考考赖沟流域植被生产力模拟

杨佩国^{1 2 3} 李保国^{1 *} 吕贻忠¹ 吴绍洪² 李 静^{2 3}

(1 中国农业大学资源与环境学院 北京 100094) (2 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101)
(3 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 该文应用气象数据、土壤物理属性实测数据、土壤水分分布式动态模型和植被表面净辐射模型的模拟结果,利用多元线性回归分析方法,建立了植被净第一性生产力模型,实现了鄂尔多斯高原东部砂质荒漠化地区考考赖沟流域尺度上 30 m × 30 m 空间分辨率的植被生产力精确模拟,并且用植被生产力的野外实测数据对模拟结果进行了验证表明:实测值与模拟值在固定沙丘、半固定沙丘和样线 2 上都达到 0.05 显著性相关水平;不同位置的实测植被生产力数据多分布在 1:1 直线附近,模拟值与实测值吻合较好,植被生产力实测值与模拟值的相对误差范围为 3.22% ~ 6.27%,偏斜度范围在 - 12.84% ~ 4.43%。该文的研究方法可以为流域尺度上植被生产力的精确模拟提供借鉴和参考。

关键词 分布式土壤水分动态模型 植被净第一性生产力 荒漠化地区 模拟 验证

SIMULATION OF NET PRIMARY PRODUCTION IN KAOKAOLAIGOU WATERSHED, CHINA

YANG Pei-Guo^{1 2 3} LI Bao-Guo^{1 *} LÜ Yi-Zhong¹, WU Shao-Hong², and LI Jing^{2 3}

¹College of Environment and Resource, China Agriculture University, Beijing 100094, China, ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China, and ³Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Aims Net primary production (*NPP*) is plant community production and is the basis of matter and energy cycles of ecosystems. The aim of this study is to accurately simulate *NPP* on the watershed scale in an area of desertification using simulated results of accumulated soil water replenishment and net radiation.

Methods Using a digital elevation model (*DEM*) at 30 m × 30 m spatial resolution, accumulated soil water replenishment was simulated by using the distributed dynamic model of soil water, and net radiation was simulated by using the Penman-Monteith formula. The *NPP* model was developed based on *NPP* data, accumulated soil water replenishment and net radiation. *NPP* was accurately simulated for the Kaokaolaigou watershed of the sandy desertification area in eastern Erdos Plateau by inputting the simulated results of the accumulated soil water replenishment and net radiation into the *NPP* model. We tested the simulated *NPP* results.

Important findings The test of the simulated *NPP* results shows that the correlation level between measured and simulated values is 0.05 for the fixed dunes, semi-fixed dunes and sample line 2 and simulated and measured values are in close agreement. The range of relative error between simulated and measured values is 3.22% - 6.27%, and the range of skewness between simulated and measured values is from - 12.84% to 4.43%. Results show that *NPP* is different on different slopes and aspects. The *NPP* decreased from 233.39 to 112.91 g DW · m⁻² · a⁻¹ when the slope increased from 0° to 20°, the maximum *NPP* of 283.21 g DW · m⁻² · a⁻¹ occurred on flatland and the minimum *NPP* of 101.68 g DW · m⁻² · a⁻¹ occurred on the south aspect. In conclusion, the *NPP* model can be used to simulate the distribution of *NPP*. This research method may allow precise simulation of *NPP* on a watershed scale.

Key words distributed dynamic model of soil water, net primary production, sandy desertification area, simulation, test

植被净第一性生产力(Net primary production, *NPP*)是指绿色植物在单位时间和单位面积上所积累的有机干物质总量(Field *et al.*, 1998)。 *NPP* 反

映了植物群落在自然环境条件下的生产能力,植物形成的产量是其自身生物学特性与外界环境因子相互作用的结果(Fang, 2000; Meilillo & McGuire,

1993)。由于 *NPP* 与碳循环和碳扰动、土地利用变化、气候变化和自然资源管理有着密切联系,同时 *NPP* 的大小也反映了区域生产能力和承载能力(周广胜和 张新时, 1996; 周涛等, 2004; 孙睿和朱启疆, 2001; 杨永辉等, 2002)。因此,开展区域和流域尺度的 *NPP* 研究具有重要意义。

