

文章编号: 1007-4619 (2002) 02-0129-07

# 中国植被净第一性生产力遥感动态监测

陈利军, 刘高焕, 励惠国

(中国科学院 地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室 北京 100101)

**摘要:** 植被净第一性生产力(*NPP*)研究方法很多, 运用 NOAA AVHRR 的可见光、近红外和热红外波段来提取和反演地面参数, 进而准确估算陆地植被净第一性生产力, 是一种全新的研究手段。利用遥感数据进行生物量和净第一性生产力的估算, 主要是采用光能利用率模型, 即通过 *NPP* 与植物吸收的光合有效辐射(*APAR*)和植被将所吸收的光合有效辐射转化为有机物的转化率( $\epsilon$ )的关系来实现的。用数学公式可表达为:

$$NPP = (FPAR \times PAR) \times [\epsilon^* \times \sigma_T \times \sigma_E \times \sigma_S \times (1 - Y_m) \times (1 - Y_g)]$$

在遥感和地理信息系统技术的支持下, 以 1990 年每旬的 8km 分辨率的 NOAA AVHRR 1—5 通道的影像为数据源, 对中国每旬的陆地植被净第一性生产力进行估算, 然后累加得出全年的 *NPP* 值。估算结果: 1990 年我国陆地植被 *NPP* 总量为  $6.13 \times 10^9 \text{ t/a}$ , *NPP* 最高值为  $1812 \text{ gC/m}^2$ 。就计算结果, 对中国大陆植被 *NPP* 的分布规律进行了分析。遥感模型能够以面代点, 比较真实地反映陆地植被 *NPP* 的时空分布状况, 与我国植被分布的地理规律性相符, 这是其它统计模型所无法比拟的。

**关键词:** 遥感; 植被净第一性生产力; 植物吸收的光合有效辐射; 光能利用率; 生物量

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## 1 引 言

植被净第一性生产力(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, 是由光合作用所产生的有机质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。它直接反映植物群落在自然环境条件下的生产能力。*NPP* 研究方法很多, 但多以气候模型为主<sup>[2-4, 9]</sup>。利用遥感和 GIS 技术进行 *NPP* 研究是一种全新手段, 它不仅免去了许多烦琐的实验工作, 还实现了区域尺度 *NPP* 估算的可能<sup>[9]</sup>。

遥感估算植被 *NPP* 主要是基于植物的反射光谱特征。因不同的植物以及同一种植物在不同的生长发育阶段, 其反射光谱曲线形态和特征不同, 并且, 在病虫害、灌溉和施肥等条件的不同也会引起植物反射光谱的变化。在利用遥感模型进行 *NPP* 估算时, 有的直接用植被指数(*VI*)与 *NPP* 的关系进行计算<sup>[1, 5]</sup>。后来的研究更多地集中于光能利用率概念模型<sup>[15, 16, 19]</sup>, 即基于植被指数和 *APAR* (植物吸收

的光合有效辐射)之间的经验和理论关系。由于光能利用率概念模型将所有 *NPP* 调控因子以相对简单的方法组合在一起, 并且可以直接利用遥感数据。因此, 近年来备受关注。

## 2 *NPP* 遥感模型

利用光能利用率概念模型估算 *NPP* 是基于资源平衡观点<sup>[11]</sup>: 即假定生态过程趋于调整植物特性以响应环境条件, 认为植物的生长是资源可利用性的组合体, 植物物种通过进化和生理生化、形态过程的驯化, 应趋向于使所有资源对植物生长有平等的限制作用。在某些极端情况下, 如果完全适应不可能时, *NPP* 则受最紧缺资源的限制。*NPP* 与 *APAR* 和  $\epsilon$  (光能利用率)的关系, 就是著名的 Monteith 方程<sup>[11, 13]</sup>:

$$NPP = APAR * \epsilon \quad (1)$$

其中  $APAR = FAPAR * PAR$ 。研究表明 *APAR* 作为植物冠层光合作用过程最好的显示器, 是监测碳储

收稿日期: 2000-12-22; 修订日期: 2001-04-10

基金项目: 本文得到国家 973 项目“中国西部干旱区生态环境演变与调控研究”(G 1999043508)和中国科学院地理科学与资源研究所创新项目(LXI0G-D00-04)的支持。

作者简介: 陈利军(1969—)男, 助理研究员。现为中国科学院资源与环境信息系统国家重点实验室 98 级博士研究生。从事遥感和地理信息系统在生态学方面的应用研究工作。发表论文 5 篇。

量最有效的方法。一般地,对大范围  $APAR$  的监测主要通过对植被冠层对入射光合有效辐射的吸收系数( $FAPAR$ )和光合有效辐射( $PAR$ )的估算来实现。 $PAR$  是植物光合作用的驱动力,对这部分光的截获和利用是生物圈起源、进化和持续存在的必要条件。从理论和实验中都证明  $PAR$  与反射值有密切联系<sup>[16]</sup>。

