

内蒙古师范大学

硕士学位论文

基于MODIS数据的内蒙古陆地植被净第一性生产力遥感估算研究

姓名：包刚

申请学位级别：硕士

专业：地图学与地理信息系统

指导教师：包玉海

20090415

中文摘要

植被是陆地生物圈的主体。植被净第一性生产力 (Net Primary Productivity, 简称 NPP) 是指绿色植物在单位面积、单位时间内所累积的有机物数量^[2-3], 是光合作用所固定的有机碳总量和自养呼吸消耗量之差, 它不仅直接反映着植被群落在自然环境条件下的生产能力, 而且还反映植被通过光合作用对大气中 CO_2 的固定能力。因此 NPP 一直被认为是陆地生态系统碳循环和碳平衡的重要环节, 判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子和重要指标。内蒙古自治区位于我国北部边疆, 总面积约 118 万 km^2 , 草地资源丰富, 是我国面积最大的草原牧区。在过去的半个世纪中, 由于人类活动和自然灾害的双重影响, 致使该区草地严重退化, 植被迅速减少, 土地荒漠化, 水土流失加剧, 鼠虫灾害频发, 沙尘暴肆虐, 生态系统功能严重失调以及生产力不断下降等一系列重大环境问题日益突出, 已对本地区人类生存及其可持续发展和我国西部大开发战略的实施构成严重威胁。

本文以光能利用率模型 CASA 模型为基础, 利用 2002~2006 年间月最大值拟合的 MODIS/NDVI 数据、地面气象观测资料 (月均温度、月降水量、月太阳总辐射) 以及植被类型数据, 在地理信息系统的支持下, 对近五年生长季 (4~8 月份) 内蒙古陆地生态系统植被净第一性生产力进行了遥感估算和评估研究。得到了以下主要结论:

1、从近五年 (2002~2006 年间) 生长季 (4~8 月份) 内蒙古陆地生态系统植被平均净第一性生产力的空间分布格局来看, 内蒙古的陆地 NPP 是东高西底、北高南低, 自西南向东北 NPP 呈逐级递增的分布趋势, 这与该地区的水热条件和植被分布基本一致。NPP 最高值主要分布在东北大兴安岭、赤峰西部和南部部分落叶阔叶林地区 and 与它相邻的草原地区以及兴安盟北部林区, NPP 在 $450 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 以上。最低值主要分布在阿拉善盟隔壁和沙漠地区和水域区域, NPP 只有 $0\sim 50 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间, 并很多地区的值都接近 0。

2、从内蒙古陆地生态系统植被净第一性生产力的时间分布格局来看, 自 2002~2006 年近五年 (每年选用了 4~8 月份的 NPP 作为全年 NPP 进行分析) 以来, 生长季内积累的 NPP 总量总体上呈现出逐渐减少的趋势, 但减少速度并不明显, 属于短期波动。这主要可能与每年选用的 5 个月降水量有关, 2004、

2005 和 2006 年 5 个月总降水量明显低于 2002 和 2003 年, NPP 年际波动还受着其它很多各种自然和社会因素。每年 4 至 8 月份单位平均 NPP 基本在 $0\sim 751.72\text{ gC/m}^2/\text{yr}$ (单位应为 $\text{gC/m}^2/5\text{month}$, 但由于每年 5 各月的 NPP 来代表全年 NPP, 因此本文生产力单位将选用 $\text{gC/m}^2/\text{yr}$) 内波动, 2002~2006 年间, 全区平均 NPP 值在 $209.01\sim 257.32\text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间, NPP 总量在 $0.241\sim 0.296\text{ Pg C/yr}$ ($1\text{Pg}=10^{15}\text{g}$) 之间波动, 平均总量为 0.273 Pg C/yr 。其中, 2002 和 2003 年的 NPP 总量最高, 分别为 0.296 Pg C/yr 和 0.295Pg C/yr , 这两年 NPP 总量几乎相等, NPP 总量最低值出现在 2004 年, 为 0.241 Pg C/yr 。从月际变化来看, 4~7 月分的 NPP 的增长速度比较快, 7 月达到 NPP 的最高值, 8 月份的 NPP 较 7 月份低, 只有 7 和 8 月积累的 NPP 占年度 NPP 总量的 61.92%。

3、由不同植被类型的 NPP 来看, 单位平均 NPP 值最高的为落叶阔叶林, 达到了 $516.45\text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 其次是落叶针叶林, 为 $386.44\text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 接着是疏林、农业植被、灌丛等, 单位平均 NPP 都 $300\text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 以上, 常绿针叶林和草原的分别约为 $278.63\text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 和 $262.05\text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 平均值最小为荒漠, 只有 $52.43\text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 。虽然近五年单位平均 NPP 从森林、农业植被、草原到荒漠地区有减少趋势的空间分布, 但由于所覆盖的面积不同, NPP 总量最高的是草原 (面积最大), 为 $1.52\times 10^{14}\text{gC/yr}$, 占总量全区的 55.68%。整个森林生态系统 (落叶针叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和疏林) 的总量为 $6.03\times 10^{13}\text{gC/yr}$, 占总量的 22.09%。从不同植被类型 NPP 年际变化特征来看, 落叶针叶林和落叶阔叶林 NPP 有增长趋势, 常绿针叶林、疏林、草原、灌丛和农业植被均有减少趋势。

关键词: 内蒙古, NPP, CASA 模型, 时空格局

ABSTRACT

Vegetation cover is main body of the terrestrial biosphere. Net primary productivity (NPP) is defined as accumulative organic matters by green plants per unit of space and time. NPP not only reflect the plant community productivity directly for a certain natural environment but also fixing ability for CO_2 by photosynthesis. It is a key component of the terrestrial carbon cycle and the basis of matter and energy cycle of terrestrial ecosystem. So it is widely used indices of C cycling in terrestrial ecosystems at local, regional and global scales. Inner Mongolia autonomous region, Situated on China's northern frontier, is the largest pasturing area in China. And it covers an area of 1.18 million square km and has abundant grassland resources. But because of the human negative activity and natural disasters, Inner Mongolia have been enduring many environmental problems such as land degeneration, vegetation decreases, desertification, loses of soil and water, frequent sandstorm attack and reduces of productivity in the second half of last century. These have threatened the sustainable development of this area and country's developing strategy for western China.

Based on the CASA model and support of Geographic Information System, this paper studied the spatial and temporal dynamics of Inner Mongolian NPP for recent five years from 2002 to 2006 using MODIS/NDVI, ground meteorological data and classified vegetation data. From the study we can draw the some conclusions:

1. There are clearly strong regional variations in Inner Mongolian terrestrial vegetation NPP. It increased from southwest toward northeast and has accord with the precipitation distribution basically. Regions of higher productivity are found in the eastern Da Xing an ling mountain area, western and southern broadleaf forest area of Chifeng and northern forestry of Xing An Meng. These regions can reach above $450\text{gC/m}^2/\text{yr}$. whereas the western desert area of A la shan Meng and water body have very small NPP values, it only ranges from $0\text{—}50\text{gC/m}^2/\text{yr}$, and many parts of it are seem to be 0.

2. From this study, it can be drawn that from 2002 to 2006 (choose from April to August for each year), the terrestrial NPP of Inner Mongolia had a tendency to decrease. It is a short term fluctuation. This decrease may be caused by five month total precipitation. The precipitation of 2004, 2005 and 2006 (for five month) is

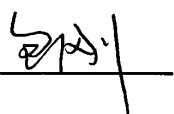
lower than that of 2002 and 2003 clearly. Of course many other natural and social factors are also changing NPP fluctuation. The accumulated NPP from April to August for each year ranges from 0 to $751.72\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ basically. NPP mean value ranges from 209.01 to $257.32\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$. The total NPP ranges from 0.241 to $0.296\text{Pg C}/\text{yr}$ ($1\text{Pg}=10^{15}\text{g}$), and the average value is $0.273\text{Pg C}/\text{yr}$. The maximum NPP value is in 2002 and 2003, is $0.296\text{Pg C}/\text{yr}$ and $0.295\text{Pg C}/\text{yr}$ respectively, the total NPP of these two years are seem to be like. And minimum is in 2004, the value is $0.241\text{Pg C}/\text{yr}$. For the monthly variation, the NPP increases rapidly from April to July, and it reached the maximum value in July. The quantity of NPP in July and August is about 61.92% of the total in five month.

3, For the NPP in different vegetation types, deciduous broadleaf forest has the highest NPP value as $516.45\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$, the secondly is deciduous coniferous forest with $386.44\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ and the thirdly are farmland, shrub and scattered forest region, the mean value is all above $300\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$. Evergreen coniferous forest and grassland are $278.63\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ and $262.05\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ respectively. And the minimum is the desert area with only $52.43\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$. However, grassland has the highest total NPP value because of its large area, it has $1.52\times 10^{14}\text{gC}/\text{yr}$ and occupy 55.68% of total NPP. Total NPP of the whole forest ecosystem is $6.03\times 10^{13}\text{g C}/\text{yr}$, and occupy 22.09% of total NPP. For the annual variation in the different vegetation types, NPP value of deciduous broadleaf forest and deciduous coniferous forest are increased, whereas evergreen coniferous forest, scattered forest, grassland, shrub and farmland are decreased. It may be caused by total precipitation

KEY WORDS: Inner Mongolia, NPP, CASA model, Spatial- temporal distribution

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果，尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含本人为获得内蒙古师范大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示感谢。

签名： 

日期： 年 月 日

关于论文使用授权的说明

本学位论文作者完全了解内蒙古师范大学有关保留、使用学位论文的规定：内蒙古师范大学有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文，并且本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

签名： 

导师签名： 

日期： 年 月 日

1. 绪 论

1.1 研究背景

植被是陆地生物圈的主体,它不仅在全球物质与能量循环中起着重要的作用,而且在调解全球碳平衡、减缓大气中二氧化碳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^[1]。植被净第一性生产力(Net Primary Productivity, 简称 NPP)是指绿色植物在单位面积上、在单位时间内所累积的有机物数量^[2-3],是光合作用所固定的有机碳总量和自养呼吸消耗量之差,它不仅直接反应着植被群落在自然环境条件下的生产能力,而且还反映植被通过光合作用对大气中 CO₂ 的固定能力。因此 NPP 一直被认为是陆地生态系统碳循环和碳平衡的重要环节,判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子和重要指标。由于十八世纪工业革命后,科学技术和现代化工业飞速发展,人类改造自然的作用越来越明显,同时也人类社会面临了新的环境问题。如全球变暖、臭氧层破坏、能源短缺、森林资源锐减、土地荒漠化、物种灭绝等众多方面。随着这些全球环境问题的日益突出以及对全球变化研究的不断深入,及时准确估算区域或全球尺度植被净第一性生产力并分析时空变化特征,理解它与各种控制因子之间的相互关系对了解全球碳循环,预测未来植被生产力的变化趋势及其对碳循环的影响具有十分重要的意义,同时对全球自然资源的合理开发和利用提供重要的科学依据。因此,植被净第一性生产力的研究已成为全球环境变化研究的热点问题之一,在全球和区域空间尺度植被净第一性生产力的估算和评价越来越受到世界各国科学家的关注。

内蒙古自治区位于我国的北部边疆,地域辽阔,东西跨 28 个经度,南北越 16 个纬度,总面积约 118 万 km²,占全国总面积的 12.13%,草地资源丰富,是我国面积最大的草原牧区。内蒙古草原处于全球面积最大的陆地生态系统欧亚大陆草原带的中部,是西北干旱区向东北湿润区和华北旱作农业区的过渡地带。自然条件的严酷性、气候的波动性以及社会和经济条件的复杂性使这一地区成为对全球变化响应的敏感带。在过去的半个世纪中,由于人类活动和自然灾害的双重影响,致使该区草地严重退化,植被迅速减少(甚至消失),土地荒漠化,水土流失加剧,鼠虫灾害频发,沙尘暴肆虐,生态系统功能严重失调以及生产力不断下降等一系列重大环境问题日益突出,已对本地区人类生存及其可持续发展和我国西部大开发战略的实施构成严重威胁。据专家研究表明,就我国沙尘天气主要起源于蒙古国南部~我国内蒙古中西部干旱荒漠地带,只有 2006 年春季出现的 18 次沙尘天气中,有 16 次

起源于蒙古国南部和我国内蒙古中西部干旱荒漠地带（彭继平，等，2008）。近年来，针对中国内蒙古和蒙古国（同属蒙古高原）上述众多环境问题，国内学者已对蒙古高原气候变化及影响因素（王菱，等，2008）、农牧业系统格局变化与影响因素（甄林，等，2008）、土壤风蚀（刘纪远，齐永青等，2008）、荒漠化和湿地调查（包玉海，等，2007）以及蒙古高原塔里亚特~锡林郭勒样带土壤风蚀及内蒙古风蚀危险度评价（师华定，2007）等方面进行开展研究。除此之外，内蒙古是我国北方的一道天然生态屏障，这里生态环境的好坏不仅关系到内蒙古各族人民的生存和发展，也对华北、东北和西北等“三北”地区的生态环境的保护和改善意义重大。因此有必要估算内蒙古地区的植被净第一性生产力，分析其时空分布规律并进行评价，将为内蒙古地区的资源环境监测提供重要依据。另外，为本地区自然资源的有效管理、开发和利用以及我国北方生态环境的保护，无疑将十分有意义。

传统的区域尺度陆地植被生产力估算做法是通过地面有限观测点的实测数据，根据区域每一种植被类型和对应类型的实测数据计算生产力平均值，然后乘以此类型的分布面积，得到此类型的总估计值，最后通过对各植被类型生产力总估计值进行计算总和得到区域植被生产力。这种地面观测方法不仅艰难而且非常昂贵。近 20 年来，遥感和 GIS 技术的飞速发展快速估算区域植被净第一性生产力提供了新的途径。已经在 NPP 模型计算中逐步引入了遥感技术，使 NPP 的计算变得简化。这不仅免去了许多繁琐的实验工作，还实现了实时、准确、大范围和多尺度的 NPP 估算。通过遥感技术获取和反演地表植被信息和相关生物物理学参数，已成为实时反演大范围地表生物量的惟一重要的工具和手段^[10]。尤其是 1999 年和 2002 年搭载 MODIS 传感器的对地观测卫星的成功发射，为全球和区域资源环境动态监测开辟了又一新的途径。MODIS 具有从可见光到红外的 36 个波段，其中 1、2 波段为可见光和近红外波段，中心波长非常接近 AVHRR 的 1、2 波段，但其波长范围更窄，对植被信息的获取更灵敏，对植被的监测更有力。MODIS 每 1~2 天可提供一次全球观测数据，每天同一区域至少可获得昼夜反射/发射辐射两景图像，并且提供免费接收服务，因而非常适合于中大尺度的区域资源环境动态监测。作为新一代对地观测仪器，MODIS 除了保留 NOAA/AVHRR 数据功能外，还在对波段数目、分辨率、数据获取方式等方面做了许多改进，使得它成为目前研究全球和区域尺度地表过程的最有利的信息获取仪器，也是陆地植被净第一性生产力估算和评估的有利手段。

1.2 研究目标和研究内容

本文引入 1991 制作的 1:500 万的内蒙古植被类型图,并结合 MODIS/NDVI 和气象数据(月均温度、月总降水量和太阳总辐射),利用朱文泉改进与完善(朱文泉, 2005)的光能利用率模型 CASA 模型来估算内蒙古 2002~2006 年每月 NPP。最后结合植被类型图和其它地理背景数据,分析近五年生长季(每年选用了 4~8 月份的 NPP 作为时空分析)内蒙古 NPP 的时空变化特征及其短期波动趋势。主要研究内容包括以下四个部分:

(1) 有关 NPP 的基本概念及模型研究

植被生产力是人类生活所需食物、原料及燃料的来源^[19]。植物通过光合作用将太阳能固定并转化为植物生物量。在单位时间内,在单位面上绿色植物通过光合作用所产生的全部有机物同化量,即光合总量(Gross Primary Productivity, GPP),叫总第一性生产力。净第一性生产力(NPP)则是由总第一性生产力中扣除自养呼吸消耗量后的剩余部分。目前,国内外学者从不同的学科和角度,对 NPP 进行深入研究,取得了许多成就。因此,在模型估算 NPP 之前,需要对有关 NPP 的基本概念及现有的国内外多种模型有一个清楚的认识。

(2) 光能利用率模型 CASA 模型的构建及实现

本文利用朱文泉改进与完善(朱文泉, 2005)的光能利用率模型 CASA 模型估算内蒙古 NPP。该模型主要三个方面进行改进与完善了原 CASA 模型:(1)利用植被类型图确定归一化植被指数 NDVI 和比值植被指数 SR 的最大值和最小值,进而实现植被对光合有效辐射的吸收比例(FPAR)的估算;(2)根据误差最小的原则,结合 NPP 实测数据,模拟获得各植被类型的最大光能率用率;(3)简化了原模型非常繁杂的水分胁迫影响系数的计算问题,实现了仅使用气象数据估算水分胁迫影响系数。并朱文泉(朱文泉, 2005)应用来自 690 个观测站点的森林 NPP 实测数据,检验得到改进后的 CASA 模型平均相对误差为 4.5%。本研究按照朱文泉 CASA 模型的需要,对模型及其各种参数进行逐步计算实现,并绘制出其对应的成果图。

(3) 内蒙古生态环境背景数据库与 NPP 观测数据集的建立

在遥感和 GIS 技术的支持下,完成内蒙古植被覆被空间数据、高时间分辨率气象卫星 MODIS NDVI 月最大值拟合数据集、2002~2006 时间序列每月栅格化气象数据集(月均温度、月总降水量和太阳总辐射)和 NPP 月观测数据集(空间分辨率

