

# 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 *NPP* 估算 ——以中国内蒙古为例

朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波

(北京师范大学 资源学院, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 在 GIS 的支持下, 利用地面气象数据和 MODIS 数据, 考虑到最大光利用率在不同植被类型中的差异, 构建了一个区域陆地植被 *NPP* 估算模型, 并以 2002 年的内蒙古植被为例, 研究了植被净初级生产力及其时空分布。结果表明: (1) 该模型在数据获取上比较容易, 仅利用地面气象数据和遥感数据就可以对陆地植被 *NPP* 进行估算, 使其实际的可操作性得到加强。(2) 通过与 *NPP* 的实测资料及其他模型的对比研究表明: 该模型对区域陆地植被 *NPP* 的模拟效果较好, 与 Chikugo 模型相比, 它更能反应森林 *NPP* 的实际情况。(3) 2002 年内蒙古植被净初级生产力为 390.8 Mt C/a, 总体分布趋势是由东北向西南递减, 其季节变化也非常明显, 在 6 月中旬至 9 月中旬的 3 个月时间里, *NPP* 占了全年的 72.7%, 而 1—2 月份植物基本停止生长, 净初级生产力极低, 每月仅为 3.59 Mt C。

**关键词:** 地理信息系统; 遥感; 净初级生产力; MODIS; 内蒙古

**中图分类号:** Q948.1/TP79 **文献标识码:** A

## 1 引言

植被净初级生产力 (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<sup>[1]</sup>。*NPP* 作为地表碳循环的重要组成部分, 不仅直接反映了植被群落在自然环境条件下的生产能力, 表征陆地生态系统的质量状况, 而且是判定生态系统碳汇和调节生态过程的主要因子<sup>[2]</sup>, 在全球变化及碳平衡中扮演着重要的作用。自 20 世纪 60 年代以来, 各国学者对 *NPP* 的研究倍受重视, 国际生物学计划 (IBP, 1965—1974 年) 期间, 曾进行了大量的植物 *NPP* 的测定, 并以测定资料为基础联系气候环境因子 2 建立模型对植被 *NPP* 的区域分布进行评估, 如 Miami 模型、Montreal 模型、Chikugo 模型等<sup>[3,4]</sup>。在此期间, 世界许多国家基本完成了植被生产力的主要描述。建立于 1987 年的国际地圈——生物圈计划 (IGBP)、全球变化与陆地生态系统 (GCTE) 和最近出台的京都协定 (Kyoto Protocol) 均把植被的 *NPP* 研究确定为核心内容之一<sup>[5]</sup>。

*NPP* 的研究方法很多, 有关学者从不同角度及学科对 *NPP* 的估算进行了深入细致的研究, 取得了丰硕成果。在区域或全球尺度上, 人们无法直接和全面地测量 *NPP*, 因此利用模型估算 *NPP* 已成为一种重要而广泛接受的研究方法<sup>[6,7]</sup>; *NPP* 研究的早期, 有些人根据 *NPP* 和气候之间的统计关系, 建立了 *NPP* 的气候估算模型<sup>[8-11]</sup>; 还有些人则根据植物生长和发育的基本生态生理和过程, 并结合气候及土壤物理数据, 建立了 *NPP* 的估算的生态过程模型<sup>[12-15]</sup>。随着遥感和计算机技术的发展, 利用遥感模型进行 *NPP* 估算已深入到许多领域, 有的直接用植被指数与 *NPP* 的关系进行计算<sup>[16-18]</sup>; 而基于资源平衡理论的光利用率模型目前已成为 *NPP* 估算的一种全新手段<sup>[19-23]</sup>, 使区域及全球尺度的 *NPP* 估算成为可能。

本文在 GIS 的支持下, 利用地面气象数据和 MODIS 数据, 考虑到最大光利用率在不同植被类型中的差异, 构建了一个区域陆地植被 *NPP* 估算模型, 并以 2002 年的内蒙古植被为例, 对植被的净初级生产力进行了估算, 分析了其时空分布。

收稿日期: 2003-12-05; 修订日期: 2004-05-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40371001) 和国家重点基础研究发展规划项目 (G2000018604) 资助。

作者简介: 朱文泉 (1975—), 男, 湖南永兴人, 北京师范大学资源学院 2002 级博士生, 主要从事遥感和地理信息系统在生态学方面的应用研究工作。已发表论文 6 篇。

