

# 植被净第一性生产力模型研究进展\*

王宗明, 梁银丽

中国科学院 水利部水土保持研究所 陕西 杨陵 712100  
(西北农林科技大学水土保持研究所)

**摘要:** 论述了植被净第一性生产力模型的国内外研究进展, 并对现有的自然植被和作物生产力模型进行了简单评价, 比较其优劣, 指出了今后的发展方向: 建立植被叶面积指数与生物生产力区域遥感动态模型; 在全球变化的背景下, 研究生物生产力的变化趋势尤为重要; 对于作物生长模型应组建模型运行所需的各类数据库。

**关键词:** 自然植被; 净第一性生产力; 作物生长模拟; 模型

**中图分类号:** Q948.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-7461(2002)02-0022-04

## Progress in Vegetation Net Primary Productivity Model Research

WANG Zong-ming, LIANG Yin-li

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Institute of Soil and Water Conservation, NW Sci-Tech Univ. of Agr. and For., Yangling, Shaanxi, 712100, China)

**Abstract:** Domestic and overseas progress of vegetation NPP is reviewed, and the existing productivity model of natural vegetation and crop evaluated. It is thought that direction of research in future is to construct district RS dynamic model between LAI and productivity, to probe into changing trend based on global change and to set up all kinds of database for crop growth simulation model.

**Key words:** natural vegetation; NPP; crop growth simulation; model

植被作为陆地生态系统的重要组成部分和核心环节, 在地表与大气之间能量、物质与动量交换中扮演着重要角色, 植被净第一性生产力 NPP (net primary productivity) 作为表征植物活动的关键变量, 是陆地生态系统中物质与能量运转研究的重要环节, 其研究将为合理开发、利用自然资源及对全球变化所产生的影响, 采取相应的策略和途径提供科学依据。1995年7月《Science》发表了一组题为生物学和生态学前沿的专题论文, 提出包括生产力生态学和生态系统生态学在内的6个方面是全球生态学界关注的焦点<sup>[1]</sup>。自从荷兰瓦格宁根学派的创始人 De Wit<sup>[2]</sup>在20世纪60年代发现植物同化率同水分蒸散有直接关系以来, 不同类型自然植被和农作物生产力的估算一直是植物生态学家所关注的问题。当前, 生产力机理模型又成为生产力生态学的研究热点。

对植被的净第一性生产力的测算最早可以追溯到19世纪80年代 Ebermayer 对巴伐利亚森林物质生产力的测定, 但是大规模的世界范围内的工作则开始于20世纪60年代<sup>[3]</sup>。特别是国际生物学计划 IBP (International Biology Program) 以来, 研究生物生产力为核心的生产力生态学成为生态学的热点, 进行了许多 NPP 的测定, 并以测定资料为基础, 联系环境因子建立了许多模型。

## 1 气候生产力模型

### 1.1 气候生产力统计相关模型

1.1.1 Miami 模型 Lieth 和 Box<sup>[4]</sup>分别拟合了净初级生产力(NPP)与年平均温度及降水之间的经验关系:

$$y^1 = \frac{3\ 000}{1 + e^{1.315 - 0.119x}} \quad (1)$$

\* 收稿日期: 2001-07-18

基金项目: 中国科学院知识创新项目(KZCX1-06-02-01)

作者简介: 王宗明(1976-), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统生产力。

$$y_2 = 3\,000 \cdot (1 - e^{-0.000\,664P}) \quad (2)$$

式中:  $y_1$  为根据年均温计算的生物生产量( $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ),  $y_2$  为根据年降水量计算的生物产量( $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ),  $t$  为年均温( $^{\circ}C$ ),  $P$  为年降水量(mm)。根据 Liebig 定律, 选取二者中最小值作为计算点的生物生产量, 此模型称做 Miami 模型。考虑到其他因素的影响, 该模型的精度大概在 66% ~ 75% 之间。陈国南<sup>[5]</sup> 采用这一方法估算了中国植被的可能生产力。由于 Miami 模型的设计者仅考虑了水热条件对生物生产量的影响, 而未考虑植物所处的土壤、地形等条件; 同时, 模型内尚未包含表示植物本身生态学特性的参数, 具有明显的局限性。