光能利用率是估算  $NPP$  的基础。早期有些模型中假设光能利用率不随时间和地表覆盖状况而变化。但实践证明把光能利用率当作常数,会引起很大的误差<sup>[13]</sup>。由于光利用率受到气温、水分、土壤、营养、疾病、个体发育、基因差异和能量分配等因素影响,光利用率必须要经过一系列的消耗系数进行纠正。因此  $NPP$  的估算可理解为(2)式:

$$NPP = (FPAR \times PAR) \times [\epsilon^* \times \sigma_T \times \sigma_E \times \sigma_S \times (1 - Y_m) \times (1 - Y_g)] \quad (2)$$

式中,  $\epsilon^*$  为植物最大光合利用率;  $\sigma_T$  为空气温度对植物生长的影响系数;  $\sigma_E$  为大气水汽对植物生长的影响系数;  $\sigma_S$  为土壤水分缺失对植物生长的影响系数;  $Y_g$  为植物生长呼吸消耗系数;  $Y_m$  为植物生活呼吸消耗系数。

## 2.1 植被吸收的光合有效辐射( $APAR$ )

光合有效辐射  $PAR$  可由(3)式的经验公式估计:

$$PAR = (a_0 + a_1U + a_2NDVI + a_3T_S + a_4DL + a_5CH1) / m \quad (3)$$

式中  $U$  为大气可降水量,  $NDVI$  为植被指数,  $T_S$  为地面辐射温度,  $DL$  为植物生理日长,  $CH1$  为  $NOAA$   $AVHRR$  第 1 通道反射率,其余为常数项。

$FAPAR$  可根据 Potter 等的方法<sup>[12, 15]</sup> 来计算:

$$FAPAR = \min\left(\frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95\right) \quad (4)$$

其中,  $SR = (1 + NDVI) / (1 - NDVI)$ 。

## 2.2 光能利用率

光能利用率是在一时期单位面积上生产的干物质中所包含的化学潜能与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比。环境因子如气温、土壤水分状况以及大气水汽压差等会通过影响植物的光合能力而调节植被的  $NPP$ 。在遥感模型中这些因子对  $NPP$  的调控是通过最大光能利用率的订正来实现的,即通过温度、大气及土壤水分的可利用程度来调节。

### 2.2.1 植物潜在光合利用率

植物潜在光合利用率( $\epsilon^*$ )就可以用(5)式表示<sup>[16]</sup>:

$$\epsilon^* = 2.76P_{C4} + (1 - P_{C4}) \times \epsilon_{C3} \quad (5)$$

式中  $P_{C4}$  是  $C4$  植物光合作用分量,由(6)式计算:

$$P_{C4} = \frac{1}{1 + \exp[-0.5 \times (T_a - 22)]} \quad (6)$$

$C3$  植物的光合利用率( $\epsilon_{C3}$ )可由(7)式求得:

$$\epsilon_{C3} = 55.2\alpha \quad (7)$$

据研究(Bonan, 1991—1995),  $C3$  植物的光合作用可基于 Collatz 等的模型<sup>[10]</sup>:

$$\alpha = 0.08 \left[ \frac{P_i - \Gamma^*}{P_i + 2\Gamma^*} \right] \quad (8)$$

方程中,  $\alpha$  为量子效率(每  $\mu\text{mol}$  光子的  $\mu\text{molCO}_2$ )。

### 2.2.2 空气温度对植物生长的影响

空气温度影响系数的计算由下式求得<sup>[7]</sup>:

$$\hat{\varphi}_T = \left[ 1 + \exp\left[ \frac{-220000 + 710(T_a + 273.16)}{8.314(T_a + 273.16)} \right] \right]^{-1} \quad (9)$$

(9)式中  $T_a$  为地表空气温度,  $\hat{\varphi}_T$  为空气温度对植物生长的影响系数。

### 2.2.3 大气水汽对植物生长的影响

大气水汽对植物生长的影响系数可由大气水汽压差( $E_v$ )求得<sup>[7]</sup>:

$$\hat{\varphi}_E = 1.2 \exp(-0.35e_v) - 0.2 \quad (10)$$

### 2.2.4 土壤水分缺失对植物生长的影响

通过遥感提取土壤水分缺失系数是一个复杂的过程。首先,土壤温度和植被冠层温度之间的差异变化不仅是表层水分的函数,还与入射太阳辐射有关。其次,根据近几年的研究<sup>[12, 14, 16]</sup>,表层水分条件与  $TIX$ (温度植被指数比值法)斜率的关系密切,可用于监测土壤水分亏缺,效果较好。 $TIX$  斜率与太阳天顶角具有以下相关性:

$$\alpha_d = 1.3\mu - 90 \quad (11)$$

(11)式中  $\alpha_d$  为土壤表层温度植被比值指数,  $\mu$  为太阳天顶角。 $\alpha_d$  是介于  $10$ — $90$  之间的数。 $\alpha_d$  为一正值表示由于潮湿土壤经强烈蒸发或有适中密度的植被冠层覆盖下地表的湿度条件。最大的  $\alpha_d$  不随太阳天顶角的变化而改变,被设为  $10$ 。因此,土壤湿度指数  $SMI$  可由  $TIX$  的斜率系数经归一化后确定:

$$SMI = \frac{\alpha_0 - \alpha_d}{10 - \alpha_d} \quad (12)$$

$\alpha_0$  为观测的  $TIX$  斜率( $T_S/NDVI$ ),可由每月或每旬

的遥感数据进行计算, 然后累积求出全年的土壤湿度指数:

$$CSI = \sum SMI \quad (13)$$

(13)式中  $CSI$  为土壤累积湿度指数。

于是, 影响植被生长的土壤水分缺失系数  $\xi$  可由下式求得:

$$\xi = \frac{CSI + 2\Delta\tau}{4\Delta\tau} \quad (14)$$

$\Delta\tau$  是植物对土壤水分缺失所引起的生理反应的忍耐系数。植物可用土壤水分的上限和下限之间的差值可被设为  $2\Delta\tau$ 。当  $CSP > 2\Delta\tau$ ,  $CSI = 2\Delta\tau$ , 土壤不再有水分配积; 当  $CSI < -2\Delta\tau$ ,  $CSI = -2\Delta\tau$ , 则  $\xi = 0$ 。

为了估计  $\Delta\tau$ , 可以通过植物根体积与地上生物量相关关系, 用一个线性方程来表达地上生物量和负  $TVX$  斜率与植被生理应力之间的时间滞后性:

$$\Delta\tau = 0.0308 \times (W - 0.03423) \quad (15)$$

### 2.2.5 植物生长和生活呼吸消耗系数

植物呼吸作用损耗的  $CO_2$  可被分解为与温度有关的生活呼吸和与温度无关的生长呼吸。通常植物的生活呼吸消耗系数和植物生长呼吸消耗系数可由下面两式计算:

$$Y_g = 1 - \frac{R_g}{P_g} \quad (16)$$

$$Y_m = 1 - \frac{0.4 * W}{0.75 * (W + 50)} \quad (17)$$

(16)和(17)式中,  $Y_g$  为植物生长呼吸消耗系数,  $Y_m$  为植物生活呼吸消耗系数,  $R_g$  为生长呼吸率 ( $gm^{-2}a^{-1}$ ),  $P_g$  为植物光合作用转化率 ( $gm^{-2}a^{-1}$ ),  $W$  为地上生物量。

### 2.3 生物量

生物量的估算采用 Prince 等的研究成果<sup>[16]</sup>, 即认为地上生物量与植物生长季内最小的可见光反射率存在着负相关, 从而建立了地上生物量遥感估算的统计模型:

$$W = 716.61(\rho^{-2.6}) \quad (18)$$

式中,  $W$  为地上生物量,  $\rho$  为生长季 AVHRR 第一通道反射率的最小值。

该种方法的不确定性因素较大, 尤其在生物量较低的区域, 由于土壤亮度反射率变化较大, 可能会导致生物量估算值偏高。但目前尚无一种通用的生物量遥感估算模型可以替代。

## 3 数据收集与处理

极轨气象卫星 NOAA 的甚高分辨率扫描辐射仪 (AVHRR), 观测空间分辨率星下点为 1.1km, 对全球每天扫描两次。经过除去云的处理之后, 对地球上大部分地区, 可以获得每十天一次的陆地表面影像。AVHRR 在大气窗区设置了五个光谱通道, 分别为 0.58—0.68 $\mu m$ , 0.725—1.1 $\mu m$ , 3.55—3.93 $\mu m$ , 10.3—11.3 $\mu m$  和 11.5—12.5 $\mu m$ 。多年的实践表明, 上述这些光谱通道对地表环境特征有良好的感应能力。从空间分辨率与时间分辨率的匹配来看, AVHRR 被认为是目前用于对陆监测的数据中最适合的。

计算所采用的数据是 1990 年每旬的 NOAA AVHRR 1—5 通道的数据, 来自美国地质调查局 (USGS) 地球资源观测系统数据中心 (EROS-EDC) 的全球 8km 分辨率 NOAA AVHRR 数据集。图像大小为 5004 $\times$ 2168, 投影为古德伪圆柱等积投影。

所有计算在 ERDAS 8.3.1 环境下自己开发的 BIONPP 模块中进行。首先计算每旬的植被指数, 用 CH1 计算每旬的生物量数据, 用 CH4、CH5 通道每旬计算地面辐射温度和地表亮温差,  $PAR$  则由 CH1 的反射值估计。然后, 由 4、5 两个热红外通道来反演地表温度, 用温度植被指数比值法来监测气温和土壤水分状况, 分别计算出每旬的空气温度对植物生长的影响系数  $\sigma_T$  和土壤水分缺失对植物生长的影响系数  $\sigma_S$ ; 并根据地面辐射温度和地表亮温差数据来确定水汽压差, 反演大气水汽对植物生长的影响系数  $\sigma_E$ 。最后根据  $NPP$  计算公式求出一年每旬的  $NPP$  值, 进行加和即可求出全年  $NPP$  值。