## 2 研究地区与方法

### 2.1 研究区域概况

内蒙古自治区位于中国北部边疆,总面积 118.3 万  $\text{km}^2$ ,呈狭长形,南北跨纬度  $15^{\circ}50'$ ,东西跨纬度  $28^{\circ}52'$ ,平均海拔 1000m 左右,大部分地区属于温带大陆性季风气候,只有大兴安岭北段地区属于寒温带大陆性季风气候,年平均气温在  $0^{\circ}\text{C}-8^{\circ}\text{C}$  之间,年降水量在 100—450mm。从东北到西北,随着降水量的减少和温度的上升,分布着温带山地针叶落叶林、草甸草原、典型草原、荒漠草原和戈壁,并与之对应有不同类型的土壤<sup>[24,25]</sup>。内蒙古草原是全球典型的中纬度半干旱温带草原生态类型,在温带草原中具有代表性并位于 IGBP 全球变化研究典型陆地样带中国东北陆地样带之内,是全球变化最为敏感的区域<sup>[25]</sup>。同时,由于气候干旱以及人为开垦破

坏,生态环境更加脆弱,而且内蒙古中西部是华北地区沙尘天气和沙尘暴的主要发源地。因此开展内蒙古植被 *NPP* 及其时空分布的研究,对于掌握该区域的生态系统质量状况和自然生产能力具有重要的意义。

### 2.2 模型与方法

*NPP* 估算模型的构建流程如图 1,模型中所估算的 *NPP* 可以由植物吸收的光合有效辐射 (*APAR*) 和光利用率 ( $\epsilon$ ) 2 个因子来表示,其估算公式如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中,  $t$  表示时间,  $x$  表示空间位置;  $APAR(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份吸收的光合有效辐射;  $\epsilon(x, t)$  表示像元  $x$  在  $t$  月份的实际光利用率。

#### 2.2.1 *APAR* 的估算

植被吸收的光合有效辐射取决于太阳总辐射和植物本身的特征,用公式(2)计算。

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

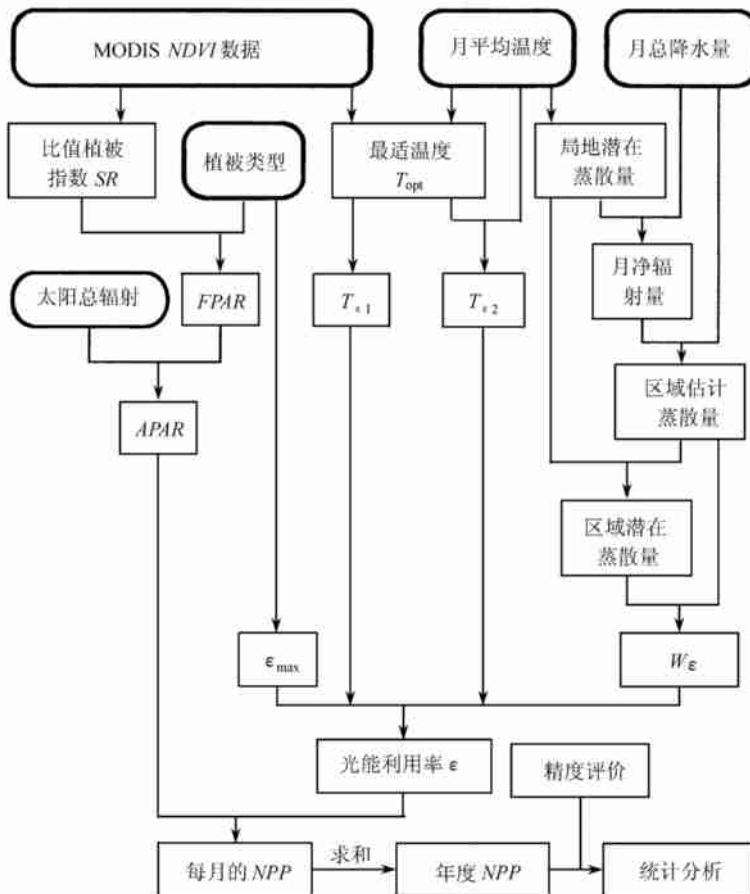


图 1 *NPP* 估算流程图

Fig. 1 Steps to estimate *NPP*

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

对于  $FPAR$  的计算采用 Potter 等<sup>[26]</sup> 提出的如下计算公式:

$$FPAR(x, t) = \min\left[\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95\right] \quad (3)$$

式中:  $SR_{\min}$  取值为 1.08,  $SR_{\max}$  的大小与植被类型有关, 取值范围在 4.14—6.17 之间。  $SR(x, t)$  由  $NDVI(x, t)$  求得

$$SR(x, t) = \left[\frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)}\right] \quad (4)$$

### 2.2.2 光利用率的估算

Potter 等<sup>[26]</sup> 认为在理想条件下植被具有最大光利用率, 而在现实条件下的最大光利用率主要受温度和水分的影响, 其计算如公式(5)。

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (5)$$

其中,  $T_{\epsilon_1}(x, t)$  和  $T_{\epsilon_2}(x, t)$  表示低温和高温对光利用率的胁迫作用,  $W_{\epsilon}(x, t)$  为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响,  $\epsilon_{\max}$  是理想条件下的最大光利用率。

