      | 原理                                          | 子类别                                            | 定义 | 优缺点                                              |
|---------|---------------------------------------------|------------------------------------------------|----|--------------------------------------------------|
|         |                                             | ② 空间定量计法<br>( spatial quantum<br>sensor, SQS)  |    | TQS 和 SQS 方法都要<br>求有专用的传感器设<br>备,在野外操作起来很<br>不方便 |
|         |                                             | ③ 动光量计法<br>(traversing quantum<br>sensor, TQS) |    |                                                  |
| 3. 目视估测 | 预先选定一定面积<br>大小的样方,凭经<br>验判断样方内植被<br>覆盖所占的比例 |                                                |    | 简单易行,但主观随意<br>性大                                 |

注: I. 样带法中常见的有正方形视点框架法和尺测法。正方形视点框架是由两根上下对齐,等距开 10 个小孔的水平杆组成,测量者从上往下看,观察到出现茎叶部分的小孔占小孔总数的百分比即为植被盖度;尺测法是指把一根长 1m,标有刻度的杆放置在地表面,平行于作物行距方向,每隔 5cm 向前移动,分别读取杆上的阴影长度,总阴影长度与杆总长度之比即为植被盖度。该方法一般要求在正午时测量(章文波等, 2001)。

II. 用样针法确定植被盖度比用肉眼从样方中估测有更坚实的理论基础。在草地研究中尤其有用,但该方法速度比较慢。另外,所研究的植被不能高于样针,所以对于某些植被类型,样点法不太现实。

III. 解译照片的方法包括数字化法、网格法和信息提取法等。其中,网格法是指在透明方格纸上以植被覆盖占的方格数与总方格数之比来反映植被盖度的大小。信息提取法是利用照片上的 RGB 值,通过特定的阈值设定提取植被信息。

IV. 在目视估测法中常用的是网格估测法,即在样地内设置由相邻基本格子组成的样方,基本格子的大小依群落类型和研究目的而定。一般,草本群落可取 0.1m×0.1m。使用网格样方估测植被盖度通常比在整个研究地区估测更容易、更迅速,在小样方中测定盖度出现误差的机会也小(Sutherland, 1999)。

资料来源:根据章文波等(2001)进行了修改

地表实测的方法在地表植被调查中发挥着非常重要的作用,一直被广泛使用。例如,对于低植被盖度的区域,土壤的反射率常常会给植被生态属性的遥感定量化带来难以预料的误差,因此,植被生态属性的地面测量是非常重要的,它可以为卫星数据的解译和定量化提供一个背景(Zhou et al. , 1998)。但是,地表实测的缺点也非常明显,它在时间和金钱上的花费都比较大,并且,只能在很小的尺度范围内提供植被结构和分布状况的变化信息。这种传统的方法显然不适合刻画大面积区域的植被变化情况。另外,一些地表实测植被盖度的方法的可靠性也受到怀疑。Wilson 等详细讨论了各种地表实测方法的局限性(Wilson et al. , 1987)。Curran 和 Williamson 研究了地表实测植被盖度,样方的大小对测量结果的影响。研究证明,样方尺寸也是影响测量精度的一个重要因素。另外,该研究指出,一些地面测量方法得出的结果的差异性之大使得后来处理的遥感数据的说服力及准确性大大降低(Curran and Williamson, 1986)。

基于以上研究不难看出,地表实测的方法由于受到其自身局限性的影响,不适宜作为一种独立的测量方法在较大的空间尺度上进行植被盖度的研究。它必须与遥感数据相结

合,才能真正发挥其作用。

## 2) 遥感测量植被盖度

不同的遥感平台和传感器所获得图像的空间分辨率、光谱分辨率和时相特征各不相同。从空间分辨率来看,卫星遥感既提供了在景观尺度上刻画植被覆盖变化模式的手段,也提供了反映小区域详细信息的手段;从光谱分辨率来看,它提供了从可见光到近红外、中红外的信息;从时相特征来看,它可以反映植被覆盖的时空分异特性。

### A. 利用遥感数据测量草地植被盖度常用的方法

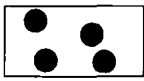
从人们目前利用遥感资料测量植被盖度的方法来看,大致可以归纳为三类,即经验模型法、植被指数法和亚像元分解法(表 1-2)。