## 4 结果分析和讨论

### 4.1 模型比较

通过采用全国 300 个气象站点的气象数据, 利用 Miami、Chikugo、Thomthwaite 模型对全国净第一性生产力进行计算比较, 结果表明: 三种模型基本反映了中国大陆  $NPP$  的空间分布特征。Miami 仅仅考虑了温度和降水对  $NPP$  的影响, 所估算的  $NPP$  为  $7.438 \times 10^9 tC$ , 估算结果与本文计算结果相差较大; Thomthwaite 模型因采用实际蒸散量, 而实际蒸散量取决于太阳辐射、温度、降水、饱和差、气压和风速等多因子的影响, 故估算的结果与本文计算结果偏差

较小; Chikugo 模型从生理生态学角度出发, 考虑的气候因子较前两个模型更为全面, 因此, 也应该比前两个模型的估算结果更为合理<sup>[8]</sup>。但在西北地区 Chikugo 模型计算的结果要明显地高于其它模型的计算结果; 在东北地区 Thornthwaite 模型的计算结果要明显高于其它模型的计算结果。与遥感模型相比, 三种模型的高值区均大于  $2000 \text{ gC/m}^2$ , 而遥感模型计算的高值只有  $1800 \text{ gC/m}^2$  左右。考虑到其它三个模型在计算时未考虑地表植被覆盖状况, 所估计的是潜在的 *NPP*, 而本文利用遥感数据提取地表植被覆盖信息的基础上计算的是现实的 *NPP*, 故比它们的计算值偏小应属正常。有所不同的是, 遥感模型能够以面代点, 比较真实地反映中国陆地 *NPP* 分布的实际情况, 这是统计模型所无法比拟的。*NPP* 统计模型多采用地面观测点常规气象资料, 在计算过程中需要插值, 不可避免地会引起误差。而遥感模型可以通过对地面参数的反演, 能够更加真实地反映地面的实际状况, 可以提高估算的精度。结果表明, 用遥感手段对 *NPP* 进行监测是可行的, 弥补了气候模型存在的不足之处。由于用于计算的数据精度较粗, 会造成 *NPP* 估算结果的偏差。因此, 今后有待于对遥感数据进行改进, 以达到精确估算 *NPP* 的要求。

## 4.2 我国 *NPP* 空间分布

本次模型计算结果表明, 1990 年我国陆地植被 *NPP* 总量为  $6.13 \times 10^9 \text{ t/a}$ , *NPP* 最高值为  $1812.9 \text{ gC/m}^2$ , 平均 *NPP* 为  $642.48 \text{ gC/m}^2$ 。由图 1(图版 I) 可见, 全国的 *NPP* 分布基本趋势是东南高、西北低, 与植被的分布紧密相关。受气候的影响, *NPP* 高值区分布在西南、华南南部和台湾。偏高值区分布在年降水  $1200\text{--}1600\text{mm}$  的长江下游以南、云贵高原以东、南岭山地以北地区。中值区分布在年降水  $400\text{--}1200\text{mm}$  的大兴安岭、小兴安岭、太行山以东、长江流域中游、四川大部、西藏的东南部地区以及新疆天山、阿尔泰山山地。低值区主要分布在年降水  $400\text{mm}$  以下的内蒙古、新疆、青藏高原的大部, 以及陕、甘、宁、晋的部分地区。

### 4.2.1 不同植被类型净第一性生产力

在用遥感模型估算 *NPP* 的基础上, 对不同植被类型进行统计, 结果见表 1。针叶林净第一性生产力为  $1031.92 \text{ gC/m}^2$ , 阔叶林为  $1023.60 \text{ gC/m}^2$ , 灌木和矮林为  $822.99 \text{ gC/m}^2$ , 草原为  $502.10 \text{ gC/m}^2$ , 草甸沼泽为  $690.86 \text{ gC/m}^2$ , 荒漠为  $132.21 \text{ gC/m}^2$ , 农业栽

培植物为  $891.18 \text{ gC/m}^2$ 。从 *NPP* 的平均水平来说, 森林植被的净第一性生产力最高, 以下依次为农业植被、灌丛、草地、荒漠。从年 *NPP* 总量来看, 我国灌丛植被的年 *NPP* 最高, 为  $1621.07 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $26.4\%$ ; 其次为森林和农业栽培植物, 年 *NPP* 分别为  $1490.28 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$  和  $1485.54 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $24.3\%$  和  $24.2\%$ ; 草原年 *NPP* 为  $722.83 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $11.8\%$ ; 草甸年 *NPP* 为  $566.13 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $9.2\%$ ; 荒漠年 *NPP* 为  $216.13 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $3.52\%$ 。

表 1 中国植被类型年净第一性生产力

植被分类	面积/ $\text{km}^2$	年 <i>NPP</i> / $\times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$	平均 <i>NPP</i> / $(\text{gC}/\text{m}^2)$
针叶林	695936	718.15	1031.92
阔叶林	749696	767.39	1023.60
灌丛	1969728	1621.07	822.99
荒漠	1634752	216.13	132.21
草原	1439616	722.83	502.10
草甸	819456	566.13	690.86
农业栽培植物	1672256	1490.28	891.18
无植被地段	509824	0	0.00
湖泊	57280	32.75	571.75
总计	9548544	6134.72	642.48

注: 植被类型数据取自中国科学院中国资源环境数据库(1:400万)

