

文章编号: 1000-5692(2001)04-0445-05

陆地植被净第一性生产力对全球 气候变化响应研究的进展

陈波

(杭州师范学院 生命科学学院, 浙江 杭州 310012)

摘要: 陆地植被的年净第一性生产力是植物每年通过光合作用所固定的碳总量。在全球 CO₂ 浓度持续变化的过程中, 作为一个对外界综合环境因素敏感的指标, 陆地植被净第一生产力的变化及与环境因子之间相互作用的机制是关注的焦点。简要介绍了植被净第一生产力研究方法的状况, 着重对当前 2 种主要生产模型 (GIO-PEM 模型和 NASA-CASM 模型) 的测定原理、方法、测定结果及优缺点进行了评述, 同时对国内相关领域的研究状况也进行了介绍。表 2 参 18

关键词: 植被; 净第一性生产力; 教学模型; 气候全球变化

中图分类号: S718.5; Q948.1 **文献标识码:** A

陆地植被净第一性生产力 (net primary productivity) 是指地球表面绿色植物在单位时间内单位面积上由光合作用所产生的有机物质总量中扣除自养呼吸后的剩余部分。从本质上看, 植物净第一生产力的形成主要涉及到碳的固定与消耗, 因此, 大气和陆地生物圈之间的碳流可以用植被净第一生产力的年净积累来表示^[1]。在全球 CO₂ 浓度持续变化的过程中, 人们已意识到 CO₂ 浓度升高、全球变暖和随之带来的水分和养分循环变化将影响到植被净第一生产力及其分布格局。目前关注的焦点是陆地植被生态系统是 CO₂ 的“源”还是“汇”以及植物本身对全球变化的响应机制^[1,2]。因此, 基于植物生理生态学机理的动态过程, 运用卫星数据和遥感技术模拟, 预测全球气候变化条件下植被净第一生产力动态和分布格局成为目前研究的主要趋势。

1 陆地植被净第一生产力的研究及测定

在自然条件下, 植被净第一生产力除受植物本身生物学特性 (如物种的净同化率、叶面积指数、叶生活周期、群落的发育阶段、植冠结构等) 的影响外, 外界环境条件 (如光照、气温、降水、大气湿度、土壤养分、土壤理化特性等) 对植被净第一生产力也有很大的限制作用。在国际地圈与生物圈计划的推动下, 人们曾根据植被生长与环境因子之间的关系, 建立起很多估算植被净第一生产的气候相关模型。Lieth (1975) 等进行了开创性研究, 他们根据全球各地约 50 个点的植被净第一生产力实测值与年均温度和年均降水量之间的关系, 对世界范围内的植被净第一性生产力进行了估算。此类模型还包括 Miami 模型、Thomthwaite 模型及 Chikugo 模型等。气候相关模型可以估测某一地区潜在植被

收稿日期: 2001-02-11; 修回日期: 2001-04-09

作者简介: 陈波(1966-), 男, 安徽怀远人, 讲师, 博士, 从事植物生态学研究。

净第一生产力,但没有充分考虑到植物的生理反应。

Monteith (1977) 的研究首次注重植物的光合生理特征^[3],用植物所吸收的光合有效辐射 (R_e) 和光能利用效率 (ϵ) 2 个指标来计算作物的净第一生产力 (P_{NP}) 即 $P_{NP} = \epsilon \times R_e$; 并引入了水分、温度和营养胁迫对植物生产力影响的观点。Heimann 等 (1989) 曾利用这个模型对陆地自然植被净第一生产力进行了研究^[4]。随后的 FOREST-BIG, DEMETER, TEM 等模型均考虑了最基本的光合作用、呼吸作用及碳同化物的分配以及与外界环境因子间的关系,并用于一些区域植被净第一生产力对全球变化的响应评估,由于大多数陆地生态系统缺乏足够的参数,其量化的效果并不理想。

目前认为时空尺度的变化对植被净第一生产力也有影响:在长期的时间尺度上,气温和降水的长期平均值可能是影响全球植被净第一生产力变化的主要驱动力,而较短的时间尺度上,温度、土壤湿度和大气湿度通过影响植物的光合生理作用来限制植物生长;同时,人类的干扰和对土地の利用方式也会影响到植被净第一生产力变化^[1]。鉴于此,近期建立的较为完善的模型都充分利用卫星数据和遥感技术,并注重气候、土壤因子与植被的生理生态过程相结合,以期准确阐明植被第一生产力在全球变化中的机理,如 GLO-PEM 模型和 NASA-CASA 模型等具有较好的效果。