$T_{\epsilon_1}(x, t)$  反映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<sup>[23, 24]</sup>。用(6)式计算。

$$T_{\epsilon_1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{\text{opt}}(x) - 0.0005 \times [T_{\text{opt}}(x)]^2 \quad (6)$$

其中,  $T_{\text{opt}}(x)$  为某一区域一年内  $NDVI$  值达到最高时的当月平均气温。已有许多研究表明,  $NDVI$  的大小及其变化可以反映植物的生长状况,  $NDVI$  达到最高时, 植物生长最快, 此时的气温可以在一定程度上代表植物生长的最适温度。

$T_{\epsilon_2}(x, t)$  表示环境温度从最适温度  $T_{\text{opt}}(x)$  向高温和低温变化时植物光利用率逐渐变小的趋势<sup>[23, 26]</sup>, 这是因为低温和高温时高的呼吸消耗必将会降低光利用率<sup>[26]</sup>, 生长在偏离最适温度的条件下, 其光利用率也一定会降低。用(7)式计算:

$$T_{\epsilon_2}(x, t) = 1.184 \left\{ 1 + \exp[0.2 \times (T_{\text{opt}}(x) - 10 - T(x, t))] \right\} \times 1 \left\{ 1 + \exp[0.3 \times (-T_{\text{opt}}(x) - 10 + T(x, t))] \right\} \quad (7)$$

当某一月平均温度  $T(x, t)$  比最适温度  $T_{\text{opt}}(x)$  高  $10^\circ\text{C}$  或低  $13^\circ\text{C}$  时, 该月的  $T_{\epsilon_2}(x, t)$  值等于月平均温度

$T(x, t)$ , 为最适温度  $T_{\text{opt}}(x)$  时  $T_{\epsilon_2}(x, t)$  值的一半。

水分胁迫影响系数  $W_{\epsilon}(x, t)$  反映了植物所能利用的有效水分条件对光利用率的影响。随着环境中有效水分的增加,  $W_{\epsilon}(x, t)$  逐渐增大。它的取值范围为 0.5(在极端干旱条件下)到 1(非常湿润条件下), 由公式(8)计算:

$$W_{\epsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5 \times E(x, t) / E_p(x, t) \quad (8)$$

其中,  $E(x, t)$  为区域实际蒸散量, 可根据周广胜和张新时<sup>[27]</sup> 建立的区域实际蒸散模型(9)求取。  $E_p(x, t)$  为区域潜在蒸散量, 可根据 Boucher<sup>[27, 28]</sup> 提出的互补关系(10)求取。

$$E(x, t) = \left\{ P(x, t) \times R_n(x, t) \times [(P(x, t))^2 + (R_n(x, t))^2 + P(x, t) \times R_n(x, t)] \right\} / \left\{ [P(x, t) + R_n(x, t)] \times [(P(x, t))^2 + (R_n(x, t))^2] \right\} \quad (9)$$

式中,  $P(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月的降水量,  $R_n(x, t)$  为像元  $x$  在  $t$  月份的太阳净辐射量。

$$E_p(x, t) = [E(x, t) + E_{p0}(x, t)] / 2 \quad (10)$$

式中的  $E_p(x, t)$  (mm) 为局地潜在蒸散量, 可以由 Thornthwaite 的植被—气候关系模型的计算方法求算<sup>[29]</sup>。

月最大光利用率  $\epsilon_{\max}$  的取值因不同的植被类型而有所不同, 由于全球最大光转化率的取值对  $NPP$  的估算结果影响很大, 人们对它的大小一直存在争议, 彭少麟等<sup>[21]</sup> 利用 GIS 和 RS 估算了广东植被光利用率, 认为 CASA 模型中所使用的全球植被月最大光利用率 ( $0.389\text{gC}/\text{MJ}$ ) 对广东植被来讲偏低。本文利用 Running 等人<sup>[30]</sup> 根据生态生理过程模型 BIOME—BGGM 对 10 种植物类型所模拟的结果, 它们的取值分别为: 常绿针叶林  $1.008\text{gC}/\text{MJ}$ , 常绿阔叶林  $1.259\text{gC}/\text{MJ}$ , 落叶针叶林  $1.103\text{gC}/\text{MJ}$ , 落叶阔叶林  $1.044\text{gC}/\text{MJ}$ , 混交林  $1.116\text{gC}/\text{MJ}$ , 落叶灌丛及稀树草原  $0.768\text{gC}/\text{MJ}$ , 稀疏灌木  $0.774\text{gC}/\text{MJ}$ , 矮林灌丛  $0.888\text{gC}/\text{MJ}$ , 草地  $0.608\text{gC}/\text{MJ}$ , 耕作植被  $0.604\text{gC}/\text{MJ}$ 。其他如城市、水体等生态系统取 CASA 模型所估算的全球月平均最大光利用率  $0.389\text{gC}/\text{MJ}$ 。