很多学者从不同的角度对 *NPP* 开展了研究。到目前为止,计算植被 *NPP* 的模型总共有 20 多种,可以将这些模型概括为经验统计模型、半经验半机理模型和过程机理模型(Potter, 1999; Paruelo, 1997; 李迪强等, 1998; 孙睿和朱启疆, 1999; 闫淑君等, 2001; 张宪洲, 1993; 郑元润和周广胜, 2000; 张佳华, 2001; 张洪和樊自立, 2000; Matsushita *et al.*, 2004)。经验统计模型,以 Miami 模型、Thornthwaite Memorial 模型为代表(Uchijima & Seino, 1985; Foley, 1994; 侯光良和游松才, 1990; 朱志辉, 1993),是利用气候因子(如温度、降水等)来估算植被 *NPP*,因此,这类模型考虑的因子比较简单,估算精度仅为 66% ~ 75%; 半经验半机理模型以 Chikugo 模型为代表,是植物生态生理学和统计相关方法相结合而建立的,通过计算光合辐射、光合有效辐射、净辐射和辐射干燥度得到植被气候生产力与净辐射的统计关系,这类模型所估算的 *NPP* 是土壤水分充分供应条件下的潜在或最大的 *NPP*,与干旱、半干旱地区的实际 *NPP* 有所差距,过程机理模型是基于植物机理以及能量的内在转换机制而建立的,通过对太阳能转化为化学能的过程来计算植被 *NPP*,其代表模型有 CASA 模型、TEM 模型、BIOME-BGC 模型和 BEPS 模型等(Potter & Randerson, 1993; 朴世龙等, 2001; 倪健, 2002),这类模型机理性强,缺点是模型需要参数较多,有些参数获取困难,国内从 20 世纪 80 年代开始修正国外的模型用于估算全国和区域尺度上的 *NPP*。周广胜和张新时(1995)根据植物的生理生态学特点及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联系植物生理生态学特点和水热平衡关系的植被净第一性生产力综合模型,该模型特别适合于对较干旱地区植被 *NPP* 的模拟。

一个地区植被 *NPP* 大小主要决定于该区域的光、热、水分和土壤条件,而在荒漠化地区,水分是最主要的环境限制因子,水分条件特别是对植物生长有效的土壤水分条件决定了荒漠化地区植被生产力的大小。本文以位于内蒙古鄂尔多斯高原毛乌素沙地的考考赖沟流域为研究区,把土壤水分分布式动态模型和植被表面净辐射模型的模拟结果与实测植

被生产力综合起来,建立了植被净第一性生产力模型,实现了对荒漠化地区高空间分辨率的植被生产力模拟,并用野外实测数据对模拟结果进行了验证。

1 研究区概况

考考赖沟流域位于鄂尔多斯高原东部,地理坐标为 39°27'3.3" ~ 39°34'6.5" N, 110°7'40.1" ~ 110°13'43.4" E,面积 114.14 km²。海拔在 1 232 ~ 1 500 m 之间,是黄河的二级支流,通过乌兰木伦河汇入黄河。该流域是位于鄂尔多斯高原向黄土高原过渡的地带。地形以起伏的丘陵、梁地及河流谷地与滩地为主,各种地形相间分布。在梁地和滩地上覆盖有不同流动或固定程度的沙丘,沙丘高一般在 5 ~ 10 m。滩地内地下水埋深不等。土壤类型以风沙土为主。自然植被目前以油蒿(*Artemisia ordosica*)为建群种的草原群落,土地利用类型包括有旱地、林地、天然草地和灌木林。

2 数据与模型

2.1 数据准备

本文使用的数据资料主要包括基础图件资料(1:10 000、1:50 000 地形图, 1:100 000 土地利用图, 1:100 000 土壤图)、气象数据、土壤水分监测数据以及土壤物理属性(如容重、饱和导水率、田间持水量等)的实测数据、自然植被 *NPP* 实测数据。

气象数据分为 3 部分:伊金霍洛旗气象站 1998 ~ 2002 年气象数据由国家气象局资料室提供,包括常规的观测项目(日最高温、最低温、日最大湿度、最小湿度、风速、降雨量和日照时数);伊金霍洛旗气象站 2003 年气象数据来自鄂尔多斯市气象局,气象数据的时间步长为 1 d;2000 ~ 2002 年部分气象数据由安置在中国科学院植物所鄂尔多斯沙地草地生态实验站内的自动气象观测站提供,时间步长为 2 h,换算成以天为时间步长后,与前两部分气象资料相互补充使用。

