

基于个体的中国森林生态系统碳收支模型
FORCCHN 及模型验证

延晓冬¹ 赵俊芳^{1,2}

(1. 中国科学院大气物理研究所,东亚区域气候-环境重点实验室,北京 100029; 2. 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘要 :以植物生理学、森林生态学和土壤环境学的基本原理为基础,建立了基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN。模型通过两种步长运行,在步长为天时的基本过程包括林分(个体)的光合、呼吸、分配和凋落,以及凋落物和土壤有机物的呼吸和转移;在步长为年时的基本过程包括林分的同化物分配、树高和胸径增长、大凋落物生成。通过对模型样地水平上与全国总量上 NPP、NEP 的验证,说明该模型在考虑幼龄林基础上,能较好的模拟出中国森林生态系统的碳收支,因此可以用来模拟中国森林生态系统碳收支的过去动态和未来发展趋势。

关键词 :个体,森林生态系统,碳收支,模型,验证

文章编号 :1000-0933 (2007) 07-2684-11 中图分类号 :Q143 文献标识码 :A

Establishing and validation individual-based carbon budget model FORCCHN of forest ecosystems in China

YAN Xiao-Dong¹, ZHAO Jun-Fang^{1,2}

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (7) 2684 ~ 2694.

Abstract : According to the principles of plant physiology, forest ecology and soil environment, the individual-based carbon budget model of forest ecosystems in China was established. The model process included two timesteps: the primary daily process comprises photosynthesis, plant respiration, allocation and litter production, soil respiration and transfer; the primary annual process consists of allocation between stands, increasing of tree height and breast diameter and producing large amount of litter fall. Through validating NPP and NEP at the plot level and at the country level, it was demonstrated that the model can well simulate carbon budget of forest ecosystem of China, so it can also simulate dynamics of carbon budget of forest ecosystems in the past and in the future.

Key Words : individual; forest ecosystems; carbon budget; model; validation

全球变化和人类活动影响下的生物圈碳循环是近年来国际地球生物圈计划 (IGBP)、世界气候研究计划

基金项目 :国家重点基础研究发展规划资助项目 (973 计划) (2002CB412500);中国科学院知识创新工程重大资助项目 (KZCX1-SW-01-11)

收稿日期 :2006-12-15; 修订日期 :2007-05-28

作者简介 :延晓冬 (1962 ~) 男,陕西绥德人,博士,研究员,主要从事森林陆面过程模式碳氮循环模型研究. E-mail :yxd@tea.ac.cn

Foundation item :The project was financially supported by the Major State Basic Research Development Program of China (973program) (No. 2004CB412500) and Innovative Item of Knowledge Chinese Academy of Sciences (No. KZCX1-SW-01-11)

Received date 2006-12-15; **Accepted date** 2007-05-28

Biography :YAN Xiao-Dong, Ph. D., Professor, mainly engaged in forest, land surface model, carbon and nitrogen cycle. E-mail :yxd@tea.ac.cn

(WCRP)和全球环境变化国际人文因素计划 (IHDP)中的全球变化和陆地生态系统 (GTCE)、土地利用和土地覆盖变化 (LUCC)、全球大气化学 (IGAC)、亚马逊大尺度大气生物圈实验 (LBA)、以及国际通量观测网络 (FLUXNET)和生物圈-大气稳定性同位素网络 (BASIN)等国际科学计划共同关注的重大科学问题^[1~3]。在全球的碳循环中,目前令科学家困惑的问题依然是对全球陆地生态系统碳通量/储量和碳汇/源估计以及区域分布的研究结果还存在着极大的不确定性^[4~6]。

由于人们无法在地区和全球尺度上直接和全面地测量生态系统的碳收支。因此,模型方法已经成为陆地碳循环研究中不可代替的手段。目前国内外陆地碳循环模型主要包括生物地理模型 (如 BIOME^[7], MAPSS^[8])和生物地球化学模型 (如 CENTURY^[9],BIOME-BGC^[10],TEM^[11]等),这两类模型的缺点是割裂了生态系统结构和功能之间的相互关系和相互影响,只是模拟生态系统从一种平衡态到另一种平衡态的碳贮量及其通量变化^[12]。而全球变化背景下的陆地生态系统碳循环,将随着气候和陆地植被之间相互作用、生态系统的结构、组成和功能均发生相应的改变,并对陆地碳循环过程带来巨大影响。因此,建立全球植被动态模型,即综合反映陆地生态系统结构和功能与全球变化之间的关系模型已成为 GCTE 计划的主要目标^[13]。目前在森林循环研究中,已有类似的模型应用,如 FORSKA 林窗模型^[14]、NEWCOP 模型^[15],但由于确定模型输入变量和参数的复杂性,这些模型在大尺度上的应用仍存在着一些困难。本文基于这一目的,在国家尺度上建立了一个基于个体的合理解释幼龄林碳收支动态机理模型,旨在为研究全球变化背景下,合理估算结构、组成处于变化之中的中国森林生态系统碳吸收能力及未来动态提供科学依据。

1 模型和数据源

1.1 模型描述

中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN (FOReSt Ecosystem Carbon Budget Model For CHiNa)是一个基于个体生长过程的的斑块模型。该模型由每日气象条件驱动,逐个计算一定面积斑块上每株树木的碳收支,通过求和及耦合土壤碳循环模型所计算的土壤碳收支得到生态系统在单位面积上的碳收支,其考虑的主要过程和计算流程图见图 1。