表 1-2 遥感测量草地植被盖度常用的方法

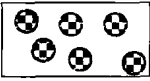
| 类别     | 定义                                              | 特点                                                            |
|--------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| 经验模型法  | 首先,建立地表实测数据与植被指数的经验模型,然后将该模型推广到大区域,求取植被盖度       | 对特定区域的地表实测数据具有依赖性,所以,仅仅当研究区是小区域时,测量结果具有一定的精度;当研究区较大时,精度就会大大降低 |
| 植被指数法  | 通过对各像元中植被类型及分布特征的分析,建立植被指数与植被盖度之间的转换关系来直接估算植被盖度 | 不依赖地表实测数据,但当研究区域较小时,其精度可能会低于经验模型法                             |
| 亚像元分解法 | 根据遥感影像像元的特点,分析亚像元结构的分布特征,针对不同的亚像元结构,建立不同的植被盖度模型 | 为大面积植被盖度的估算提供了一种有效的途径,基本能够满足生态及气候模型研究的要求(陈晋等, 2001)           |

相对于后两种方法,经验模型法使用的时间较长。植被指数法和亚像元分解法是近年被日益广泛使用的方法。亚像元分解法可看作是在植被指数法基础上所做的改进。Gutman 等提出的利用亚像元分解求取植被盖度的方法比较具有代表性。该方法根据不同亚像元的植被分布特征,将亚像元分为均一亚像元和混合亚像元,而混合亚像元又进一步分为等密度、非密度和混合密度亚像元。针对不同的亚像元结构,分别建立不同的植被盖度模型(Gutman and Ignatov, 1998)(表 1-3)。

表 1-3 植被的亚像元模型一览表

| 像元类型 | 植被的亚像元结构 | 图示                                                                                  | 定义                  | 植被盖度模型                                             |
|------|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------|
| 均一像元 | 全覆盖      |  | 指像元完全被一定厚度的植被覆盖     | $f_g = 1$                                          |
| 混合像元 | 高密度      |  | 像元中植被类型较为单一且垂直密度足够高 | $f_g = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_{\infty} - NDVI_0)$ |

续表

| 像元类型 | 植被的亚像元结构 | 图示                                                                                | 定义                          | 植被盖度模型                                                            |
|------|----------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|
|      | 低密度      |  | 像元中植被类型较为单一且垂直密度较小          | $f_g = (NDVI - NDVI_0) / (NDVI_g - NDVI_0)$                       |
|      | 混合密度     |  | 像元中植被含有多种植被类型,并且它们的垂直密度多种多样 | $\Sigma f_{gi} = \Sigma [(NDVI - NDVI_0) / (NDVI_{gi} - NDVI_0)]$ |

注:  $f_g$  代表植被盖度;  $NDVI_0$  和  $NDVI_\infty$  对应于裸土 ( $LAI \rightarrow 0$ ) 和高垂直密度植被 ( $LAI \rightarrow \infty$ ) 的  $NDVI$  值。该表译自文献 (Gutman and Ignatov, 1998), 并根据文献 (陈晋等, 2001) 进行了修改。

在定量化测量植被盖度时,并不存在某一标准的方法。现存的模型都是使用不同的测量方法而建立的,而这些方法和模型都毫无例外地受到某些条件的限制,如地面实测数据的精度和遥感影像的分辨率等。

#### B. 利用遥感数据测量草地植被盖度常用的植被指数

$NDVI$  长期以来被用来监测植被的变化情况,它与植被的叶面积指数 ( $LAI$ )、盖度等都有很好的相关关系。然而,它常常会受到下面这些因素的影响:①定标和仪器特性;②云和云影;③由于可变的气溶胶、水汽和残存云产生的大气效应;④太阳目标传感器的几何结构及其产生的在与角度有关的信号方面地面和大气的各向异性的相互作用;⑤叶冠背景的污染,包括潮湿地面、雪、枯叶、粗糙度和土壤类型等因素。因此,需要对  $NDVI$  进行修正,以降低它对土壤背景及大气能见度的敏感性。大气阻抗植被指数 ( $ARVI$ ) 运用蓝光和红光反射率的线性组合补偿由于气溶胶光学厚度的增加带来的通道辐射的增加 (Kaufman and Tanre, 1992)。土壤调节植被指数 ( $SAVI$ ) 在红光和近红外之间加上了权重因子常数  $L$ ,以降低对土壤亮度变化的敏感性 (Huete, 1988)。修改型土壤调节植被指数 ( $MSAVI$ ) (Qi et al., 1994a) 用动态土壤调节因子取代了  $SAVI$  中的常量  $L$ 。大气土壤植被指数 ( $ASVI$ ) 是将  $ARVI$  和  $MSAVI$  的修正原理相结合产生的一个新植被指数 (Qi et al., 1994b)。全球环境监测指数 ( $GEMI$ ) 也是源于这种思想产生的,它同时降低了对大气能见度和土壤反射率的敏感性,增强了对植被的敏感性 (Pinty and Verstraete, 1992)。