### 2.3 数据来源

本项目研究所利用的 TERRA MODIS 遥感数据来自美国马里兰大学的全球土地覆盖研究部(Global Land Cover Facility, GLCF)(下载网址: <http://modis. umiacs. umd. edu/main. htm>)。图像空间分辨率为  $500\text{m} \times 500\text{m}$ , 时间分辨率为 32 天, 时间序列为 2001

年 12 月 27 日至 2002 年 12 月 26 日。由于数据是 32 天合成的, 因此它所对应的时间与通常的日历有所

区别, 一年的数据实际上是对应 11 个时间段, 而不是 12 个月份(表 1)。

表 1 MODIS 数据时间段与日历对照表

Table 1 The calendar day look-up table for each period of MODIS data

时间段	日序数	日历	时间段	日序数	日历
1	001-032	12月27日-02月01日	7	193-224	07月12日-08月12日
2	033-064	02月02日-03月05日	8	225-256	08月13日-09月13日
3	065-096	03月06日-04月06日	9	257-288	09月14日-10月15日
4	097-128	04月07日-05月08日	10	289-320	10月16日-11月16日
5	129-160	05月09日-06月09日	11	321-360	11月17日-12月26日
6	161-192	06月10日-07月11日	1	361-365	12月27日-12月31日

气象数据来自内蒙古气象局, 为 2002 年内蒙古 118 个站点每天的降水、平均温度及太阳总辐射数据, 合成的时间段与 MODIS 数据一致。计算植被的光利用率需要栅格化的气象数据, 并从空间上与遥感数据相匹配。利用 GIS 的插值工具, 根据各气象站点的经纬度信息, 通过对气象数据进行 Kringing 插值, 获取像元大小与 *NDVI* 数据一致、投影相同的气象要素栅格图。

植被图为中国科学院地理研究所资源与环境信息系统国家重点实验室生产的全国 1:400 万的矢量格式的植被图<sup>[31]</sup>、以及潘耀忠等人基于 NOAA/AVHRR 和 Holdridge 的中国土地覆盖分类图<sup>[32]</sup>。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 模型精度评价

区域及全球尺度的 *NPP* 精度评价一直是一个非常困难的问题, 也引起了很多的争议, 评价的方法一般有两种: 一是与实测数据对比, 二是与其他模型所估算的结果进行对比。*NPP* 的实测数据获取比较困难, 试验点上所得到的数据也很难推广到区域及全球的尺度, 而且往往存在 *NPP* 获取的时间与模型所模拟的时间不一致的情况, 所以在进行 *NPP* 验证时, 二者之间因为环境变化异常而存在着一定程度的不可比性, 即使模拟的结果与实测结果完全一致, 误差也还是存在。

本文利用 30 组实测资料(资料来源于全球 *NPP* 数据库, 下载网址: [http://www.daac/oml.gov/NPP/npp\\_home.html](http://www.daac/oml.gov/NPP/npp_home.html))对估算结果进行了验证(图 2), 从中可以看出, *NPP* 的估算值与实测值相当吻合。由于实测值是多年来各自试验点上的平均观测值, 而本研究所模拟的是 2002 年的 *NPP*, 由于温度、降水、人为活动等环境

变化的影响, 二者之间存在一定的差异是难免的。值得说明的是, 尽管实测值与模拟值的时间不一致, 但对于大多数观测点来说, *NPP* 的估算值基本上都落在 *NPP* 实测值的变动范围内, 这可以从图 2 中的 *NPP* 趋势线与各实测点的标准差之间的关系反映出来。

本文还同时利用 Miami 模型、Montreal 模型和 Chikugo 模型<sup>[9]</sup>的计算结果作了对比。Miami 模型和 Montreal 模型都缺乏理论基础, Chikugo 模型由于把植物生理生态学和统计相关方法结合起来, 综合考虑了诸因子的作用, 是估算自然植被 *NPP* 的较好方法<sup>[9]</sup>, 用其估算的结果与实测值相比, 误差较小, 尤其对于旱和半干旱地区偏差更小<sup>[33]</sup>。表 2 列出了各模型的估算结果, 从中可以看出, 本文的 *NPP* 估算模型与 Chikugo 模型所反应的趋势比较一致, 均为落叶针叶林的 *NPP* 值最大, 荒漠的 *NPP* 值最小; 但新模型对森林 *NPP* 的估算要比 Chikugo 模型高, 其他如灌丛、草原、耕地等植被类型则较为一致。结合前面 *NPP* 估算值与实测值的比较(图 2), 我们可以看出, 新模型对区域陆地植被 *NPP* 的模拟效果较好, 与 Chikugo 模型相比, 它更能反应森林 *NPP* 的实际情况。