土壤水分和物理属性数据:土壤水分监测于 2000 ~ 2003 年 7 ~ 9 月,在研究区内根据地形特点选定艾碱壕和深海沟两个断面设 10 个样点通过埋设 TDR 探针(Made by Spectrum in America)进行自动观测和传统的烘干称重法进行测定,每个样点作 2 个重复,观测周期为 5 d,遇到降雨时,等雨停后,立即对所有监测点进行加测。水分监测的土壤剖面深度为自表层每隔 15 cm 取样,至底部 120 cm。TDR 的观测深度分别为 0 ~ 15、15 ~ 30、30 ~ 60、60 ~ 90、

90~120 cm;用环刀法作 2 个重复测定土壤容重;用圆盘入渗仪测定饱和导水率;由于受水源条件的限制,在实验站前面的空地上选定与各监测点在质地、容重等土壤物理性状接近的地块,用抽水机从水井中抽水,对选定地块进行人工灌溉,等土壤饱和以后,测定土壤的田间持水量。

自然植被 NPP 实测数据:作者于 2003 年 8 月 15 日至 9 月 3 日到研究区实测植被生产力数据,分别在半固定沙丘和固定沙丘各选 6 个代表性样地,每个样地布置 3 m×3 m 的样方 3 个,共 36 个。同时在研究区范围内选取了西南到东北(样线 1)和东南到西北(样线 2)两条样线,每条样线上实测了 15 个代表样点的植被生产力数据,两点之间的间隔约 500 m,用手持全球定位系统(GPS)测定。测定时统计每个样方中灌木的种类,对每种灌木依其丛幅和高度相对地划分大、中、小 3 个等级组,按不同的等级组分别统计灌木丛的数量并记录,用 NPP 标准测定方法(董鸣,1997)测定大、中、小 3 个等级组的植被生产力,再根据统计不同灌木丛的数量计算出每个样方内实测植被生产力。

2.2 模型

2.2.1 累积土壤水分补给量子模型

累积土壤水分补给量是指在降雨过程中能够为土壤所保持的部分,只有这一部分降雨能够为植被所潜在利用。依据水量平衡原理,建立了累积土壤水分补给量的计算公式,模型的建立过程和验证详见文献(牛振国等,2003),具体公式为:

$$S_i = P_i + R_{in,i} - R_{out,i} - D_i - E_i \tag{1}$$

式中: S_i 为第 i 个栅格得到的累积土壤水分补给量(mm); P_i 为第 i 个栅格得到的降雨量(mm); D_i 为第 i 个栅格的土壤渗漏损失(mm)。其中,在降雨过程中水分的蒸发 E_i 忽略不计。 $R_{in,i}$ 为周围栅格汇入第 i 栅格的水分(mm); $R_{out,i}$ 为第 i 栅格流向其它栅格的水分(mm)(不包括垂直方向水分的收支);

降水径流的计算:采用美国农业部土壤保持局的曲线数字法(SCS curve number method)

$$Q = (P - 0.2S) / (P + 0.8S) \quad P > 0.2S \tag{2}$$

$$Q = 0 \quad P \leq 0.2S \tag{3}$$

式中: Q 为日径流量(mm); P 为日降水量(mm); S 为保持参数(Retention parameter)。保持参数随流域和时间而不同,它与流域的土壤、坡度、土地利用、管理措施以及土壤前期含水量等有关。用以下方程将保持参数 S 与曲线数字 CN 联系起来:

$$S = 254 (100 / CN - 1) \tag{4}$$

式中:常数 254 为单位转换系数,使 S 由英寸转换为毫米。曲线数字 CN 根据土地利用图和土壤图确定具体方法参见文献(牛振国等,2003),取值范围是 0~100(不等于 0),因此当 $CN = 100$ 时, $S = 0$,并且 $Q = P$ 。

渗漏的计算:每个栅格的渗漏取决于土壤最大持水量,采用如下公式:

$$\begin{cases} D_i = S_i - S_{max,i} & S_i > S_{max,i} \\ D_i = 0 & S_i < S_{max,i} \end{cases} \tag{5}$$