1. 1. 2 Motreal 模型 Thornthwaite 和 Rosenzweig 都研究了蒸腾蒸发量( $ET$ )与气温、降水和植被之间的关系, 并据此建立了  $NPP$  和  $ET$  之间的统计关系。Lieth 基于 Thornthwaite 发展的可能蒸散量模型及世界五大洲 50 个地点植被净生产力资料, 于 1974 年提出了 Thornthwaite Memorial 模型<sup>[6]</sup> (后来也被称做 Motreal 模型):

$$NPP = 3\,000[1 - e^{-0.000\,969\,5(v-20)}] \quad (3)$$

其中:  $v = \frac{1.05R}{1 + (1 + 1.05R/L)^2}$   
 $L = 3\,000 + 25t + 0.05t^3$

式中:  $NPP$  为植物气候产量( $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$ ),  $v$  为年实际蒸散量(mm),  $L$  为该地年平均蒸散量(mm),  $t$  为年平均气温( $^{\circ}C$ ),  $R$  为年平均降水量(mm)。张宪洲<sup>[7]</sup> 等比较了 Miami 模型和 Motreal 模型, 指出 Motreal 模型包含的环境因子较全面, 计算的结果优于前者。尽管如此, 这两个模型仅仅是植被生产力与环境因子的回归, 缺乏理论基础。

## 1. 2 半经验半理论模型

这类模型以生理生态学模型为基础, 在某些参数的选定上则采用经验方法, 目前比较成熟的主要有筑后模型、北京模型、周广胜模型等。

1. 2. 1 筑后(Chikugo)模型 Uchijima 等<sup>[8]</sup> 根据 IBP 期间 682 组森林植被资料, 利用成熟植被与近地气层之间水气和  $CO_2$  通量方程导出:

$$NPP = f(RDI) \cdot R_n \quad (4)$$

式中:  $NPP$  单位为  $t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$  (其中  $t$  为质量干重),  $RDI$  为辐射干燥度( $RDI = R_n/Lr$ ,  $L$  为蒸发潜热(mm),  $r$  为年降水量(mm)),  $R_n$  为陆地表面所获得的净辐射量( $kcal \cdot cm^{-2} \cdot a^{-1}$ )。

1985 年日本岛内以 Uchijima 的研究结果为基础, 而后利用叶菲莫娃<sup>[9]</sup> 和 Cannel 等人根据 IBP

期间取得的世界各地的生物量数据和气候要素进行相关分析, 建立了根据净辐射和辐射干燥度计算  $NPP$  的 Chikugo 模型:

$$NPP = 0.29e^{[-0.216(RDI)^2]} \cdot R_n \quad (5)$$

此模型包含了植物生长的生理生态学机理, 具有一定的理论基础, 是估算自然植被净第一性生产力的一种较为合理的方法。但是该模型在推导过程中是以土壤水分供给充分, 植物生长很茂盛条件下的蒸散量计算  $NPP$ 。对于许多地区, 该条件并不能满足, 因而在干旱、半干旱地区应用时误差较大。

1. 2. 2 北京模型 朱志辉<sup>[11]</sup> 利用包括中国在内的 751 组各类植被数据建立了估计  $NPP$  的解析模型——北京模型:

$$NPP = \begin{cases} 6.93e^{[-0.224(RDI)^{1.82}]} \cdot R_n, & \text{当 } RDI \leq 2.1 \\ 8.26e^{[-0.498(RDI)]} \cdot R_n, & \text{当 } RDI > 2.1 \end{cases} \quad (6)$$

与 Whittaker 基于 IBP 期间实测资料的推荐均值相比较, 北京模型对各类植被类型的估计值都比较适中, 接近推荐均值。

1. 2. 3 周广胜模型 周广胜等<sup>[12, 13]</sup> 联系植物生理生态学特点, 基于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:

$$NPP = RDI \cdot \frac{r \cdot R_n(r^2 + R_n^2 + r \cdot R_n)}{(r + R_n) \cdot (r^2 + R_n^2)} \cdot e^{(-\frac{9.87 + 6.25RDI}{r})} \quad (7)$$

并将利用此模型模拟的结果与叶菲莫娃<sup>[9]</sup> 实测的净第一性生产力数据进行了验证, 证明符合较好, 尤其在干旱、半干旱地区应用时效果要明显优于 Chikugo 模型。

气候统计模型和半理论半经验模型虽然已经在不同区域得到不同程度的验证, 且被广泛应用, 但尚未考虑到植物的生理生态反应和复杂生态系统过程和功能的变化, 也没有考虑到  $CO_2$  及土壤养分的作用和植物对环境的反馈作用, 需进一步完善。

## 2 过程模型

### 2.1 作物生长模拟模型

作物生长模拟模型是指能定量和动态地描述作物生长、发育和产量形成过程及其对环境反应的计算机模拟程序。国外植物模拟研究以美国和荷兰开始最早(20 世纪 60 年代), 研究水平最高。荷兰兰瓦格宁根农业大学的 De Wit<sup>[14]</sup> 1969 年提出了模拟作