均为 1000 米)。另外, 由于 CASA 模型的需要还建立了内蒙古植被吸收的光合有效辐射 ($APAR$)、植被对光合有效辐射的吸收比例 ($FPAR$)、植被光能率用率的温度胁迫影响系数 ($T_e(x,t)$)、水分胁迫影响系数 ($W_e(x,t)$) 的月数据集和内蒙古每年植被生长的最适温度年数据集、植被最大光能利用率和重新数字化编码的内蒙古植被类型数据等各类生态环境背景数据集。

(4) 近五年内蒙古植被 NPP 时空变化分析

内蒙古地区每年 9 月份开始天气变冷, 草原牧区的打草严重影响植被生长状况, 而且 9 月份开始很多植物都开始枯黄, 并冬季内蒙古不少地区都被积雪覆盖, 遥感观测的植被指数难以反映植被的生长状况。因此本研究只对内蒙古生长季 (每年选用 4 月 1 日~8 月 31 日的 NPP 作为时空分布分析) 的 NPP 进行时空变化特征分析。空间变化分析主要从近五年平均 NPP 的分布状况、不同植被类型的 NPP 总量及其在全区 NPP 总量中的贡献率的角度进行分析。时间变化分析主要对 2002~2006 年间的 NPP 变化特征及趋势、月际变化和不同植被类型 NPP 的年际变化状况进行讨论。

1.3 国内外研究现状和进展

国外 NPP 研究比国内要早。学者们利用不同的方法和模型, 从不同角度和尺度对 NPP 的估算进行了深入研究, 取得了丰硕成果。最早的研究可以追溯到 19 世纪 80 年代 Ebemayer 对巴伐利亚森林物质生产力的测定^[11]。后到 1932 年丹麦科学家 P.Boysen-Jensen 首次提出了总生产力和净生产力的概念及其计算模式。但从上个世纪 60 年代国际生物学计划 (IBP) 以及 1987 建立的国际地圈与生物圈计划 (IGBP) 的开展以来, NPP 及其地理分布的研究得到了快速发展。尤其是在 IBP 期间进行了大量 NPP 的测定, 并以测定资料为基础联系环境因子建立了估算模型对 NPP 的区域分布开展了计算及评估研究。这也极大地促进了全球变化研究。到现在为止, 计算 NPP 的模型总共有 20 多种^[12]。Ruimy 等把现有的 NPP 模型大体分为三大类^[13]: 统计模型 (亦称气候相关模型), 参数模型 (亦称光能利用率模型) 和过程模型 (亦称机理模型)。早在 1973 年 Leith 等人根据世界五大洲约 50 个点的净第一性生产力实测数据与相应年份均温和降水量资料首次建立全球 NPP 计算模型 (即 Miami 模型), 并首次模拟获得全球 NPP 及其地理分布规律。虽然 Leith (1974 年) 和 Uchijima (1985 年) 后来又分别提出了基于 Thornthwaite 可能蒸散模型的桑斯威特纪念 (Thornthwaite Memorial) 模型和根据净辐射和辐射干燥度来计算 NPP 的筑后

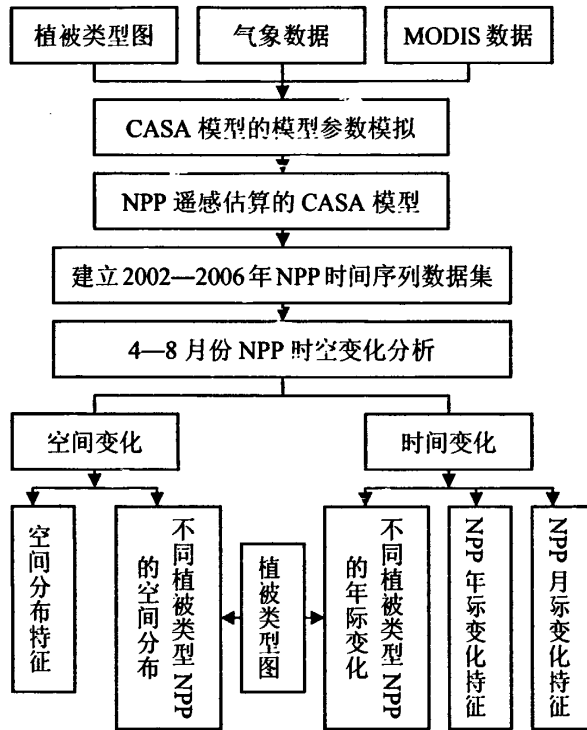
(Chikugo) 模型^[14-16,38,39], 但这些模型均属于气象统计模型。由于这些模型都基于自然植被的净生产力及相应的气候资料建立的, 考虑的环境因子有限, 计算方法简单和实用, 但缺乏植物生态学方面的内在机制和过程理论基础。因此估算误差较大, 尤其是模型在研究区域的大小和空间分布的不同而带来的误差更大, 只反应区域潜在生产力。针对植物生态学特征及其对环境反应的特点, 以美国和荷兰^[11]率领开始建立了许多过程模型。过程模型是通过对植物的生长过程机理以及能量的内在转换机制进行深入研究, 模拟太阳能转化为化学能的过程, 植物体及土壤水分散失的过程等(闫慧敏, 2005)。过程模型对陆地生态系统的水、碳及营养元素的循环作用进行模拟, 能够揭示生产力及植被~环境之间的相互作用的机理。如 ELCROS 模型(DeWit, 1969)、SUCROS 模型(Penning, 1982)、TEM (Terrestrial Ecosystem Model) 模型(McGuire, *et al.*, 1995)、CENTURY(Pouton 等, 1987)、BIOME-BGC (Biome BioGeochemical Cycles Model) 模型(Running & Hunt, 1993)、BIOME3 模型等。这些过程模型虽然生理生态机理清楚, 有强有力的理论基础, 但模型结构比较复杂, 建立的方程和模型输入参数较多, 这些参在大尺度范围内很难获得(方精云, 2000), 而且一般都针对单一种植被类型和特定的研究区而提出来的, 因此难以得到推广。随着全球变化研究的深入和卫星遥感技术的飞速发展, 近 10 年 NPP 的研究进入了一个崭新的发展阶段。基于遥感技术所获数据来实现 NPP 估算的参数模型成为主要研究方法之一。该类模型典型的主要有 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) (Potter *et al.*, 1993; Field *et al.*, 1995)、GLO-PEM (Prince & Goward, 1995)、C-Fix (Veroustraete *et al.*, 1994) 等。GLO-PEM 模型是植被通过光合作用对光合有效辐射的吸收和利用原理估算 NPP 的模型, 是一个完全由遥感模型驱动的生产力效率模型, 它应用的太阳辐射数据和气候数据均来自卫星遥感观测数据。美国马里兰大学网站(<http://glcf.umiaccs.umd.edu/data/glopem/index.shtml>)已提供了基于 GLO-PEM 模型的以旬和月为周期的全球 NPP 产品。CASA 模型是以遥感和地理信息系统为技术手段, 用植被 NDVI 资料、太阳总辐射以及气象资料(温度、降水量)的区域 NPP 估算模型, 该模型被认为是当前对区域乃至全球 NPP 估算最为精确的方法之一^[17]。

虽然我国对 NPP 的研究比国外稍晚些, 但所取得的成就是显著的, 发展速度也比较快, 很多学者利用不同模型和实现方法对不同研究区域进行了深入细致的研究。周广生, 张新时等(1995)根据植物的生理生态学特点, 联系能量平衡方程和水量平衡方程的区域蒸散模式建立了自然植被净第一性生产力模型, 并用实测数据

验证模型精度后得出模拟结果较好，特别是在较干旱地区模型精度明显优于 Chikugo 模型^[18]。朱志辉（朱志辉，等，1993）利用 751 组各种植被数据建立了估算 NPP 的解析模型（即北京模型），并模拟结果与 IBP 期间实测资料的推荐均值进行比较后得出北京模型对各类植被类型的估计值都比较适中，接近于实测值的结果。后来陈力军（陈力军，2001）利用光能利用率模型对我国 1981~1994 年的 NPP 时空演化模式和土地资源承载力进行研究，结果为 1981~1994 年中国 NPP 大致在 $5.88 \sim 6.66 \times 10^9 \text{ t C yr}^{-1}$ 之间^[12]。朱文泉（朱文泉，2005）利用 NOAA/AVHRR 数据和 CASA 模型较系统地重建和分析了 1982~2000 年中国陆地生态系统植被净第一性生产力及其与气候变化关系，结果表明 1982~2000 年中国陆地生态系统 NPP 总量在 $2.66 \sim 3.64 \text{ Pg C yr}^{-1}$ 之间，平均为 $3.14 \text{ Pg C yr}^{-1}$ ，约占全球 NPP 总量的 5.0~5.3%^[19]。卢玲，李新等（2005）利用基于 Monteith 光能利用率理论的碳通量估算模型 C-FIX，SPOT/VEGETATION 和气象数据估算了 2002 年中国西部地区植被净第一性生产力，并进行时空格局研究。王兆礼，陈晓宏（2006），刘海桂，唐旭利等（2007），吕光辉，刘卫国（2008）均利用 GLO-PEM 模型分别研究了珠江流域、广东省和新疆的 20 年 NPP 时空格局^[17,20-21]。高清竹，万运帆等（2007）基于 1981~2004 年 NOAA/AVHRR 遥感资料和气象数据，采用 CASA 模型模拟分析藏北地区草地 NPP 及其时空变化特征，发现该地区 NPP 有进一步下降趋势^[22]。王军邦（王军邦，2007）对“自上而下”的 GLO-PEM 遥感模型与“自下而上”的 CEVSA 生态系统过程模型之间进行耦合，形成 GLOPEM-CEVSA 耦合模型，对青海地区 1982~2005 年生态系统 NPP 和碳循环进行模拟研究^[23]。针对内蒙古地区的多年 NPP 时空分析国内较少。

1.4 技术路线和研究方法

论文的研究方法和总体技术路线可以概括如图 1—1 所示。利用 MODIS 数据、植被类型数据和气象数据估算 CASA 模型的五个重要参数（太阳总辐射、植被对光合有效辐射的系数比例、植被最大光能利用率、温度胁迫影响因子和水分胁迫影响因子），再进一步估算并建立近五年内蒙古陆地生态系统 NPP 时间序列数据集，最后对 NPP 的时空变化特征进行分析。整个工作都在 ENVI 遥感图像处理软件、IDL 语言以及 ARCGIS 地理信息系统软件的支持下完成。现有植被类型图的数字化，重新编码、栅格化以及气象数据的栅格化主要用 ARCGIS 完成。在 IDL 语言的支持下主要实现 MODIS/NDVI 的计算、CASA 模型的五个重要参数的计算和 NPP 估算。最后各种时间序列数据集的建立和成果图的绘制用 ENVI 完成。



图(1—1) 总体技术路线示意图

1.5 论文框架

本文共分 6 章。第一章主要阐述论文的研究背景和研究内容,国内外研究进展、技术路线以及研究方法。第二章主要阐述 NPP 的几个基本概念、NPP 形成过程和 NPP 估算模型,并比较常见几种 NPP 模型的优缺点。第三章描述研究区概况,主要对研究区的地理位置、地势地貌、气候、土壤、植被进行阐述。第四章构建估算 NPP 的光能利用率模型 CASA 模型,并对模型的每个参数进行详细计算实现,做出对应参数的成果图。第五章建立近 5 年内蒙古陆地生态系统 2002~2006 每月的 NPP 时间序列数据集,深入地分析研究时段内 NPP 的时空变化特征。第六章对本文做了总结,并展望了今后工作计划和蒙古国高原生态环境监测的重要意义。

2. NPP 基本概念及估算模型

2.1 几个基本概念

2.1.1 总第一性生产力

植被总第一性生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 是指绿色植物在单位时间内, 在单位面上通过光合作用所产生的全部有机物同化量, 即光合总量 (GPP)。GPP 中除了包括植物个体各部分的生产量外, 还包括同期内植物群落为维持自身生存, 通过呼吸所消耗的有机物。

2.1.2 净第一性生产力

植被净第一性生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 是指在单位时间和单位面积上, 绿色植物所积累的有机物数量。是由光合作用所固定的有机质总量中扣除植物自养呼吸的消耗量后的剩余部分。一般用下式计算:

$$NPP = GPP - R_a \quad (2-1)$$

式中, R_a 指绿色植物的自养呼吸消耗量。

2.1.3 净生态系统生产力

净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity, NEP) 表示整个生态系统与大气之间的碳交换, 其中包括了异养生物的呼吸消耗量。是由净第一性生产力中扣除异养生物的呼吸消耗量之后的剩余部分, 即:

$$NEP = NPP - R_h \quad (2-2)$$

式中, R_h 代表异养生物的呼吸消耗量。

2.1.4 净生物群系生产力

净生物群系生产力 (Net Biome Productivity, NBP) 是指由 NEP 中扣除各类自然和人为干扰因素如各种自然灾害、动物啃食、森林采伐、打草以及农林产品收获等非生物呼吸的消耗量后所剩余部分。它与净生态系统生产力的关系如下:

$$NBP = NEP - NR \quad (2-3)$$

式中, NR 表示非呼吸代谢所消耗的光合作物。

2.1.5 生物量

生物量是指一定时间内单位面积所包含的一个或一个以上生物种或一个生物地理群落中所有生物有机体的总干物质量，其单位为 g/m^2 。在净第一性生产力与生物量形成过程中还存在枯死、凋落量的损失以及动物采食量的消耗^[2]。即：

$$dv/dt = NPP - f_{VL} \quad (2-4)$$

式中， dv/dt 为单位时间、单位面积变化的生物量； NPP 为净光合作用速率，即净第一性生产力； f_{VL} 为残落物速率。从定义可以看出， NPP 是生物量形成的基础，生物量是一定时间内净生产力的存留部分。

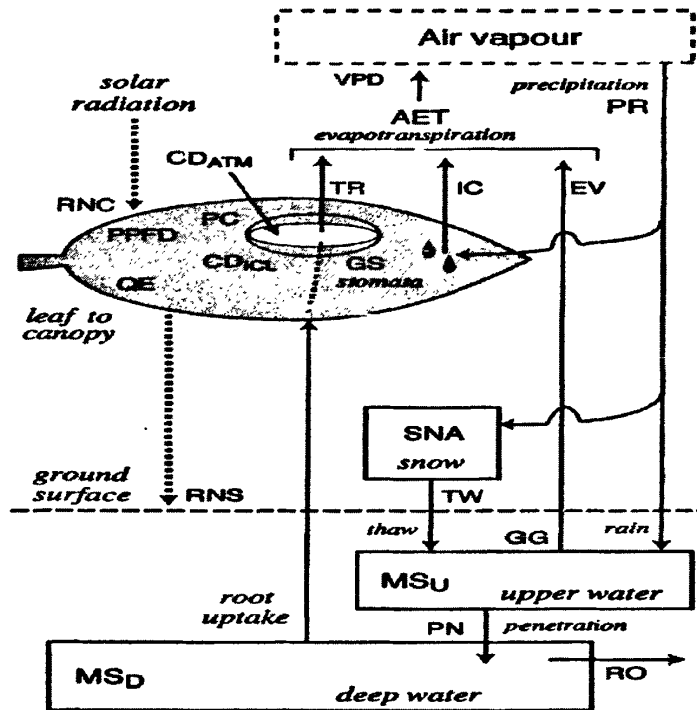
2.1.6 NPP 形成过程

光合作用是 NPP 基本驱动因子 (Field, *et al.*, 1995)，是一个积蓄能量和形成有机物的过程，其原理非常复杂。绿色植物的单叶片是光合作用过程的主要器官，叶绿体 (Chloroplast) 是光合作用的重要细胞器。单叶片气体交换是植物生理生态最基本的过程，它涉及到多环境因子，这些因子通过作用于气孔，影响气孔大小、开关及活性，并作用于细胞内的生化代谢过程从而影响植物的光合作用^[19]。植物通过光合作用形成 NPP 的整个过程不仅受着植物本身的生物学特征外，还受着外部许多环境因素如气候（温度、降水、太阳辐射、日照数）、大气二氧化碳浓度、土壤（土壤类型、质地、持水量、湿度变化、理化形状和肥力等）以及人类活动（土地利用变化、植物造林、毁林开荒等）等的影响(朱文泉, 2005)。图 (2—1) 显示了叶片生理生态过程及其与环境间的关系。

2.2 NPP 估算模型

NPP 的研究方法很多，有关学者从不同的学科和角度对 NPP 的估算进行了深入细致的研究，取得了丰硕的成果。目前普遍采用并发展较快的方法是模型模拟法。到现在为止，计算 NPP 的模型总共有 20 多种^[12]。Ruimy 等把现有的 NPP 模型大体分为三大类^[13]：统计模型（亦称气候相关模型），参数模型（亦称光能利用率模型）和过程模型（亦称机理模型）。三类模型的几种举例模型及其表达式表 (2—1) 所示。这些模型都有各自的优缺点。统计模型一般比较简单，广泛应用在 NPP 研究的起初阶段。由于该类型模型只对气候因子（温度、降水量、光照和）和植物干物质生产进行相关性分析，并建立统计回归方程计算得到区域 NPP 。因此，这类模型的生态学机制不明确，估算误差较大，一般用于区域潜在 NPP 的估算。过程模型是对

植物的生态机理以及能量的内在转换机制进行深入研究,模拟太阳能转化为化学能



图(2—1) 叶片至冠层的水汽和太阳辐射变化示意图

(Ito & Oikawa, 2002; 朱文泉, 2005)

图中显示了各种环境因子(如光量子通量密度(PPFD)、大气 CO_2 浓度(CD_{ATM})、叶表面温度(TG)、土壤含水量(MS)、蒸汽压差(VPD)等)对气孔导度(GS)、细胞间 CO_2 浓度(CD_{ICL})、光能利用率(QE)、光合碳同化量(PC)的影响。降水量(PR)被分配到以及几个部分:土壤含水量(MS)、地表蒸发(EV)、叶面蒸发(IC)、树冠蒸腾(TR)以及地下径流(RO)。地表蒸发与树冠蒸腾各自依赖于地表净辐射(RNS)和冠层净辐射(RNC)的输入