式中: D_i 为栅格 i 的渗漏量(mm); $S_{max,i}$ 为栅格 i 最大持水量(mm); S_i 为栅格 i 得到的有效降雨(mm)。

2.2.2 植被表面净辐射子模型

植被表面净辐射的计算采用 Penman-Monteith 公式里计算净辐射的方法, Penman-Monteith 公式被认为是计算参考作物蒸散量最精确的计算方法之一,1990 年联合国粮农组织在意大利召开蒸散量计算的专题会议上推荐使用该公式(Smith,1991),其中关于作物表面的净辐射量的系列计算公式如下:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \tag{6}$$

式中: R_n 为植被表面的净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{ns} 为植被表面的净短波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{nl} 为植被表面的净长波辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)

$$R_{ns} = 0.77 R_s \tag{7}$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{max,K}^4 + T_{min,K}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \tag{8}$$

$$(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \tag{8}$$

式中:0.77 为计算参考蒸散的草地的发射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数($4.903 \times 10^9 \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $T_{max,K}$ 为日最大绝对温度($K = ^\circ\text{C} + 273.16$); $T_{min,K}$ 为日最小绝对温度($K = ^\circ\text{C} + 273.16$); e_a 为实际水汽压(kPa); R_s/R_{so} 为相对短波辐射(≤ 1.0); R_s 、 R_{so} 分别为实际和晴天短波辐射量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

$$R_{so} = (a_s + b_s) R_a \tag{9}$$

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a \tag{10}$$

式中: n 、 N 分别为实际和最大天文日照时数(h); R_a 大气外层太阳辐射通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); a_s 、 $a_s + b_s$ 分别为 $n = 0$ 和 $n = N$ 时的短波辐射比例系数,在没有可利用数据的情况下, a_s 、 b_s 分别取 0.25 和 0.50。这样:

$$R_{so} = (\frac{0.75N}{0.25N + 0.5n}) R_s \tag{11}$$

对实际太阳辐射进行地形校正,采用傅抱璞提出的校正方法,详细的校正过程参见文献(牛振国等,2002;傅抱璞,1983,1998)

2.2.3 植被净第一性生产力模型构建

采用样线 1 上 *NPP* 实测数据、累积土壤水分补给量和地形校正后的植被表面净辐射数据,把表 1 中的数据输入到 SPSS13.0 软件的 Data Editor 中,运用最小二乘法进行多元线性回归分析,建立二元回归模型如下:

$$NPP = 0.464W + 0.178R_n - 248.721 \quad (12)$$

式中:*NPP* 为植被净第一性生产力($\text{g DW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$);*W* 为年累积土壤水分补给量(mm);*R_n* 为植被表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

多重判定系数 $R = 0.976$; $R^2 = 0.953$;修正的判定系数 $R^2 = 0.945$,说明自变量与因变量之间有良好的相关性。

对回归模型进行 *F* 检验: $F = 122.246$, $p = 0.000 < 0.05$,表明该回归模型从整体上的是显著的,对回归模型进行 *t* 检验,*W* 和 *R_n* 对应的 *p* 值分别为 0.030 和 0.022,均小于 $\alpha = 0.05$ 水平,均具有显著性意义。

表 1 样线 1 上各点输入数据
Table 1 The input data in the line 1

样点号 No. of sample	<i>NPP</i>	<i>R_n</i>	<i>W</i>
1	98.69	999.11	392.29
2	133.32	1 038.64	424.84
3	140.51	1 041.23	430.51
4	96.55	971.57	387.26
5	126.08	1 026.20	414.14
6	175.51	1 112.03	446.17
7	109.55	1 004.73	398.21
8	82.97	949.06	362.08
9	191.08	1 254.39	456.32
10	201.08	1 298.42	488.93
11	122.12	1 015.51	403.88
12	224.63	1 343.38	537.18
13	95.38	959.90	376.00
14	185.77	1 176.67	448.93
15	145.42	1 055.68	436.59

NPP:净第一性生产力 Net primary production *R_n*:植被表面净辐射 Net radiation on the vegetation *W*:累积土壤补给量 Accumulated soil water replenishment