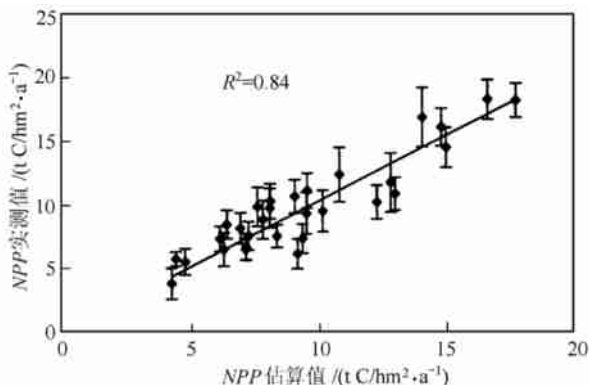


图 2 *NPP* 估算值与实测值的比较

Fig. 2 Comparison of simulated *NPP* and observed *NPP*

表 2 不同模型估算的 *NPP*Table 2 Comparison of annual *NPP* estimated by different models

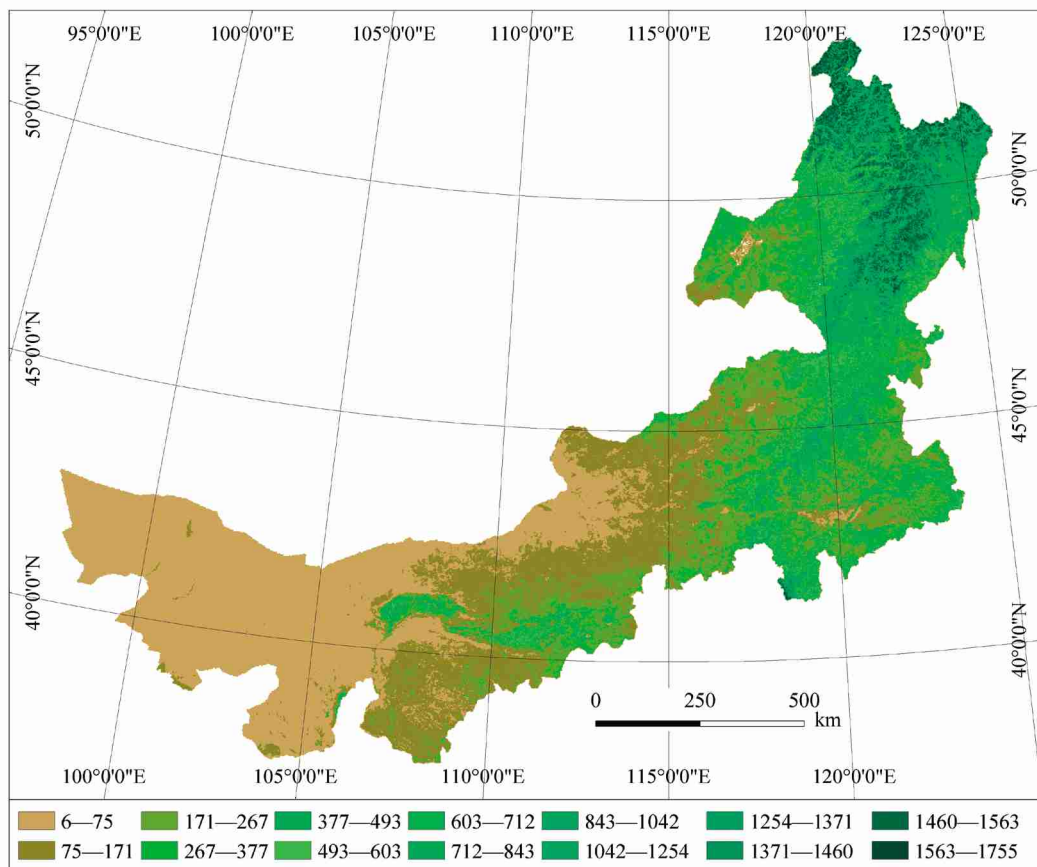
植被类型	Miami 模型		Montreal 模型		Chikugo 模型		本文 <i>NPP</i> 模型	
	均值	总和	均值	总和	均值	总和	均值	总和
	$/(gC/m^2a^{-1})$	$/(MtC/a)$	$/(gC/m^2a^{-1})$	$/(MtC/a)$	$/(gC/m^2a^{-1})$	$/(MtC/a)$	$/(gC/m^2a^{-1})$	$/(MtC/a)$
落叶针叶林	593.9	51.3	754.8	65.2	515.4	44.5	1435.9	124.1
常绿针叶林	1035.4	12.4	726.2	8.7	476.8	5.7	900.8	10.8
落叶阔叶林	840.4	27.3	757.0	24.6	513.4	16.7	1085.6	35.3
灌丛	1092.0	41.4	602.8	22.8	372.2	14.1	235.6	8.9
草原草甸	958.6	535.6	687.4	384.1	442.9	247.5	259.9	145.2
荒漠	1316.7	363.1	293.9	81.0	94.1	25.9	19.4	5.3
水域及沼泽	681.7	17.6	742.6	19.2	496.1	12.8	369.0	9.5
耕地	1027.7	140.9	715.4	98.1	465.1	63.8	376.8	51.7
总计		1189.6		703.7		431.0		390.8