物生长过程碳素平衡的模拟模型(ELCROS), Penning 等<sup>[14]</sup> 1982 年正式提出 SUCROS 模型, 为作物生长模拟模型进行深入广泛的研究和应用奠定了基础, Van Keulen 及 De Wit 等在此基础上考虑了水分的订正, 建立了 ARID CROP 模型。荷兰的模型研究注重对生物机理性和作物共性的描述, 对作物的形态发育和阶段发育上的差异性描述相对薄弱<sup>[15, 16]</sup>。刘建栋等<sup>[17, 18]</sup> 利用 ARID CROP 模型对黄淮海地区玉米生产力进行了模拟研究, 指出该模型的光合及蒸腾子模型尚需进一步改进。

在美国, 20 世纪 70 年代初, 密西西比州立大学完成了棉花生长模型(GOSSYM)和大豆生长模型(GLYCIM), 与此同时, Ritchies 等人完成了 CERES 系列模型<sup>[15]</sup>。迄今为止, CERES 系列模型主要包括以下几种: WHEAT(小麦)、MAIZE(玉米)、RICE(水稻)、SORGHUM(高粱)、MILLET(谷子)等模型; J. R. Williams 等<sup>[19]</sup> 1984 年建立了土壤侵蚀与生产力模型 EPIC, 至今已得到广泛应用, 并取得了较好的模拟效果; 现阶段国外比较成熟的还有 DSSAT(decision support system for agotechnology transfer)、COTCROP 等<sup>[16]</sup>。

我国作物模型研究开始于 20 世纪 80 年代中期, 机理性较强的有高亮之的水稻模型 RICEMOD、戚昌翰的水稻模型 RICAM、冯利平的小麦模型 WHEATSM、尚宗波的玉米模型 MPESM 等<sup>[16]</sup>。

这些模型能够反映作物生长和发育的基本生理生态机理和过程, 具有动态性和通用性。但是, 各种作物模型对作物生理生态过程的量化描述有繁有简, 参数取值差别较大, 许多作物模型中采用了一系列的假设来描述未知的生理过程, 使得精度降低。另外, 由于模型所需的大量气候、土壤和作物特性资料不容易得到, 也增加了应用难度。

## 2.2 景观和区域生理生态仿真模型

随着 IGBP(international geography and biology program) 研究计划的进展, 以描述生态系统的功能为主的仿真模型反映了物理环境对植物的有效性、资源的竞争、植物与环境之间的碳氮循环, 正成为研究热点。

2.2.1 TEM——陆地生态系统模型(terrestrial ecosystem model) TEM 通过计算机模拟陆地生态系统碳、氮循环, 将包括光、热、水、土、气、植被类型等在内的变量贮存在以 GIS 管理的数据库中。Raich 等人对此模型进行了详细描述, 并将其应用于南美地区, 结果与 Miami 模型接近; Mellio 等将

此模型用于全球陆地生物圈呼吸、分解的模拟, Printice 称之为第一个应用于全球尺度的“过程模型”<sup>[20]</sup>。

2.2.2 CASA——卡萨生物圈模型(carnegie ames stanford approach) 与以往参数模型不同的是卡萨模型将净第一性生产力表示为水分和温度的函数:

$$\epsilon(X, t) = \epsilon^* \cdot T_{el}(X, t) \cdot T_{eh}(X, t) \cdot W_{\epsilon}(X, t) \quad (8)$$

其中  $X$  代表地点,  $\epsilon^*$  为独立常数,  $T_{el}$  和  $T_{eh}$  分别为极低和极高温对  $\epsilon^*$  的影响,  $W_{\epsilon}$  为水分供应的影响。其他较为流行的有著名的 CENTURY(草地生态系统模型)、BIOME-BGC(生物地化循环模型)、FBM(法兰克福生物圈模型等)<sup>[20]</sup>。

以上的仿真模型尽管在具体结构上形态各异, 但相互间却有着惊人的统一性, 这些模型都是早期的几个简单生产力模型的变种, 从本质上讲都是把植物生长看作是环境因子的函数。作者认为, 作为一个过程模型最重要的是要包括生物对环境的反馈, 即生物对环境的调节和控制作用。这在以上模型中并未得到充分体现。

## 3 光能利用率模型

随着遥感技术的发展, 以卫星遥感数据作为信息源的植被净第一性生产力研究已显示出其优越性。其中比值植被指数  $VI(VI = NIR/VIS, NIR$  表示近红外波段的反射率,  $VIS$  表示可见光或红外波段的反射率) 和归一化差值植被指数  $NDVI[NDVI = (NIR - VIS)/(NIR + VIS)]$  可确定植被对光合有效辐射的吸收比例(FPAR), 光能利用率模型就是由植被指数来确定 FPAR, 并通过光能利用率获得植被干物质的增长。光能利用率模式简单, 且可直接利用遥感数据, 使得其成为 NPP 模型的一个主要发展方向, 孙睿等<sup>[21]</sup>、郑元润等<sup>[22]</sup> 分别利用光能利用率模型进行了我国陆地植被净第一性生产力的评价和地区分布特征研究。

