

我国气候对植被分布和净初级 生产力影响的数值模拟

梁妙玲^{1,2} 谢正辉¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100039

摘 要 基于 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 经纬网格分辨率的一个全球植被动态模式, 利用全国 676 个雨量站点 1961~2000 年日资料在 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格上插值得到的降水和气温资料作为模式气候强迫, 模拟研究了中国区域近 40 年来的植被动态变化, 估算了当前中国区域陆地植被净初级生产力, 并分析气候与植被净初级生产力的相关性。结果表明: 模拟的植被分布时空格局与实际观测的对应关系良好, 模拟与观测的叶面积指数总体上比较一致; 植被初级生产力空间分布及总量 (约为 $4.64 \times 10^{15} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1} (\text{C})$) 的模拟比较理想。对模拟结果分析显示降水是影响净初级生产力的主要气候因子, 而在干旱、半干旱地区温度与植被净初级生产力存在显著负相关关系。研究表明该模式能够比较合理地模拟气候对植被年际动态和生产力变化的影响, 对于进一步深入研究气候与植被相互作用是有意义的。

关键词 植被动态 植被分布 叶面积指数 净初级生产力

文章编号 1006-9585 (2006) 05-0582-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Simulations of Climate Effects on Vegetation Distribution and Net Primary Production in China

LIANG Miao-Ling^{1,2} and XIE Zheng-Hui¹

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*

Abstract The vegetation distribution and net primary production (NPP) in China are simulated with a dynamic vegetation model Lund-Potsdam-Jena DGVM based on $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ grid cells. Results show that simulated spatial and temporal distribution patterns of vegetation are consistent with observations, and simulated leaf area index is consistent with remote sensing retrieval data. The annual NPP and its distribution in China are also well simulated. Furthermore, we found that precipitation is the primary climate factor that affects NPP. However, in arid and semi-arid areas, temperature is remarkable correlated with NPP. It is indicated that the LPJ DGVM can successfully simulate the effects of climate on inter-annual vegetation dynamics and NPP, which is useful for further study on interactions between vegetation and climate.

Key words vegetation dynamics, vegetation distribution, leaf area index, net primary production

收稿日期 2005-04-25 收到, 2006-07-02 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 90411007、40275023 及中国科学院创新团队国际合作伙伴计划“气候系统模式研发及应用研究”项目

作者简介 梁妙玲, 女, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事陆面过程植被动态模拟研究工作。E-mail: mliang@mail.iap.ac.cn

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

1 引言

植物地理学指出，气候是决定陆地植被类型分布格局及其结构功能特性的最主要因素^[1]。主要表现有：植物空间分布主要取决于植物生态生理条件，如最低温度、热量和干旱指数等；植被结构（如冠层高度、冠层面积、叶面积指数、茎直径、根系深度等）取决于植物所需资源的供应，包括光照、水和养分等^[2]。工业革命以来，人类活动显著改变了陆地生态系统和气候系统，尤其是进入 20 世纪中叶后，人类大量使用矿物燃料，过度砍伐森林，草原过度放牧，导致大气中 CO₂ 等温室气体浓度剧增，加强了温室效应，使得全球气候产生了有史以来从未有过的急剧变化，主要表现包括全球变暖、降水格局变化、云量分布变化及海平面上升等^[3]。气候变化必然导致植被分布和结构的变化，国际科学界越来越关注以全球变暖为突出标志的全球气候变化可能对生态系统产生的严重影响。

早在 20 世纪 30 年代 Köppen^[4] 等就开始了气候对植被的影响的定性观测研究，之后又相继出现了用统计分析、非机理模型以及机理模型研究气候和植被关系的工作。当前国际上用于研究陆地生态系统对全球变化响应的模型主要有两类：全球植被模型和全球植被动态模型。全球植被模型包括生物地理模型和生物地球化学模型，如 TEM^[5] 和 CENTURY^[6] 模型等，主要思想是将陆地分为若干主要的生物群落区或植被类型，根据一系列气候指标，以及大气环流模型提供的未来气候变化来预测植被分布的改变。这类模型没有考虑植被变化的滞后效应，仅仅模拟植被覆盖对气候变化的平衡响应，因此不能模拟植被动态变化。而全球动态植被模型如 IBIS^[7]、LPJ^[8] 和 VECODE^[9] 等模型结合了生物地理模型和生物地球化学模型，从而能具体考虑到全球变化和各种干扰对陆地生态系统产生的不同影响以及这些影响在不同时间尺度上的差异，因而既可以预测植被对气候变化的瞬间响应，也能够较合理地预测陆地植被在未来 10 年甚至 100 年时间尺度上的可能变化。尤其是 LPJ 植被动态模型能够合理地把网格平均植被个体与植被个体这两个概念联系起

来，模式计算单位具体到植被个体，从而可以比较真实地反映植被动态^[8]。本研究应用该植被动态模式模拟研究我国近 40 年来植被动态变化和气候对植被的影响，估算当前我国自然植被净初级生产力，并分析不同气候因子对植被净初级生产力（net primary production, NPP）的影响。对我国植被净初级生产力分布研究，国内也已经有了利用生物地球化学模型模拟的结果，例如，吕建华和季劲钧^[10] 用 AVIM^[11] 模式模拟植被叶面积指数和生产力分布，李克让等^[12] 利用 CEVSA^[13] 模式模拟我国植被及土壤碳储量，但本文在模拟这些变量的同时，还模拟了植被分布尤其是荒漠化的时空变化。