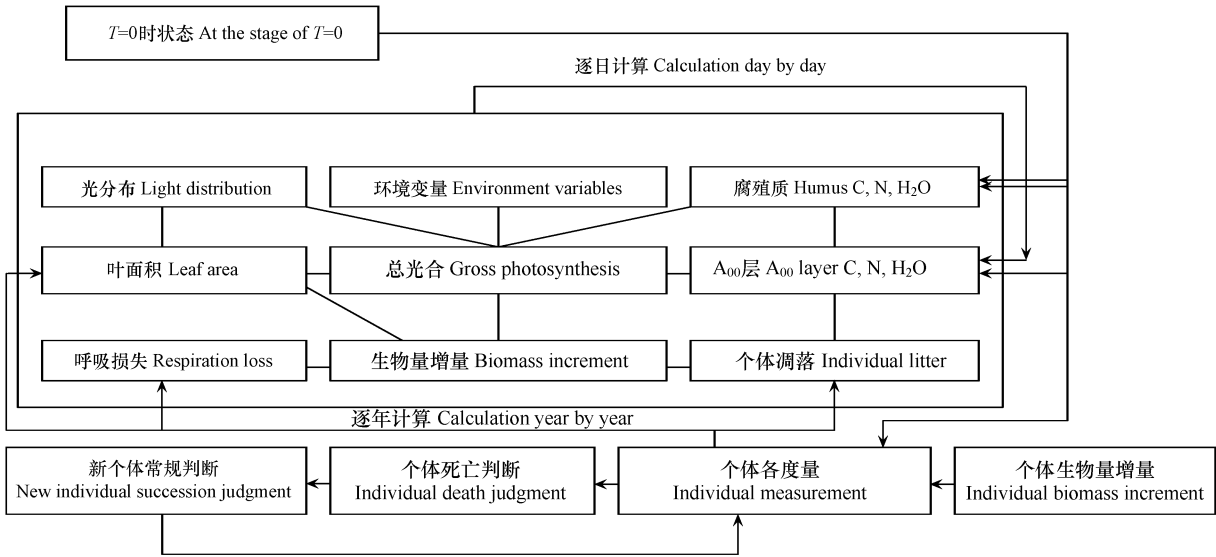


图 1 模型 FORCCHN 考虑的主要过程和计算流程图

Fig. 1 The primary process and flow chart of FORCCHN model

该模型具有 4 个主要特点:第一,碳、水和氮在土壤-植物-大气系统中的循环过程有机地结合;第二,森林生态系统碳收支的外部强迫和驱动因素基本上基于个体生理生态过程机制,而不是由当前气候和生态系统的统计关系预先确定;第三,生态系统的碳收支是由林分个体生长来确定的,从而使中国森林生态系统碳收支得

到较可靠的估算;第四,模型可以同时用于预测气候变化所引起的森林生态系统碳收支的动态变化和未来平衡态,与 Hybrid 模型^[16,17]的显著不同在于,不仅能模拟个体,而且每个个体是逐年生长的(胸径和树高逐年变化)。模型的分辨率为 10km×10km,假设每个网格内森林植被一样,且土壤与成熟林、幼林无关。

1.2 模型的主要控制方程

个体树木碳收支及对应的林分碳收支方程分别为：

$$\frac{dx_i}{dt} = GPP_i - t_{resp} \times (RM_i + RG_i) - L_i \frac{d(\sum x_i)}{dt} = \sum GPP_i - t_{resp} \times (\sum RM_i + \sum RG_i) - \sum L_i$$

式中 x_i 、 GPP_i 、 RM_i 、 RG_i 、 L_i 分别表示个体碳增量、总光合、维持呼吸、生长呼吸、凋落量,量纲都是 (kgC·d⁻¹) ; t_{resp} 表示气温对植物呼吸的影响系数,无单位,在 0~1 之间变化。

1.2.1 日过程

模式通过两种步长运行,假定第 i 个个体属于第 j 类植物功能类型,在步长为天时的基本过程有：

光合作用 树木个体及单位面积林分的总光合^[18,19]可以表示为

$$GPP_i = \min (GPPM_i \times f_c \times f_{dry} \times f_T \times an \times aNS)$$
$$GPPM_i = \frac{2 \times Am_j \times DL}{KL_j} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{1 + KL_j \times Sl_j \times PAR_i / Am_j}}{1 + \sqrt{1 + KL_j \times Sl_j \times PAR_i \times \exp (-KL_j \times LAI_i) / Am_j}} \right]$$

式中 GPP_i 为树木个体日总光合 (kgC·d⁻¹) ; $GPPM_i$ 为林分日总光合 (kgC·d⁻¹) ; DL 为当天可照时数 (h) ; PAR_i 为该树木个体正午冠顶光合有效辐射 (W·m⁻²) ; Am_j 为第 j 类树木单叶最大可能光合 (kgC·m⁻²·h⁻¹) ; KL_j 为第 j 类树木的消光系数,无量纲 ; Sl_j 为第 j 类树木的光强-光合作用曲线初始斜率 [kgC·m⁻²·h⁻¹/W·m⁻²] ; LAI_i 为该树木在其占据面积上的叶面积指数 ; f_c 、 f_{dry} 、 f_T 、 $an \times aNS$ 分别为二氧化碳浓度、土壤水分条件、气温、壤有效氮对总光合的影响,其中 aNS 为土壤有效氮量 (kgN·m⁻²) ,本研究取 $an = 150$,作为表示同化作用碳氮比的一个参数。

呼吸作用 植物的自养呼吸可以分为维持呼吸和生长呼吸^[20]。维持呼吸、生长呼吸^[21]可由下式计算：

$$RM_{ik}(T_d, T_n, DL) = \frac{1}{24} [DLe^{0.069315(T_d-15)} - 0.009(T_d-15)^2 + (24 - DL)e^{0.069315(T_n-15)} - 0.009(T_n-15)^2] r_k C_{ik}$$
$$RG_i = r_g \times (GPP - RM_i)$$

式中 RM_{ik} 为日维持呼吸量 (kgC·d⁻¹) ; T_d 为白天平均气温 (℃) ; T_n 为夜间平均气温 (℃) ; DL 为日长 (h) ; r_k 为在气温为 15℃ 时叶、枝、干、根和细根的相对呼吸速率 (1/d) ; C_{ik} 为相应碳库的库量 (kgC) ,其中当 k 代表叶和细根时对应的 C_{ik} 为叶量和细根量,当代表枝、干、根时对应的 C_{ik} 为边材量 (kgC) ; RG_i 为日生长呼吸量 (kgC·d⁻¹) ; r_g 为生长呼吸系数,取 0.25 ; GPP 为日总光合 (kgC·d⁻¹) 。

凋落过程 每叶、细根凋落通量^[21]可以表示为：

$$L_{ik} = l_k C_{ik}$$

式中 L_{ik} 为生长季或非生长季每叶、细根凋落通量 (kgC·d⁻¹) ; C_{ik} 为相应碳库的库量 (kgC·d⁻¹) ; l_k 为对应的相对凋落速率 (1/d) 。

光合产物分配过程 根据 Arrora 和 Boer^[22]与 Salter 等^[23]光合产物分配机制,本模型假定在天为步长的树木生长过程中,净光合产物只供给叶、细根生长和凋落,其他储存在假定的缓冲碳库中。所以,叶、细根储存量增长 ΔC_{ik} 及该树当年最大可能叶量或细根量 C_{ik}^{max} ^[24]为：

$$\Delta C_{ik} = \begin{cases} \min (C_{ikmax} - C_{ik}, d_k \cdot BF_i) & BF_i > 0 \\ 0 & BF_i = 0 \end{cases}$$
$$C_{ikmax} = e_k D_{bi}^2$$