### 4.2.2 不同土地利用类型生产力评价

按照 1:400 万中国资源环境数据库土地利用类型分类, 中国土地利用分为 7 大类, 如表 2 所示, 分别是农业用地、林业用地、草地、居民地、水域、荒地和难利用地。其中农业用地包括水田、灌溉用地和非灌溉用地; 林业用地包括森林、经济林、疏林和灌木林等; 难利用地包括冰雪、沙漠、戈壁、冻原等。从 *NPP* 总量来看, 林业用地积累的植物碳量最多, 为  $2096.87 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $34.2\%$ ; 其次为草地和农业用地, 比较接近, 分别为  $1911.41 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$  和  $1760.57 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ , 占 *NPP* 总量的  $31.2\%$  和  $28.7\%$ ; 再次为荒地、难利用地和水域, 年 *NPP* 总量分别为  $193.96 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ ,  $125.92 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$  和  $51.62 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ ; 居民地所占土地面积的比例最小, 年 *NPP* 总量也最小, 只有  $3.84 \times 10^6 \text{ tCa}^{-1}$ 。

从平均 *NPP* 来看, 林业用地仍然是最高的, 为

966.08 gC/m<sup>2</sup>; 农业用地平均 *NPP* 为 897.05 gC/m<sup>2</sup>, 列其次; 水域、居民地和草地比较接近, 平均 *NPP* 分别为 656.28 gC/m<sup>2</sup>, 550.46 gC/m<sup>2</sup> 和 545.92 gC/m<sup>2</sup>; 荒地和难利用地最低, 分别为 299.74 gC/m<sup>2</sup> 和 106.56 gC/m<sup>2</sup>。

表 2 中国土地利用类型年净第一性生产力

Table 2 The *NPP* of different land use types in China

土地利用类型	面积/km <sup>2</sup>	年 <i>NPP</i> /×10 <sup>4</sup> Ca <sup>-1</sup>	平均 <i>NPP</i> /(gC/m <sup>2</sup> )
农业用地	1962408	1760.57	897.15
林业用地	2170496	2096.87	966.08
草地	3501248	1911.41	545.92
居民地	6976	3.84	550.46
水域	78656	51.62	656.28
荒地	647104	193.96	299.74
难利用地	1181656	125.92	106.56
总计	9548544	6134.72	642.48

注: 土地利用数据取自中国科学院中国资源环境数据库(1:400 万)

### 4.3 我国陆地生态系统植被净第一性生产力监测

#### 4.3.1 森林生产力监测

我国地带性的森林植被类型主要分布在东南部的湿润地区。从北至南依次分布着寒温带针叶林、温带阔叶混交林、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林、热带季雨林及雨林。在森林植被中, 热带雨林、季雨林地区, 年净第一性生产力最高, 平均达到 1451.50 gC/m<sup>2</sup>; 亚热带常绿阔叶林的植被冠层不如热带雨林高大茂密, 其净第一性生产力比热带雨林要小, 平均为 1340.95 gC/m<sup>2</sup>; 亚热带、热带常绿针叶林的净第一性生产力又比常绿阔叶林的要小, 平均为 1199.11 gC/m<sup>2</sup>; 温带亚热带落叶阔叶林 *NPP* 平均为 1027.46 gC/m<sup>2</sup>; 温带针阔混交林的 *NPP* 为 728.87 gC/m<sup>2</sup>; 寒温带落叶针叶林所处地带温度比较低, 生产力比较小, *NPP* 平均为 718.49 gC/m<sup>2</sup>。

从图 2(图版 I)可以看出, *NPP* 大于 1200 gC/m<sup>2</sup> 的地区主要集中在藏东南、云南西南河谷地带、华南、海南岛及台湾东部地区, 这里是我国热带雨林、季雨林以及亚热带常绿阔叶林的分布所在地, 自然条件优越, 森林生产力较高。其中, 云南西南部西双版纳、海南岛东南部和台湾的南端地区, 森林 *NPP* 超过了 1800 gC/m<sup>2</sup>; 分布在东北的小兴安岭和长白山地区、中部的秦巴山地、东南沿海的武夷山、南岭等丘陵山地, 两湖平原以西的武陵山、雪峰山,

以及喜马拉雅山东段的森林, *NPP* 较高, 在 800—1200 gC/m<sup>2</sup> 之间; 分布于大兴安岭、天山、阿尔泰山的森林, 由于受气温条件的限制, 生长季短, 植被净第一性生产力也比较低, 一般小于 800 gC/m<sup>2</sup>; 分布于塔里木河沿岸的胡杨林, 由于受到水分的制约, 生产力很低, 基本小于 500 gC/m<sup>2</sup>。

#### 4.3.2 草地生产力监测

我国的草原区域是欧亚大草原的重要组成部分, 连续分布在东北松嫩平原、内蒙古高原、黄土高原及青藏高原, 从北纬 51°到北纬 28°, 约跨 23 个纬度, 东西绵延约 4500km。但主体类型仍然是温带草原, 主要建群植物为几种针茅、根茎禾草羊草及其他多年生杂草, 从东南向西北依次出现草甸草原、典型草原、荒漠草原及青藏高原所分布的几类自然植被类型。