的过程和植物冠层蒸散与光合作用相伴随的植物体及土壤水分散失过程的模型。虽然这些模型可用来模拟生产力,但其中大部分模型不是仅为NPP的模拟而特意建立的。过程模型除了考虑温度和降水对NPP的影响外,还引入了太阳辐射、蒸腾作用、 CO_2 浓度、土壤质地、持水量和湿度变化、风速以及碳和氮的动态变化等诸多环境因子。因此,模型结构复杂,所需参数较多,而且有些参数难以获取,区域尺度的转换对模型精度带来很大的影响,且研究涉及的领域广泛,很难得到推广。但过程模型的生态机制清楚,估算结果较准确,一般应用在小区域的生产力模拟。植物NPP研究的另一种方法为由植被吸收的光合有效辐射和光能转化率两个因子来模拟生产力的方法,即光能利用率模型(参数模型)。这类模型的重要参数之一:植

被对光合有效辐射的吸收系数 (F_{PAR}) 可以通过遥感计算的植被指数 (一般选用归一化植被指数 NDVI 和比值植被指数 SR) 来进行估算得到。因此, 随着近年遥感与地理信息系统学科快速发展, 光能利用率模型成为近年来 NPP 研究的主导方法, 在大尺度植被净第一性生产力和全球碳循环研究中得到了广泛应用。光能利用率模型比较简单, 模型中的植被参数可以由遥感获得, 区域尺度转换容易, 可以分析 NPP 的长时间序列季节和年际动态变化特征, 适用于区域或全球尺度上的 NPP 估算。但模型仍存在可靠的植物生理生态学基础, 所模拟光能传递和转换过程中还存在许多不确定性问题。

今年来, 随着“3S”技术和计算机技术的快速发展和日益成熟, 在 NPP 模型计算中逐步引入了遥感技术, 使得 NPP 的计算变得简化, 省去了大量的实验工作, 最重要的是可以进行不同区域性计算, 已成为 NPP 研究的重要工具和技术手段。植被反射光谱特征是遥感估算 NPP 的基础。不同的植被或同一个植被在不同生态环境和不同发育阶段、不同的病虫害程度、不同灌溉和施肥条件下反映出的反射光谱特征是不同的。而植被反射光谱是这些多种因素影响而形成的综合反应, 为利用遥感信息计算植被 NPP 提供了条件和基础。因此, 近年来, 以遥感数据驱动的植被生产力模型 (如 GLO-PEM, CASA, C-Fix 等) 得到迅速发展和应用, 这些模型根据各自的模型原理应用高时间分辨率的遥感数据实现了区域乃至全球的 NPP 估算。基于遥感数据计算模型参数的植被生产力模型已经应用于区域或全球 NPP 的实时、长时间序列重复监测和年际波动及长期变化趋势的探测。本文采用目前应用较广泛的光能利用率模型 CASA 模型来估算内蒙古 2002~2006 年全年 NPP, 并分析生长季 4~8 的 NPP 时空变化特征。

表(2—1) 几种 NPP 估算模型一览表

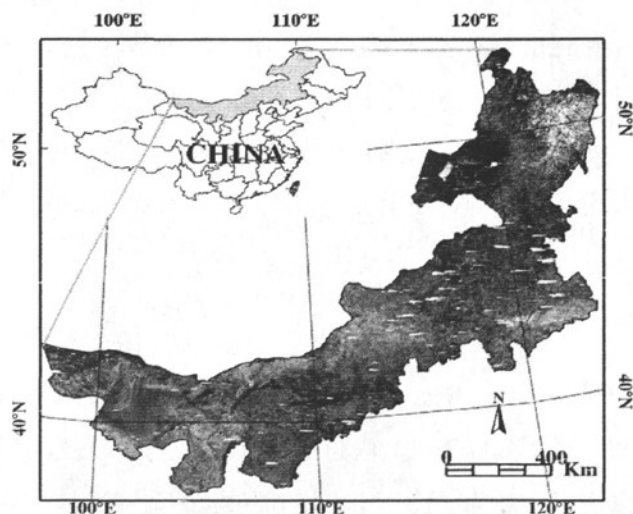
模型类型	模型举例	模型表达式	模型参数
统计模型		$NPP_t = 3000 / [1 + e^{1.315 - 0.1996 T}]$	
(气候相关模型)	Miami 模型	$NPP_p = 3000 [1 - e^{-0.000664P}]$ $NPP_m = \min(NPP_p, NPP_t)$	温度(T)、降水(P)
	Thornthwaite 纪念模型	$NPP = 3000(1 - e^{-0.009695(1 - 20)})$ $v = \frac{1.05R}{\sqrt{1 + (1 + 1.05R / L)^2}}$ $L = 3000 + 25t + 0.05t^3$	蒸散量 (v)、蒸散量 (v) 由年平均降水量 (R) 和平均气温 (t) 计算得到
	筑后(Chikugo) 模型	$NPP = 0.29e^{-0.216(RDI)^2} \times R_n$ $RDI = R_s / Lr$	辐射干燥度(RDI)、净辐射(R _n)
	北京模型	$NPP = \begin{cases} 6.93[-0.224(RDI)^{1.82}] \times R_n \\ 8.26[-0.498(RDI)] \times R_n \end{cases}$	辐射干燥度(RDI)、净辐射(R _n)

1.当 $RDI \leq 2.1$; 2.当 $RDI \geq 2.1$		
简光驻模型	$NPP = RDI \times \frac{rR_n(r^2 + R_n^2 + rR_n)}{(P_n + r) \cdot (R_n^2 + r^2)} \times e^{-\sqrt{9.87+6.25 \cdot RDI}}$	辐射干燥度(RDI)、
CENTURY 模型	$NPP = f(VegC, T, SW, P, PET, N, P, S)$	叶面积指数、温度、 CO ₂ 、蒸散、降水、湿度、植物本身生物学参数
过程模型 (机理模型)	BIOME3 模型 $GPP = f(Rs, LAI, T, AET / PET, CO_2)$ $R_a = f(LAI, GPP)$ $NPP = GPP - R_a$	叶面积指数、温度、 CO ₂ 、蒸散、降水等
	BEPS 模型 $GPP = f(Rs, LAI, T, AWC, SW, VPD, P, CO_2, LeafN)$ $R_a = f(VegC, LAI, T)$ $NPP = GPP - R_a$	叶面积指数、温度、 CO ₂ 、蒸散、降水、湿度、蒸汽压差、植物本身生物学参数
参数模型 (光能利用率模型)	GLO-PEM 模型 $NPP = GPP - R_a \sum t(S_i \times FPAR_i) \cdot \varepsilon_g - R_a$ $R_a = \left[0.53 \times \left(\frac{w}{w+50} \right) \times e^{0.5 \left(\frac{T_c - T_a}{25} \right)} \right]$ $\varepsilon_g = f(T_a, D, CSI) \cdot \varepsilon_g^*$	吸收的光合有效辐射 (APAR)、光能利用率(ε)、平均温度、降水量和大气水汽压等
	CASA 模型 $NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \varepsilon(x, t)$ $APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5$ $\varepsilon(x, t) = \varepsilon_{max} \times T_e(x, t) \times W_e(x, t)$	吸收的光合有效辐射 (APAR)、光能利用率(ε)、平均温度和降水量

3. 研究区概况

3.1 地理位置

内蒙古自治区是我国第一个少数民族自治区，位于中国北部边疆。从祖国的东北边界额尔古纳河起，向南斜贯，绵延到甘肃省北部边缘，由东北向西南延伸，呈狭长形（图 3—1）。经纬度西起 $97^{\circ}12'E$ ，东至 $126^{\circ}04'E$ ，横跨经度 $28^{\circ}52'$ ，相隔 2400 多公里，南起 $37^{\circ}24'N$ ，北至 $53^{\circ}23'N$ ，纵占纬度 $15^{\circ}59'$ ，直线距离 1700 公里，是我国跨纬度最大的省级行政区。全区总面积 118.3 万 km^2 ，占全国总面积的 1/8，居全国第三位。内蒙古地跨东北、西北、华北等我国“三北”地区，东与黑龙江、吉林、辽宁接壤，西与甘肃、宁夏毗邻，南与河北、山西、陕西相连，北与蒙古国和俄罗斯联邦交界，国境线长 4221 公里，靠近京津。内蒙古地下矿藏富集，已发现的有 120 多种，已探明储量的 78 种。其中有 42 种矿储量居全国前 10 位，22 种列前 3 位，7 种居全国之首。特别是煤炭处于国内北方露天矿群的集中地带，储量极其丰富。现已查明含煤面积达 10 多万平方公里，累计探明储量 2400 亿吨，占全国探明储量的 25% 以上，居全国第二位，远景储量 12000 亿吨，仅次于新疆维吾尔自治区。2001 年草原总面积为 86.7 万 km^2 ，占土地总面积的 73.3%，森林面积 18.66 万 km^2 ，耕地面积 7.09 万 km^2 ，淡水总面积 0.86 万 km^2 ，占全区土地总面积的 0.7%。从土地利用状况看，林牧用地是内蒙古自治区的主要土地利用方式，两者占土地总面积的 85% 以上。可利用耕地为 7.09 万 km^2 ，人均占有 3600 m^2 ，是全国人均耕地的 4 倍。



图（3—1）内蒙古地理位置及 MODIS 彩色合成图

3.2 地势与地貌

内蒙古自治区的地貌以高原为主体,高原从东北向西南延伸 3000 公里,具有复杂多样的形态,地势由南向北、由西向东缓缓倾斜。海拔最高点贺兰山主峰 3556 米,多数地区海拔为 1000~1500 米左右,除东南部外,基本是高原,占总土地面积的 50%左右,通称内蒙古高原,是我国四大高原中的第二大高原。主要由阿拉善及鄂尔多斯高原、乌兰察布和巴彦淖尔高原、锡林郭勒高平原、呼伦贝尔等高平原组成,高原四周分布着贺兰山、阴山(狼山、色尔腾山、大青山、灰腾梁)、大兴安岭等山脉,构成内蒙古高原地貌的脊梁。高原上分布着辽阔的草原,是我国著名的天然牧场,高原西端分布有巴丹吉林、腾格里、乌兰布和、库布其、毛乌素等沙漠,总面积 15 万平方公里。在大兴安岭的东麓、阴山脚下和黄河岸边,有嫩江西岸平原、西辽河平原、土默川平原、河套平原及黄河南岸平原。这里地势平坦、土质肥沃、光照充足、水源丰富,是内蒙古的粮食和经济作物主要产区。在山地向高平原、平原的交接地带,分布着黄土丘陵和石质丘陵,其间有低山、谷地和盆地分布,水土流失较严重。全区高原面积占全区总面积的 53.4%,山地占 20.9%,丘陵占 16.4%,河流、湖泊、水库等水面面积占 0.8%。

3.3 土壤

内蒙古自治区地域辽阔,土壤种类较多,其性质和生产性能也各不相同,但其共同特点是土壤形成过程中钙积化强烈,有机质积累较多。根据土壤形成过程和土壤属性,可分为 9 个土纲,22 个土类。其中在 9 个土纲中,以钙层土分布最少。内蒙古土壤在分布上呈现出东西之间变化明显,且土壤带基本呈东北~西南向排列,最东为黑土地带,向西依次为暗棕壤地带、黑钙土地带、栗钙土地带、棕壤地带、黑垆土地带、灰钙土地带、风沙土地带和灰棕漠土地带。其中黑土壤的自然肥力最高,结构和水分条件良好,易于耕作,适宜发展农业。黑钙土自然肥力次之,适宜发展农林牧业。

3.4 气候

内蒙古自治区地域广袤,所处纬度较高、高原面积大、距离海洋较远且边沿有山脉阻隔,气候以温带大陆性季风气候为主,因地域辽阔,各地差异较大。多数地区四季分明,夏短冬长,较为干冷。年平均气温为 $0^{\circ}\text{C}\sim 8^{\circ}\text{C}$,气温年差平均在 $34^{\circ}\text{C}\sim 36^{\circ}\text{C}$,日差平均为 $12^{\circ}\text{C}\sim 16^{\circ}\text{C}$ 。年总降水量 50~450 毫米,东北降水多,向西部递减。东部的鄂伦春自治旗降水量达 486 毫米,西部的阿拉善高原年降水量少于

50 毫米,额济纳旗为 37 毫米。蒸发量大部分地区都高于 1200 毫米,大兴安岭山地年蒸发量少于 1200 毫米,巴彦淖尔高原地区达 3200 毫米以上。内蒙古日照充足,光能资源非常丰富,大部分地区年日照时数都大于 2700 小时,阿拉善高原的西部地区达 3400 小时以上。全年大风日数平均在 10~40 天,70%发生在春季,其中锡林郭勒、乌兰察布高原达 50 天以上,大兴安岭北部山地,一般在 10 天以下。沙暴日数大部分地区为 5~20 天,阿拉善西部和鄂尔多斯高原地区达 20 天以上,阿拉善盟额济纳旗的呼鲁赤古特大风日,年均 108 天。由于具有降水量少而不匀,风大,寒暑变化剧烈的特点,所以大兴安岭北段地区属于寒温带大陆性季风气候,巴彦浩特~海勃湾~巴彦高勒以西地区属于温带大陆性气候。总的特点是春季气温骤升、多大风天气;夏季短促而炎热、降水集中;秋季气温剧降、霜冻往往早来;冬季漫长严寒、多寒潮天气。因此全年太阳辐射量从东北向西南递增,降水量由东北向西南递减。

3.5 植被

内蒙古草地资源丰富,是我国面积最大的草原牧区。内蒙古草原处于全球面积最大陆地生态系统欧亚大陆草原带的中部,是西北干旱区向东北湿润区和华北旱作农业区的过渡地带。内蒙古境内植被由种子植物、蕨类植物、苔藓植物、菌类植物、地衣植物等不同植物种类组成。植物种类较丰富而且分布不均衡,山区植物最丰富。东部大兴安岭拥有丰富的森林植物及草甸、沼泽与水生植物。中部阴山山脉及西部贺兰山兼有森林、草原植物和草甸、沼泽植物。高平原和平原地区以草原与荒漠旱生型植物为主,含有少数的草甸植物与盐生植物。内蒙古境内草原植被由东北的松辽平原,经大兴安岭南部山地和内蒙古高原到阴山山脉以南的鄂尔多斯高原与黄土高原,组成一个连续的整体,其中草原植被包括呼伦贝尔草原、锡林郭勒草原、乌兰察布草原、鄂尔多斯草原等;荒漠植被主要分布于鄂尔多斯市西部、巴彦淖尔市西部和阿拉善盟,且主要由小半灌木盐柴类和矮灌木类组成,共有种子植物 1000 多种。植物种类不太丰富,但地方特有种类的优势作用十分明显。

4. 遥感估算 NPP 的光能利用率模型构建及实现

光能是陆地生命的基本能量来源, 植物通过光合作用把太阳能转变成化学能固定在植物体内。这一过程被成为“地球上最重要的化学反应”, 是地球上唯一大规模把太阳能转化为化学能, 无机物转化为有机物放出氧气的过程, 是植物把太阳能转化为生物量的过程。基于光能利用率原理, 早在上个世纪 70 年代 Monteith (1972, 1977) 首次提出利用植被吸收的光合有效辐射 (Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR) 和光能利用率 (Light-Use Efficiency, LUE) 估算植被净生产力的模式 (式 4—1)。

$$NPP = APAR \times LUE \quad (4-1)$$

式中: NPP 为植被净生产力 (单位: $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{time}^{-1}$), $APAR$ 为植被吸收的光合有效辐射 (单位: $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{time}^{-1}$), LUE 为光能利用率 (单位: $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$)。后来, Potter (Potter, *et al.*, 1993), Filed (Filed, 1995) 在此基础上建立了 CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型, 并模型中引入植被指数等遥感数据, 估算了全球陆地净第一性生产力。CASA 模型利用植被遥感原理, 通过遥感计算的归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 获取植被对光合有效辐射的吸收系数 $FPAR$ (Fractional Photosynthetically Active Radiation), 再利用太阳总辐射 PAR (Photosynthetically Active Radiation) 和 $FPAR$ 计算植被吸收的光合有效辐射 $APAR$, 进而估算 NPP 。CASA 模型中光能利用率的确定对 NPP 估算有重要意义, 而且目前还没有用遥感技术计算光能利用率的报道 (J.B. Bradford *et al.*, 2005)。目前, CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach) 模型是植被生产力光能利用率模型的典型代表, 属于遥感数据驱动的植被生产力机理模型, 已在大尺度植被净第一性生产力研究中得到广泛应用。

基于地理信息系统和卫星遥感应用技术, 本文利用目前较流行的 CASA 模型来估算内蒙古 2002~2006 年每月植被净第一性生产力, 并分析 4~8 月份 NPP 时空分布格局。

4.1 模型框架

估算 NPP 的 CASA 模型总体框架如图 4—1 所示。模型中植被净第一性生产力主要由植被所吸收的光合有效辐射 ($APAR$) 和实际光能利用率 (ϵ) 两个变量来确定。其以月为时间步长的 NPP 模型的表达式如下:

$$NPP(x,t) = APAR(x,t) \times \varepsilon(x,t) \quad (4-2)$$

式中： x 表示空间位置， t 表示时间； $NPP(x,t)$ 为像元 x 在 t 月份的植被净第一性生产力（单位： $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ）； $APAR(x,t)$ 为像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射（单位： $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ）； $\varepsilon(x,t)$ 代表像元 x 在 t 月的实际光能利用率（单位： $\text{gC} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ）。