2 植被动态模型

LPJ 全球植被动态模式以气候、土壤条件和大气 CO₂ 浓度为输入变量，从植被动力学出发，以光合生物化学反应、冠层能量平衡以及光合作用产物在植物内部的分配规则和土壤水平衡为基础，考虑生态系统的自然死亡规律和自然干扰因素的影响，模拟生态系统的光合作用、呼吸作用、叶片形成和枝叶脱落、资源竞争、组织周转、种群建立及死亡、土壤微生物分解等过程，计算植物—土壤—大气之间碳和养分循环以及 CO₂ 和水的交换通量、光合作用强度和初级生产力以及植被和土壤之间的碳储量。

模式以植物对环境的生态生理适应性和资源竞争能力为基础模拟植被分布和组成。植被分 10 种植被功能型（plant type function, PFT），其中包括 8 种树木植被（根据植被叶子物候、形状和地理纬度分布分类）和 2 种草本植被功能型（根据光合途径分类）。植物功能型的建立和死亡决定于一组基于 20 年移动气候极值的生态生理限制条件，并考虑不同植物种类由于生态生理适应性、资源利用能力（如植物高度和根系深度）和光合效率的差异所产生的竞争优势或劣势。LPJ 植被动态模式对植被组成结构变化、再分布和演替、动态变化、PFT 种群间的竞争及土壤生物化学等都做了详尽描述。

为了便于在网格中实现由植被个体到种群的尺度变换，LPJ 模式的最小计算单位是 PFT 平均

个体。对每种 PFT 都给定一套固定动力学和生态学参数, 这样 PFT 种群就由一组描述平均个体状态的参数及其种群密度来确定。对树木植被, 平均个体由其冠层面积、4 个碳库 (叶子质量 C_l 、边材质量 C_s 、心材质量 C_h 和细根质量 C_r) 确定, 草本植被仅考虑叶子和细根的质量, 并且设定其种群密度为 l 。

2.1 平均个体特征值

平均个体叶面积指数 L_i 由下式给出^[8]:

$$L_i = \frac{C_l S}{C_A}, \quad (1)$$

其中 C_A 是冠层面积, C_l 是叶子质量, S 是比叶面积 (单位: $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (C)), 根据文献 [14] 可以表示为

$$S = 2.0 \times 10^{-4} \frac{\exp 6.15}{(12a_1)^{0.46}}, \quad (2)$$

这里 a_1 是树叶生命期参数。考虑到尺度变换的实现问题, 模式引入变量投影覆盖率 (F)^[15]。平均个体覆盖率 F_i 与叶面积指数关系如下^[16]:

$$F_i = 1 - \exp(-0.5L_i), \quad (3)$$

任意网格的总植物覆盖比率 F_g 表示如下^[8]:

$$F_g = C_A P F_i, \quad (4)$$

式中 P 是物种密度。

2.2 光合作用

LPI 模式中, 光合作用取决于吸收的光合有效辐射、温度、日长及冠层传导率。其中吸收的光合有效辐射表示为^[8]

$$A_P = P_A F_P, \quad (5)$$

式中 P_A 是光合有效辐射, F_P 是植物的吸收系数, 可表示为^[8]

$$F_P = F_g d_P, \quad (6)$$

其中 d_P 是平均物候状况, 取值范围 0~1, 表示植物当前的叶子覆盖率与年最大覆盖率的比例。光合作用率表示为^[17~19]

$$A_g = \min(J_E, J_C), \quad (7)$$

其中, J_E (单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (C)) 是光电子捕获效率限制, J_C (单位: $\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (C)) 是 Rubisco 氧化酶限制。具体请参见文献 [8]。

2.3 呼吸作用

维持呼吸是根据温度、各组织的 C:N、组织生物量和物候计算的。任意 PFT 的年维持呼吸量表示为

$$R_m = \left[\sum_{i=1}^{365} (R_l + R_s + R_r) \right] P, \quad (8)$$

而成长呼吸表示为^[20]

$$R_g = 0.25(G - R_m), \quad (9)$$

这里 G 为总初级生产力, 净初级生产力 N_P (单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)) 表示如下:

$$N_P = 0.75(G - R_m). \quad (10)$$

2.4 增长生物量的分配

个体成长考虑到光合作用产物在各组织间的周转、繁殖等过程, 减掉用于繁殖后剩下 NPP 就是生物量增长。描述生物量生长还要对净增长生物量在各个组织的分配。分配过程按照以下 4 条规则, 考虑净生物量增长在叶子、茎、细根 3 个碳库之间进行分配^[8,21~24]:

$$L = k_{1,s} S, \quad (12)$$

$$C_l = R_{lmax} \alpha C_r, \quad (13)$$

$$C_A = k_1 D^{k_{tp}}, \quad (14)$$

$$H = k_2 D^{k_3}, \quad (15)$$

这里 L 、 S 分别是叶面积和比叶面积; $k_{1,s}$ 是常数; ω 表示水压力度, 取值 0~1; R_{lmax} 是叶子和细根的最大比值, H 和 D 分别是树高和树茎直径; k_1 、 k_2 、 k_3 是常数, k_{tp} 。植物结构 (主要考虑冠层面积 C_A 和 F) 要在生物量增长 ΔC 的分配、并考虑种群的建立和死亡过程以及自然干扰因素后做更新。限于篇幅问题, 对土壤水平衡、种群建立及死亡过程、自然干扰因素不做详尽介绍。