我国现有各类草原 225.9×10<sup>4</sup>km<sup>2</sup>, 约占国土面积的 23.7%。北方的温带草原是中国草原的主体, 占 47.9%。此外南方还分布有草山草坡。由于水热条件的不同, 植被净第一性生产力不相同。由热带季雨林或亚热带针叶林破坏后次生而来的亚热带稀树灌木草原生长季长, 热量及水分资源比较充足, 其净第一性生产力最高, 平均为 975.40 gC/m<sup>2</sup>, 温带草原的分布受水分条件的限制, 从东北地区森林边缘的草甸草原向典型草原、荒漠草原过度, 草地的长势也越来越低, 平均为 745.11 gC/m<sup>2</sup>。温带草甸地处地势比较低的低洼地区, 水分条件比较充足, 因此其净第一性生产力比温带草原要高, 平均为 601.00 gC/m<sup>2</sup>。

从图 3(图版 I)可以看出, 质量较好、产量较高的草原分布在东北西部、内蒙古东部的呼伦贝尔、科尔沁以及锡林郭勒草原、青藏高原的东部和东北部地区、天山中部和巴音布鲁克和西段山地草原, 以及阿尔泰山地区, 这里的草原面积很大, 生产力高, 牧草生产力一般在 600—800 gC/m<sup>2</sup> 之间, 部分地区超过 800 gC/m<sup>2</sup>。除了分布在内蒙古中部、宁夏的草场仍保持较高的生产力水平外, 从甘肃到新疆的广大荒漠区, 植被逐渐变得稀疏, 大片土地裸露, 只是在绿洲或高山上才有一些零星草原分布, 生产力水平较低, 一般要小于 150 gC/m<sup>2</sup>。青藏高原所分布的草原、牧草种类虽然稀少, 但覆盖程度较高, 生产力水平基本呈现出东高西低的趋势。

#### 4.3.3 农业栽培植物生产力监测

栽培植物是劳动人民在长期生产实践中利用自然与改造自然, 使农业生产发展到稳定阶段的产物,

包括农作物、蔬菜、药用植物、果园与人工林、经济林等。在中国绝大多数栽培植物为农作物,并且 90% 集中在东部湿润、半湿润地区,而东部又集中在几个大平原、盆地与三角洲,在西部分布甚为零星。

农业植被由于人类的精耕细作, *NPP* 比较大,仅次于森林。全国农业栽培植物的平均 *NPP* 为  $891.18 \text{ gC/m}^2$ ,在农业植被中,受热量条件的限制,形成不同的种植制度。在一年一熟制地区,农作物生长季短,其净第一性生产力比较小,平均为  $775.37 \text{ gC/m}^2$ ,在一年两熟或两年三熟的地区,农作物生长季相对较长, *NPP* 要比一年一熟制地区要高,平均为  $882.90 \text{ gC/m}^2$ ,长江以南地区,降水充足,作物生长季更长, *NPP* 也增加,其中单(双)季稻喜凉作物所处地区冬季受低温的影响比较大, *NPP* 要比双季稻连作喜温作物较低,平均为  $936.02 \text{ gC/m}^2$ ,双季稻连作喜温作物 *NPP* 平均为  $997.84 \text{ gC/m}^2$ 。

从图 4(图版 I)中可以看到,我国农业栽培植物生产力水平较高的地区基本分布在西南、华南、东南沿海,以及海南岛、台湾西部地区,生产力平均在  $1000 \text{ gC/m}^2$  以上;华北平原和长江中下游平原部分地区也保持较高的水平;三江平原、东北平原东部、四川盆地、华北平原大部生产力一般在  $600-1000 \text{ gC/m}^2$  之间;黄土高原东部、新疆南部部分地区生产力维持在一般水平, *NPP* 值在  $200-600 \text{ gC/m}^2$  之间;而黄土高原中部、塔里木盆地西缘以及西藏地区的南部地区,生产力水平较低,一般低于  $200 \text{ gC/m}^2$ 。

## 5 结 论

利用光利用效率模型估算植被 *NPP* 有 3 大优点:(1)模型比较简单,在实验和理论上适宜于向区域推广;(2)冠层绿叶所吸收的光合有效辐射的比例可以通过遥感手段获得,不需要烦琐的野外实验测定;(3)遥感模型能够以面代点,减少了统计模型利用地面点观测值插值所引起的误差,提高估算 *NPP* 的精度。

基于遥感卫星数据对地表 *NPP* 的估算,避免了传统气候模型以点代面的缺点,使得估算的 *NPP* 更加接近地表真实情况,能够实时、直观地反映 *NPP* 的时空变化。但是,遥感模型估算 *NPP* 最大的缺点在于其缺乏生物学基础,对植物、大气与土壤的耦合机理缺乏一定的解释。目前,还没有很好的方法利用遥感数据参与气候变化的研究,但在非遥感数据也无法很好地解释气候变化问题的同时,遥感模型