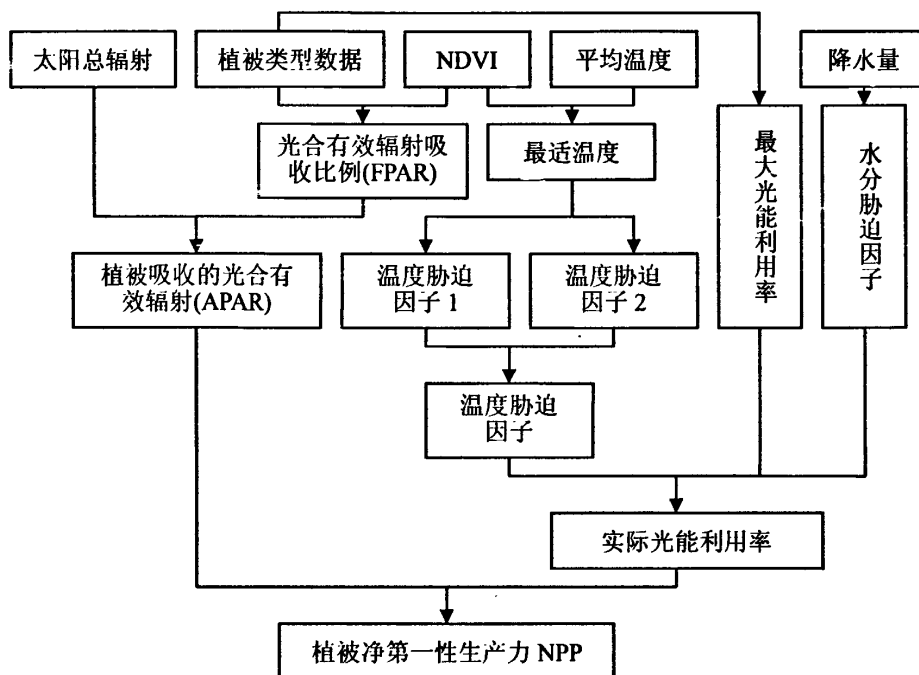


图 4—1 净第一性生产力估算模型总体框架

4.2 $APAR$ 子模型及实现

植被吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植被本身的特性，用公式 (4—3) 表示。

$$APAR(x,t) = SOL(x,t) \times FPAR(x,t) \times 0.5 \quad (4-3)$$

式中： $SOL(x,t)$ 是 t 月份在像元 x 处的太阳总辐射量（单位： $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$ ）； $FPAR(x,t)$ 为植被层对入射光合有效辐射 PAR 的吸收比例，反应了植被对 PAR 的吸收程度；常数 0.5 表示植被所能利用的太阳有效辐射（波长为 $0.38 \sim 0.71 \mu\text{m}$ ）占太阳总辐射的比例。

4.2.1 $SOL(x,t)$ 的确定

利用 ARCGIS 的插值工具，根据全内蒙古 8 个太阳总辐射站点的经纬度信息，

对辐射测量月值进行 Kriging 插值得到 $SOL(x,t)$ 。其分辨率为 1000m，与 NDVI 分辨率一致。以 2006 年 8 月为例，插值得到的 $SOL(x,t)$ 为如图 4—2 所示。

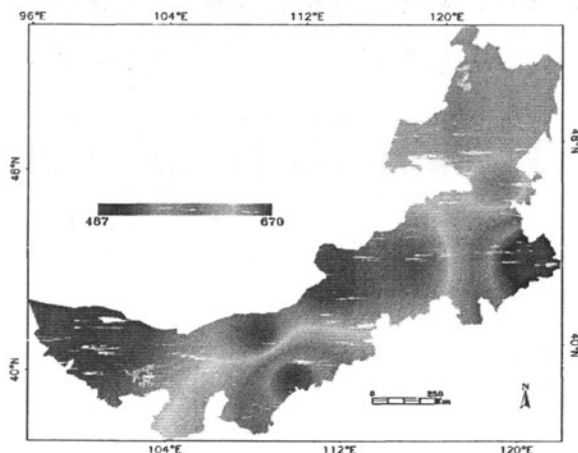


图 (4—2) 内蒙古太阳总辐射量 (单位: $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$) (以 2006 年 8 月为例)

4.2.2 FPAR 模型

植被对光合有效辐射的吸收比例取决于植被类型和植被覆盖状况。而由遥感数据计算的 $NDVI$ 能很好地反应植被覆盖状况 (Potter *et al.*, 1993)。Ruimy (1994), Kumar & Monteith (1982), Hatfield (1984), Sellers (1985) 和 Goward & Huemmrich (1992) 等的研究表明, 根据植被类型和不同植被类型对应的 $NDVI$ 最大值和最小值来确定 $FPAR$ (4—4)。

$$FPAR(x,t) = \frac{(NDVI(x,t) - NDVI_{i,min})(FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min})} + FPAR_{min} \quad (4-4)$$

其中, $NDVI_{i,max}$ 和 $NDVI_{i,min}$ 分别代表 i 种植被类型的 $NDVI$ 最大值和最小值。Low (1994), Field (1995), Sellers (1996) 等的进一步研究表明, $FPAR$ 也可以根据比值植被指数 SR 计算 (4—5)。

$$FPAR(x,t) = \frac{(SR(x,t) - SR_{i,min})(FPAR_{max} - FPAR_{min})}{(SR_{i,max} - SR_{i,min})} + FPAR_{min} \quad (4-5)$$

$$SR = \frac{1 + NDVI(x,t)}{1 - NDVI(x,t)} \quad (4-6)$$

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (4-7)$$

式中, ρ_{Red} 和 ρ_{NIR} 分别表示 MODIS 数据红光波段和近红外波段反射率, 分别对应第 1 和 2 波段; SR 代表比值植被指数; $SR_{i,max}$ 和 $SR_{i,min}$ 表示 i 种植被类型的 SR 最大值和最小值; $FPAR_{max}$ 和 $FPAR_{min}$ 表示 $FPAR$ 最大值和最小值, 分别取 0.950 和 0.001。

后来, Los (Los, 1998) 的研究表明, 用两种方法估算的 $FPAR$ 的平均值与实测值之间的误差最小, 即公式 (4—8), 本文用此方法来计算 $FPAR$ 。目前, 国内采用此方法的有朱文泉 (2005)、王军邦 (2007) 等。

$$FPAR = \frac{(FPAR_{NDVI} + FPAR_{SR})}{2} \quad (4-8)$$

(1) $FPAR$ 模型的实现

对 MODIS 数据进行大气校正和几何精纠正等相关处理后, 根据 MODIS 数据的红光 (第 1 波段) 和近红外 (第 2 波段) 波段反射率, 利用公式 (4—7) 逐日计算 2002~2006 年全年 $NDVI$ 。在此基础上, 用最大值拟合法 MVC (Maximum Value Composite) 合成得到月最大值 $NDVI$ 图 (式 4—9), 其计算公式为如下:

$$NDVI_{i,j} = MAX(NDVI_{i,k}) \quad (4-9)$$

式中, i 为月份 (1~12 月), j 为年份 (2002~2006 年), k 为天数 (1~30/31 天)。

$NDVI$ 、 SR 的最大值和最小值根据植被类型而定, 不同植被类型对应的 $NDVI_{max}$ 、 $NDVI_{min}$ 、 SR_{max} 和 SR_{min} 直接采用朱文泉 (2005) 确定的值, 其取值如表 4—1 所示。植被类型图选用了雍世鹏、李博、崔海亭等 1991 年主编的内蒙古自治区植被类型图 (内蒙古自治区资源系列地图), 比例尺为 1:500 万。按照表 4—1 的 9 种植被类型, 对植被类型图进行数字化和重新编码后得到新的内蒙古植被类型空间分布图 (图 4—3)。

表 (4—1) 植被类型及其对应的 $NDVI$ 和 SR 的最大值和最小值

代码	植被类型	$NDVI_{max}$	$NDVI_{min}$	SR_{max}	SR_{min}
1	落叶针叶林	0.738	0.023	6.63	1.05
2	常绿针叶林	0.647	0.023	4.67	1.05
3	落叶阔叶林	0.747	0.023	6.91	1.05
4	灌丛	0.636	0.023	4.49	1.05
5	草原	0.634	0.023	4.46	1.05
6	荒漠	0.634	0.023	4.46	1.05
7	疏林	0.636	0.023	4.49	1.05
8	农作物植被	0.634	0.023	4.46	1.05
9	水域	0.634	0.023	4.46	1.05

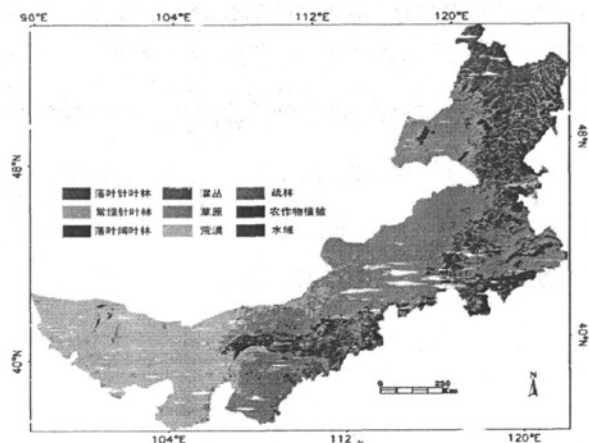


图 (4—3) 内蒙古植被类型分布图

根据植被类型图及其对应 $NDVI$ 和 SR 最大值和最小值, 利用公式 (4—7), (4—6), 以 2006 年 8 月为例, 计算得到的内蒙古地区 $NDVI$ 和 SR 分布如图 4—4 和 4—5。

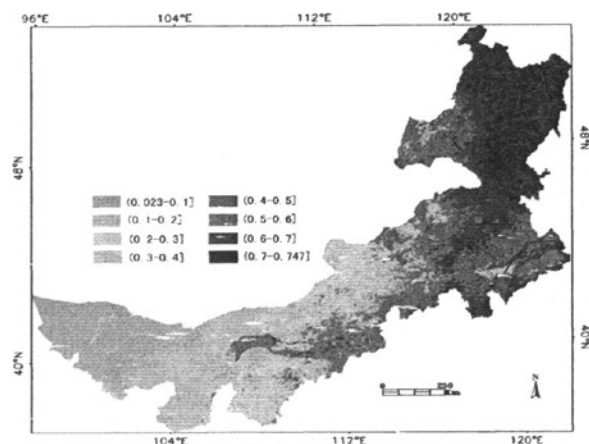
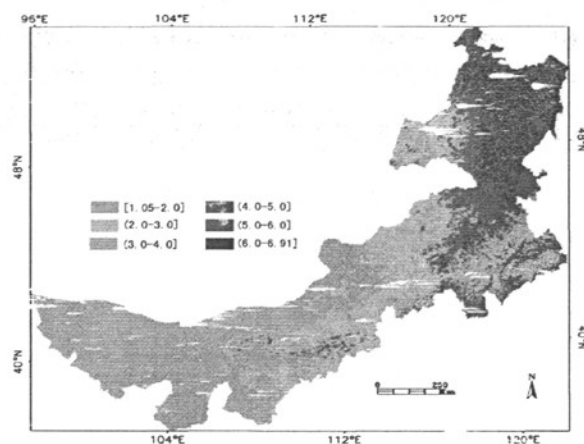
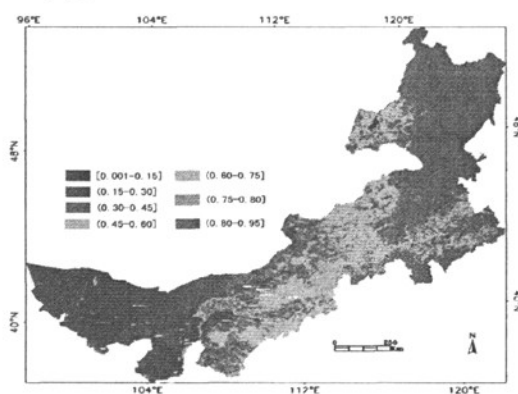
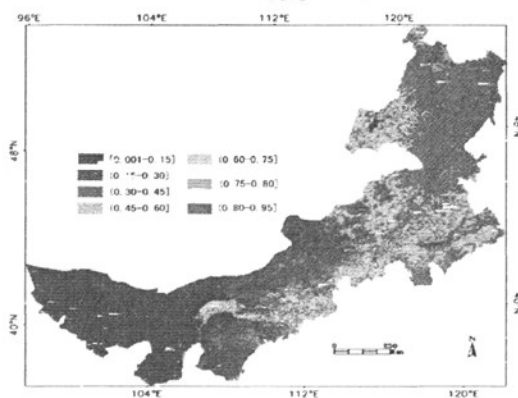
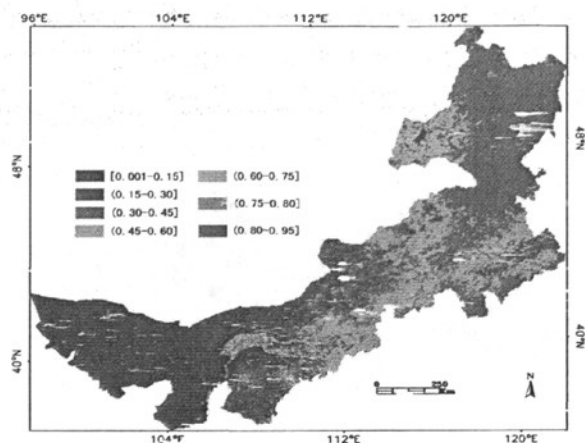


图 (4—4) 内蒙古地区 $NDVI$ 分布图 (2006 年 8 月)


 图 (4—5) 内蒙古地区 SR 分布图 (2006 年 8 月)

以 2006 年 8 月为例, 利用公式 (4—4、4—5、4—8) 和对应输入参数 $NDVI$ 、 SR 及其最大, 最小值计算得到的内蒙古地区 $FPAR_{NDVI}$ 、 $FPAR_{SR}$ 、 $FPAR$ 分布如图 (4—6、4—7、4—8) 所示。

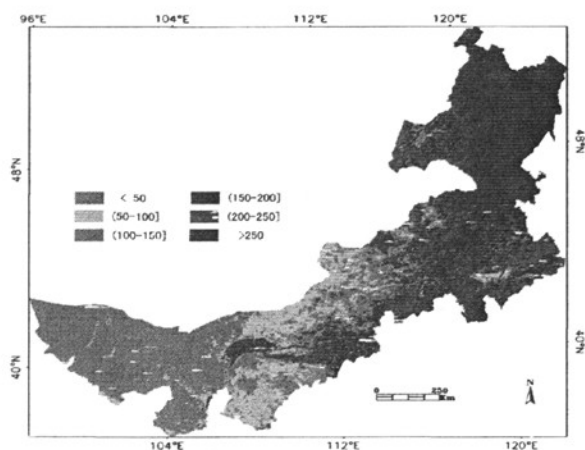

 图 (4—6) 内蒙古地区 $FPAR_{NDVI}$ 分布图 (2006 年 8 月)

 图 (4—7) 内蒙古地区 $FPAR_{SR}$ 分布图 (2006 年 8 月)



图(4—8) 内蒙古地区 $FPAR$ 分布图(2006 年 8 月)

4.2.3 $APAR$ 的实现

用公式(4—3), 以内蒙古太阳总辐射量 ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$) (2006 年 8 月) 和内蒙古地区 $FPAR$ (2006 年 8 月) 为输入变量, 计算得到的 2006 年 8 月内蒙古 $APAR$ 分布如图(4—9) 所示。



图(4—9) 内蒙古地区 $APAR$ 分布图(单位: $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{月}$) (2006 年 8 月)

4.3 实际光能利用率 $\varepsilon(x, t)$ 子模型及实现

光能利用率是指植被通过光合作用, 对所吸收的光合有效辐射 $APAR$ 转化为有机碳的效率, 通常用 gC/MJ 来表示。不同植被的光能利用率差异很大。Potter(Potter, et al., 1993) 认为在理想条件下植被具有最大光能利用率, 在现实条件下的植被实际光能利用率主要由温度和水分胁迫因子来调整最大光能利用率而确定, 其计算如公式(4—10) 表示。

$$\varepsilon(x, t) = \varepsilon_{\max} \times T_{\varepsilon}(x, t) \times W_{\varepsilon}(x, t) \quad (4-10)$$

式中: $\varepsilon_{\max}$ 是理想条件下的植被最大光能利用率, $T_e(x,t)$ 表示温度对光能利用率的胁迫影响系数, $W_e(x,t)$ 表示水分胁迫影响系数。

4.3.1 植被最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 的确定

植被最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 是指植被在没有任何限制的理想条件下对光合有效辐射的利用率, 它是植被本身的一种生理属性, 由其内在的生物学机制形成, 其取值因不同的植被类型而有所不同, 在目前的科研条件下无法通过试验来获得, 只能通过模拟来求取(朱文泉, 2006)。Potter(Potter, *et al.*, 1993)和 Field(Field, *et al.*, 1995)认为全球植被的最大光能利用率为 0.389 gC/MJ, 没有区分植被类型。彭少麟等(2000)认为 CASA 模型中所用的全球植被最大光能利用率 0.389gC/MJ 对广东植被来讲偏低, 将广东植被最大光能利用率取值应为 1.25 gC/MJ。Raymond 等(1994)认为光能利用率的上限为 0.389 gC/MJ。朱文泉(2006)根据 NPP 遥感估算的建模思路, 应用 NOAA/AVHRR、气象数据和来自 690 个观测站点的森林 NPP 实测数据, 模拟得到中国典型植被最大光能利用率介于 CASA 模型和 BIOME-BGC(生理生态过程模型)模型的模拟结果之间。本研究直接采用朱文泉(2006)对中国典型植被所模拟的结果, 其取值如表(4—2)所示。

表 (4—2) 植被最大光能利用率

代码	植被类型	$\varepsilon_{\max}$
1	落叶针叶林	0.485
2	常绿针叶林	0.389
3	落叶阔叶林	0.692
4	灌丛	0.429
5	草原	0.542
7	疏林	0.475
8	农作物植被	0.542
9	其它	0.542