3 数据来源

全国共分为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格 4196 个, 模型在每个网格上独立运行。模型输入变量包括气温、降水和云量, 大气 CO_2 浓度以及土壤质地类型。虽然模型积分时间步长为日, 但考虑到节约计算量, 对某些量如光合有效辐射量、潜在蒸发、土壤温度及冠层传导等的计算是按月时间步长计算的, 因此模型气候输入为月平均状况, 这样模式中需要做月平均值线性插值为日值的处理。

3.1 降水和气温

降水及气温资料采用了全国共 676 个站点包含 1961~2000 年的 40 年的日资料。站点资料需要插值到 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 分辨率网格上, 插值方法采用的是以距离反比为权重的 3 点插值法, 即选取距网格中心最近的 3 个站点, 以距离反比为权重进行内插;

如果网格内的站点数超过 3 个,则对网格内的所有站点进行以距离反比为权重的内插计算。

3.2 月平均云量

由于没有长系列的日辐射资料,在模式中太阳辐射是根据纬度和儒略日计算,而净太阳辐射计算公式^[25,26] $R_s = (c + dn_i)(1 - \beta)Q_0 \cos z$, 这里 n_i 是日照时数百分数,这样就要求云量作为模式输入。云量我们用的是 University of East Anglia 的 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格 1961~1995 年的资料^[27], 1996~2000 年的云量则是由前 30 年平均得到。

3.3 大气 CO₂ 浓度和土壤质地资料

1961~2000 年大气 CO₂ 浓度资料用的是美国夏威夷 Mauna Loa 观测所提供的月平均资料^[28]。而土壤质地类型用的是 Haxeltine 等人^[26] 根据国际粮农组织的土壤分类^[29] 建立的全球 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 网格土壤质地(分 8 种)资料。

4 模型应用

在模型模拟中,首先在假设没有植被(即全为裸地)覆盖的前提下,用 1961~1990 年 30 年的气象数据驱动模式进行 1 000 年的 spin-up 模拟以达到生态系统平衡态(主要是考虑碳库和植被覆盖两方面),然后用 1961~2000 年的每日气象观测数据和月大气 CO₂ 浓度进行动态模拟,研究中国区域近 40 年来植被的时空动态变化(主要考虑主要植被时空分布(包括地表植被和荒漠化分布)和叶面积指数 LAI (leaf area index) 的年际变化及季节变化);模拟我国现阶段自然植被净初级生产力(NPP),并分析其与气候的关系。

4.1 植被动态

模式以植物对环境的生态生理适应性和资源利用能力(如植物高度和根系深度)和光合效率的差异所产生的竞争优势或劣势为基础,模拟植被组成结构(如冠层高度、冠层面积、叶面积指数、茎直径、根系深度等)变化、再分布和演替动态变化。本研究主要从植被分布的 20 年变化和叶面积指数的 10 年变化来分析中国近 40 年气候对植被动态的影响,并且分析沙漠面积变化与气候变化的关系。

4.1.1 植被分布的时空变化

图 1 是模式模拟的 2000 年我国主要自然植被

类型(即网格中覆盖率最大的植被功能型)的分布。由该图可看出:我国植被带呈东北—西南走向,并且与东南季风递变方向一致,从东南向西北递变依次出现:森林、草原、荒漠和裸露荒漠。其中八大植被区域的植被概况如下:1)大兴安岭寒温带夏绿针叶林区域;2)东北、华北、青藏高原寒温带夏绿阔叶、常绿针叶混交林区域;3)华北东部沿岸、华中北部的温带夏绿阔叶林区域;4)华南、西南、华中南部的温带常绿阔叶林区域;5)华中东部温带常绿针叶林区域;6)西北、内蒙、东北温带草原区域;7)西北裸露荒漠(即网格内各类植被功能型的 F_g 总和小于 10%)以及西藏西北部的高寒荒漠区域;8)海南热带常绿阔叶林、热带阔叶雨林区域。模拟的植被区域与《中国植被》^[30] 中的中国植被区域基本一致,主要区别在于模拟华南、西南地区主要植被类型是温带常绿阔叶林区域而不是热带雨林区域,造成偏差原因是对模拟结果只分析网格植被覆盖率最大的植被类型,而对网格中其他植被类型没有加以分析;另外青藏高原地区的森林植被含量较大而文献[30]中的仅为草原、荒漠区域,这点可能模拟结果更为客观,因为中国科学院植物研究所在公布的植物分布规律中指出“青藏高原上的植被,也不是像从前有些人所想象的“寒原一块”,其植被分布有明显的地带性分异,大致是东部和南部高原边缘为森林地带,向西北依次为高寒草甸、高寒草原和高寒荒漠”。本研究结果与此论点非常吻合。

分析模拟的植被分布隔 20 年变化图(图 2)可发现:青藏高原西北、内蒙古、东北、华北森林区域减小,而草原面积增加,且呈东南方向扩张的趋势,20 世纪 90 年代以来尤其显著;西北荒漠面积年际变化也很明显(图 3),前 25 年表现为向东扩张的趋势,并且一度扩至 119°E ,而后又为新建立草原替代,荒漠带回退;天山山脉以北的植被在 40 年期间内也反复出现为草原替代而后重新建立的变化;西北华中、华南、西南地区主要植被分布基本无变化。