不失为一种有用的尝试,使得将来的建模或许会由此得到启发。总之,遥感模型 *NPP* 的资源平衡假说为其提供了一个非常有用的生态学基础,只是其使用的普遍性尚待进一步的证明。在一定程度上,基于遥感数据的 *NPP* 估算模型或许需要对不同植被类型和不同资源组合进行不同光能利用率的标定。近年来, *NPP* 模型的构建越来越强调 *NPP* 对敏感气候、土地利用改变、大气组成变化的响应,这些变化可能会破坏这些控制因子之间的相关关系,而这些因子间的关系是以往一些简单模型构建的基础,使得研究的难度进一步加大。因此,在以后的建模过程中,研究基于大尺度生态系统对气候、资源和干扰因素的响应是非常重要的。尤其,遥感数据的改进是精确估算 *NPP* 的关键。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Rui Sun, Qijiang Zhu, 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,中国陆地植被第一性生产力及季节变化研究[J]. 地理学报, 2000, 50(1): 36-45.]
- [2] Zhuhui Zhu, Climate Coupling between the Function and Zone Structure of Natural Vegetation Productivity in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(增). [朱志辉,我国自然植被生产力功能和地带性结构的气候耦合[J]. 地理学报, 1996, 51(增).]
- [3] Zhuhui Zhu, The model of Net Primary Productivity of Vegetation in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(15): 1422-1426. [朱志辉,我国植被净第一性生产力估计模型[J]. 科学通报, 1993, 38(15): 1422-1426.]
- [4] Diqiang Li, Chengyong Sun, Xinshi Zhang, Modelling the Net Primary Productivity of the Natural Potential Vegetation in China [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1998, 40(6), 560-566. [李迪强等,中国潜在植被生产力的分布与模型[J]. 植物学报, 1998, 40(6), 560-566.]
- [5] Qiangguang Xiao, Weiyang Chen, Yongwei Shen and Liang Guo, Estimating the Net Primary Productivity in China Using Meteorological Satellite Data [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1996, 38(1): 35-39. [肖乾广等,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.]
- [6] Guangsheng Zhou, Xinshi Zhang, A Natural Vegetation NPP Model [J]. *Acta Phytocologia Sinica*, 1995(3): 193-200. [周广胜,张新时,自然植被第一性生产力模型初探[J]. 植物生态学报, 1995, 3: 193-200.]
- [7] Renhai Zhang, Experimental models for Remote Sensing and Land Surface Foundation [M]. Publishing House of Science, 1996 [张仁华,实验遥感模型及地面基础[M]. 科学出版社, 1996.]
- [8] Xianzhou Zhang, Estimation and Distribution of Net Primary Productivity of Natural vegetation in China [J]. *Natural Resources*, 1993, 1: 15-21. [张宪洲,我国自然植被第一性生产力的估算与分

- 布 [J]. 自然资源, 1993, 1: 15—21.]
- [9] Arai Ma. Remote Sensing Information Models (Part 2) [M]. Publishing House of Peking University, 1997. [马蔼乃, 遥感信息模型 (遥感系列丛书之二)[M]. 北京大学出版社, 1997.]
- [10] Collatz G J, Ball J T, *et al.* Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer [J]. *Agric. For. Met.*, 1991, 54: 107—136.
- [11] Field C B, Randerson J T, Malmstrom C. M. Global net primary production: combining ecology and remote sensing [J]. *Remote Sens. Environ.* 1995, 51: 74—8.
- [12] Goward S N, Waring R H, *et al.* Ecological remote sensing at OTTER satellite macroscale observations [J]. *Ecol. Appl.*, 1994, 4: 322—343.
- [13] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystem [J]. *J. Appl. Ecol.*, 1972, 9: 747—766.
- [14] Nemani R, Pierce L, *et al.* Developing satellite-derived estimates of surface moisture status [J]. *J. Appl. Met.*, 1993, 32: 548—557.
- [15] Potter C S, Randerson J T, *et al.* Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochem. Cycles*, 1993, 7: 811—841.
- [16] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 815—835.
- [17] Roujean J L, Breon F M. Estimation PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements [J]. *Remote Sensing Environment*, 1995, 51: 375—384.
- [18] Runyon J, Waring R H, *et al.* Environmental limits on net primary production and light-use efficiency across the Oregon transect [J]. *Ecol. Appl.*, 1993, 4: 226—237.
- [19] S. Moulin, *et al.* Combining agricultural crop models and satellite observations from field to regional scales [J]. *Int. J. Remote Sens.* 1998, 19: 1021—1036.

## Estimating Net Primary Productivity of Terrestrial Vegetation in China Using Remote Sensing

CHEN Li-jun, LIU Gao-huan, LI Hui-guo

(State Key Lab. of Resources and Environment Information System, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract:** By means of Remote Sensing, the estimation of biomass and *NPP* mainly is on the basis of the models of solar energy efficiency. The biomass and *NPP* can be calculated through the relation among *NPP*, APAR and the rate ( $\epsilon$ ) of which transform APAR to the organic matter. The model is:

$$NPP = (FPAR \times PAR) \times [\epsilon^* \times \sigma_T \times \sigma_E \times \sigma_S \times (1 - Y_m) \times (1 - Y_g)]$$

On the basis of RS and GIS, the net primary production of terrestrial vegetation of China in every ten days using the NOAA AVHRR data with five channels and 8km×8km resolution cell was calculated. And then the annual *NPP* was accumulated. The result shows the total *NPP* of terrestrial vegetation of China is  $6.13 \times 10^9$  t/a in 1990 and the maximum *NPP* is 1812.9 gC/m<sup>2</sup>. According to this result, the spatial distribution of *NPP* shows a decreasing trend from south-east China to north-west China. The distribution may have close relationship with the distribution of vegetation.