4.3.2 温度胁迫影响系数计算模型及实现

温度胁迫影响系数用公式(4—11)计算:

$$T_e(x,t) = T_{e1}(x,t) \times T_{e2}(x,t) \quad (4-11)$$

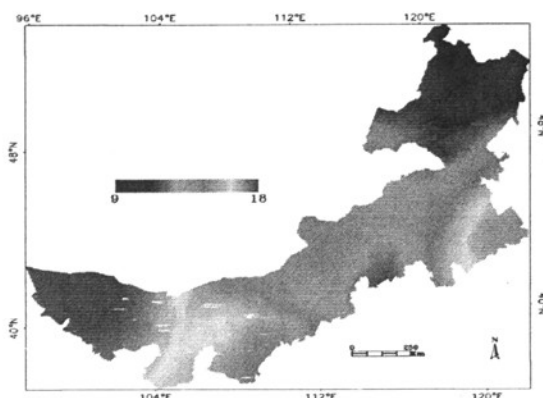
式中: $T_{e1}(x,t)$ 反应在低温和高温时植物内在的生化作用对光合的限制而降低净第一性生产力(Potter, *et al.*, 1993; Field, *et al.*, 1995), $T_{e2}(x,t)$ 表示环境温度从最适温度($T_{opt}(x)$)向高温和低温变化时植物的光能利用率逐渐变小的趋势(Potter, *et*

al.,1993; Field, et al., 1995)。分别按照表达式(4—12)和(4—13)求出。

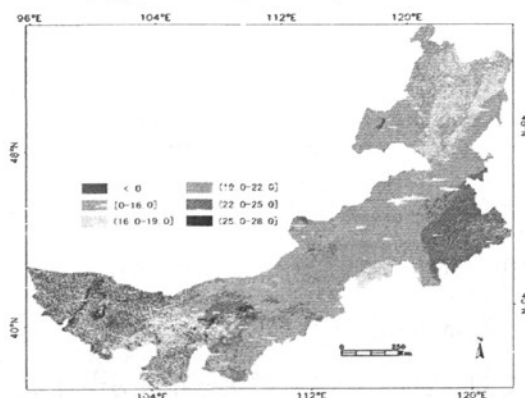
$$T_{e1}(x,t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \quad (4-12)$$

其中, $T_{opt}(x)$ 为某一区域一年内 $NDVI$ 值达到最高时的当月平均气温, 当某一月平均温度小于或等于 -10°C 时, $T_{e1}(x,t)$ 取 0。

(1) $T_{opt}(x)$ 的计算。首先根据全内蒙古 118 个气象站点的经纬度信息, 对月平均气温值进行 Kriging 插值得到逐月时间序列内蒙古温度分布图, 以 2006 年 9 月为例, 插值得到的温度数据为图(4—10)所示。其次, 建立 12 月时间序列 $NDVI$ 数据集。最后在 IDL 语言的支持下, 按像素逐步提取一年 12 个月内最大 $NDVI$ 值对应月的温度值, 并绘制最适温度图, 以 2006 年为例提取得到的最适温度分布如图(4—11)所示, 从图可以看出最适温度小于零区主要分布在水域和无植被地段, 由于无植被覆盖地段的 $NDVI$ 没有明显的季节变化特点, $NDVI$ 的最大值有可能出现在冬季, 因此出现了小于零的现象。



图(4—10) 内蒙古地区温度($^\circ\text{C}$)分布图(2006年9月)



图(4—11) 内蒙古地区 2006 年最适温度($^\circ\text{C}$)分布图

(2) $T_{e1}(x,t)$ 的计算。用式 (4—12) 直接计算, 以 2006 年 9 月为例, 计算得到的 $T_{e1}(x,t)$ 为如图 (4—12)。

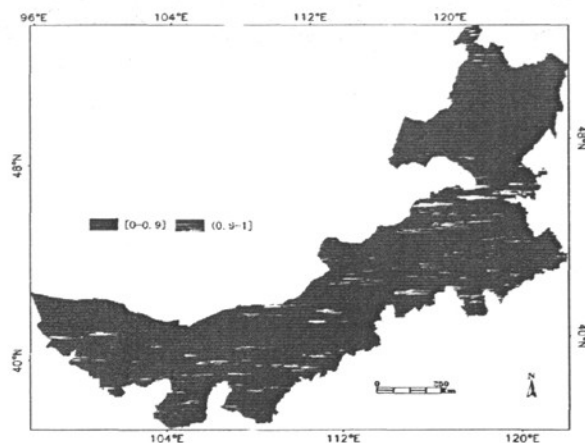


图 (4—12) 内蒙古地区 $T_{e1}(x,t)$ 分布图 (2006 年 9 月)

(3) $T_{e2}(x,t)$ 的计算。用式 (4—13) 计算, 以 2006 年 9 月为例, 计算得到的 $T_{e2}(x,t)$ 为如图 (4—13)。

$$T_{e2}(x,t) = \frac{1.1814}{\{1 + e^{0.2 \times [T_{opt}(x) - 10 - T(x,t)]}\} \times \{1 + e^{0.3 \times [-T_{opt}(x) - 10 + T(x,t)]}\}} \quad (4-13)$$

当某一月的平均温度 $T(x,t)$ 比最适温度 $T_{opt}(x)$ 高 10°C 或低 13°C 时, 该月的 $T_{e2}(x,t)$ 值等于月平均温度 $T(x,t)$ 为最适温度 $T_{opt}(x)$ 时 $T_{e2}(x,t)$ 取值的一半。

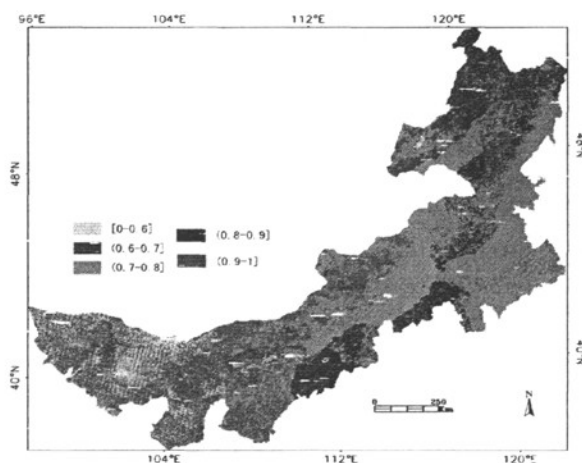


图 (4—13) 内蒙古地区 $T_{e2}(x,t)$ 分布图 (2006 年 9 月)

(4) $T_e(x,t)$ 的实现。以 2006 年 9 月为例, 利用公式 (4—11) 和已计算得到

的 $T_{e1}(x,t)$ 、 $T_{e2}(x,t)$ 来估算的 $T_e(x,t)$ 为如图 (4—14)。

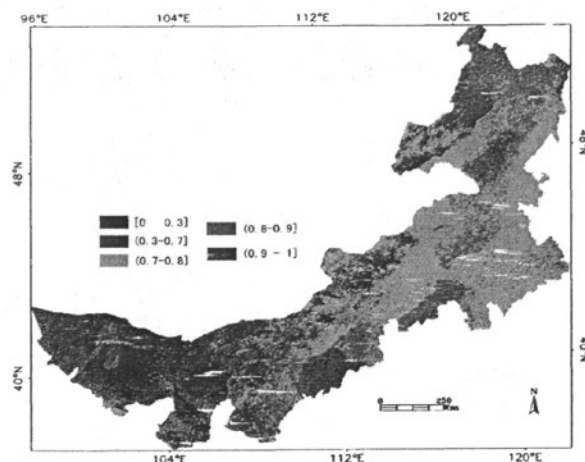


图 (4—14) 内蒙古地区 $T_e(x,t)$ 分布图 (2006 年 9 月)

4.3.3 水分胁迫影响系数计算模型及实现

水分胁迫影响系数 ($W_e(x,t)$) 反应了植物所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响, 随着环境中有效水分的增加, $W_e(x,t)$ 逐渐增大。它的取值范围为 0.5 (在极端干旱条件下) 到 1 (非常湿软条件下) (朴世龙, 2001; 朱文泉, 2005)。水分胁迫影响系数的求取比较繁杂, 本文采用朱文泉 (朱文泉, 等, 2005) 的仅利用气象数据 (温度、降水、太阳净辐射) 来估算 $W_e(x,t)$ 的方法, 即综合利用区域实际蒸散量模型 (周光胜, 张新时, 1995) 和潜在蒸散量模型 (张志明, 1990; 周光胜, 张新时, 1996a) 估算 $W_e(x,t)$ 的方法来实现水分胁迫影响系数估算。其计算公式为 (4—14) 所示。

$$W_e(x,t) = 0.5 + \frac{0.5 \times E(x,t)}{E_p(x,t)} \quad (4-14)$$

式中: $E(x,t)$ 为区域实际蒸散量 (Estimated Evapotranspiration, mm)。 $E_p(x,t)$ 为区域潜在蒸散量 (Potential Evapotranspiration, mm), 其计算方法为分别如式 (4—15) 和 (4—20)。

(1) $E_p(x,t)$ 的估算。

$$E_p(x,t) = \frac{E(x,t) + E_{p0}(x,t)}{2} \quad (4-15)$$

式中: $E_{p0}(x,t)$ 为局地潜在蒸散量, 可根据 Thornthwaite 植被~气候关系模型的计算方法求取 (张新时, 1989)。

(2) $E_{p0}(x, t)$ 的估算。

$$E_{p0}(x, t) = 16 \times \left[\frac{10 \times T(x, t)}{I(x)} \right]^{a(x)} \quad (4-16)$$

$$a(x) = [0.675 \times I^3(x) - 77.1 \times I^2(x) + 17920 \times I(x) + 492390] \times 10^{-6} \quad (4-17)$$

$$I(x) = \sum_{i=1}^{12} \left[\frac{T(x, t)}{5} \right]^{1.514} \quad (4-18)$$

$I(x)$ 是 12 个月总和的热量指标, $a(x)$ 则是因地而异的常熟, 是 $I(x)$ 的函数。这一关系仅在气温 0°C 到 26.5°C 之间有效。Thornthwaite 将气温低于 0°C 时的可能蒸散率设定为 0; 在高于 26.5°C 时, 可能蒸散仅随温度增加而增加, 与 $I(x)$ 值无关。计算所得的 $E_{p0}(x, t)$ 值还需要根据实际的日长时数与每月日数进行校正后, 才能得到校正的可能蒸散值 ($APE(x, t)$):

$$APE(x, t) = E_{p0}(x, t) \times CF(x, t) \quad (4-19)$$

式中的 $CF(x, t)$ 是因经纬度而异的日长时数与每月日数的系数 (朱温泉, 2005)。

以 Kriging 插值得到的 2006 年全年 12 个月温度数据月值为例, 利用公式 (4-18) 计算实现的内蒙古 2006 年 12 个月总和的热量指标 $I(x)$ 为如图 (4-15) 所示。

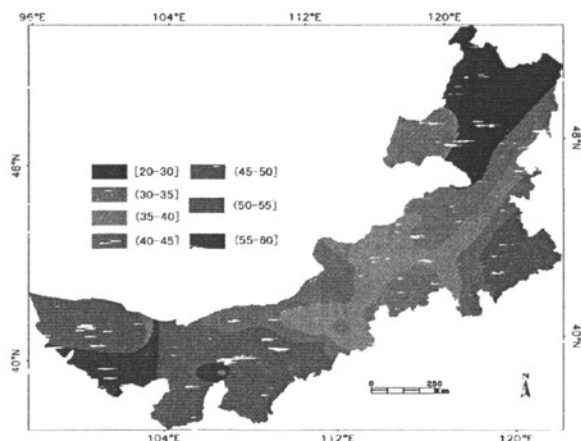


图 (4-15) 2006 年 12 个月总和的热量指标 ($I(x)$, $^\circ\text{C}$)

以 2006 年 8 月为例, 根据公式 (4-16、4-17、4-18) 计算得到的内蒙古局地潜在蒸散量分布为如图 (4-16) 所示。

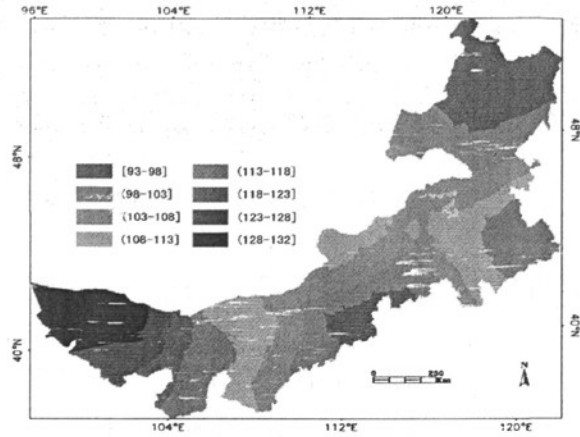


图 (4—16) 内蒙古局地潜在蒸散量 $E_{p0}(x, t)$ 分布 (mm) (2006 年 8 月)

(3) $E(x, t)$ 的计算。根据周光胜和张新时 (周光胜, 张新时, 1995) 建立的区域实际蒸散模型求算。

$$E(x, t) = \frac{P(x, t) \times R_n(x, t) \times [(P(x, t))^2 + (R_n(x, t))^2 + P(x, t) \times R_n(x, t)]}{[P(x, t) + R_n(x, t)] \times [(P(x, t))^2 + (R_n(x, t))^2]} \quad (4-20)$$

式中: $P(x, t)$ 为像元 x 在 t 月份的降水量, 同样根据全内蒙古 118 个气象站点的经纬度信息, 对月总降水量数据进行 Kriging 插值得到逐月时间序列的内蒙古降水量分布图, 以 2006 年 8 月为例, 插值得到的降水量数据为图 (4—17) 所示。

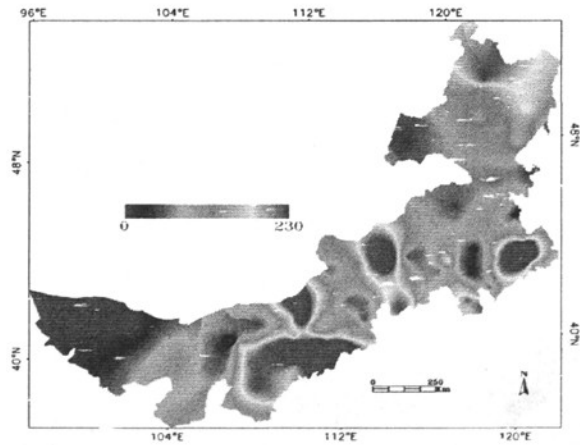


图 (4—17) 内蒙古降水量分布 (mm) (2006 年 8 月)

$R_n(x, t)$ 为像元 x 在 t 月份的地表净辐射量, 一般的气象观测站均不进行地表净辐射观测, 本文根据朱文泉 (朱文泉, 2005) 的方法利用周光胜和张新时 (周光胜, 张新时, 1996b) 建立的经验模型求取。

$$R_n(x,t) = [E_{p0}(x,t) \times P(x,t)]^{0.5} \times \left\{ 0.369 + 0.589 \times \left[\frac{E_{p0}(x,t)}{P(x,t)} \right]^{0.5} \right\} \quad (4-21)$$

(4) $E_p(x,t)$ 的计算。以 2006 年 8 月为例, 利用公式 (4—20、4—16、4—15) 计算得到的区域潜在蒸散量为图 (4—18) 所示。

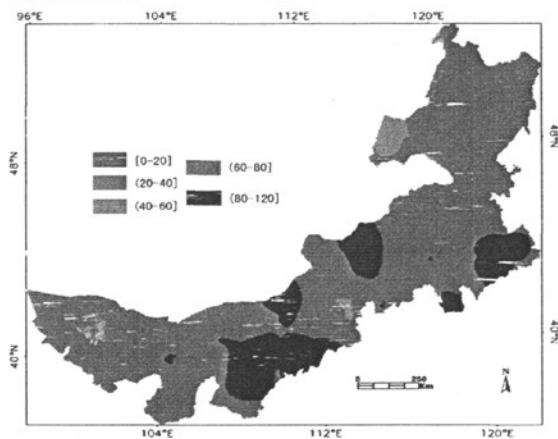


图 (4—18) 内蒙古区域潜在蒸散量 $E_p(x,t)$ (mm) (2006 年 8 月)

最后再利用公式 (4—16、4—21、4—20) 以及 Kriging 插值后的月降水量数据可计算得到区域实际蒸散量, 并计算得到的区域实际蒸散量 $E(x,t)$ 和区域潜在蒸散量 $E_p(x,t)$ 值进行像素对像素比较, 如果 $E(x,t) \leq E_p(x,t)$, 实际蒸散量取 $E(x,t)$ 值, 否则取 $E_p(x,t)$ 值, 其最后估算得到的区域实际蒸散量如图 (4—19) 所示。

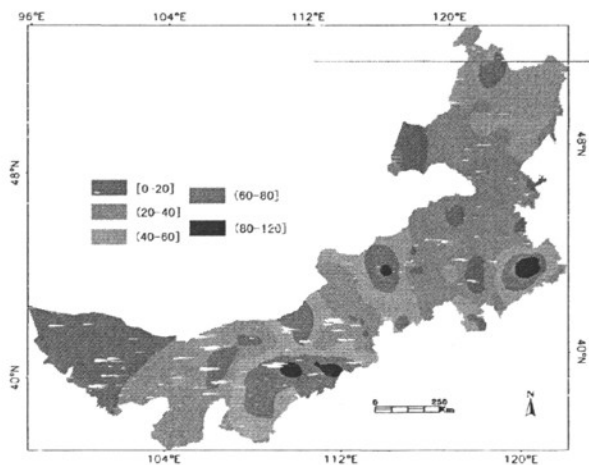


图 (4—19) 内蒙古区域实际蒸散量 $E(x,t)$ (mm) (2006 年 8 月)

(4) $W_e(x,t)$ 的计算。以 2006 年 8 月为例, 利用公式 (4—14) 以及计算实现的 $E(x,t)$ 和 $E_p(x,t)$ 成果直接计算水分胁迫影响系数 $W_e(x,t)$, 如图 (4—20)。