3 植被净第一性生产力模拟

3.1 模型实现

将累积土壤水分补给量和植被表面净辐射的模拟结果,输入到植被净第一性生产力模型中,实现整

个研究区内的植被净第一性生产力模拟。利用研究区 1:10 000 的地形图,生成了 30 m×30 m 空间分辨率的 DEM 作为模型实现的平台,然后采用 Visual Basic 高级程序语言和 Arcview3.2 的二次开发语言 Avenue 联合编程,实现了植被生产力模型和 GIS 的完整结合。

3.2 模型验证

对植被生产力模拟结果进行验证是比较困难的工作,特别是大尺度植被生产力模拟结果的验证,用实测值进行验证几乎是不可能的,已有的研究大多采用间接验证的方法。

由于本文对植被生产力模拟采用了 30 m×30 m 的空间分辨率,使得应用实测值对模拟结果进行验证成为可能。由于人力所限,在固定沙丘和半固定沙丘各选择了 6 个代表性样地、在样线 2 上选择了 15 个样地,实测植被生产力对模拟结果进行验证。对模拟值和实测值进行回归分析,在固定沙丘、半固定沙丘和样线 2 上都达到 0.05 显著性相关水平。图 1 是研究区不同位置模拟值与实测值的比较,图中包括 1:1 直线和研究区不同位置模拟值与实测值的线性回归线。从图中可以看出,不同位置的植被生产力数据多分布在 1:1 直线附近,说明其模拟值与实测值吻合较好。固定沙丘和半固定沙丘上模拟值与实测值的吻合程度要高于样线 2 上模拟值与实测值的吻合程度。在样线 2 上多数样点的模拟值低于实测值,主要原因可能是有些地方利用地下水进行灌溉,实际水分条件好于模拟水分条件,导致植被生产力模拟值低于实测值。总的来说,在野外非常复杂多变的自然环境下,该方法的模拟结果基本能达到植被生产力估算的精度要求。

图 1 研究区不同位置模拟值与实测值的比较
Fig.1 Comparison of simulated values and measured value at different sites in study area

采用相对误差和偏斜度来描述模拟结果与实测结果的符合程度。相对误差采用下式计算：

$$R_e = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i) \cdot 2}{\sum_{i=1}^n x_i \cdot 2} \times 100\%$$

(13)

式中： y_i 为模拟值， x_i 为实测值， R_e 为相对误差，用来描述模拟值与实测值的偏离程度。偏斜度是模拟值与实测值无截距回归方程的斜率与1的偏差，表

表 2 不同位置植被生产力模拟值的相对误差与偏斜度
Table 2 Relative error and bias of linear regression equation with 1 between measured and simulated value

名称 Name	固定沙丘 Fixed dune	半固定沙丘 Semi-fixed dune	样线 2 Sample line 2
相对误差(%) Relative error	3.79	3.22	6.27
偏斜度 Measure of skewness	4.43	0.58	- 12.84

示通过原点的拟合直线偏离 1:1 线的程度(%)。表 2 是不同位置植被生产力实测值与模拟值的相对误差与偏斜度，从表中可以看出，相对误差的范围为 3.22% ~ 6.27%，偏斜度范围在 - 12.84% ~ 4.43%。

3.3 模拟结果

把 2003 年研究区的气象资料、土壤物理属性数据等参数输入到累积土壤水分补给量子模型，得到研究区 2003 年累积土壤水分补给量模拟结果；把 2003 气象资料和由 DEM 获得的地形属性数据(如高程、坡度和坡向等)输入植被表面净辐射模型，得到研究区 2003 年植被表面净辐射模拟结果，然后把累积土壤水分补给量和植被表面净辐射的模拟结果作为植被净第一性生产力模型的输入参数，对研究区内植被净第一性生产力进行模拟，结果如图 2，对模拟结果进行统计分析，研究区内 2003 年植被 NPP 总量为 1.31×10^7 g DW，平均为 $127 \text{ g DW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

不同坡向上植被生产力分布(图 3)：平地上植被生产力最大为 $283.21 \text{ g DW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ，北坡和东

图 2 研究区植被净第一性生产力(NPP)($\text{g DW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 分布图
Fig.2 The distribution of net primary production(NPP)
($\text{g DW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) in study area