4.1.2 荒漠化分析

近年来,沙漠化问题已成为全球关注的重大环境问题之一,而我国是世界沙漠化最严重国家之一。沙漠化的概念在我国仍存在分歧,沙漠土

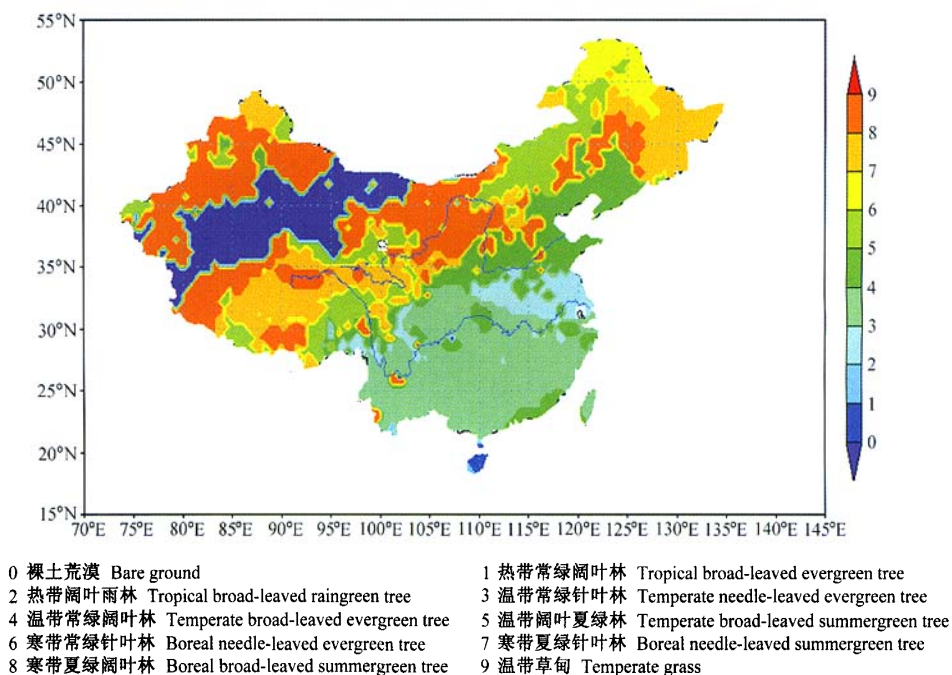


图1 2000年主要植被功能型分布

Fig. 1 Simulated dominant plant functional type in 2000

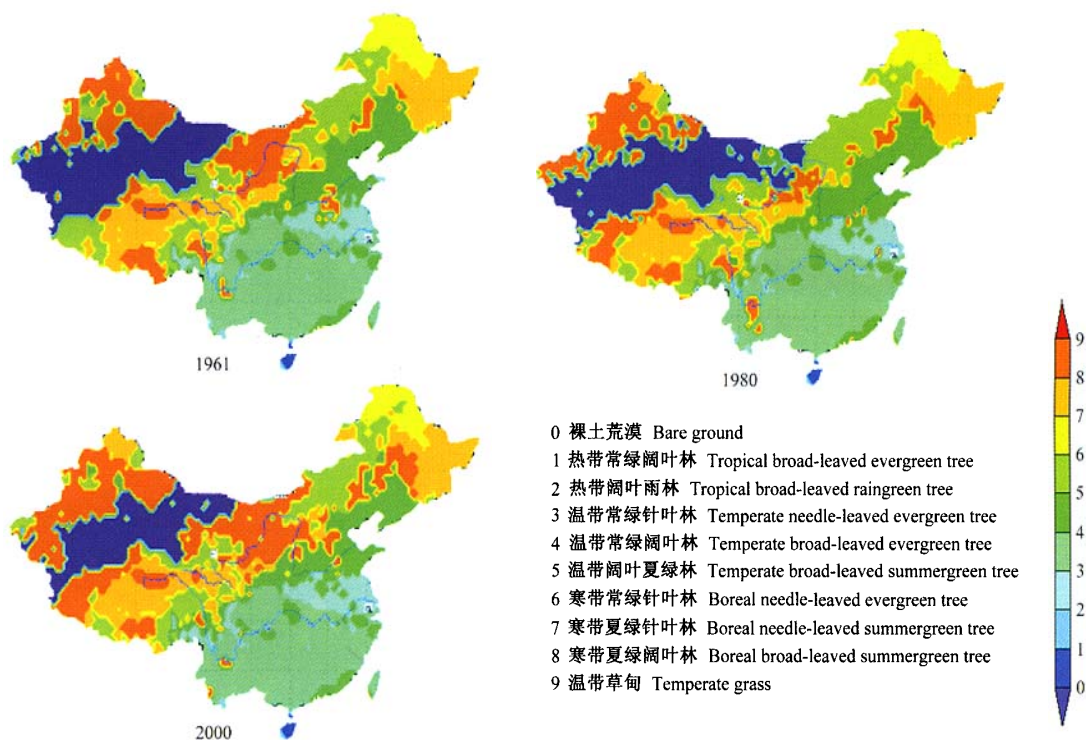


图2 我国主要植被1961~2000的20年变化(图标同图1)

Fig. 2 Vegetation variability in China during 1981—2000 (same code as Fig. 1)