1.1 GLO-PEM 模型及结果

全球生产力效应模型 GLO-PEM (global production efficiency model) 是将遥感技术和植物生理生态特征相结合并充分考虑到气温、土壤水分、大气水汽压差等因素对植被净第一生产力的影响^[3]。其基本公式为: $P_{NP} = \sum_i [(\hat{q}_{\epsilon_{g,t}}^*)(N_i S_t)] Y_g Y_m$ 。其中, $\epsilon_{g,t}^*$ 是潜在的光能转化效率: $\hat{q} = \hat{q}_t \hat{q}_t \hat{q}_t \hat{q}_t$, \hat{q}_t 和 \hat{q}_t 分别表示较低气温、较高的大气水汽压、土壤水分状况对植物同化能力的影响; N_t 表示植被对光合有效辐射的吸收比例 (即 R_{FPA}); S_t 表示入射光合有效辐射; $Y_g Y_m$ 是植物生长呼吸和维持呼吸对植被净第一生产力的影响。 Y_g 取值为 0.75, $Y_m = \{1 - (0.4/0.75)[10^3 W / (10^3 W + 50)]\}$, W 是陆地植被每公顷的生物量^[9]。

GLO-PEM 模型需要利用 R_{FPA} 与 I_{NOV} 之间的线性关系,由 NOAA 气象卫星的 SVHRR 资料估算全球 R_{FPA} 的分布;光合有效辐射 R_{PA} 由 TOMS (total ozone mapping spectrometer) 的紫外波段反射值估计,因为云在紫外和 R_{PA} 波段的反射比较稳定,对这两个波段的辐射吸收比较小,因此云对 R_{PA} 的影响需用 TOMS 紫外反射值的线性函数来估计。

该模型利用共计

208.7 万个 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$

的分辨率数据估算

1987 年的全球植被净第一生产力总量 (碳)

是 68.97 Pg 。对不同植被类型的净第一生产力的研究表明 (表 1), 植被净第一生产力的最大值在亚马逊盆地、赤道西部、中非以及赤道附近的远东地区,中国西藏高原的植被净第一生产力沿高原东部山麓向西部急剧递减;地球上干旱地区植

表 1 GLO-PEM 模型对全球不同植被类型相关参数的估算

Table 1 Estimates of GLO-PEM for P_{NP} , ϵ_g and respiration in different vegetation types

植被类型	$\epsilon_g (\times 10^{-6}) / (\text{g} \cdot \text{J}^{-1})$	平均呼吸作用 / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	平均 $P_{NP} / (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	总 $P_{NP} / (\text{Pg} \cdot \text{a}^{-1})$
1 常绿阔叶林	0.71 (0.35)	409 (443)	1206 (507)	15.95
2 针叶常绿林和灌木	0.66 (0.75)	283 (376)	833 (729)	11.08
3 高纬度落叶林和灌木	0.67 (0.86)	266 (346)	781 (653)	4.57
4 冻原	0.11 (0.46)	45 (140)	130 (387)	1.01
5 混交针叶林和灌木	0.64 (0.61)	313 (388)	920 (675)	6.23
6 灌木草地	0.43 (0.46)	220 (293)	645 (571)	13.61
7 草地	0.40 (0.71)	97 (173)	289 (419)	5.56
8 裸地	0.19 (0.80)	69 (33)	19 (93)	0.32
9 栽培作物	0.41 (0.53)	160 (242)	468 (533)	6.18
10 阔叶落叶林和灌木	0.41 (0.52)	187 (275)	549 (594)	2.45
11 灌丛和裸荒	0.50 (0.93)	53 (102)	151 (250)	1.68
总计				68.97

说明: 植被类型划分按 DeFries & Townshend (1994) 依据 [7]; 括号内为标准误

被净第一生产力较低。常绿阔叶林、灌木草地对全球植被第一生产力的年积累贡献最大,分别为 $15.95 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $13.61 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$, 随后是针叶常绿林和灌木、混交针叶林和灌木、栽培作物和草地等。

不同植被因呼吸作用消耗碳的变化趋势与植被净第一生产力相似, 常绿阔叶林最高。同其他模型的估算结果相比, GLO-PEM 模型的结果在北方和高纬度地区明显要大。这些地区包括北方森林区、西欧、落基山、安第斯山、高加索山脉和西藏高原等地, Prince 认为在全球尺度上造成这种差异的主要原因是 ϵ_g^* 的取值不同, 尤其是交错地带的变异更大, 而其他模型可能忽略了 ϵ_g^* 与气温之间的明显负相关关系^[5]。