The *NPP* varies with the different vegetation. It is indicated that the *NPP* of conifer, broadleaf, shrubbery, grassland, meadow/morass, desert, and corn are 1031.92 gC/m<sup>2</sup>, 1023.60 gC/m<sup>2</sup>, 822.99 gC/m<sup>2</sup>, 502.10 gC/m<sup>2</sup>, 690.86 gC/m<sup>2</sup>, 132.21 gC/m<sup>2</sup> and 891.18 gC/m<sup>2</sup> respectively. According to the yearly *NPP*, the *NPP* of shrubbery is  $1621.07 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> accounting for the largest part of China (26.4%). The sequences of the other vegetation types are forest and corn, grassland, meadow and desert. The yearly *NPP* of them are  $1490.28 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (24.3%),  $1485.54 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (24.2%),  $722.83 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (11.8%),  $566.13 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (9.2%) and  $216.13 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (3.52%) respectively. The *NPP* of different land use types shows that the *NPP* of forest, agriculture land, grassland, water area, inhabitant area, wasteland and hard-using land are 966.08 gC/m<sup>2</sup>, 897.15 gC/m<sup>2</sup>, 545.92 gC/m<sup>2</sup>, 656.28 gC/m<sup>2</sup>, 550.46 gC/m<sup>2</sup>, 299.74 gC/m<sup>2</sup> and 106.56 gC/m<sup>2</sup>. According to the yearly *NPP*, the *NPP* of forest is  $2096.87 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> accounting for the largest part of China (34.2%). The sequences of the other vegetation types are grassland, agriculture land, wasteland, hard-using land, water area and inhabitant area. The yearly *NPP* of them are  $1911.41 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (31.2%),  $1760.57 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> (28.7%),  $193.96 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup>,  $125.92 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup>,  $51.62 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> and  $3.84 \times 10^6$  tCa<sup>-1</sup> respectively.

**Key words:** remote sensing; *NPP*; APAR; solar energy efficiency; biomass

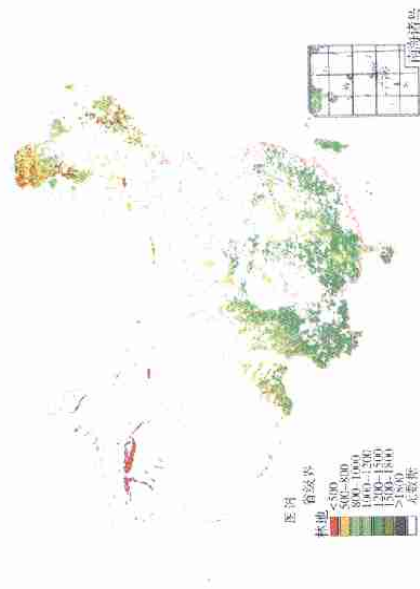


图 2 全国森林生产力监测图

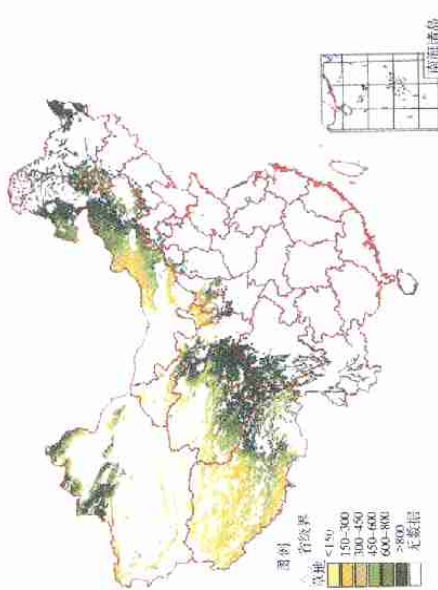


图 1 中国陆地植被净第一性生产力分布图

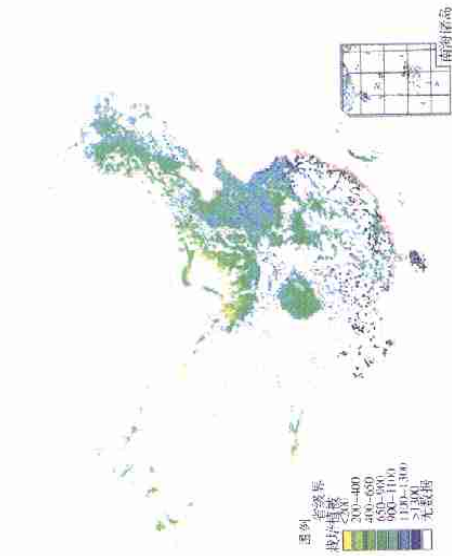


图 4 全国农作物生产力监测图

图 3 全国草地生产力监测图