式中 BF_i 为第 i 株树木当天的缓冲碳库大小 (kgC) ; d_k 为分配比例系数, $d_{细根} + d_{叶} = 1$; e_k 为比例系数

($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) ; D_{bi} 为第 i 株树木枝下高处直径 (m)。

土壤有机物呼吸和转移过程 本模型假定土壤过程是逐日的 ,并采用改进后的适合于森林土壤的土壤碳收支模型 CENTURY^[25]。CENTURY 模型起初用于草地碳循环和生产力^[26-27]的模拟和预测 ,现在已广泛用于森林生态系统 ,通过模拟 C、N、P 的生物地球化学循环过程 ,以及一些主要驱动因子 ,如温度、降雨等的作用 ,对生态系统的生产力进行预测^[28]。

其中改进后 CENTURY 模型^[25]的主要过程和公式描述如下 叶和细根可以同时向代谢凋落库和结构凋落库凋落 ,其比例为 :

$$f_m=0.85-0.018N_r/L_r$$
$$f_s=1-f_m$$

式中 f_m 、 f_s 分别表示叶和细根凋落库中代谢凋落物、结构凋落物所占的比例 ; N_r 、 L_r 分别表示叶和细根凋落库中氮、木质素的含量。

各个碳库的分解速率、呼吸排放量和输送给其他碳库的碳量分别可以表示为 :

$$D_k=s_rg_Tg_w e^{-bL_s}C_{sk}$$
$$R_k=p_kD_k$$
$$SD_{kj}=p_j(D_k-R_k)$$
$$\sum p_j=1$$
$$g_T(T)=e^{\frac{3.36(T-40)}{T+31.79}}$$
$$g_w(W)=1-\left(\frac{ws}{ff \cdot FC}-1\right)^2$$

式中 D_k 为第 k 个碳库日分解量 ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) ; s_r 为参考相对分解速率 (d^{-1}) ; g_T 、 g_w 分别为温度、水分对分解过程的影响系数 ; b 为常数 ,取值 5.0 ; L_s 为结构凋落库中木质素含量 ,对于非结构和代谢碳库取为零 ; C_{sk} 为土壤碳库和土壤木质素库之差 ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2}$) ; R_k 为呼吸排放量 ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) ; p_k 为呼吸所占份额 ; SD_{kj} 为输送给其他碳库的碳量 ($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) ; p_j 为向第 j 个碳库输送的比例 ; ws 为土壤或凋落物中的含水量 (cm) ; ff 为常数 ,取值为 0.6 ; FC 为田间持水量 (cm) ; T 为土壤温度 ($^{\circ}\text{C}$)。

1.2.2 年过程

模式在步长为年时的基本过程包括林分的同化物分配、树高和胸径增长、大凋落物生成。每年树木中的碳通过非个体死亡途径循环 ,如自然凋落物 (包括花、果实)的产生 ,其中存在两个阈值 ,如果年终个体缓冲碳库量大于第 1 个阈值 ,则花的凋落物量达到最大可能量 ,如大于第 2 个阈值 ,则花和果实的凋落物量都达到最大可能量。这种模拟方法的公式如下 :

$$L_{i\text{ year}}=\begin{cases}BF_i & BF_i \leq lm_1 \\ lm_1+\gamma(BF_i-lm_1) & lm_1 < BF_i \leq lm_2 \\ Lm_2 & BF_i > lm_2\end{cases}$$
$$DC_i=BF_i-L_{i\text{ year}}$$

式中 $L_{i\text{ year}}$ 为当年第 i 株树木的凋落物量 (kgC) ; BF_i 为年终个体缓冲碳库量 (kgC) ; lm_1 、 lm_2 分别为第 1、第 2 阈值 (kgC) ; DC_i 为当年第 i 株树木的最终碳积累增量量 (kgC) ,在本模型中 ,这个量的 95% 要转化成树木结构器官的变化 ,包括树高、基径、枝下高和枝下高处的直径的增长。同时这个量也决定着树木边材量的大小 ,进而决定了未来一年的最大可能叶面积指数、树木木质呼吸等。

树木木质部分增量、基径增量和高度增量的计算方程式如下 :

$$DC_i=f_{\text{wood}}-f'_{\text{wood}}$$
$$\Delta h=cd\times\Delta d$$

$$\begin{aligned}f_{\text{wood}} &= f_{\text{stem}} + f_{\text{twig}} + f_{\text{root}} \\f_{\text{stem}} &= 2.019595243 \times astem \times d^2 \times h \\f_{\text{twig}} &= 1.121997357 \times astem \times d^2 \times h \times (1 - m^3)^2 \times (1 - m) \\f_{\text{root}} &= 1.5 \times 2.019595243 \times astem \times d^2 \times h \times [(1 - n^3)^2 \times (1 + n) - 1]\end{aligned}$$

式中 DC_i 为第 i 株树木木质部分增量 (kgC) ; $f_{\text{wood}} \setminus f_{\text{stem}} \setminus f_{\text{twig}} \setminus f_{\text{root}}$ 分别为木 (当年) 、杆、枝、根生物量 (kgC) ; f'_{wood} 表示头一年木的生物量 ; d 为树木基径 (m) ; Δd 为树木基径增量 (m) ; h 为树木高度 (m) ; Δh 为树木高度增量 (m) ; b 为枝高 (m) ; hr 为根深 (m) ; $astem$ 为木质部分容重 (kgC · m⁻³) ; cp 为由该树木冠顶的光照梯度决定的的一个常数 ; $m = b/h$; $n = hr/h_0$ 。

1.3 模型参数与主要初始、边值条件

1.3.1 模型的参数

模型参数包括土壤参数和树木类型依赖的参数。其中树木分为 9 个基本类型 ,并考虑到了树木类型分布的广泛性和其一般的特征 ,如耐遮荫 (顶级)和阳性 (先锋)树种等。土壤参数分为土壤有机质和凋落物库分解参数与土壤物理参数 ,后者是树种依赖于地理位置的。土壤碳循环的基本参数和 9 种树木基本类型对应的生理生态参数分别见表 1、表 2。