GLO-PEM 模型中的 ϵ_g^* 和其他环境因子参数以 10 d 为时间步长, 故实时性较强; 同时, 注重 C₃ 和 C₄ 植物的不同光合途径, 对 ϵ_g^* 分别取值, 并注重不同植被类型中 ϵ_g 的变化。该模型可在区域性尺度上预测作物、草地和森林植被的净第一生产力。但该模型仍有一些局限, 由于高分辨率卫星数据的模拟和计算需要很多其他参数和统计数据, 在一定程度上可能会限制数据的来源; 其次影响 R_{FPA} 的因素较多; 在卫星数据不合适的情况下, 气候变化等会改变植物的生长和分配, 因此很有可能改变植被指数从而限制现有数据的利用。GLO-PEM 模型的下一步研究应利用单轨道 (single-orbits) 数据来进行大气水蒸气的测量以及增进对土壤湿度和大气湿度的详尽调查, 并注重 AVHRR 数据的连续性, 而且要注重近 20 a 对区域性和全球性大气干扰程度的影响, 以便更准确地计算全球植被净第一生产力分布格局和变化。

1.2 NASA-CASA 模型及估算结果

NASA-CASA (national aeronautics and space administration-carnegie ames stanford approach) 模型是为了在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的分辨率上估算每月每季的碳固定、植物生物量、营养同化与凋落、土壤营养矿化以及 CO₂ 交换等^[8]。计算式为: $P_{NP} = S_r R_{FPA} \epsilon_{max} TW$ 。其中 S_r 是表面太阳辐射; R_{FPA} 的数据来自 AVHRR NDVI; ϵ_{max} 为最大光能利用效率, 取校正后的值, 即 $0.56 \times 10^{-6} g^\circ J^{-1} R_{PA}$; T 为温度, 由影响植物生产力的最适温度 T_{opt} 得出; W 从每月的水分亏损值中算出, 对土壤层的划分包括 3 层, M_1 地表枯枝落叶层, M_2 为 0~0.3 m 层, M_3 为 1~10 m 的根层。该模型用上世纪 80 年代 $8 km \times 8 km$ 分辨率陆地覆盖率地图和 NDVI 数据进行分析^[9]。

该模型估算 20 世纪 80 年代期间全球植被净第一生产力地上部分 (叶和木质) 共计 651 Pg, 年碳储量为 $56.4 Pg \cdot a^{-1}$; 全球范围内森林生态系统地下总生物量 (主要是根的生物量) 为 50 Pg。全球最大的碳储量在热带地区的雨林中 ($> 17 kg \cdot m^{-2}$), 而温带地区的针叶落叶混交林的碳储量较低 (表 2)。

表 2 NASA-CASA 对陆地不同植被类型中碳的固定和 P_{NP} 的估算

Table 2 Estimates for carbon and P_{NP} in different ecosystem from NASA-CASA model

植被类型序号	总面积 ($\times 10^6$)/km ²	地上生物量中 的平均碳 ^{**} / ($g \cdot m^{-2}$)	地上生物量 中总碳 ^{**} / Pg	地上生物量中 的平均碳 [*] / ($g \cdot m^{-2}$)	地上生物量 中总碳 [*] / Pg	P_{NP} 中的碳 平均 [*] / ($g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	P_{NP} 中总碳/ ($Pg \cdot a^{-1}$)
1 常绿阔叶林	15.4	8 159	126.1	12 622	195.0	1 075.4	16.6
2 针叶常绿林和灌丛	13.5	11 381	153.5	6 014	84.9	233.3	3.3
3 高海拔落叶林和灌丛	5.9	11 918	70.1	5 603	34.0	244.5	1.5
4 冻原	8.6	428	3.8	1 878	17.7	72.6	0.7
5 针叶混交林和灌丛	7.5	5 321	40.2	7 386	56.9	386.2	3.0
6 草原和灌木	24.3	4 540	111.2	8 193	202.4	782.4	19.3
7 温带草原	22.1	476	10.6	154	3.5	172.5	4.0
8 沙漠	17.7	190	3.4	525	9.4	21.4	0.4
9 栽培作物	14.6	747	10.9	182	2.7	365.0	5.4
10 阔叶落叶林和灌木	3.6	7 390	26.9	6 751	24.7	397.4	1.5
11 半干旱灌丛	11.5	971	11.1	1 721	20.0	69.0	0.8
总计	145.4		567.8		651.1		56.4