### 3.2 内蒙古 *NPP* 的空间分布

计算结果表明, 2002 年内蒙古植被净初级生产力为 390.8MtC/a, 这一结果小于 Miami 模型、Montreal 模型和 Chikugo 模型所得出的结果(表 2)。由于气候模型计算时没有考虑植被覆盖情况, 所估算的

是潜在  $NPP^{14}$ , 并将气象站点上的 *NPP* 经过插值扩展到面上, 因此估算结果会偏高<sup>19</sup>。

内蒙古自然植被 *NPP* 的分布受水热条件的限制相当明显, 总体呈现从东北向西南递减的趋势(图 3)。东北部大兴安岭林区的植被覆盖率较高, 植被类型多样, 因此净初级生产力也较高, *NPP* 平均

图 3 内蒙古 *NPP* 的空间分布Fig. 3 Spatial distribution of *NPP* in Inner Mongolia

值超过了  $1000\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ ; 中部地区主要为草原草甸, 降水有所减少,  $NPP$  在  $500\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$  左右; 西部的荒漠区植被覆盖率极低, 有些地区甚至寸草不生,  $NPP$  最小, 平均值在  $100\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$  以下。植被净初级生产力受水分及温度的限制比较厉害, 温度升高、降水增加都会减少这两个因素的限制作用, 因此,  $NPP$  的相对增加幅度比较大。这与国际生物圈计划 (IBP) 的研究结果基本一致。

从表 2 中可以看出,  $NPP$  在不同植被类型中的差异也是相当明显的。内蒙古森林植被的平均年净初级生产力都超过了  $900\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ , 其中落叶针叶林平均年净初级生产力最大, 达到  $1435.9\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ ; 灌丛和草原草甸的平均年净初级生产力在  $250\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$  左右; 荒漠是年净初级生产力最小的植被类型, 平均值只有  $19.4\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ , 这与朴世龙等<sup>[19]</sup> 估算结果 ( $14\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ ) 相当一致。

### 3.3 内蒙古 $NPP$ 的季节变化

内蒙古  $NPP$  的季节变化如图 4。7 月中旬至 8 月中旬, 太阳辐射丰富, 水热条件适合于植物生长, 这段时期的净初级生产力达到极大值, 占全年净初级生产力的 29.3%。在 6 月中旬至 9 月中旬的 3 个月时间里,  $NPP$  占了全年的 72.7%, 这主要是因为内蒙古草原面积占了很大比例, 草本植物都集中在这段时间生长。10 月中旬开始, 至次年的 4 月初, 由于气温较低, 植物生长很慢, 1—2 月份时植物基本停止生长, 因此这段时期植被的净初级生产力很低, 每月仅为  $3.59\text{MtC}$ 。

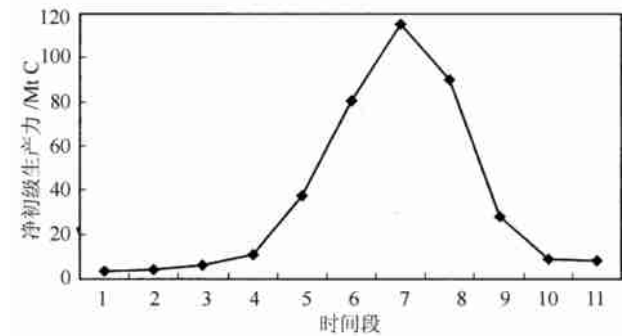


图 4 内蒙古净初级生产力的季节变化

Fig. 4 Seasonal changes of  $NPP$  in Inner Mongolia

## 4 结论

本文在 GIS 的支持下, 利用地面气象数据和 MODIS 数据, 考虑到最大光利用率在不同植被类型

中的差异, 构建了一个区域陆地植被  $NPP$  估算模型, 并以 2002 年的内蒙古植被为例, 对植被的净初级生产力进行了估算, 分析了其时空分布, 获得以下结论:

(1) 构建的  $NPP$  估算模型在数据获取上比较容易, 仅利用地面气象数据和遥感数据就可以对陆地植被  $NPP$  进行估算。它一方面保持了光能利用率模型原有的植物生理生态学基础, 另一方面则在一定程度上对有关参数实行了简化, 使其实际的可操作性得到加强。

(2) 通过与  $NPP$  的实测资料及其他模型的对比表明: 新构建的  $NPP$  估算模型对区域陆地植被  $NPP$  的模拟效果较好, 与 Chikugo 模型相比, 它更能反应森林  $NPP$  的实际情况。