表 1 土壤分解参数表*
Table 1 Parameters of soil decomposition*

变量 Variable (d ⁻¹)	碳库 Carbon pool	数值 Value
S1	地上代谢凋落物库 Above-ground metabolic litter pool	0.021
S2	地上结构凋落物库 Above-ground structural litter pool	0.1
S3	地下代谢凋落物库 Below-ground metabolic litter pool	0.027
S4	地下结构凋落物库 Below-ground structural litter pool	0.13
S5	细小木质凋落物库 Fine woody litter pool	0.01
S6	粗大木质凋落物库 Coarse woody litter pool	0.002
S7	地下粗大凋落物库 Below-ground coarse litter pool	0.002
S8	活跃土壤有机质库 Active soil organic matter pool	0.042
S9	缓释土壤有机质库 Slow soil organic matter pool	0.001
S10	惰性土壤有机质库 Resistant soil organic matter pool	3.5 × 10 ⁻⁵

* 根据文献^[25]推算得到 The parameters were from the literature^[25]

1.3.2 模型主要边值和初值条件

本研究主要初始和边值条件数据依托于 10km × 10km 分辨率网格数据库 ,该数据库包括的主要边值条件有在每个网格上 1980 ~ 2002 年逐日的最高、最低、平均气温 (°C) 、降水量 (cm) 、空气相对湿度 (%) 、风速 (m · s⁻¹) 、总辐射 (W · m⁻²) ;主要初值条件有在每个网格上的土壤田间持水量 (cm) 、容重 (kgC · m⁻³) 、碳库量 (kgC · m⁻²) 、氮库量 (kgN · m⁻²) 、土壤含水量 (cm) 、沙粒含量 (%) 、粉粒含量 (%) 、黏粒含量 (%) 、1980 年最大叶面积指数 (m² · m⁻²) 、最小叶面积指数 (m² · m⁻²) 、本网格内森林覆盖率 (%) 。

本模型每次模拟试验都以 1980 年 1 月 1 日为开始时间 ,逐个模拟每个网格上森林生态系统的碳收支。需要说明的是 ,在模式验证时 ,净初级生产力 NPP 的模拟值是 1993 ~ 2002 年 10a 的平均值 ,与通量观测所比较的 NEP 数值是包含通量观测站点的网格上 2002 年的逐月 NEP 模拟值。

1.4 用来验证模型的数据

以罗天祥^① 690 个样地森林及 193 个文献中记载的森林生产力实测资料^[16]来验证模型的有效性。在计

① 罗天祥 ,1996. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 北京 :中国科学院自然资源综合考察委员会

接表 2

算中根据上述两套资料中各个站点的位置,选取包含该站点的网格点上的 1993 ~ 2002 年模拟值的平均值作为模型计算的森林净初级生产力。

2 模型的验证

目前区域模型研究方面的难点之一是对模型的全面验证^[30]。目前对于大尺度碳循环的验证方法可以分为 4 类:(1)与短期资料相比较;(2)时空代替;(3)历史资料重建;(4)与其他相关模型的比较。本文采取和他人实测资料、模拟结果相比较的方法,在一定程度上说明模型的有效性。

2.1 样地水平上 NPP 模拟与观测结果的比较

图 2 给出罗天祥 690 个站点和其它文献中 193 个站点资料平均值与模拟值对比情况。分析该图可知,本模型可以很好地模拟出基于森林清查的 690 个样地和文献中记载的 193 个样地的森林净初级生产力,模拟的 NPP 与样地观测资料的相关系数达到 0.77 以上,具有显著相关,同时令截距为零时,观测与模拟的回归直线的斜率为 1.009,因此在数值上模拟结果也与观测相当接近,模拟在观测低值区和中值区的大多数样地与观测值相当接近,但在部分高值区偏低,其主要原因可能是 ①观测高值主要发生在华南,许多可能是人工林,本模拟模型按照天然林或天然次生林来模拟,导致模拟值偏低;②观测值偏高。由图 2.4 可见,有些观测值高达 $1.8\text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,远高于 Lieth^[31]给出的平均上界 $1.5\text{ kgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

2.2 基于全国总量的 NPP、NEP 模拟与观测结果的的对比

已经有许多研究者对中国森林生态系统的 NPP 和 NEP 进行了研究。对中国 NPP 进行研究的包括朴世龙等^[22]采用基于遥感的 CASA 模型的模拟研究;欧阳志云等^[32]的资料分析估算;刘明亮^①的模拟模型研究;曹明奎^[33]采用 CEVSA 模式的模拟估算;何勇等^[34]采用陆面模式 AVIM 的模拟研究;Pan 等^[35]采用 TEM 模式对中国植被 NPP 的模拟研究;孙睿和朱启疆^[36]采用遥感技术等对 NPP 的研究。对中国 NEP 进行研究的有:戴民汉^[37]的估算;曹明奎^[33]采用 CEVSA 模式的模拟估算;Streets 等^[38]采用资料分析推算 NEP;Gong 等^[39]采用遥感和资料分析反推计算;Fang 等^[40]采用林业统计资料的分析研究。总的研究结果表明,中国森林生态系统是大气二氧化碳的一个微小的汇,全国的 NPP 在 $0.7\sim1.58\text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,平均约为 $1.22\text{ Pg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

图 3 给出本模型模拟的中国森林 NPP 与上述各研究的对比图。从图中看出,基于遥感数据的估算一般偏低,基于资料分析或生态系统过程的模型的模拟结果较为适中,陆面过程模式 AVIM 和 TEM 模式因为对植被类型细节注意不够而估算偏高。图示说明本模型与欧阳志云等的资料分析结果较为接近,并处于所有这些研究的平均水平上。

图 4 给出本模型模拟的中国森林生态系统 NEP 与上述各研究的对比图。从图中可见,即使包括了所有植被,大多数研究所估算的中国森林生态系统 NEP 都偏小,本模型所得结果仅小于包括所有植被的戴民汉等的结果。考虑到中国森林 NPP 约为 $1.22\text{ PgC}\cdot\text{a}^{-1}$,可以看作是比较可靠的结论,而中国森林大多是次生幼林或新营造的人工林,NEP 应该比较大,值不应该像用方精云的材积法所得的那样低 ($0.04\text{ PgC}\cdot\text{a}^{-1}$),曹明奎的研究和宫鹏等的研究也偏低。本模型因为考虑到了幼林生长带来的 NEP 增长,所以 NEP 估算较高,约为 $0.21\text{ PgC}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

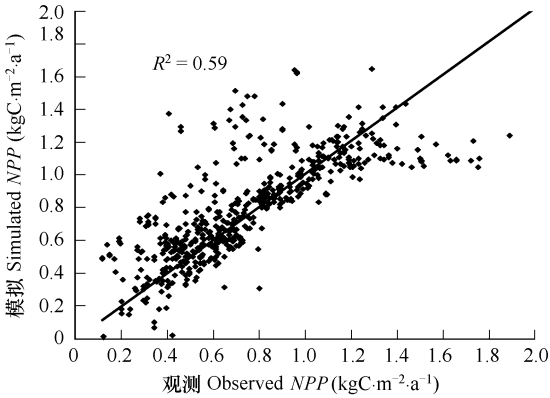


图 2 模拟的 NPP 和观测的 NPP 值的比较情况
Fig. 2 comparison the NPP of simulation with observation at the plot level