说明: * 数据来自 NASA-CASA 模型, ** 数据来自 Olson 等 (1983)

Potter (1999) 将 NASA-CASA 模型的结果与 Olson 等 (1983) 的结果^[8] 作了对比。Olson 等估算全球植被地上生物量中的碳贮量为 568 Pg, 针叶常绿林和高纬度地区落叶林的净第一生产力的结果也有不同, 草原和栽培作物在 NASA-CASA 中的净第一生产力较低, Potter 认为这可能是在每月的 NDVI 的基

础上对这2种植被类型年产量的估算较低所致,并且植物地上和地下生物量的分配比率也不相同。

NASA-CASA模型还可计算植物各组织对碳的同化速率(α)以及碳在植物体内的储存时间,推算出碳循环的周转时间,同时也可推算土壤碳库的动态变化和全球净碳损失。结果表明全球的死地被物(dead litter)和土壤库中的碳达170 Pg,加上森林植物地下生物量中的50 Pg,全球地表和地下储存的碳为220 Pg,这些碳在地表和土壤库内的平均存留时间至少为25 a。不同植被类型中碳的贮藏时间不同,冻原、北方针叶林植物木质部内碳的贮存时间约为50 a,根系中碳的贮存时间约3 a,而萨王纳和木本草原、温带草原植物根系内碳的贮存时间约5 a。在20世纪90年代初期,因砍伐森林造成的全球年净碳损失高达1.2~1.3 Pg,其中,热带雨林造成的净碳损失最大,达 $0.69 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$,热带萨王纳灌木林达 $0.56 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。因森林砍伐或退化造成净碳损失最多的国家是巴西,约为 $0.25 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$,其后是扎伊尔和印度尼西亚,接近 $0.1 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$;加拿大、法国和美国等因森林的复植、保护和管理较好,森林碳积累速率最高,大约是 $0.02 \text{ Pg} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

NASA-CASA模型模拟的结果具有以下几个特点:①反映的是陆地地面实际条件,时间尺度小于5 a;②在 $1^\circ \times 1^\circ$ 的空间分辨率上不仅反映了大气对植物生产力的控制,而且也注重土壤肥力等理化特性对植物体内不同组织之间碳同化的影响;③NASA-CASA模型将地上生物量细化为叶生物量和木质部生物量两部分,并估算了碳的周转时间,因此更注重净第一生产力对全球碳循环的贡献。由于植物群落的年龄结构对生产力有很大影响,而卫星数据不能提供这方面的准确信息,因而这是该模型的一个缺陷;同时由于缺少在1~8 km分辨率上气候和土壤的月变化动态的高质量地图,在一些地区尤其是泛亚地区的估算方法需要进一步加强。

2 我国植被净第一生产力研究现状

我国全国范围内的生物生产力测定工作大致始于上世纪70年代末80年代初期,主要以较小尺度上的实测数据或回归方程估出,全国尺度上的植被净第一生产力研究始于80年代末期。陈国南、侯光良等、张宪洲等以及朱志辉分别利用Miami模型、Thomthwaite模型及Chikugo模型对我国植被净第一生产力进行初步的估算^[10~13]。张新时等采用Holdridge生命地带系统与Chikugo模型首次对全球变化后中国陆地生态系统的植被地理分布及净第一生产力进行了预测^[14]。周广胜等在建立联系植物生理生态特性和水热平衡关系基础上,对中国植被的净第一生产力进行了分析^[15]。肖乾广等利用NOAA-AVHRR的积累NDVI的统计关系估算了我国植被净第一生产力的测算结果^[16]。研究结果表明我国植被净第一生产力的基本分布模式为东南沿海地区最高,自然植被的净第一生产力在森林地带由北向南递增明显;在全球变化条件下限制我国植被净第一生产力的主要原因仍是水分不足。倪健(1996)利用Chikugo模型对中国亚热带现状条件和气候变化条件下常绿阔叶林的植被净第一生产力进行了估算,并认为在全球气候变化条件下,水分供应不足也是限制我国亚热带常绿阔叶林植被净第一生产力的主要原因^[17]。估测全球变化条件下的中国植被净第一生产力分布的研究主要根据气温和降水的变化得出,植物在气候变化过程中的生理生态学过程没有充分反映,并且缺少实测资料来验证各种模型的估计结果。我国森林带在陆地上绵延约35个纬度,具有从寒温带到热带的各种类型,尤其我国东部地区是研究植被与气候变化相关性、预测全球变化对植被影响以及植被对全球变化响应的理想区^[18],因此,深入加强这方面的科研工作,对准确评价和预测我国植被净第一生产力的动态变化及其对全球变化中碳循环的研究有重要的理论意义和实践意义。