地面积的数字也存在很大出入。为了研究我国西部地区地表覆盖质量的退化程度，本研究模拟了我国地表沙漠和荒漠化面积（这里定义的荒漠面积为网格植被覆盖率 F_g 总和低于 10% 的区域面积）。计算的我国过去 40 年平均沙漠面积约为 $1.42 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。这与国内一些相关研究结果比较吻合，张强等^[31]统计的我国沙漠面积总数在 $1.33 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右，徐兴奎等^[32]通过分析计算指出我国沙漠面积在 $1.2 \times 10^6 \text{ km}^2$ 左右动态变化。图 3 给出了本研究 and 徐兴奎等^[32] 人的遥感分析方法计算出的 1982~1999 年沙漠面积年际变化，由图可见，两种方法计算的年际变化趋势很一致，在 1982~1999 年期间变化有几个明显的波动，1986 年，沙漠面积达到最大值，而最小值出现在 1994

年。

影响沙漠面积的因子主要有两个：气候变化和人类活动^[33]。其中气候变化的影响主要考虑降水量和温度的年际变化导致地表沙漠面积年际波动。Tucker 等^[34]在用 NDVI 研究撒哈拉沙漠的研究中指出沙漠面积年际变化的 83% 是由降水引起，只有 17% 由其他因子引起。在我国，李晓兵等^[35]也指出荒漠草原的变化主要受降水影响，对降水的变化表现出滞后反应。考虑到沙漠陆表主要出现在干旱半干旱区，本研究对于干旱和半干旱地区沙漠面积和前年年降水量做了相关性分析，由图 4 可见，两者呈负相关关系，系数为 -0.78，说明降水是导致我国沙漠面积年际变化的主要因子。

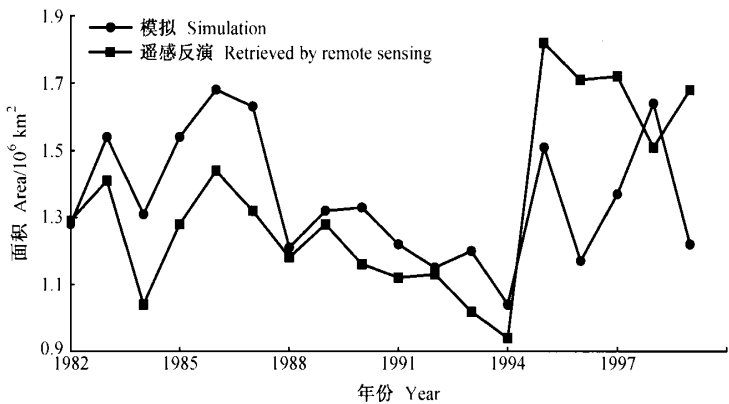


图 3 模拟和遥感反演^[17]的沙漠总面积年际变化比较
Fig. 3 Comparison of simulated and retrieved by remote sensing^[17] desert areas from 1982 to 1999

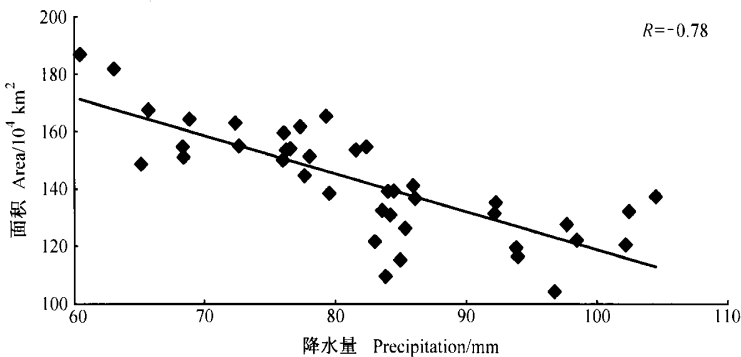


图 4 1981~2000 年干旱半干旱区平均年降水量（前一年降水量）与沙漠面积年际变化相关分析
Fig. 4 Correlation analysis between annual average precipitation and desert areas in arid and semi-arid zone from 1981 to 2000