① 刘明亮 2001. 中国土地利用、土地覆盖变化与陆地生态系统植被碳库和生产力研究. 北京:中国科学院遥感应用研究所

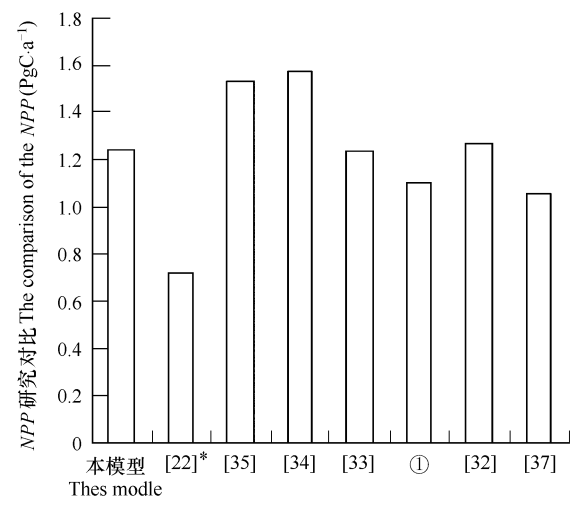


图3 中国森林 NPP 研究结果对比图

Fig. 3 Comparison the NPP of simulation with observation at the country level

* 为参考文献号 Number of references

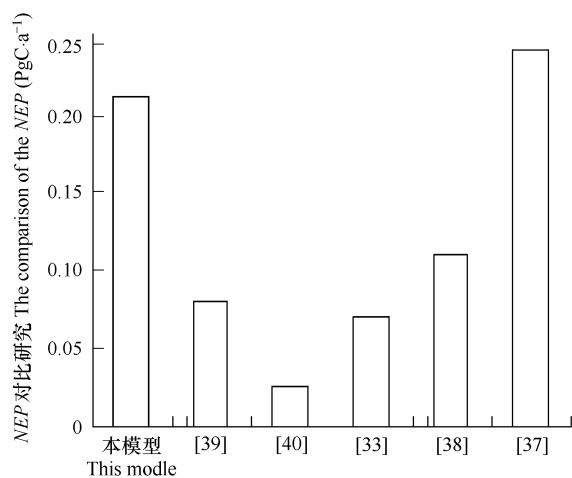


图4 中国森林生态系统 NEP 研究结果对比图

Fig. 4 Comparison the NEP of simulation with observation at the country level

2.3 基于全国总量的 NPP 空间差异比较

图 5 为 FORCCHN 模拟的 2000 年全国森林 NPP 空间分布状况。从 NPP 的地区分布来看 ,全国 NPP 总量主要集中分布在东北、华北、华中和华南等东部季风区 ,西北干旱区和青藏高原区的 NPP 总量仅占很小的一部分。

从经向来看 ,NPP 的分布趋势基本上是东南沿海最高 ,依次向西北内陆递减 ,其主要原因是我国西北地区植被覆盖稀少 ,气候干旱 ,而东部地区气候湿润 ,水热条件好 ,能更好地满足植被的生长。这与陶波用 CEVSA 模型模拟得到的 1981 ~ 2000 年中国植被 NPP 空间分布格局相类似 (图 6)^[41]。

3 结论与讨论

本文以植物生理学、森林生态学和土壤环境学的基本原理为基础 ,建立了基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN。该模型不仅能合理解释中国森林生态系统中幼龄林碳收支的动态机理 ,而且通过对模型的验证 ,模拟的 NPP 与样地观测资料的相关系数达到 0.77 ,模拟的全国总量 NPP 都处于其他研究者的平均水平之上 ,全国 NPP 空间分布情况也同以往研究结果类似 ,这说明该模型在考虑幼龄林基础上 ,能较好的模拟出中国森林生态系统的碳收支 ,因此可以用来模拟中国森林生态系统碳收支的过去动态和未来发展趋势。

通过对 FORCCHN 模型的初步模拟表明 ,该模型在中国东北与西北地区可以相当合理地模拟森林碳收支及其与林龄的关系。另外 ,模型在模拟过程中还存着以下不确定性 ,有待于进一步改进 :首先模型本身考虑的不够十分细致 ,并没有把所有的过程都考虑进去 ,如土壤水分模块就没有考虑林冠截流、地表径流、实际蒸发散 ;其次模型的参数和初始场也不完全和真实情况一样 ,最后用来验证模型的数据本身也存在很大的不确定性。

此外 ,该模型中气象要素 ,如辐射、降水、温度等是森林碳固定过程的最基本驱动力。因而 ,在以后的应用中如能和气候模型耦合有可能更客观地定量评价中国森林生态系统碳吸收能力及全球变化对中国森林生态系统碳吸收能力的影响。

接彩图 5 p

Reference :

[1] Steffen W ,Tyson P. Global change and the earth system :a planet under pressure. IGBP Science ,2001 ,(4):33.

[2] IPCC. Special Report of Emission Scenarior of the Intergovernment Panel on Climate Change. In :Nakicenovic N and Sward R eds. UK :Cambridge University Press ,2001. 570.

[3] Global Carbon Project. Science framework and implementation. Earth system science partnership (IGBP ,IHDP ,WCRP ,DIVERSTTAS) report No.1. Global carbon project report No.1 ,Camberra ,2003. 68.

[4] Tans P P ,Fung I ,Takahasi T. Observational constraints on the global atmospheric carbon budget. Science ,1990 ,247 :1431 — 1438.

[5] Ciaia P ,Tans P P. A large northern hemisphere terrestrial CO₂ sink indicated by the ¹³C/¹²C ratio of atmospheric CO₂. Science ,1995 ,269 :1098 — 1102.

[6] IPCC. Climate change 2001-the third assessment report of the IPCC 2002.

[7] Prentice I C. A simulation model for the transient effects of climate change on forest landscapes. Ecological Modelling ,1993 ,65 :51 — 70.

[8] Neilson R P ,King G A ,Koerper G. Toeards a rule-based biome model. Land Ecol ,1992 ,7 (1):27 ~43.

[9] Parton W J. Observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worlwide. Global Biogeochemical Cycles ,1993 ,7 (4):785 — 809.