3 结论

全球变化已成为主要的环境问题,研究植被净第一生产力对全球变化的响应应有助于分析全球变化对地球生物圈的影响并为人类的应对策略奠定理论基础,同时为合理利用和开发自然资源提供科学依据。在研究中,植被类型划分标准或分布界限应该统一,否则在全球气候变化中任何模型测定的植被净第一生产力仍缺乏可比性。卫星数据、遥感技术的来源和程序步骤应尽量统一。植被净第一生产力对气候变化有滞后效应,由于很多数据缺乏连续性,全球气候变化和植被净第一生产力之间相互作用

用的时间尺度仍很模糊。在中小尺度上, 加强植物群落内物种的生理生态学研究以及群落生产力的分析可为区域性和全球性植被净第一生产力研究提供实测资料, 有助于模型参数的校正和改进。

致谢: 本文在宋永昌教授指导下完成, 深表感谢。

参考文献:

- [1] 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—88.
- [2] Tans P P, Fung I Y, Takahashi T. Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget [J]. *Science*, 1990, **247**: 1 431—1 438.
- [3] Monteith L L. Climate and the efficiency of crop production in Britain [J]. *Phil Trns Roy Soc London*, 1997, **B281**: 277—294.
- [4] Hemann M, Keeling C D. A three-dimensional model of atmospheric CO₂ transport based on observed winds: II. Model description and simulated tracer experiments [A]. Peterson D H. Climate Variability in the Pacific and the Western American [C]. San Francisco: American Geophysical Union Press, 1989. 237—235.
- [5] Prince S D, Goward S N. Global primary production: a remote sensing approach [J]. *J Biogeog*, 1995, **22**: 815—835.
- [6] Hunt E R. Relationship between woody biomass and PAR conversion efficiency for estimating net primary production from NDVI [J]. *Int J Remote Sensing*, 1994, **15**: 1 725—1 730.
- [7] DeFries R, Townshend J. NDVI-DERIVED land cover classification at global scales [J]. *Int J Remote Sensing*, 1994, **15**: 3 567—3 586.
- [8] Potter C S. Terrestrial biomass and the effects of deforestation on the global carbon cycle: results from a model of primary production using satellite observations [J]. *BioScience*, 1999, **49** (10): 769—778.
- [9] Sellers P J, Los S O, Tucker C J. A global 1°×1° NDVI data set for climate studies. II. the generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from the NDVI [J]. *Int J Remote Sensing*, 1994, **15**: 3 519—3 545.
- [10] 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—278.
- [11] 侯光良, 游松才. 用筑后模型估算我国植物气候生产力 [J]. *自然资源学报*, 1990, **5** (1): 60—65.
- [12] 张宪洲. 我国自然植被净第一性生产力的估算与分析 [J]. *自然资源*, 1993, (1): 15—21.
- [13] 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): 1 422—1 426.
- [14] 张新时, 杨奠安. 植被的 PE (可能蒸散) 指标与植被气候分类 (三) 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*, 1993, **17** (2): 97—109.
- [15] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一生产力模型初探 [J]. *植物生态学报*, 1995, **19** (3): 193—200.
- [16] 肖乾广, 陈维英. 用 NOAA 气象卫星的 AVHRR 遥感资料估算中国的第一性生产力 [J]. *植物学报*, 1996, **38** (1): 35—39.
- [17] 倪建. 中国亚热带常绿阔叶林净第一生产力的估算 [J]. *生态学杂志*, 1996, **15** (6): 1—8.
- [18] 宋永昌. 中国东部森林植被带划分之我见 [J]. *植物学报*, 1999, **41** (5): 54—552.

Progress in the response of net primary productivity of terrestrial vegetations to global climate changes

CHEN Bo

(Life Science College, Hangzhou Teachers College, Hangzhou 310012, Zhejiang, China)

Abstract: Annual net primary productivity (NPP) of terrestrial vegetation is the net amount of carbon-fixed by plants through photosynthesis in one year. As a sensitive index to environmental factors, NPP of terrestrial vegetation and its relationships with environmental factors have been paid much attention during the past years due to rising CO₂ concentration and global climate change. Studies on NPP are reviewed in this paper, especially on the principals, methods, characteristics and results of GLO-PEM and NASA-CASA, which have been to be two major models. Finally, The NPP research in China are also introduced in the paper.

Key words: plants; net primary production; mathematics models; global climate change