北坡分别为 253.6 和 180.72 $\text{g DW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,南坡最小为 101.68 $\text{g DW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,主要是由于不同坡向上的光照条件不同 ,引起了不同坡向上水分条件的不同 ,进而导致不同坡向上植被生产力分布的空间差异。

图 3 不同坡向上净第一性生产力(NPP)分布
Fig.3 The distribution of net primary production (NPP) on different aspects
F :平地 Flat N :北 North NE :北东 Northeast E :东 East
SE :南东 Southeast S :南 South SW :南西 Southwest W :西 West
NW :北西 Northwest

图 4 不同坡度上净第一性生产力(NPP)分布
Fig.4 The distribution of net primary production (NPP) in different slopes
I : 0° ~ 1° II : 1° ~ 3° III : 3° ~ 5° IV : 5° ~ 7° V : 7° ~ 10°
VI : 10° ~ 15° VII : 15° ~ 20° VIII : 20° ~ 25° IX : > 25°

不同坡度上植被生产力的分布(图 4) :在坡度 20°以内 ,随着坡度的增加 ,植被生产力逐渐减小 ,坡度从 0°增加到 20° ,植被生产力从 233.39 $\text{g DW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 减小到 112.91 $\text{g DW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,这是由于有较大降雨量的时候 ,可以在坡面产生径流 ,从坡度较大的地方流到坡度较小的地方 ,补充了平地 and 洼地的土壤水分含量 ,使坡度越小的地方水分条件越好 ,植被生产力也就越高。

4 结论与讨论

本文把土壤水分分布式动态模型、植被表面净辐射模型的模拟结果和植被生产力实测数据相结合 ,建立了植被净第一性生产力模型 ,实现了对流域尺度上 30 m × 30 m 空间分辨率的植被生产力精确模拟 ,并且用植被生产力的野外实测数据对模拟结果进行了验证表明 :实测值与模拟值在固定沙丘、半固定沙丘和样线 2 上都达到 0.05 显著性相关水平 ;不同位置的植被生产力数据多分布在 1:1 直线附近 ,模拟值与实测值吻合较好 ,植被生产力实测值与模拟值的相对误差范围为 3.22% ~ 6.27% ,偏斜度范围在 - 12.84% ~ 4.43%。因此 ,该方法可以用于流域尺度上植被生产力的精确模拟。

本文主要从土壤水分状况和植被表面净辐射两个方面建立了植被净第一性生产力模型 ,实际上影响植被生产因素很多 ,如植物生理遗传性状、植物种类、温度、土壤养分状况、植物病虫害等。今后应尝试考虑更多因子的影响 ,来模拟区域植被生产力状况。

参 考 文 献

Dong M (董鸣) (1997). *Investigation and Analysis of the Terrestrial Biocommunities* (陆地生物群落调查观测与分析). Standards Press of China, Beijing. (in Chinese)
Fang JY (2000). Forest productivity in China and its responses to global climate changes. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 24, 513 – 517.
Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P (1998). Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 281, 237 – 240.
Foley JA (1994). Net primary productivity in the terrestrial biosphere: the application of a global model. *Journal of Geophysical Resource*, 99(D10), 20773 – 20783.
Fu BP (傅抱璞) (1998). The differences and variations in components of radiation budget on underlying surfaces of different topographies. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 22, 178 – 190. (in Chinese with English abstract)