[10] White M A ,Thornton P E ,Runing S W. A continental phenology model for monitoring vegetation response to interannual climatic variability. Global Biogeochemical Cycles ,1997 ,11 (2):217 — 234.

[11] Melillo J M ,McGuire A D. Global climate change and terrestrial net primary production. Nature ,1993 ,363 :234 — 240.

[12] Wang Y X ,Zhao S D. Modelings of terrestrial carbon cycling. Chinese Journal of Applied Ecology ,1998 ,9 (6):658 — 664.

[13] VEMAP Members. Vegetation/ecosystem modeling and analysis project :Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem response to climate change and CO₂doubling. Global Biogeochemical Cycles ,1995 (4):407 — 437.

[14] Prentice I C. Biome modelling and carbon cycles. In :NATO ASI Series eds. The Global Carbon Cycles. Heidelberg :Springer-Verlag ,1993. 115 :219 — 238.

[15] Yan X D ,Zhao S D ,Yu Z L. Modeling growth and succession of northeastern china forests and its applications in global change studies. Acta Phytoecologica Sinica ,2000 ,24 (1):1 — 8.

[16] Friend A D. The prediction and physiological significance of tree height. In :Solomom A M and Shugart H H eds. Vegetation Dynamic and Global Change. New York :Chapman and Hall ,1993. 101 — 115.

[17] Friend A D ,Stevens A K ,Knox R G ,Cannell M G R. A process-based ,terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v. 3.0). Ecological Modelling ,1997 ,95 :249 — 287.

[18] Oikawa T. Simulation of forest carbon dynamic based on dry matter production model 1. fundamental model structure of a tropical rainforest ecosystem. Botanical Magazine Toyko ,1985 ,98 :225 — 238.

[19] Yan X D ,Zhao S D. Simulation model of carbon storage dynamics in temperate broadleaved-coniferous mixed forest ecosystem. Chinese Journal of Ecology ,1995 ,14 (2):6 — 12.

[20] McCree K J. Equation for the rate of dark respiration of white clover as function of dry weight ,photosynthesis and temperature. Crop Sci. ,1974 ,14 :509 — 514.

[21] Ruimy A ,Dedieu G ,Saugier B. TURC :A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity. Global Biogeochemical Cycle ,1996 ,10 (2):269 — 285.

[22] Arrotta V K ,Boer G J. A parameterization of leaf phenology for the terrestrial ecosystem component of climate models. Global Change Biology ,2005 ,11 (1):39 — 59.

[23] Salter M G ,Franklin K A ,Whitelam G C. Gating of the rapid shade-avoidance response by the circadian clock in plants. Nature ,2003 ,426 :680 — 683.

[24] Shinozak K ,Yoda K ,Hozumi K ,Kira T. A quantitative analysis of plant form-the pipe model theory I . Basic analyses. Jpn J Ecol ,1964 ,14 :97 — 105.

[25] Kirschbaum M U F ,Paul K I. Modelling C and N dynamics in forest soils with a modified version of the CENTURY model. Soil Biology and Biochemistry ,2002 ,34 (3):341 — 354.

[26] Parton W J ,McKeown B ,Kirchner V ,Ojima D S. Century user mannul. Natural Resource Ecology Laboratory ,Colrado State University ,Fort Collins. 1992.

[27] Parton W T ,Scurlock J M O ,Ojima D S ,Gilmanov T G ,Scholes R J ,Schimel D C ,Kiechner T ,Menaut H C ,Seatedt T ,Garcia M E ,Kamnalrut

A , Kinyamario J L. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles* ,1993 ,7 :785—809.

[28] Huang Z L. Application of a CENTURY model to management effects in the productivity of forest in DingHuShan. *Acta Phytocologica Sinica* , 2000 ,24 (2) :175—179.

[29] Goto N , Sakoda A , Suzuki M. Modelling of soil carbon dynamics as a part of carbon cycle in terrestrial ecosystem. *Ecological Modelling* ,1994 ,74 (3-4) :183—204.

[30] Yu M , Gao Q , Xu H M , *et al.* Response of vegetation distribution and primary production of terrestrial ecosystem of China to climate change , *Quaternary Sciences* ,2001 ,21 (4) :281—293.

[31] Lieth H , Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere. New York : Springer-Verlag Press , 1975.

[32] Ouyang Z Y , Wang X K , Miao H. A primary study On Chinese terrestrial ecosystem services and their ecological-economic values. *Acta Ecologica Sinica* ,1999 ,19 (5) :607—613.

[33] Cao M K , Tao B , Li K R , *et al.* Change of carbon flux of terrestrial ecosystem in China from 1981 to 2000. *Acta Botanica Sinica* ,2003 ,45 (5) :552—560.

[34] He Y , Dong W J , Ji J J , *et al.* The Net Primary Productivity simulation of terrestrial ecosystems in China by AVIM. *Advance in Earth Sciences* , 2005 ,20 (3) :345—349.

[35] Pan Y D , Melillo J M , Kicklighter D W , Xiao X , McGuire A D. Modeling structural and functional responses of terrestrial ecosystems in China to changes in climate and atmospheric CO₂. *Acta Phytocologica Sinica* ,2001 ,25 (2) :175—189.

[36] Sun R , Zhu Q J. Studies on terrestrial Net Primary Productivity and seasonal change. *Journal of Remote Sensing* ,2001 ,5 (4) :300—305.

[37] Dai M H , Zhai W D , Lu Z M , *et al.* Regional studies of carbon cycles in China :progress and perspectives. *Advance in Earth Sciences* ,2004 ,19 (1) :120—130.

[38] Streets D G , Bond T C , Carmichael G R , Fernandes S D , Fu Q , He D , Klimont Z , Nelson S M , Tsai N Y , Wang M Q , Woo J H , Yarber K F. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000. *J. Geophys. Res.* ,2003 ,108 (Q1) :8809.

[39] Gong P , Xu M , Jin C , Jing M C , Ye Q , Greg B , Ji Y L , Shao Q W. A preliminary study on the carbon dynamics of China's terrestrial ecosystems in the past 20 years. *Earth Science Frontiers* ,2002 ,9 (1) :55—61.

[40] Fang J Y , Chen A P , Peng C H. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science* ,2001 ,292 (5525) :2320—2322.

[41] Tao B , Li K R , Shao X M , *et al.* Temporal and spatial pattern of net primary production of terrestrial ecosystem in China. *Acta Geographica Sinica* ,2003 ,58 (3) :372—380.

参考文献：

[12] 汪业勤 ,赵世洞. 陆地碳循环研究中的模型方法. *应用生态学报* ,1998 ,9 (6) :658 ~ 664.