(3) 2002 年内蒙古植被净初级生产力为  $390.8\text{MtC}$ , 其总体分布趋势是由东北向西南递减, 东北部大兴安岭林区的  $NPP$  值最高, 平均超过了  $1000\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$ ; 西部的荒漠区植被覆盖率极低, 有些地区甚至寸草不生,  $NPP$  最小, 平均在  $100\text{gC}/\text{m}^2\text{a}^{-1}$  以下。内蒙古  $NPP$  的季节变化也非常明显, 在 6 月中旬至 9 月中旬的 3 个月时间里,  $NPP$  占了全年的 72.7%, 而 1—2 月份植物基本停止生长, 净初级生产力极低, 每月仅为  $3.59\text{MtC}$ 。

### 参考文献 (References)

- [1] Liu J, Chen J M, Chen W. Net Primary Productivity Distribution in the BOREAS Region from a Process Model Using Satellite and Surface Data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1999, **104**(D22): 27735—27754.
- [2] Field C B, Behrenfeld M J, Randerson J T, et al. Primary Production of the Biosphere: Integrating Terrestrial and Oceanic Components [J]. *Science*, 1998, **281**: 237—240.
- [3] Leith H, Wittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere [M]. New York: Springer Verlag, 1975.
- [4] Uchijima Z, Seino H. Agroclimatic Evaluation of Net Primary Productivity of Natural Vegetation (1): Chikugo Model for Evaluating Productivity [J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 1985, **40**: 343—353.
- [5] IGBP (Steffan W, Noble I, Canadell P, et al.). The Terrestrial Carbon Cycle: Implications for Kyoto Protocol [J]. *Science*, 1998, **280**: 1393—1394.
- [6] Alexandrov G A, Oikawa T, Yamagata Y. The Scheme for Globalization of a Process-based Model Explaining Gradations in Terrestrial  $NPP$  and Its Application [J]. *Ecological Modelling*, 2002, **148**(3): 293—306.
- [7] Cranner W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing Global Models of Terrestrial Net Primary Productivity ( $NPP$ ): Overview and