- Fu BP(傅抱璞)(1983). *Mountain Climate*(山地气候). Science Press, Beijing, 61–72. (in Chinese)
- Hou GL(侯光良), You SC(游松才)(1990). To calculate China's plant-climate productive potentialities by Chikuzo model. *Journal of Natural Resources*(自然资源学报), 5, 60–65. (in Chinese with English abstract)
- Li DQ(李迪强), Sun CY(孙成永), Zhang XS(张新时)(1998). Modelling the net primary productivity of the natural potential vegetation in China. *Acta Botanica Sinica*(植物学报), 40, 560–566. (in Chinese with English abstract)
- Matsushita BK, Yang CF(杨翠芬), Chen J(陈晋), Wang QX(王勤学), Kameyama STS, Tamura MSYK(2004). Accurate estimation of net primary productivity of terrestrial ecosystem at a regional scale. *Acta Geographica Sinica*(地理学报), 59, 80–87. (in Chinese with English abstract)
- Meiillo JM, McGuire AD(1993). Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 363, 234–240.
- Ni J(倪健)(2002). BIOME models: main principles and applications. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 26, 481–488. (in Chinese with English abstract)
- Niu ZG(牛振国), Li BG(李保国), Zhang FR(张凤荣)(2003). Modeling of soil water replenishment in catchments based on GIS. *Journal of Hydraulic Engineering*(水利学报), 2, 73–77. (in Chinese with English abstract)
- Niu ZG(牛振国), Li BG(李保国), Zhang FR(张凤荣), Chen HW(陈焕伟)(2002). A distributed model of reference evapotranspiration based on the DEM. *Advances in Water Science*(水科学进展), 13, 303–307. (in Chinese with English abstract)
- Paruelo JM(1997). A *NPP* estimates from *NDVI* for the central grassland region of the United States. *Ecology*, 78, 953–958.
- Piao SL(朴世龙), Fang JY(方精云), Guo QH(郭庆华)(2001). Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 25, 603–608. (in Chinese with English abstract)
- Potter CS(1999). Terrestrial biomass and effects of deforestation on the global carbon cycle—results from a model of primary production using satellite observations. *BioScience*, 49, 769–778.
- Potter CS, Randerson JT(1993). Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811–841.
- Smith M(1991). *Report on the Expert Consultation on Revision of FAO Methodologies for Crop Water Requirements*. Land and Water Development Division, Food and Agriculture Organization, Rome, 54.
- Sun R(孙睿), Zhu QJ(朱启疆)(2001). Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Remote Sensing*(遥感学报), 5, 58–61. (in Chinese with English abstract)
- Sun R(孙睿), Zhu QJ(朱启疆)(1999). Net primary productivity of terrestrial vegetation—a review on related researches. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 10, 757–760. (in Chinese with English abstract)
- Uchijima Z, Seino H(1985). Agroclimatic evaluation of net primary productivity of nature vegetation (1): Chikugo model for evaluating primary productivity. *Journal of Agricultural Meteorology*, 40, 343–352.
- Yan SJ(闫淑君), Hong W(洪伟), Wu CZ(吴承祯), Bi XL(毕晓丽)(2001). Modification of natural vegetation *NPP* model. *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*(江西农业大学学报), 23, 248–252. (in Chinese with English abstract)
- Yang YH(杨永辉), Wang ZP(王智平), Sakura YS, Tang CY(唐常源), Shindo SZ(2002). Effects of global warming on productivity and soil moisture in Taihang Mountain: a transplant study. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 13, 667–671. (in Chinese with English abstract)
- Zhang H(张洪), Fan ZL(樊自立)(2000). Studies on a *NPP* model of salinized meadow in the north of Tarim Basin. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 24, 13–17. (in Chinese with English abstract)
- Zhang JH(张佳华)(2001). Study on models for evaluation primary productivity of natural vegetation and crop yield. *Acta Agriculturae Shanghai*(上海农业学报), 17, 83–89. (in Chinese with English abstract)
- Zhang XZ(张宪洲)(1993). The estimation and distribution of net primary productivity of natural vegetation in China. *Resources Science*(资源科学), 1, 15–21. (in Chinese with English abstract)
- Zheng YR(郑元润), Zhou GS(周广胜)(2000). A forest vegetation *NPP* model based on *NDVI*. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 24, 9–12. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS(周广胜), Zhang XS(张新时)(1995). A natural vegetation *NPP* model. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 19, 193–200. (in Chinese with English abstract)
- Zhou GS(周广胜), Zhang XS(张新时)(1996). Study on *NPP* of natural vegetation in China under global climate change. *Acta Phytocologica Sinica*(植物生态学报), 20, 11–19. (in Chinese with English abstract)
- Zhou T(周涛), Shi PJ(史培军), Sun R(孙睿), Wang SQ(王绍强)(2004). The impacts of climate change on net ecosystem production in China. *Acta Geographica Sinica*(地理学报), 59, 357–365. (in Chinese with English abstract)
- Zhu ZH(朱志辉)(1993). The model of estimating net primary productivity of natural vegetation. *Chinese Science Bulletin*(科学通报), 38, 1422–1426. (in Chinese with English abstract)