[15] 延晓冬 ,赵士洞 ,于振良. 中国东北森林生长演替模拟模型及其在全球变化研究中的应用. *植物生态学报* ,2000 ,24 (1) :1 ~ 8.

[19] 延晓冬 ,赵士洞. 温带针阔混交林林分碳贮量动态的模拟模型. I. 乔木层的碳贮量动态. *生态学杂志* ,1995 ,14 (2) :6 ~ 12.

[28] 黄忠良. 运用 Century 模型模拟管理对鼎湖山森林生产力的影响. *植物生态学报* ,2000 ,24 (2) :175 ~ 179.

[30] 喻梅 ,高琼 ,许红梅 ,等. 中国陆地生态系统植被结构和净第一性生产力对未来气候变化响应. *第四纪研究* ,2001 ,21 (4) :281 ~ 293.

[32] 欧阳志云 ,王效科 ,苗鸿. 中国陆地生态系统服务功能及其生态经济价值的初步研究. *生态学报* ,1999 ,19 (5) :607 ~ 613.

[33] 曹明奎 ,陶波 ,李克让 ,等. 1981 ~ 2000 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化. *植物学报* ,2003 ,45 (5) :552 ~ 560.

[34] 何勇 ,董文杰 ,季劲钧 ,等. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. *地球科学进展* ,2005 ,20 (3) :345 ~ 349.

[36] 孙睿 ,朱启疆. 陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. *遥感学报* ,2001 ,5 (4) :300 ~ 305.

[37] 戴民汉 ,翟惟东 ,鲁中明 ,等. 中国区域碳循环研究进展与展望. *地球科学进展* ,2004 ,19 (1) :120 ~ 130.

[41] 陶波 ,李克让 ,邵学梅 ,等. 中国陆地净初级生产力时空特征模拟. *地理学报* ,2003 ,58 (3) :372 ~ 380.

表2 模型中9种树木基本类型的生理生态参数*

Table 2 Parameters of physiology and ecology in the FORCCHN model*									
生理生态参数 Physiology and ecology parameters	雨林树 Rain forest tree		常绿阔叶树 Evergreen broad-leaved tree		落叶阔叶树 Deciduous broad-leaved tree		常绿针叶树 Evergreen conifer tree		落叶针叶树 Deciduous conifer tree
	耐荫 Shade tolerance	阳性 Sun species	耐荫 Shade tolerance	阳性 Sun species	耐荫 Shade tolerance	阳性 Sun species	耐荫 Shade tolerance	阳性 Sun species	
L_o	5.5	11.0	5.5	11.0	5.5	11.0	5.5	11.0	11.0
Am	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.5×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}	5.0×10^{-4}
Sl	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}	1.3×10^{-5}
Kl	4.5×10^{-1}	4.5×10^{-1}	4.5×10^{-1}	4.5×10^{-1}	4.0×10^{-1}	4.0×10^{-1}	4.0×10^{-1}	4.0×10^{-1}	3.5×10^{-1}
r_L	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	6.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	3.5×10^{-3}	3.5×10^{-3}	1.2×10^{-2}
r_W	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}
r_R	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	1.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-3}
lm_2	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0.50	0.50	0.50
CN_L	40.0	40.0	45.0	45.0	40.0	40.0	60.0	60.0	50.0
CN_W	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0	200.0
CN_R	40.0	40.0	45.0	45.0	40.0	40.0	60.0	60.0	50.0
$Hmax$	40.0	60.0	50.0	40.0	40.0	40.0	60.0	60.0	50.0
$Dmax$	2.0	3.0	2.0	1.5	2.0	1.5	2.0	2.0	2.0
$Amax$	200.0	100.0	400.0	200.0	400.0	200.0	1000.0	300.0	500.0
e_L	600.0	600.0	600.0	600.0	200.0	700.0	700.0	700.0	300.0
e_R	20.0	20.0	20.0	20.0	30.0	30.0	15.0	15.0	28.0
$cLAI_L$	15.0	15.0	15.0	15.0	45.0	20.0	18.0	18.0	40.0
$astem$	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0	350.0
$Tmin$	5.0	5.0	3.0	1.0	-1.0	-5.5	-5.5	-2.5	-5.5
$Topt$	27.0	29.0	27.0	25.0	23.0	20.0	18.0	23.0	16.0
$Tmax$	50.0	50.0	50.0	50.0	45.0	45.0	40.0	40.0	35.0
Dry	1.0	0.8	0.9	0.8	0.8	0.6	0.9	0.7	0.5
l_L	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	1.1×10^{-4}	1.1×10^{-4}	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}	1.1×10^{-4}
Lr/Nr	40.0	40.0	40.0	40.0	30.0	50.0	80.0	80.0	50.0
l_R	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	5.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	4.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}	8.0×10^{-5}

* 根据文献^[29]推算得到 The parameters were calculated according to the literature^[29]; L_o 为光补偿点 ($W \cdot m^{-2}$) Photosynthesis compensate point ; Am 为最大光合 ($kgC \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) Maximal photosynthesis ; Sl 为光强-光合作用曲线的初始斜率 [$(kg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}) / (W \cdot m^{-2})$] The initial slope of light intension and photosynthesis ; Kl 为树冠叶消光系数 Extinction coefficient ; r_L 为叶相对呼吸速率 (d^{-1}) The relative breath rate of leaf ; r_W 为木相对呼吸速率 (d^{-1}) The relative breath rate of wood ; r_R 为根相对呼吸速率 (d^{-1}) The relative breath rate of root ; lm_2 为果实凋落阈值 The threshold value of fruit ; CN_L 为叶碳氮比 The C:N ratio of leaf ; CN_W 为木碳氮比 The C:N ratio of wood ; CN_R 为根碳氮比 The C:N ratio of root ; $Hmax$ 为树木最大高度 (m) Maximal tree height ; $Dmax$ 为树木最大基径 (m) Maximal tree diameter ; $Amax$ 为树木最大可能树龄 (a) Maximal tree age ; e_L 为叶量系数 ($kgC \cdot m^{-2}$) The coefficient of leaf quantity ; e_R 为根量系数 ($kgC \cdot m^{-2}$) The coefficient of root weight ; $cLAI_L$ 为叶面积系数 ($m^2 \cdot kgC^{-1}$) The coefficient of leaf area ; $astem$ 为木容重 ($kgC \cdot m^{-3}$) The bulk density of wood ; $Tmin$ 为光合最低温度 ($^{\circ}C$) The lowest temperature of photosynthesis ; $Topt$ 为光合最适温度 ($^{\circ}C$) The optimum temperature of photosynthesis ; $Tmax$ 为光合最高温度 ($^{\circ}C$) The highest temperature of photosynthesis ; Dry 为耐干旱能力 The capability of enduring drought ; l_L 叶凋落相对速率 (d^{-1}) The relative litter rate of leaf ; Lr/Nr 为木质素与氮含量之比 The ration of lignin and nitrogen content ; l_R 根凋落相对速率 (d^{-1}) The relative litter rate of root