4.1.3 叶面积指数

叶面积指数是指单位面积土地上所有的叶面积，是陆地—生物过程非常重要的物理量，它与反照率、粗糙度、气孔传导等陆面参数密切相关，

影响植被与大气间的能量、动量、CO₂ 和水分的交换通量，是耦合气候模式与生态模式的关键变量之一。

由模拟的叶面积指数时间变化(图5d,2000

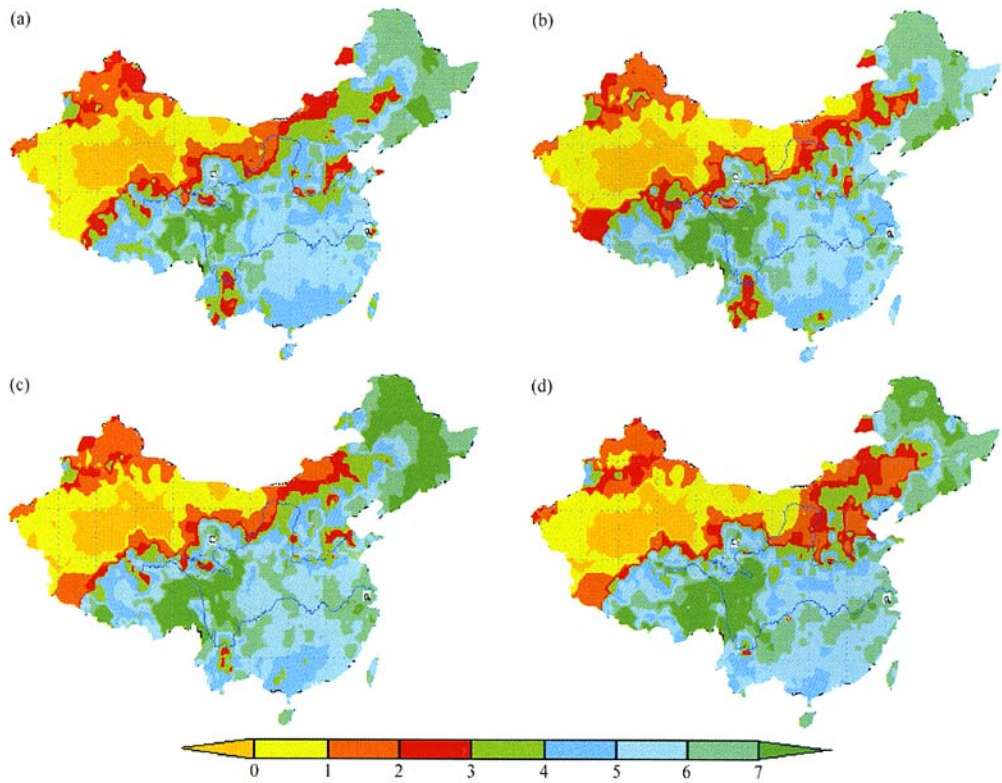


图5 模拟的我国 LAI 的时间变化: (a) 1970 年; (b) 1980 年; (c) 1990 年; (d) 2000 年
Fig. 5 Simulated LAI in China; (a) 1970; (b) 1980; (c) 1990; (d) 2000

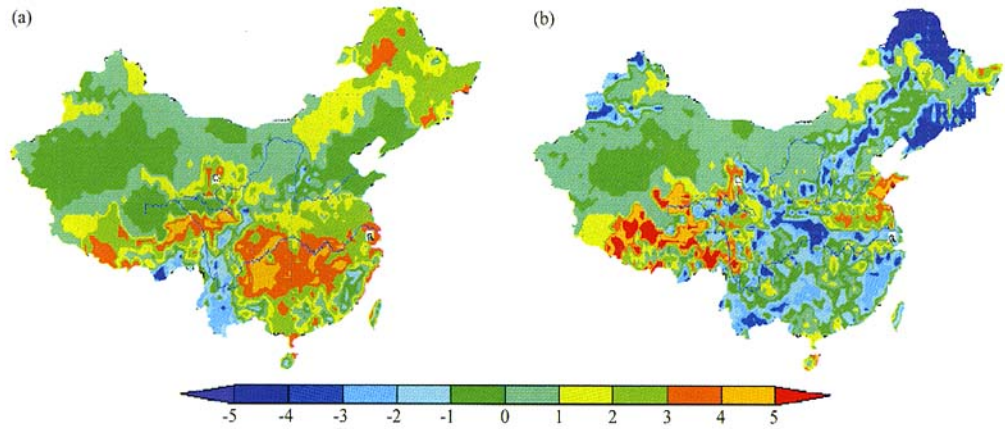


图6 2000 年季节叶面积指数观测值和模拟值的比较 (模拟-AVHRR^[37]): (a) 冬季 (1 月份); (b) 夏季 (7 月份)
Fig. 6 Difference of LAI between simulation and AVHRR^[37] (simulation - AVHRR): (a) Winter; (b) for Summer

年模拟情况) 可发现, 我国的叶面积指数是东高西低, 整个东部地区在 4 以上, 其中又以青藏高原东南部、西南和东北大兴安岭地区最高, 叶面积指数可高达 7 以上, 西北荒漠地区在 1 以下。叶面积指数分布形势与我国年干燥度分布^[36]形势很一致。东北山地、秦岭—淮河以南、青藏高原东南部及其以东地区, 干燥度 < 1.0 , 为湿润区, 区内叶面积指数均在 5 以上; 年干燥度 $1.0 \sim 1.49$ 的东北平原、华北平原、渭河平原等半湿润区, 叶面积指数 $2 \sim 4$; 半干旱区包括内蒙古高原、黄土高原、天山山地, 年干燥度 $1.5 \sim 4$, 叶面积指数 $1 \sim 3$; 西北部塔里木盆地、准葛尔盆地、柴达木盆地等年干燥度 ≥ 4 的干旱区, 叶面积指数 < 1 。模拟不理想之处在于青藏高原半干旱地区的模拟结果偏高。

对比分析模拟结果与观测资料 (是 Myneni 等^[37]对 AVHRR 资料反演得到) (见图 6) 可发现: 7 月模拟较好, 与观测结果比较吻合, 差值较大中心有两个, 分别在东北北部的偏低模拟和青藏高原部分地区的过高模拟; 相对而言 1 月模拟结果误差较大, 主要表现在高原西南部、华南、东北北部偏高, 以及西双版纳地区偏低。

4.2 植被净初级生产力

植被净初级生产力 (NPP, 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)) 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, 它一方面反映了植物群落在自然条件下的生产能力, 另一方面也反映了陆地生态系统在陆气间的碳循环中固定大气 CO_2 的能力。因此, IGBP 的全球变化与陆地生态系统 (GCTE) 项目将 NPP 的研究确定为核

究内容之一^[38]。为了了解近年来我国植被在全球碳循环中的作用, 本研究模拟计算了我国植被净初级生产力的现状及时空变化, 并探讨分析影响净初级生产力的主要气候因素。