- Key Results[ J ]. *Global Change Biology*, 1999, 1(Suppl. ): 1—15.
- [ 8 ] Zhu Z H . The Model of Net Primary Productivity of Vegetation in China [ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(15): 1422—1426. [ 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.]
- [ 9 ] Zhou G S, Zhang X S. A Natural Vegetation NPP Model [ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, 19(3): 193—200. [ 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.]
- [ 10 ] Zhou G S, Zhang X S. Study on NPP of Natural Vegetation in China under Global Climate Change[ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 1996, 20(1): 11—19. [ 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究[ J ]. 植物生态学报, 1996, 20(1): 11—19.]
- [ 11 ] Lieth H, Box E. The Gross Primary Production Pattern of the Land Vegetation; A First Attempt [ J ]. *Tropical Ecology*, 1977, 18: 109—115.
- [ 12 ] Ito A, Oikawa T. A Simulation Model of the Carbon Cycle in Land Ecosystems (Sim-CYCLE): A Description Based on Dry Matter Production Theory and Plot-scale Validation[ J ]. *Ecological Modeling*, 2002, 151: 143—176.
- [ 13 ] McGuire A D, Melillo J M, Kicklighter D W, et al. Equilibrium Responses of Soil Carbon to Climate Change—Empirical and Process-based Estimates [ J ]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22(4—5): 785—796.
- [ 14 ] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and Modeling of Biomass and Soil Organic Matter Dynamics for the Grassland Biome Worldwide[ J ]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7: 785—890.
- [ 15 ] Running S W, Coughlan J C. A General Model of Forest Ecosystem Process for Regional Applications I. Hydrologic Balance, Canopy Gas Exchange and Primary Production Process[ J ]. *Ecological Modeling*, 1988, 42: 125—154.
- [ 16 ] Sun R, Zhu Q J. Distribution and Seasonal Change of Net Primary Productivity in China from April, 1992 to March, 1993[ J ]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 50(1): 36—45. [ 孙睿, 朱启疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[ J ]. 地理学报, 2000, 50(1): 36—45.]
- [ 17 ] Xiao Q G, Chen W Y, Shen Y W, et al. Estimating the Net Primary Productivity in China Using Meteorological Satellite Data[ J ]. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 35—39. [ 肖乾广, 陈维英, 盛永伟, 等. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的净第一性生产力[ J ]. 植物学报, 1996, 38(1): 35—39.]
- [ 18 ] Jiang H, Apps M J, Zhang Y, et al. Modeling the Spatial Pattern of Net Primary Productivity in Chinese Forests[ J ]. *Ecological Modeling*, 1999, 122: 275—288.
- [ 19 ] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of CASA Model to the Estimation of Chinese Terrestrial Net Primary Productivity [ J ]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, 25(5): 603—608. [ 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[ J ]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603—608.]
- [ 20 ] Chen L J, Liu G H, Li H G. Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation in China Using Remote Sensing [ J ]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(2): 129—135. [ 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测[ J ]. 遥感学报, 2002, 6(2): 129—135.]
- [ 21 ] Peng S L, Guo Z H, Wang B S. Use of GIS and RS to Estimate the Light Utilization Efficiency of the Vegetation in Guangdong, China [ J ]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(6): 903—909. [ 彭少麟, 郭志华, 王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率[ J ]. 生态学报, 2000, 20(6): 903—909.]
- [ 22 ] Goetz S J, Prince S D, Goward S N, et al. Satellite Remote Sensing of Primary Production; an Improved Production Efficiency Modeling Approach[ J ]. *Ecological Modeling*, 1999, 122: 239—255.
- [ 23 ] Field C B, Randerson J T, Malmerström C M. Global Net Primary Production: Combining Ecology and Remote Sensing[ J ]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51: 74—88.
- [ 24 ] Niu J M. Relationship between Main Vegetation Types and Climatic Factors in Inner Mongolia[ J ]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(1): 47—52. [ 牛建明. 内蒙古主要植被类型与气候因子关系的研究[ J ]. 应用生态学报, 2000, 11(1): 47—52.]
- [ 25 ] Dong Y S, Zhang S, Qi Y C. Fluxes of CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O and CH<sub>4</sub> from a typical temperature grassland in Inner Mongolia[ J ]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 318—322. [ 董云社, 章申, 齐玉春等. 内蒙古典型草地 CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> 通量的同时观测及其日变化[ J ]. 科学通报, 2000, 45(3): 318—322.]
- [ 26 ] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial Ecosystem Production: A Process Model Based on Global Satellite and Surface Data [ J ]. *Global Biogeochemical Cycle*, 1993, 7: 811—841.
- [ 27 ] Zhou G S, Zhang X S. Study on Climate-vegetation Classification for Global Change in China[ J ]. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 8—17. [ 周广胜, 张新时. 全球变化的中国气候—植被分类研究[ J ]. 植物学报, 1996, 38(1): 8—17.]
- [ 28 ] Zhang Z M. Theory and Methods about Computing Evapotranspiration [ M ]. Chengdu: Chengdu Science and Technology University Press, 1990. [ 张志明. 计算蒸发量的原理与方法[ M ]. 成都: 成都科技大学出版社, 1990.]
- [ 29 ] Zhang X S. The Potential Evapotranspiration (PE) Index for Vegetation and Vegetation-Climatic Classification (2)—an Introduction of Main Methods and PEP Program[ J ]. *Acta phytocologica Et Geobotanica Sinica*, 1989, 13(3): 197—207. [ 张新时. 植被的 PE(可能蒸散) 指标与植被—气候分类(二)——几种主要方法与 PEP 程序介绍[ J ]. 植物生态学与地植物学学报, 1989, 13(3): 197—201.]
- [ 30 ] Running S W, Thomson P E, Nemani R, et al. Global Terrestrial Gross and Net Primary Productivity from the Earth Observing System [ A ]. Sala O, Jackson R, Mooney H. Methods in Ecosystem Science [ C ]. New York: Springer Verlag, 2000: 44—57.
- [ 31 ] Institute of Botany of the Chinese Academy of Sciences. Vegetation map of China[ M ]. Beijing: Cartographic Publishing House, 1979. [ 中国科学院植物研究所. 中国植被图[ M ]. 北京: 中国地图出版社, 1979.]
- [ 32 ] Pan Y Z, Li X B, He C Y. An Integrative Classification of Vegetation in China Based on NOAA AVHRR and Vegetation-climate Indices of the Holdridge Life Zone[ J ]. *International Journal of Remote Sensing*,

## Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation Based on GIS and RS: A Case Study in Inner Mongolia, China

ZHU Wen-quan, PAN Yao-zhong, LONG Zhong-hua, CHEN Yun-hao, LI Jing, HU Hai-bo

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Key Laboratory of Environmental

Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing 100875 China)

**Abstract:** According to recent studies that there are important differences in maximum light utilization efficiency ( $\epsilon_{\max}$ ) among vegetation types, an estimation model of net primary productivity (*NPP*), based on geographic information system (GIS) and remote sensing (RS) technology, is presented. This model has two significant characteristics; (1) *NPP* can be estimated just using ground meteorological data and remote sensing data. It is relatively easier to acquire data and its application can be enhanced. (2) After the validation with observed data and the comparison with other *NPP* models, the results showed that the predicted *NPP* was consistent with observed values, and it can more actually reflect the forest *NPP* than Chikugo model. In order to validate the *NPP* model, a case study in Inner Mongolia, China, was carried out. The results showed that the total annual *NPP* in Inner Mongolia in 2002 was 390.8 Mt C. The spatial changes of *NPP* were remarkable, and it decreased from northeast toward southwest. Moreover, seasonal variations of *NPP* were also large. It was about 72.7% of the total annual *NPP* in the three month of June, July and August, and the *NPP* values was very low (3.59 Mt C per month) in January and February.

**Key words:** geographic information system; remote sensing; MODIS; *NPP*; Inner Mongolia