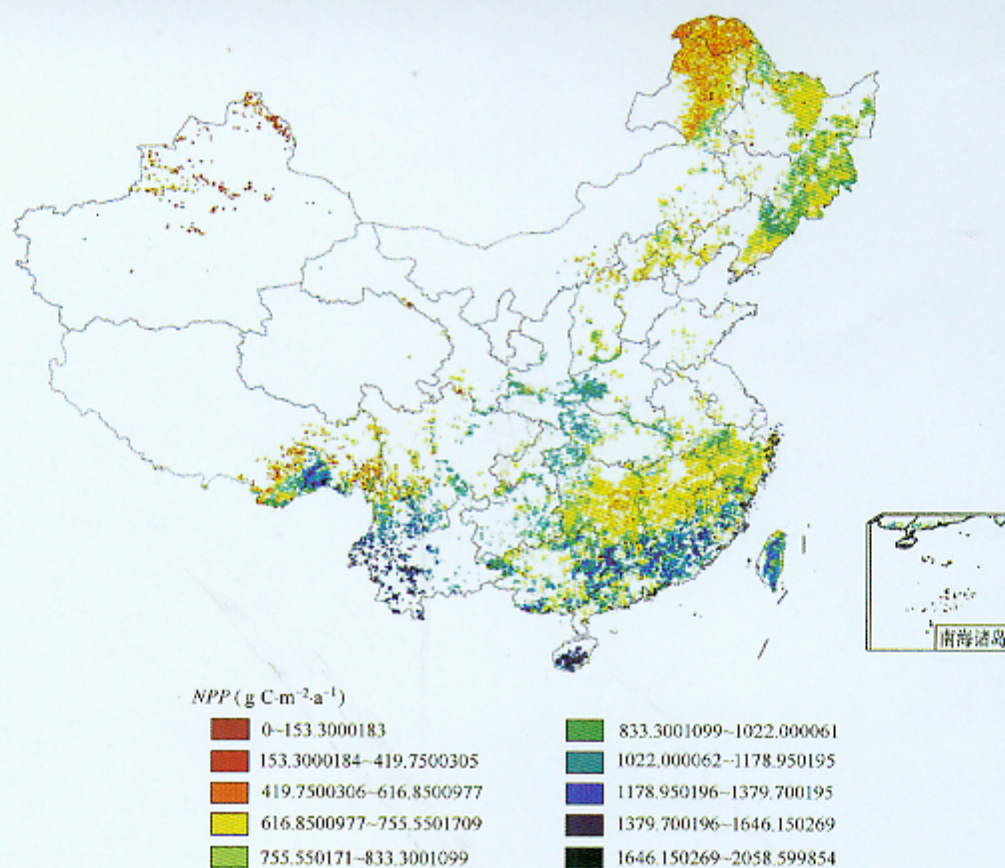


图5 FORCCHN 模拟的 2000 年全国森林 NPP 空间分布
Fig. 5 The distribution of NPP from FORCCHN during 2000

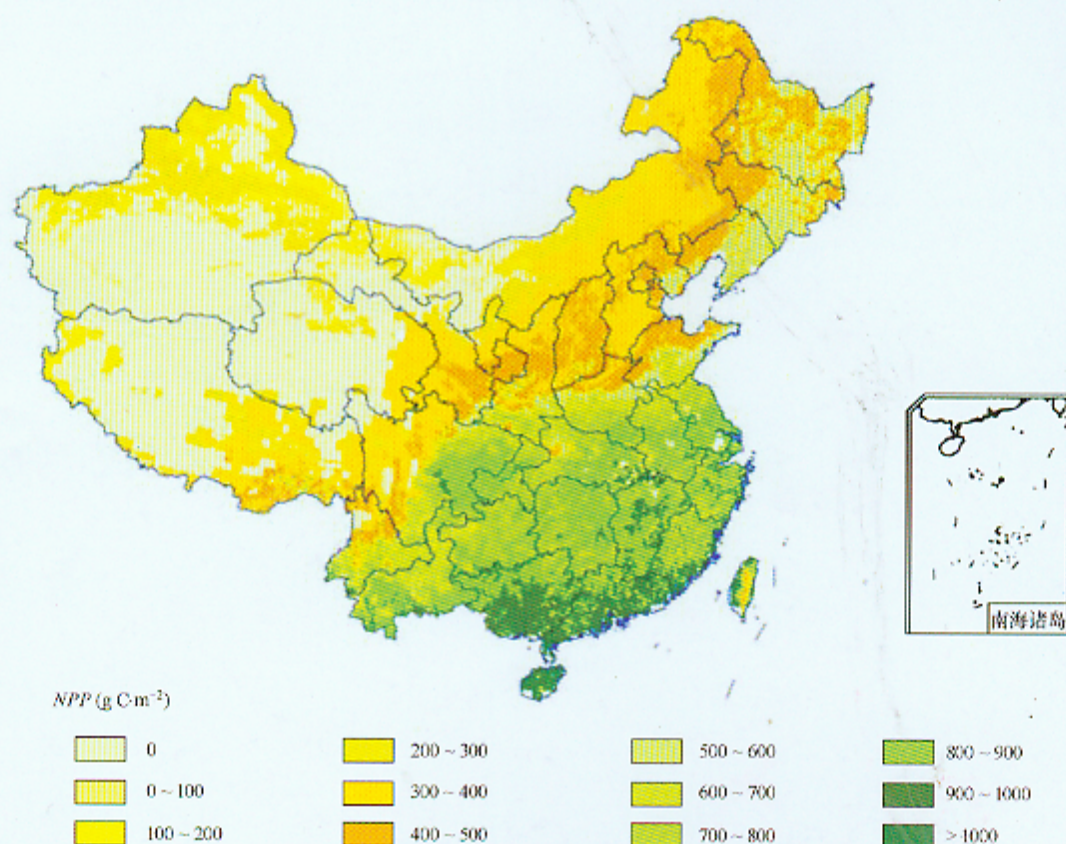


图6 CEVSA 模拟得到的 1981-2000 年 NPP 平均分布^[4]
Fig. 6 The averaged NPP from CEVSA during 1981-2000