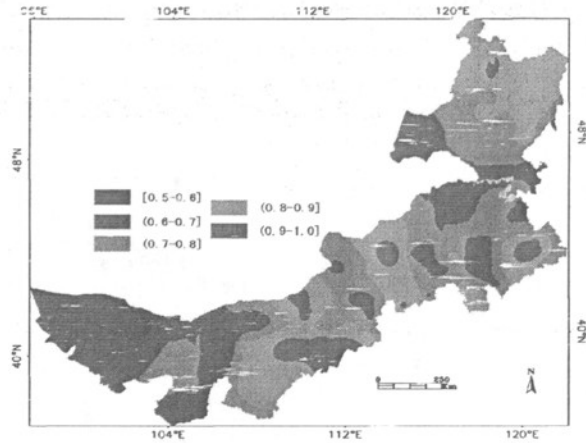


图 (4—20) $W_e(x, t)$ 的计算结果 (2006 年 8 月)

4.4 NPP 的估算实现

根据上述整个计算方法以及 2006 年 8 月的 $SOL(x, t)$ 、 $FPAR(x, t)$ 、 $T_e(x, t)$ 、 $W_e(x, t)$ 以及最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$ 等参数计算得到的 2006 年 8 月内蒙古陆地植被净第一性生产力 NPP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{Month}$) 的分布为如图 (4—21) 所示。

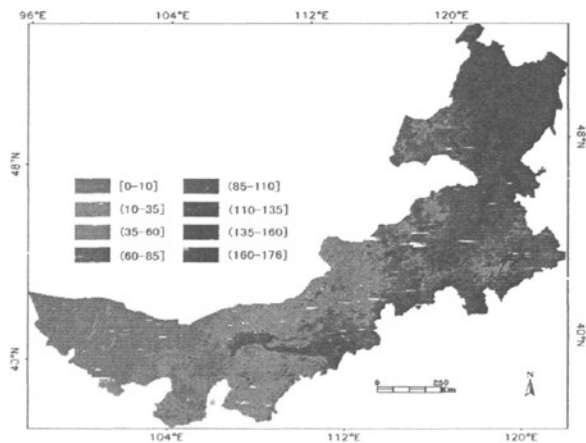


图 (4—21) 内蒙古陆地植被净第一性生产力 ($\text{NPP gC}/\text{m}^2/\text{Month}$) 的分布图 (2006 年 8 月)

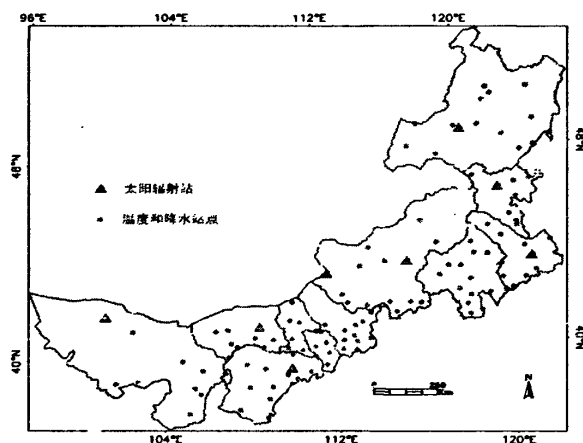
4.5 模型的精度讨论

区域及全球尺度的 NPP 模型的精度检验一直是一个非常重要的问题，它不仅是对 NPP 遥感估算很重要的问题，而对整个陆地、海洋和大气各种环境参数遥感反演都是一个非常重要的问题，也引起了很多争议。目前各种模型的精度评价一般有两种：一是与实测数据对比，二是不同模型结果的相互比较。由于缺乏与遥感数据空

间分辨率相匹配的大空间尺度地面实测数据,与实测数据对比是困难的,既是有了地面实测数据也难以保证数据采集时间和卫星过境时间的同步,因此两者之间还存在一定的不可比性。不同模型所输入参数的不同,模型结果比较也会有偏差是难免的。本文使用的模型是朱文泉(朱文泉,2005)对已有光能利用率 CASA 模型进行改进和完善后的 CASA 模型。朱文泉(朱文泉,2005)应用来自全国 690 个点的森林实测 NPP 数据,已对该模型进行了精度验证,模型的总体验证结果是模拟值和实测值比较接近,两者相差仅 $43 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 平均相对误差为 4.5%。另外,张峰(张峰,周广胜等,2008)等同样利用来源于内蒙古典型草原的实测数据对 CASA 模型进行验证得到两者具有很好的一致性,两者的平均绝对误差(APE)为 $17.49 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$, 平均相对误差(RPE)为 17.45%, 两个误差值均相对较少。

4.6 近 5 年内蒙古 NPP 时空序列集的建立

本文利用 2002~2006 覆盖全内蒙古的 126 (118 个气象站点和 8 个太阳总辐射站) 个气象观测站点(图 4—21)的气象数据(太阳总辐射、月平均温度和月总降水量)和 MODIS 卫星遥感数据,按照上述计算 NPP 的光能利用率 CASA 模型和实现步骤,逐月计算并建立了 2002~2006 年每月植被 NPP 时间序列数据集。由于 9 月份开始内蒙古地区天气变寒冷,植被开始枯黄,同时冬季内蒙古部分地区都被积雪覆盖,遥感观测的地表反射信息不能反映绿色植被的反射光谱特征,所计算的 *NDVI* 很难反应植被的生长状况。另外,冬季 NPP 对全年 NPP 总量的贡献比较低,每年 4~8 月份是内蒙古 NPP 积累的最主要时期。因此本文主要对近五年每年选用 4~8 月份的 NPP 用于时空分布特征分析。



图(4—21) 内蒙古气象站点分布图

5. 内蒙古陆地 NPP 时空分布特征

本文建立内蒙古陆地生态系统 2002~2006 年每月植被 NPP 时间序列数据集, 分析了近五年生长季(4~8 月份)的内蒙古 NPP 时空分布特征及其变化趋势。

5.1 NPP 空间分布特征

由近五年 4~8 月内蒙古 NPP 的平均状况来看(图 5—1), 内蒙古陆地生态系统 NPP 空间分布的基本特点是东高西底、北高南低, 自西南向东北 NPP 呈逐渐递增的分布趋势, 这与该地区的水热条件和植被分布基本一致。NPP 高值区主要分布在大兴安岭、赤峰西部和南部部分落叶阔叶林地区 and 与它相邻的草原地区以及兴安盟北部林区, NPP 在 $450 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 以上。NPP 次一级高值区主要分布在呼伦贝尔盟大兴安岭西部草原地区和北部针叶林区以及锡林郭勒盟东北少部分草原地区, NPP 为 $350 \sim 450 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 。接着是主要通辽、赤峰、锡林郭勒中部、集宁南部、呼和浩特和河套灌区农作物地区的 NPP, 大概介于 $250 \sim 350 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间。NPP 最低值区主要分布在阿拉善盟隔壁和沙漠地区和水域区域, NPP 只有 $0 \sim 50 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间, 并很多地区的值都接近 0。次一级低值区分布在锡林郭勒盟西部、集宁北部、临河北部和鄂尔多斯高原地区, 五年平均 NPP 为 $50 \sim 250 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 。为了更明显的体现内蒙古 NPP 的空间分布差异, 在 NPP 空间分布图上由阿拉善盟向呼伦贝尔盟做两条覆盖全区的西南~东北方向的剖面, 剖面一的起点和终点分别选取了(97.174°E , 42.778°N)和(120.303°E , 51.683°N)。剖面二的为(99.371°E , 39.936°N)和(125.651°E , 51.314°N) (图 5—2)。两条剖面线对应的 NPP 变化如图 5—3 所示, NPP 总的变化趋势是由西南阿拉善向东北呼伦贝尔地区 NPP 不断上升, 从荒漠地区最低值不到 $10 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 上升到森林地区的高值 $600 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 左右, 而且在经度 $97.174^\circ\text{E} \sim 120.303^\circ\text{E}$ 之间随着两条剖面 NPP 增长速度比较快, 经过经度 120.303°E 之后 NPP 变化进入稳定状况, 上升趋势基本停止。

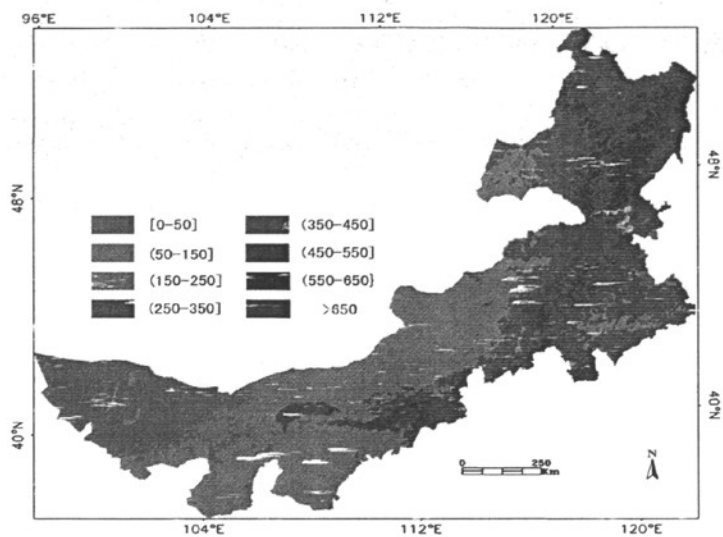


图 (5—1) 2002~2006 年内蒙古 NPP 平均值分布图 ($\text{gC/m}^2/\text{yr}$)

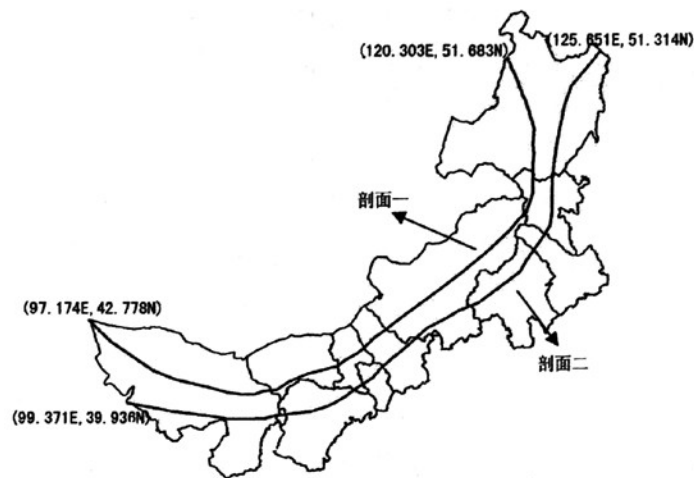
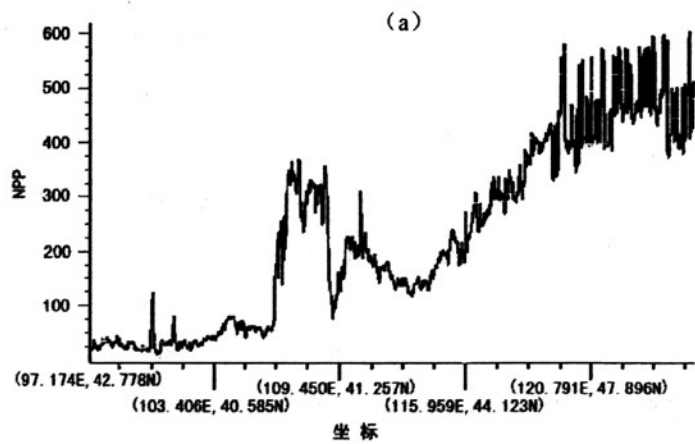


图 (5—2) 选取的剖面位置图



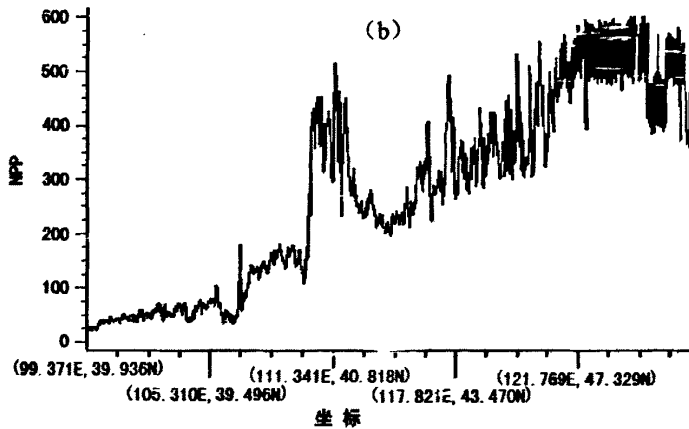


图 (5—3) 两条剖面上的 NPP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$) 变化图
(a) 剖面一; (b) 剖面二

5.2 不同植被类型平均 NPP 分布特征

利用雍世鹏、李博、崔海亭等 1991 年主编的内蒙古自治区资源系列地图中的 1:500 万内蒙古自治区植被类型图 (图 4—3), 对不同植被类型的近五年 4~8 月份平均 NPP 及其总量进行统计分析, 结果如表 (5—1) 和图 (5—4)。由表格和图可以看出, 内蒙古陆地生态系统不同植被类型的 NPP 呈现出明显的时空变化特征。其中, 平均 NPP 值最高的为落叶阔叶林, 达到了 $516.45 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$, 其次是落叶针叶林, 为 $386.44 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$, 接着是疏林、农业植被、灌丛等, 单位平均 NPP 都 $300 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ 以上。常绿针叶林和草原的分别约为 $278.63 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ 和 $262.05 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$, 而且由草原的标准差可看出, 草原单位平均 NPP 值的离散程度比较大, 表明空间变化更大。水域和荒漠区域的都非常小, 荒漠只有 $52.43 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ 。虽然近五年单位平均 NPP 从森林、农业植被、草原到荒漠地区有减少趋势的空间分布, 但由于所覆盖的面积不同, NPP 总量的差异也很大。本文所利用的 MODIS 数据分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 因此, 不同植被类型的像元数可以近似代表所覆盖面积。其中, 面积最大是草原, NPP 总量也达到最高, 为 $1.52 \times 10^{14} \text{ gC}/\text{yr}$, 占总量的 55.68%, 其次为落叶阔叶林和农业植被, 分别约为 $3.60 \times 10^{13} \text{ gC}/\text{yr}$ 和 $3.41 \times 10^{13} \text{ gC}/\text{yr}$, 占总量的 13.19% 和 12.49%, 落叶针叶林的为 $2.32 \times 10^{13} \text{ gC}/\text{yr}$, 占 8.5%。荒漠和灌丛的都不是很高。疏林和水域的极低, 对总量的贡献率都很低。整个森林 (落叶针叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和疏林) 的总量为 $6.03 \times 10^{13} \text{ gC}/\text{yr}$, 占总量的 22.09%。

表 (5—1) 近五年 4-8 月份不同植被类型平均 NPP 统计结果

植被类型	像元数	代码	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
落叶针叶林	59965	1	31.40	444.16	386.44	29.36	2.32×10^{13}
常绿针叶林	1671	2	92.84	398.08	278.63	66.27	4.66×10^{11}
落叶阔叶林	69683	3	33.69	693.25	516.45	79.82	3.60×10^{13}
疏林	1828	7	56.27	496.73	320.42	89.47	5.86×10^{11}
草原	580969	5	15.54	557.95	262.05	115.18	1.52×10^{14}
荒漠	290609	6	0.0	82.01	52.43	37.39	1.52×10^{13}
灌丛	34195	4	49.03	438.14	309.00	71.86	1.06×10^{13}
农业植被	108702	8	0.12	561.38	313.77	66.37	3.41×10^{13}
水域	4017	9	0.68	497.14	122.60	121.37	3.41×10^{11}
总计	1151639						2.73×10^{14}

注释: NPP 最小值、最大值和平均值($\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$); 总量($\text{Pg C}/\text{yr}$);

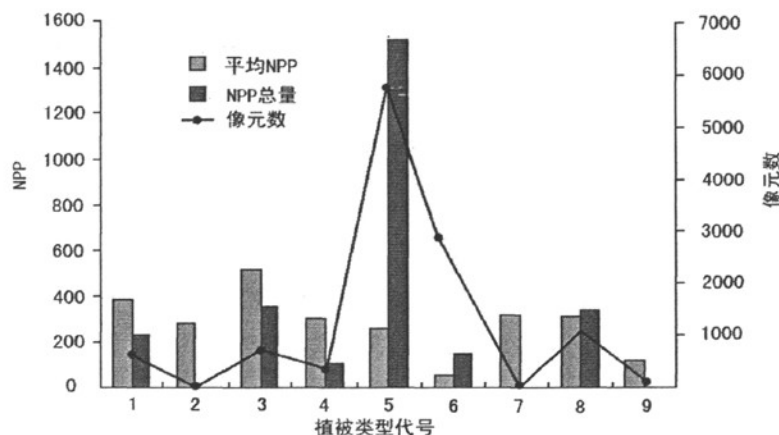


图 (5—4) 不同植被类型的平均 NPP ($\text{gC}/\text{m}^2/\text{yr}$) 及其总量 ($\times 10^{11} \text{ gC}/\text{yr}$) 和对应像元数量 ($\times 10^2$)

5.3 NPP 年际变化特征

2002~2006 年每年 4 至 8 月份内蒙古陆地生态系统植被累计 NPP 空间分布和统计值如图 (5—5) 和表 (5—2) 所示。由图 (5—5) 可看出, 2002~2006 年间, 内蒙古 NPP 由西南到东北逐渐增加分布的总体趋势是没有变化, 只是局部地区有所变化。2003 年和 2004 年呼伦贝尔地区的 NPP 高值区范围较其它年明显有所缩小, 呼伦贝尔地区这两年 NPP 值大于 $650 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$ 的像元很少, 而 2005 年和 2006 年 NPP 高值区明显大于其它三年。内蒙古西部以及河套灌区的 NPP 分布这几年都没有太大的变化。中部地区 2005 年和 2006 年 NPP 低值区面积较其它年份明显有所扩大, 还有鄂尔多斯高原地区 2005 和 2006 年 NPP 明显有下降趋势。表 (5—2) 显示, 2002~2006 年 4 至 8 月份内蒙古累计 NPP 变化范围为 $0 \sim 751.72 \text{ gC}/\text{m}^2/\text{yr}$, 全区平