Purevdorj 等以地面模拟的  $AVHRR$  数据为资料,运用经验模型法估测了蒙古国及日本草原区的植被盖度 ( $f_g$ ),得到了如下经验关系模型

$$f_g = -4.337 - 3.733 \times NDVI + 161.968 \times NDVI^2 \quad (1-1)$$

$$f_g = -22.634 + 180.38 \times SAVI - 15.928 \times SAVI^2 \quad (1-2)$$

$$f_g = 1.062 + 43.5442 \times TSAVI + 97.817 \times TSAVI^2 \quad (1-3)$$

$$f_g = -19.721 + 189.537 \times MSAVI - 42 \times MSAVI^2 \quad (1-4)$$

研究结果表明,上述这些模型适用于估测干旱和半干旱地区草地的植被盖度,并且通过在植被盖度和植被指数之间建立二次多项式关系,实现用  $AVHRR$  数据较准确地估测草地植被盖度。如果可以得到土壤线的特征值,用  $TSAVI$  得到的植被盖度最精确。如果



土壤线的特征值无法得到,草地覆盖的密度变化又较大时,NDVI 提供的植被盖度信息较准确。SAVI 则适宜用来估测稀疏草地的植被盖度(Purevdorj et al., 1998)。

Eastwood 等运用不同的植被指数估测盐沼地带的植被盖度,在植被盖度与不同的植被指数(ARVI、ASVI、GEMI、MSAVI、NDVI)之间建立一元线性关系。研究结果表明,MSAVI 和 GEMI 更适宜于盐沼植被盖度的估测(Eastwood et al., 1997)。

### C. 利用不同空间分辨率的遥感数据测量草地植被盖度的研究进展

从空间分辨率来看,目前用于测量植被盖度常用的传感器可以分为以下几类(表 1-4)。

表 1-4 测量植被盖度常用的遥感数据

| 空间分辨率分类    | 典型代表             | 空间分辨率                     | 波段数    | 特点                                  | 适用场合                      |
|------------|------------------|---------------------------|--------|-------------------------------------|---------------------------|
| 低空间<br>分辨率 | ① NOAA/<br>AVHRR | 1.1km                     | 5      | 具有较高的辐射分辨率和时间分辨率                    | 适用于在宏观区域上研究植被盖度的变化和进行动态监测 |
|            | ② MODIS          | 250 ~ 1000m               | 36     |                                     |                           |
| 中空间<br>分辨率 | ① TM             | 30m(除第 6 波段)              | 7      | 光谱分辨率由可见光                           | 适用于在区域、景观尺度上测量植被盖度        |
|            | ② MSS            | 80m                       | 4      | 到近红外、中红外,所成影像与实际地理空间最接近(周成虎等, 2001) |                           |
|            | ③ SPOT           | { 多光谱模式:20m<br>{ 全色模式:10m | 3<br>1 |                                     |                           |
| 高空间<br>分辨率 | 航空像片             | 亚米级                       |        | 机动性好,实效性高,目的性强                      | 适用于在较小空间尺度上获取地面覆盖的精确信息    |
|            | IKONOS           | { 多光谱模式:4m<br>{ 全色模式:1m   | 5      |                                     |                           |

#### a. 利用低空间分辨率的遥感数据测量草地植被盖度

大多数传感器都在光谱分辨率、空间和时间采样的方法方面受到制约,有很少的传感器能做到可重复刻画全球尺度和地区尺度上的生物圈的情况。在这一点上,NOAA/AVHRR 有它自己的优势,NOAA/AVHRR 具有较高的辐射分辨率,数据量化等级为 1024,温度分辨率为 1℃,并且时间分辨率极高,以上特征决定了它可以为大面积的草地测量提供一个良好的数据源,并且有可能为任何待研究的区域提供生长期内的无云层干扰的数据。在研究小到斑块大到全球范围的水体、能量、植被、土壤之间的相互作用时,AVHRR 数据可以发挥重要作用。目前,NOAA/AVHRR 卫星数据广泛用于宏观区域变化和持续发展的研究、及动态性很强的应急系统中(周成虎等, 2001)。

在全球尺度上,Gutman 和 Ignatov 运用亚像元分解法中的等密度模型估测了全球范围的植被盖度(Gutman and Ignatov, 1998)。Zeng Xunbin 等运用植被指数法,以 NDVI 为自变量估测全球植被盖度(Zeng et al., 2000)。研究得出的全球植被盖度的数据库与 Defries 等(1999)用更复杂的统计方法得出的数据库具有相似的空间分布,但数值整体上都偏小。

在区域尺度上,Wittich 和 Hansing 分别运用植被盖度与 NDVI 之间的线性关系模型