研究表明, 我国陆地植被的 NPP 呈东高西低的趋势, 最大中心依次出现在西双版纳和西藏山南地区。现阶段我国 NPP 分布范围在 $0 \sim 1\ 510\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C), 全国平均为 $493\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。近 40 年来我国植被年净初级生产力变化如图 7。由图可见, 模拟期间, 我国陆地植被年总 NPP 在 $4.23 \sim 5.11\ \text{Pg}$ (C) 之间波动, 且波动中呈增加趋势, 40 年的平均值为 $4.64 \times 10^{15}\ \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。由于测定对象和方法缺乏统一性以及缺乏观测资料的验证, 众多 NPP 估算方法的结果差异比较大, 如陈利军等^[39]利用遥感和地理信息系统 (GIS) 技术估算的 1990 年我国 NPP 总量为 $6.134 \times 10^{15}\ \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C), NPP 最高值为 $1\ 812.9\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C), 平均值为 $642\ \text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (C); Tao 等^[40]利用 CEVSA 模型估算的我国 1981~1998 年间 NPP 总量在 $2.86 \times 10^{15} \sim 3.37 \times 10^{15}\ \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C) 间波动; 而 Fang 等^[41]基于地理信息系统和卫星遥感技术, 利用植被、气候和土壤等地面空间数据, 应用 CASA^[42]半机理模型估算的 1982~1999 年的平均值为 $1.44 \times 10^{15}\ \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C), 同时朴世龙等^[43]同样是用 CASA 模型估算的 1982~1999 年的 NPP 平均值却为 $1.8 \times 10^{15}\ \text{g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C)。

影响陆地植被 NPP 的主要气候因子有降水和气温^[44]。研究发现我国植被年净初级生产力与年平均降水量显著相关, 而与年平均温度之间的相关关系不显著, 相关系数分别为 0.67 和 0.19。此

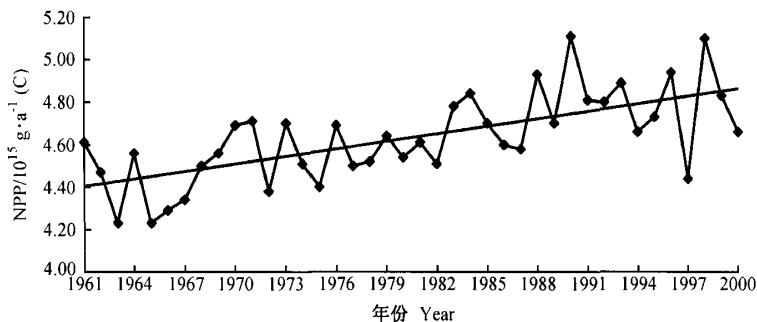


图 7 模拟的 1961~2000 年间我国植被年净初级生产力的变化

Fig. 7 Simulated yearly NPP in China from 1961 to 2000

外,不同地区降水和温度对 NPP 的影响又各不相同。表 1 给出了干旱半干旱区与湿润区降水和气候与 NPP 之间的相关系数。由表 1 可见,降水是影响我国现阶段陆地植被 NPP 的主要气候要素,而且这种影响在干旱半干旱区更是显著,相关系数高达 0.92;而温度仅在干旱半干旱区对 NPP 有显著影响,而在湿润区影响不大。

表 1 不同区域气候因子与 NPP 相关系数

Table 1 Correlation coefficients between climate factors and NPP in various regions

分析区域 Analytic region	NPP—年平均 降水量 NPP—annual precipitation	NPP—年平均 温度 NPP—annual average tempera- ture
全国区域 Total country	0.67	0.19
干旱半干旱区 Arid and semiarid region	0.92	-0.61
湿润区 Humid region	0.42	0.25

5 结论

本研究应用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬网格分辨率的全球植被动态模式 LPJ, 利用全国 676 个雨量站点 1961~2000 年日资料在 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格上插值得到的日气温和日降水作为模式气候强迫, 模拟研究了中国区域近 40 年来的植被分布和叶面积指数的时空变化, 估算了当前中国区域植被净初级生产力, 并分析其主要影响气候因素。主要结论如下:

(1) 模型模拟的我国主要植被分布和 LAI 的时空变化比较合理, 植被分布与我国气候生物规划区域分布一致; 年际 LAI 的分布与我国干燥度分布形势一致; 模拟的月 LAI 与观测资料也比较接近;

(2) 模拟的我国沙漠面积 40 年平均约为 $142 \times 10^4 \text{ km}^2$, 沙漠面积与前年年降水量成负相关关系, 系数为 -0.78; (3) 模拟期间我国总 NPP 的平均值为 $4.63 \times 10^{15} \text{ g} \cdot \text{a}^{-1}$ (C), 现阶段我国植被 NPP 的主要影响气候因子是降水, 尤其是干旱半干旱地区, 相关系数高达 0.92; 温度的影响在不同地区差别很大, 在干旱地区为负相关,

-0.61, 而在湿润地区影响不大, 系数约为 0.25。

本研究说明 LPJ 模式在我国区域的应用具有较好的适用性, 该模式对于改进气候与植被相互作用的研究有意义。但模式没有考虑氮循环, 仅仅是在维持呼吸计算时通过固定的各组织 C:N 比值考虑氮在植物生长过程中的影响, 而氮循环是生态系统中另一必不可少的物质循环, 因此如何在模式中实现氮循环动态表述, 需要进一步探讨和研究。

参考文献 (References)