均值在 $209.01 \sim 257.32 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间。NPP 总量在 $0.241 \sim 0.296 \text{ Pg C/yr}$ ($1 \text{ Pg} = 10^{15} \text{ g}$) 之间, 波动幅度为 0.055, 平均为 0.273 Pg C/yr , 波动幅度占平均总量的 20.1%。这五年 4 至 8 月份积累的 NPP 内蒙古总量大约占全国 NPP 总量的 8.69% (以朱文泉估算的 1982~2000 全国平均 NPP 总量为 3.14 Pg C/yr 为参考)。其中, 2002 和 2003 年的 NPP 总量最高, 分别为 0.296 Pg C/yr 和 0.295 Pg C/yr , 两年 NPP 总量几乎相等。其次为 2005 年和 2006 年, NPP 总量最低值出现在 2004 年, 只有 0.241 Pg C/yr 。图 (5—6) 显示, 这五年生长季内累计 NPP 总量总体上呈现出逐渐减少的趋势, 但减少幅度不是很大, 属于短期波动。这主要可能与 5 个月降水量有关, 2004、2005 和 2006 年 5 个月总降水量明显低于 2002 和 2003 年。当然 NPP 年际波动还受着其它很多各种自然和社会因素。

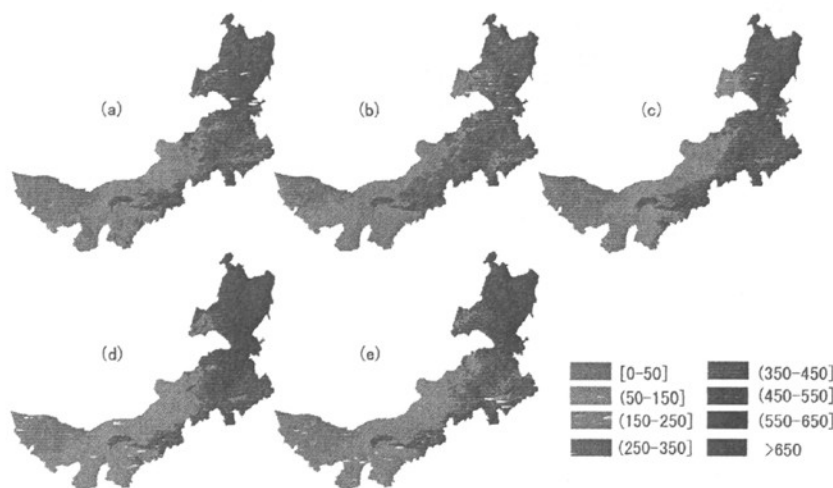


图 (5—5) 内蒙古陆地生态系统五年月累计 NPP ($\text{NPP gC/m}^2/\text{yr}$) 分布图
(a) 2002 年 4~8 月累计 NPP; (b) 2003 年 4~8 月累计 NPP; (c) 2004 年 4~10 月累计 NPP;
(d) 2005 年 4~10 月累计 NPP; (e) 2006 年 4~10 月累计 NPP

表 (5—2) 内蒙古 2002~2006 年 4 至 8 月份累计 NPP 统计结果

年份	累计月份	5个月总降水量	最小值	最大值	平均值	标准差	总量
2002	4-8月	29621.3	0.0	751.19	257.32	174.31	0.296
2003	4-8月	32748.5	0.0	696.18	256.97	138.18	0.295
2004	4-8月	28609.8	0.0	726.83	209.01	140.22	0.241
2005	4-8月	27261.3	0.0	693.12	237.86	175.20	0.274
2006	4-8月	25580.5	0.0	751.72	223.48	167.24	0.257

注释: NPP 最小值、最大值和平均值($\text{gC/m}^2/\text{yr}$); 总量(Pg C/yr), 降水量 (mm)。

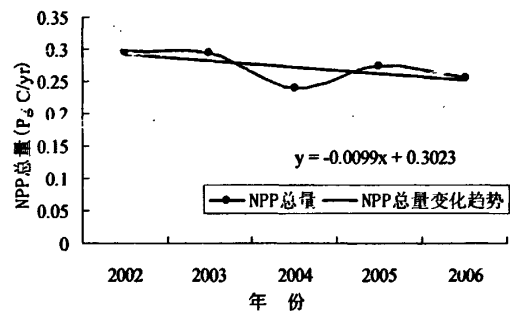


图 (5—6) 近五年 NPP 总量变化图

5.4 不同植被类型 NPP 年际变化特征

近五年不同植被类型NPP年际变化特征如表 (5—3、4、5、6、7) 和图 (5—7) 所示。不同植被类型NPP总量每年不尽相同，其中落叶针叶林和落叶阔叶林有增长趋势，常绿针叶林、疏林、草原、灌丛和农业植被有减少趋势，有可能与降水量变化有关，近五年总降水量有明显的减少趋势。

表 (5—3) 2002年不同植被类型NPP统计表

代码	植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
1	落叶针叶林	0.02	536.34	417.65	40.74	2.50×10^{13}
2	常绿针叶林	107.20	429.86	318.31	79.86	5.32×10^{11}
3	落叶阔叶林	20.96	751.19	574.80	106.40	4.01×10^{13}
7	疏林	75.90	527.98	344.87	92.44	6.30×10^{11}
5	草原	0.01	613.37	290.53	126.93	1.69×10^{14}
4	灌丛	0.03	478.89	331.45	80.37	1.13×10^{13}
8	农业植被	0.15	607.48	331.69	77.95	3.61×10^{13}

表 (5—4) 2003年不同植被类型NPP统计表

代码	植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
1	落叶针叶林	0.0	457.64	354.79	40.65	2.13×10^{13}
2	常绿针叶林	117.54	400.80	266.76	49.92	4.46×10^{11}
3	落叶阔叶林	1.05	696.18	477.50	77.62	3.33×10^{13}
7	疏林	97.07	533.84	346.17	90.79	6.33×10^{11}
5	草原	0.0	587.23	287.85	103.96	1.67×10^{14}
4	灌丛	51.21	472.71	319.33	66.73	1.09×10^{13}
8	农业植被	0.11	604.53	331.41	65.40	3.60×10^{13}

表 (5—5) 2004年不同植被类型NPP统计表

代码	植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
1	落叶针叶林	0.0	389.64	307.85	62.76	1.85×10^{13}
2	常绿针叶林	33.88	389.67	236.06	51.96	3.94×10^{11}

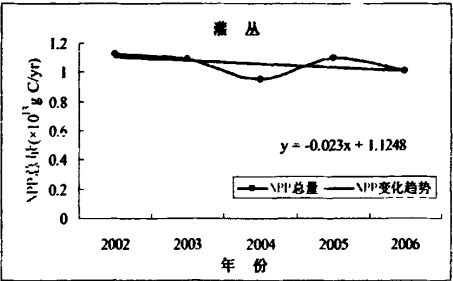
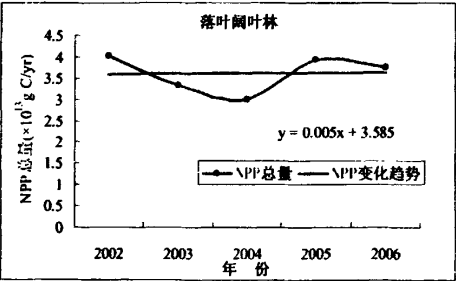
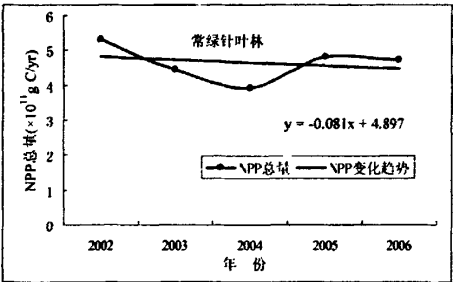
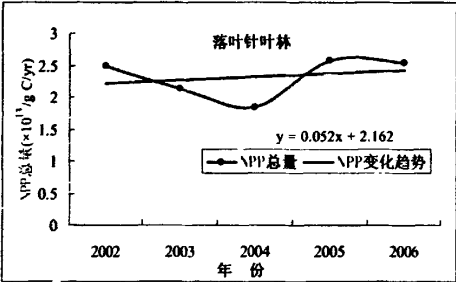
3	落叶阔叶林	0.0	726.83	430.55	74.09	3.00×10^{13}
7	疏林	21.57	599.53	364.53	114.12	6.66×10^{11}
5	草原	0.0	673.36	234.29	108.39	1.36×10^{14}
4	灌丛	0.0	522.54	277.45	65.10	9.49×10^{12}
8	农业植被	0.10	663.55	303.20	83.97	3.30×10^{13}

表 (5—6) 2005年不同植被类型NPP统计表

代码	植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
1	落叶针叶林	0.001	512.13	428.58	33.43	2.57×10^{13}
2	常绿针叶林	54.37	395.04	288.12	87.38	4.81×10^{11}
3	落叶阔叶林	0.0	693.12	563.04	91.11	3.92×10^{13}
7	疏林	70.75	459.81	281.19	97.02	5.14×10^{11}
5	草原	0.0	602.07	256.62	144.19	1.49×10^{14}
4	灌丛	0.0	462.33	321.28	91.80	1.10×10^{13}
8	农业植被	0.12	565.65	309.72	88.14	3.37×10^{13}

表 (5—7) 2006年不同植被类型NPP统计表

代码	植被类型	最小值	最大值	平均值	标准差	平均总量
1	落叶针叶林	0.0	486.15	423.32	33.56	2.54×10^{13}
2	常绿针叶林	0.13	425.95	283.89	90.41	4.74×10^{11}
3	落叶阔叶林	0.0	751.72	536.38	104.62	3.74×10^{13}
7	疏林	4.03	488.55	265.34	86.43	4.85×10^{11}
5	草原	0.0	579.12	240.95	130.70	1.40×10^{14}
4	灌丛	0.0	463.11	295.50	89.24	1.01×10^{13}
8	农业植被	0.05	578.26	292.83	80.57	3.18×10^{13}



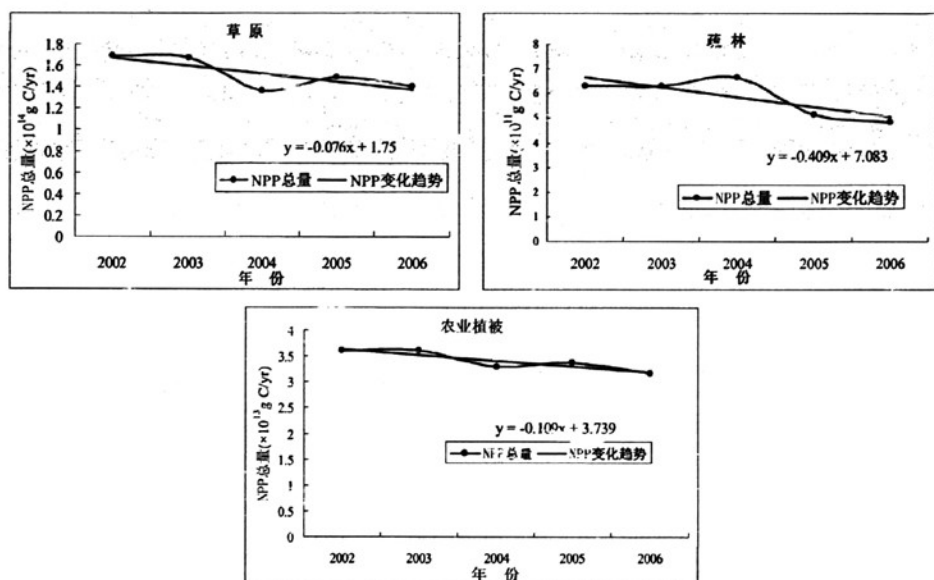


图 (5—7) 不同植被类型 NPP 总量变化图

5.5 NPP 月际变化

由于不同月份的水热条件的不同,各月NPP的变化也很大。因此本文计算了五年的月平均NPP进行分析。图(5—8)显示了所计算的4、5、6、7、8月份月平均NPP和月总量的变化情况。从图可看出,4~7月分的NPP的增长速度比较快,7月达到NPP的最高值,8月份的NPP相对于7月份低些。其中,4月份平均积累的NPP占总量的4.0%,5月占10.96%,6月份为23.13%,7、8月份分别为31.29%和30.63%,只有7和8月积累的NPP占年度NPP总量的61.92%。

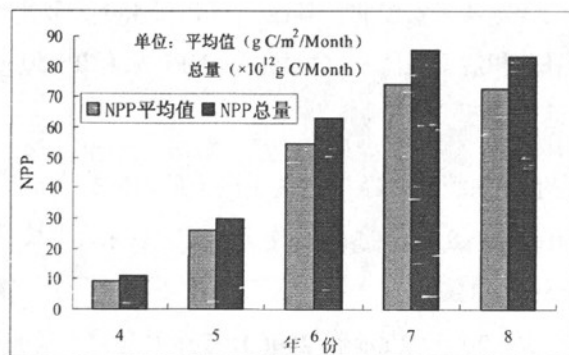


图 (5—8) 多年月平均 NPP 和月总量

6. 结论与展望

6.1 结论

本文以 TERRA/MODIS 的 NDVI 影像为主要数据源, 结合相应时间段的地面气象资料 (月均气温、月总降水量和太阳总辐射) 和雍世鹏、李博、崔海亭等 1991 年主编的 1:500 万内蒙古自治区植被类型分布图 (内蒙古自治区资源系列地图), 利用朱文泉改进与完善 (朱文泉, 2005) 的光能利用率模型 CASA 模型, 估算了内蒙古 2002~2006 年间每月植被净第一性生产力, 并分析了生长季 (4~8 月份) 的 NPP 时空分布特征。主要的研究结果包括如下几点:

1、以卫星遥感资料为基础, 结合植被类型数据和气象数据, 利用光能利用率模型可以大面积进行估算区域尺度的 NPP, 避免了传统统计计算模型或抽样定点观测法的以点代面缺点, 使得 NPP 的估算结果更接近地表真实情况, 能够更直观、实时、准确地反映 NPP 的时空分布格局。

2、从近五年 (2002~2006 年间) 生长季 (4~8 月份) 内蒙古陆地生态系统植被平均净第一性生产力的空间分布格局来看, 内蒙古的陆地 NPP 是东高西底、北高南低, 由西南向东北 NPP 呈逐渐递增的分布趋势, 这与该地区的水热条件和植被分布基本一致。NPP 最高值主要分布在大兴安岭、赤峰西部和南部部分落叶阔叶林地区 and 与它相邻的草原地区以及兴安盟北部林区, NPP 在 $450 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 以上。最低值主要分布在阿拉善盟隔壁和沙漠地区和水域区域, NPP 只有 $0\sim 50 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间, 并很多地区的值都接近 0。

3、从内蒙古陆地生态系统植被净第一性生产力的时间分布格局来看, 2002~2006 年五年 (每年选用了 4~8 月份的 NPP 作为分析) 以来, 生长季内积累的 NPP 总量总体上呈现出逐渐减少的趋势, 但减少幅度不是很大, 属于短期波动。这主要可能与 5 个月降水量有关, 2004、2005 和 2006 年 5 个月总降水量明显低于 2002 和 2003 年。当然 NPP 年际波动还受着其它很多各种自然和社会因素。每年 4 至 8 月份单位平均 NPP 基本在 $0\sim 751.72 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 内波动, 全区平均值在 $209.01\sim 257.32 \text{ gC/m}^2/\text{yr}$ 之间。NPP 总量在 $0.241\sim 0.296 \text{ Pg C/yr}$ ($1\text{Pg}=10^{15}\text{g}$) 之间。其中, 2002 和 2003 年的 NPP 总量最高, 分别为 0.296 Pg C/yr 和 0.295Pg C/yr , 两年 NPP 总量几乎相等, NPP 总量最低值出现在 2004 年, 为 0.241 Pg C/yr 。从月际变化来看, 4~

7月分的NPP的增长速度比较快,7月达到NPP的最高值,8月份的NPP相对于7月份低些,只有7和8月积累的NPP占年度NPP总量的61.92%。

4、从不同植被类型的NPP来看,平均NPP值最高的为落叶阔叶林,达到了 $516.45\text{gC/m}^2/\text{yr}$,其次是落叶针叶林,为 $386.44\text{gC/m}^2/\text{yr}$,接着是疏林、农业植被、灌丛等,单位平均NPP都 $300\text{gC/m}^2/\text{yr}$ 以上,常绿针叶林和草原的分别约为 $278.63\text{gC/m}^2/\text{yr}$ 和 $262.05\text{gC/m}^2/\text{yr}$,平均值最小为荒漠,只有 $52.43\text{gC/m}^2/\text{yr}$ 。虽然近五年单位平均NPP从森林、农业植被、草原到荒漠地区有减少趋势的空间分布,但由于所覆盖的面积原因,NPP总量最高的是草原(面积最大),为 $1.52\times 10^{14}\text{gC/yr}$,占总量的55.68%。整个森林生态系统(落叶针叶林、常绿针叶林、落叶阔叶林和疏林)的总量为 $6.03\times 10^{13}\text{gC/yr}$,占总量的22.09%。从不同植被类型NPP年际变化特征来看,落叶针叶林和落叶阔叶林NPP有增长趋势,常绿针叶林、疏林、草原、灌丛和农业植被有减少趋势。

6.2 展望

本文用MODIS/NDVI、气象数据(太阳总辐射、温度、降水)和内蒙古植被类型数据计算CASA模型的5各重要参数作为模型输入,对近五年内蒙古陆地生态系统植被NPP进行估算,取得了初步研究成果,但尚存在诸多问题,今后应在如下方面着重开展研究:

1、本文在处理所需要的温度、降水量、太阳总辐射等气象资料时,均对来自126个地面气象观测站点的有限个数据通过Kriging插值得到了空间分辨率与NDVI数据一致的栅格化气象数据。虽然Kriging插值方法的插值功能较强,但这种从点到面的外推过程中,不可能避免对NPP估算产生误差,而且气象条件与它的空间分布和地形因素有密切相关。因此,为了减少这种误差,需要更高精度的插值估算方法,获得更高精度的栅格化的气象数据。或者发展尽量从遥感数据中得到模型所需要参数的方法,实现各种参数的同步,从而提高NPP的估算精度。

2、本文使用的植被类型数据是雍世鹏、李博、崔海亭等1991年主编的1:500万内蒙古自治区植被类型分布图(内蒙古自治区资源系列地图)。但论文以2002~2006年间的MODIS数据为数据源进行估算NPP,并空间分辨率为1000m。因此,今后将植被类型数据与遥感数据的精度和时间匹配上有待进一步提高。

3、对模型的改进与优化以及精度验证上需要进一步发展。模型一般是基于特

定的区域,不同的时间及空间尺度和一定的假设条件建立的。世界各地的差异很大,当选择一种模型估算具体区域的生态环境参数时,要考虑该模型的可移植性和可操作性。遥感模型的精度验证不仅是对 NPP 估算很重要问题,而对整个陆地、海洋和大气各种环境参数遥感估算都是一个非常重要的问题。目前普遍采用的方法有两种:一是与实测数据对比,二是与其它模型所估算结果进行对比。但不同模型的参数不同,模型对比也难免有偏差。大规模的 NPP 实测数据的获取也比较困难,既是有实测数据难以保证数据获取时间和卫星过境时间的同步,而且实测数据是点数据,遥感数据是面数据,两者之间还存在一定的不可比性。因此,今后对模型的选用、改进、完善和精度检验上需要进一步发展。

4、本研究只对近五年我国内蒙古陆地生态系统植被 NPP 进行时空分布研究。据专家研究表明,就我国沙尘天气主要起源于蒙古国南部~我国内蒙古中部干旱荒漠地带,只有 2006 年春季出现的 18 次沙尘天气中,有 16 次起源于蒙古国南部和我国内蒙古中西部干旱荒漠地带(彭继平,等,2008)。近年来,针对中国内蒙古和蒙古国(同属蒙古高原)众多环境问题,国内学者已经开展对蒙古高原气候变化及影响因素(王菱,等,2008)、农牧业系统格局变化与影响因素(甄林,等,2008)、土壤风蚀(刘纪远,齐永青等,2008)、荒漠化和湿地调查(包玉海,等,2007)以及蒙古高原塔里亚特—锡林郭勒样带土壤风蚀和内蒙古土壤风蚀危险度评价(师华定,2007)等方面进行研究。因此,我们今后拟对蒙古高原(中国内蒙古和蒙古国)地区更长时间序列 NPP 的时空分布特征及其影响因子进行研究。这不仅对该地区生态环境可持续发展具有较强的实际意义,也对我国华北、东北和西北等地区生态环境的保护和改善无疑将十分有意义。

5、本本一个值得注意的存在问题是,实际情况下沙漠、戈壁和水域等无植被地区的 NPP 应为 0,但模型估算的 NPP 都有值。这可能主要是由 NDVI 数据本身所引起的。NDVI 虽然是目前已有的 40 多种植被指数中应用最为广泛,可以对仪器定标、太阳角、地形、云阴影和大气条件有关的辐照度变化进行归一化处理,增强了对植被的响应能力。但 NDVI 也存在一些缺陷,如高植被区的饱和现象、大气影响校正的不彻底、土壤背景的干扰等。因此,无植被地带 NDVI 有时出现较大的值,从而导致估算的 NPP 不为 0。另外可能是混合象元问题,如果某个像元里同时存在植被和水体信息则导致所计算的像元 NDVI 值有可能大于 0,从而出现水域 NPP 不为 0 现象。

参考文献

- [1] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力, 植物生态学报, 2001, 25(5), 603~608.
- [2] 陈利军. 中国植被净第一性生产力的遥感评估研究[D]. 中国科学院地理科学与资源研究所, 博士学位论文, 2001.
- [3] 朱文全, 陈云浩, 徐丹, 李京. 陆地植被净第一性生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3), 296~300.
- [4] 郭晓寅, 何勇, 沈永平, 冯丁. 基于 MODIS 资料的 2000-2004 年江河源区陆地植被初级生产力分析. 冰川冻土, 2006, 28(4), 512~517.
- [5] 孙金铸. 内蒙古地理文集[M]. 内蒙古, 呼和浩特, 内蒙古大学出版社, 2003.
- [6] 彭继平, 李钢铁, 2006 年我国沙尘暴灾害特点及原因分析. 干旱区资源与环境, 2008, 22(2), 61~64.
- [7] 王菱, 甄霖, 刘雪林, Ochirbat Batkhashig, 王勤学. 蒙古高原中部气候变化及影响因素比较研究, 2008, 27(1).
- [8] 刘纪远, 齐永青, 师华定, 庄大方, 胡云峰. 蒙古高原塔里亚特-锡林郭勒样带土壤风蚀速率的 ^{137}Cs 失踪分析, 科学通报, 2007, 52(23).
- [9] 齐永青, 刘纪远, 师华定, 胡云峰, 庄大方. 蒙古高原北部典型草原区土壤风蚀的 ^{137}Cs 示踪法研究, 科学通报, 2008, 53(9).
- [10] 李贵才, 基于 MODIS 数据和光合利用率模型的中国陆地净第一性生产力估算研究. 中国科学院遥感应用研究所, 博士学位论文, 2004.
- [11] 王宗明, 梁银丽. 植被净第一性生产力模型研究进展. 西北林学院学报, 2002, 17(2), 22~25.
- [12] 崔霞, 冯琦胜, 梁天刚. 基于遥感技术的植被净第一性生产力研究进展. 草业科学, 2007, 24(10), 36~42.
- [13] 冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 周文佐. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. 自然资源学报, 2004, 19(3), 370~378.
- [14] 朱志辉. 自然植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15), 1422~1426.
- [15] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 19(3): 193~200.
- [16] 周广胜, 张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研[J]. 植物生态学报, 1996, 20(1), 11~19.
- [17] 刘海桂, 唐旭利, 周国逸, 刘曙光. 1981-2000 年广东省净第一性生产力的时空格局. 生态学报, 2007, 27(10).
- [18] 周广生, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. 植物生态学报, 1995, 19(3), 193~200.
- [19] 朱文泉. 中国陆地生态系统植被净第一性生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究. 北京师范大学, 博士学位论文, 2005.
- [20] 王兆礼, 陈晓宏. 珠江流域植被净第一性生产力及其时空格局. 中山大学学报, 2006, 45(6), 106~110.
- [21] 吕光辉, 刘卫国. 新疆 20 年生态系统净第一性生产力研究. 新疆大学学报, 2008, 25(1), 9~22.
- [22] 高洁竹, 万运帆, 李玉娥, 林而达, 杨凯, 江村旺扎, 王宝山, 李文福. 基于 CASA 模型的藏北地区草地植被净第一性生产力及其时空格局. 用生态学报, 2007, 18(11), 2526~2532.
- [23] 王军邦. 基于遥感-过程耦合模型的区域陆地净生态系统生产力模拟研究. 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院博士后研究报告.
- [24] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永. 中国典型植被最大光利用率模拟. 科学通报, 2006, 51(6), 700~706.
- [25] 甄林, 刘纪远, 刘雪林, 王菱, Ochirbat Batkhashig, 王勤学. 蒙古高原农牧业系统格局变化与影响因素分析. 干旱区资源与环境, 2008, 1(22), 540~548.
- [26] 冯秀, 仝川, 张鲁等. 内蒙古白音锡勒牧场区域尺度草地退化现状评价. 自然资源学报, 2006, 21(4): 575~583.
- [27] 朴世龙, 方精云, 贺金生等. 中国草地植被生物量及其空间分布格局. 植物生态学报, 2004, 28(4): 491~498.
- [28] 朱文泉, 陈云浩, 潘耀忠等. 基于 GIS 和 RS 的中国植被光能利用率估算. 武汉大学学报: 信息科学版, 2004,

- 29(8): 694~698.
- [29] 闫慧敏. 基于遥感观测的土地利用对中国农田生态系统生产力和碳吸收的影响研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [30] 彭少麟, 郭志华. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光能利用率. 生态学报, 2000, 20(6): 903~909.
- [31] 徐希孺, 金丽芳, 赁常恭等. 利用 NOAA-CCT 估算内蒙古草场产草量的原理和方法. 地理学报, 1985, 40(4): 333~346.
- [32] 刘占宇, 黄敬峰, 吴新宏等. 草地生物量的高光谱遥感估算模型. 农业工程学报, 2006, 22(2): 111~115.
- [33] 李文华. 生物生产力的概念及其研究的基本途径. 自然资源, 1978, 1: 71~92.
- [34] 黄敬峰, 王秀珍, 王人潮等. 天然草地牧草产量与气象卫星植被指数的相关分析. 农业现代化研究, 2000, 21(1): 33~36.
- [35] 王绍强, 周成虎, 罗承文. 中国陆地自然植被碳量空间分布特征探讨. 地理科学进展, 1999, 18(3): 238~244.
- [36] 张增祥. 我国资源环境遥感监测技术及其进展. 中国水利, 2004, 11: 52~54.
- [37] 方精云. 全球生态学——气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [38] Leith, H. Whittaker, R. H. Primary Productivity of Biosphere, Springer-Verlag [M]. New York, 1975.
- [39] Uchijima, Z., Seino, H. Agrocimatic evaluation of net primary productivity of nature vegetation [I]. Chikugo model for evaluating primary productivity [J]. Journal of Agricultural Meteorology, 1985, 40: 343-352.
- [40] Field CB, Randerson JT, Malmström CM. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 1995, 51, 74~88.
- [41] Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7, 811~841.
- [42] Prince SD, Goward SN. Global net primary production: a remote sensing approach. Journal of Biogeography, 1995, 22, 815~835.
- [43] J.B.Bradford, J.A.Hicke, W.K.Lauenroth, the relative importance of light-use efficiency modifications from environmental conditions and cultivation for estimation of large-scale net primary productivity. Remote Sensing of Environment, 2005, 96, 246~255.
- [44] Goetz, S. J., Prince, S. D. 1996. Remote sensing of net primary production boreal forest stands. Agricultural and Forest Meteorology, 78: 149~179.
- [45] Cao, M. K., Woodward, F. I. 1998. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. Nature, 393: 249~252.
- [46] Brogaard, S., Runnstrom, M., Seaquist, J. W. 2005. Primary production of Inner Mongolia, China, between 1982 and 1999 estimated by a satellite data-driven light use efficiency model. Global and Planetary Change, 45: 313~332.
- [47] Cramer, W., Field, C.B. 1999. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): introduction. Global Change Biology, 5: 3~4.
- [48] Euskirchen, E. S., Chen, J., Li, H. 2002. Modelling landscape net ecosystem productivity (Land NEP) under alternative management regimes. Ecological Modelling, 154: 75~91.
- [49] Goetz, S. J., Prince, S. D. 2000. Interannual variability of global terrestrial primary production: results of a model driven with satellite observations. Journal of Geophysical Research, 105: 20077~20091.
- [50] Fang, J. Y., Chen, A. P., Peng, C. H. 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. Science, 292: 2320~2322.
- [51] Field, C. B., Randerson, J. T., Malmstrom, C. M. 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. Remote Sensing of Environment, 51: 74~88.
- [52] Labus, M. P., Nielsen, G. A., Lawrence, R. L. 2002. Wheat yield estimates using multi-temporal NDVI satellite

- p>imagery.
- International Journal of Remote Sensing*
- , 23: 4169~4180.
- [53] Gower, S. T., Vogel, J. G., Norman, J. M. 1997. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine, and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba. Canada. *Journal of Geophysical Research*, 102: 29029~29041.
- [54] Matsushita, B., Tamura, M. 2002. Integrating remotely sensed data with an ecosystem model to estimate net primary productivity in East Asia. *Remote Sensing of Environment*, 81: 58~66.
- [55] Hunt, Jr. E. R. 1994. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1725~1730.
- [56] Lieth, H. 1975. Modelling the primary production of the world. In: Lieth, H., Whittaker, R.H., eds. *Primary productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 237~263.
- [57] McCrady, R. L., Jokela, E. J. 1998. Canopy dynamics, light interception, and radiation use efficiency of selected loblolly pine families. *Forest Science*, 44: 64~72.
- [58] Monteith, J. L. 1972. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems, *Journal of Applied Ecology*, 9: 747~766.
- [59] Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. W., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R. B., Running, S. W. 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300: 1560~1563.
- [60] Melillo, J. M., McGuire, A. D., Kicklighter, D. W. 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363: 234~240
- [61] Parton, W. J., Scurlock, J. M. O., Ojima, D. S. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 785~809.
- [62] Paruelo, J. M., Epstein, H. E., Lauentoth, W. K. 1997. ANPP estimates from NDVI for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78: 953~958.
- [63] Potter, C. S., Klooste, S., Brooks, V. 1999. Interannual variability in terrestrial net primary production: exploration of trends and controls on regional to global scales. *Ecosystems*, 2: 36~48.
- [64] Ni, J. 2002. Carbon storage in grasslands of China. *Journal of Arid Environments*, 50: 205~248.
- [65] Ruimy, A., Saugier, B., Dedieu, G. 1994. Methodology for the estimation of net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99: 5263~5283.
- [66] Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B. 1993. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7: 811~841.
- [67] Prince, S. D., Goward, S. N. 1995. Global primary production: a remote sensing approach. *Journal of Biogeography*, 22: 815~835.
- [68] Raich, J. W., Rastetter, E. B. 1991. Potential net primary production in South America. *Ecological Applications*, 1: 399~429.
- [69] Raymond, E., Hunt, J. R. 1994. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 1725~1730.
- [70] Running, S. W., Hunt, E. R. Jr. 1993. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIO-BGC, and an application for global-scale models. In: Ehleringer, J.R., Field, C.B. (eds.), *Scaling Physiological Processes*. New York: Academic Press, 141~158.
- [71] Running, S. W., Thornton, P. E., Nemani, R. R., Classy, J. M. 2000. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system. In: Sala, O., Jackson, R. Mooney, H. *Methods in Ecosystem Science* New York, Springer-verlag, 44~57.
- [72] Whittaker, R. H. 1975. *Communities and Ecosystems*. 2nd ed. New York: MacMillan Publishing Co. Inc.
- [73] Taylor, B. F. 1985. Determination of seasonal and interannual variation in New Zealand pasture growth from NOAA 7 data. *Remote Sensing of Environment*, 18: 177~192.

- [74] Tucker, C. J., Seller, P. J. 1985. Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1395~1416.
- [75] Cao, M. K., Prince, S. D., Small, J., Goetz, S. 2004. Satellite remotely sensed interannual variability in terrestrial net primary productivity from 1980 to 2000. *Ecosystems*, 7: 233~242.
- [76] Schimel, D. S. 1995. Terrestrial biogeochemical cycle: global estimates with remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51: 49~56.
- [77] Ruimy, A., Kergoat, L., Bondeau, A. 1999. The participants of the Postdam NPP model intercomparison. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): analysis of differences in light absorption and light-use efficiency. *Global Change Biology*, 5: 56~64.
- [78] Zhao M, Heinsch F A, Nemani R R, et al. Improvement of the MODIS terrestrial gross and net primary production global data set[J] *Remote Sensing of Environment*, 2005, 95(2):164~176.

致 谢

本论文是在导师包玉海教授的指导下完成的。首先感谢他对我工作、生活和学习上的指导和帮助。从论文选题、撰写、修改、定稿的每一步，无不凝结着导师的心血和汗水。导师渊博的专业知识，严谨的治学态度，精益求精的工作作风，诲人不倦的高尚师德，严以律己、宽以待人的崇高风范，对我影响深远。不仅使我树立了远大的学术目标、掌握了基本的研究方法，还使我明白了许多待人接物和为人处世的道理。有幸得到导师的指导，是我一生的财富。

阿拉腾图雅老师是我工作和学习上的良师益友。她不仅在生活中给予无微不至的照顾和关怀，而且引导我在地学和遥感研究领域上不断学习新知识、探索新方法。这三年学业的完成离不开老师的指导，拳拳师生之情，令我终身难忘。

感谢生命科学与技术学院能乃扎布老师，他对科学的热情、严谨的治学态度、刻苦的拼搏精神，让我在以后的工作中都将受益非浅。

感谢银山、李百岁、雷军、马跃东、春喜、秦树辉等老师在学术上的指导和生活上的帮助。

感谢中国农业科学院农业资源与区划所农业部资源遥感重点实验室毛克彪博士和北京师范大学资源学院朱文泉博士。虽然我们没有见过面，但两位博士通过电子邮件为我解答了很多在地表温度反演和净初级生产力估算方面的疑问。在这里对两位博士表示衷心的感谢和崇高的敬意。

感谢内蒙古气象局李云鹏主任、都瓦拉、乌兰和刘鹏涛等朋友在气象数据搜集方面给予的大力帮助。

感谢我的同事内蒙古师范大学内蒙古自治区遥感与地理信息系统重点实验室常玉山，金来全，王萨仁娜等老师。

感谢研究生处的穆成立、邵金宝等老师在三年学业上的帮助。

感谢在内蒙古师范大学与我渡过美好时光的白中海、包玉龙、何振华、包山虎、周玲、呼斯呼、李秀云、春风、韩丽芳和那日苏等同学在三年学习生活中的相互鼓励，相互促进。

感谢我的父母，岳父母、在我求学道路上给予的无私奉献和一贯支持。他们质朴的语言和真实的行动永远激励我奋发向上。你们的健康快乐是我最大的心愿！感谢我的妻子在我学习和生活上给予的巨大帮助和奉献，感谢她对我的理解和支持！