利用  $NDVI$  等参数估算净第一性生产力具有方便快捷的优点, 可以实现对各种植被的快速监测。目前, 我国各区域净第一性生产力的测定还存在部分空白, 我国地形复杂多样, 即使在同一地区, 受局部小地形的影响, 植被净第一性生产力水平仍有较大差异, 从而降低了模型的精度。在我国生产力测定精度与地区密度提高的情况下, 利用  $NDVI$  测定 NPP 将会显示出更大的优势。 <http://www.cnki.net>

## 4 今后发展方向

在生产力建模的诸多问题中,对于不同时空尺度上的现象与过程的处理是最为棘手的。同样重要的问题是将微观过程应用到对宏观过程的模拟,许多微观过程,如光合作用对温度、水分及CO<sub>2</sub>的反应等,是在实验室条件下进行的,与实际生态系统往往有较大差异。而将这些过程应用到宏观模型中,温度、水分等数据往往直接取自气象资料,环境条件的不同导致模型结果出现误差。赵士洞等<sup>[23]</sup>指出叶面积指数是生产力模型尺度转换的连接点。因此今后应加强叶面积指数的测定研究,建立植被叶面积指数与生物生产力区域遥感动态模型,并利用现有的生态系统定位研究成果,研制地球化学循环生理生态仿真模型。同时,应该注意到植物对于环境的反馈作用,在全球气候变化的背景下,研究生物生产力的变化趋势尤为重要,对于农业生态系统生产力研究应加强水分平衡、运移、转换与作物生产力关系的研究。另外,对于作物生长模型应不断深化对作物生理生态过程和机制的系统了解和量化描述,建立作物生理生态数据库,提高模型描述精度;同时还应组建模型运行所需的气候、土壤数据库,降低应用难度。

### 参考文献:

- [1] 程序. 农牧交错带研究中的现代生态学前沿问题[J]. 资源科学, 1999, 21(5): 1-8.
- [2] De Wit C T. 农作物同化、呼吸和蒸腾的模拟[M]. 北京农业大学生理生化组译. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 埃塞林顿. J. R. 环境和植物生态学[M]. 曲仲湘译. 北京: 科学出版社, 1989.
- [4] Lieth H F H. Modeling the primary productivity of the world [J]. *Nature and Resources*, 1972, 8(2): 5-10.
- [5] 陈国南. 用迈阿密模型测算我国生物生产量的初步尝试[J]. 自然资源学报, 1987, 2(3): 270-277.
- [6] 袁嘉祖. 黄土高原地区植物可能生产力[J]. 西北林学院学报, 1988, 3(2): 9-19.
- [7] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分布[J]. 自然资源, 1992, (1): 15-21.
- [8] Uchijima Z, Seino H. An agroclimating net primary productivity of natural vegetation[J]. *J. Agric. Res. Q.*, 1985, 214: 244-250.
- [9] Efimova N A. Plant productivity and radiation factor[M]. *Gidrometeoizdat: Leningrad*, 1977.
- [10] Cannell M G R. World forest biomass and primary productivity data[M]. London: Academic Press, 1982.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Penning de Vries FWT, Vanlarr HH. Simulation of plant growth and crop production[M]. Wageningen Center for Agricultural Publishing and Documentation, 1982.
- [15] 李军. 作物生长模拟模型的开发应用进展[J]. 西北农业大学学报, 1997, 25(4): 39-42.
- [16] 宇振荣. 作物生长模拟模型研究和应用[J]. 生态学杂志, 1994, 13(1): 69-73.
- [17] 刘建栋, 丁强, 傅抱璞. 黄淮海地区夏玉米气候生产力的数值模拟研究[J]. 地理科学进展, 1997, 12(增): 33-38.
- [18] 刘建栋. 农业气候资源数值模拟中气候资料处理模式的研究[J]. 中国农业气象, 1999, 20(3): 1-5.
- [19] Williams J R, Jones C A, DYKE P T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. *Trans. ASAE*, 1995, 27: 129-144.
- [20] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. *Journal of Biogeography*, 1995, (22): 815-835.
- [21] 齐晔, Charles A S Hall. 全球变化研究中的生物圈模型——初级生产力模拟[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 1992, (1): 48-56.
- [22] 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, 5(1): 36-44.
- [23] 郑元润, 周广胜. 基于NDVI的中国天然森林植被净第一性生产力模型[J]. 植物生态学报, 2000, 24(1): 9-12.
- [24] 赵士洞, 罗天祥. 区域尺度陆地生态系统生产力研究方法[J]. 资源科学, 1998, 20(1): 23-34.