- [1] 宋永昌. 植被生态学. 上海: 华东师范大学出版社, 2001
Song Yongchang. *Vegetation Ecology* (in Chinese). Shanghai: East China Normal University Press, 2001
- [2] 曹明奎, 李克让. 陆地生态系统与气候相互作用的研究进展. 地球科学进展, 2000, **15**: 446~452
Cao Mingkui, Li Kerang. Research advances on interactions between terrestrial ecosystem and climate. *Advances on Geoscience* (in Chinese), 2000, **15**: 446~452
- [3] 方精云, 唐艳鸿, 林俊达, 等. 全球生态学——气候变化与生态响应. 北京: 高等教育出版社, 2000
Fang Jingyun, Tang Yanhong, Lin Junda, et al. *Global Ecology—Climate Change and Ecological Responses* (in Chinese). Beijing: Higher Education Press, 2000
- [4] Köppen W. Das geographisches system der klimate. In: *Handbuch der Klimatologie*, Köppen Wm Ed. Berlin: Gebrüder borntraeger, 1936
- [5] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et al. Potential net primary production in South American: Application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, **1** (4): 399~429
- [6] Schimel D S, Braswell B H, Holland E A, et al. Climatic edaphic and biotic controls over carbon and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**: 279~293
- [7] Forley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface progresses, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (4): 603~628
- [8] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, **9**: 161~185
- [9] Brovkin V, Ganopolski A, Claussen M, et al. Modeling climate response to historical land cover change. *Global Ecology and Biogeography*, 1999, **101**: 251~261

- [10] 吕建华, 季劲钧. 青藏高原大气—植被相互作用的模拟试验 II. 植被叶面积指数和净初级生产力. 大气科学, 2002, **26** (2): 255~262
Lü Jianhua, Ji Jinjun. Simulation experiment on atmosphere—vegetation interactions in Tibetan Plateau. Part II: Vegetation leaf area index and net primary productivity. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2002, **26** (2): 255~262
- [11] Ji Jinjun. A climate—vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface. *Journal of Biogeography*, 1995, **22**: 445~451
- [12] 李克让, 王绍强, 曹明奎. 中国植被和土壤碳贮量. 中国科学 (D辑), 2003, **33** (1): 72~80
Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Carbon storage in vegetation and soil in China. *Science in China* (Ser. D) (in Chinese), 2003, **33** (1): 72~80
- [13] Cao Mingkui, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology*, 1998, **4**: 185~198
- [14] Reich P B, Walters M B, Ellsworth D S. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 1997, **94**: 13730~13734
- [15] Specht R L. Growth indices — their role in understanding the growth, structure and distribution of Australian vegetation. *Oecologia*, 1981, **50**: 347~356
- [16] Monsi M, Saeki T. Über den Lichtfaktor in den Pflanzengesellschaften und seine Bedeutung für die Stoffproduktion. *Japanese Journal of Botany*, 1953, **14**: 22~52
- [17] Farquhar GD, von Caemmerer S. Modelling of photosynthetic response to environmental conditions. In: *Physiological Plant Ecology*. II: *Water Relations and Carbon Assimilation*, Nobel P S, Osmond C B, Ed. Berlin: Springer, 1982: 549~587
- [18] Collatz G J, Ball J T, Grivet C, et al. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1991, **54**: 107~136
- [19] Collatz G J, Ribas-Carbo M, Berry J A. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. *Australian Journal of Plant Physiology*, 1992, **19**: 519~538
- [20] Ryan M G. Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1991, **1** (2): 157~167
- [21] Shiozaki K, Yodak K, Hozumi K, et al. A quantitative analysis of plant form — the pipe model theory. I. Basic analyses. *Japanese Journal of Ecology*, 1964, **14**: 97~105
- [22] Shiozaki K, Yodak K, Hozumi K, et al. A quantitative analysis of plant form — the pipe model theory. II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japanese Journal of Ecology*, 1964, **14**: 133~139
- [23] Waring R H, Schroeder P E. Application of pipe model theory to predict canopy leaf area. *Canadian Journal of Forest Research*, 1982, **12**: 556~560
- [24] Huang S, Titus S J, Wiens D P. Comparison of nonlinear height—diameter functions for major Albert tree species. *Canadian Journal of Forest Research*, 1992, **22**: 1297~1304
- [25] Linacre E T. Estimating the net-radiation flux. *Agricultural Meteorology*, 1968, **5**: 49
- [26] Haxeltine A, Prentice I C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, **10** (4): 693~709
- [27] New M, Hulme M, Jones P D. Representing twentieth century space-time climate variability. Part 1: development of 1901–1990 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate*, 1999, **12**: 829~856
- [28] Keeling C D. Atmospheric CO₂ records from sites in the SIO air sampling network. In: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information analysis Center, Ed. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 1999
- [29] Zobler L. A world soil file for global climate modeling. NASA Technical Memorandum 87802, Washington, D. C., 1986, 32pp
- [30] 吴征镒. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980
Wu Zhengyi. *Vegetation in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980
- [31] 张强, 赵雪. 中国沙区草地. 北京: 气象出版社, 1998
Zhang Qiang, Zhao Xue. *Pasture in Chinese Sanlots* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1998
- [32] 徐兴奎, 林朝晖, 李建平, 等. 利用卫星遥感资料对中国地表植被及荒漠化时空演变和分布的研究. 自然科学进展, 2001, **11** (7): 699~704
Xu Xingkui, Lin Zhaohui, Li Jianping, et al. Using the remote sensing data to study the time and space variation of land surface vegetation and desertification in China. *Advances in Natural Science* (in Chinese), 2001, **11** (7): 699~704
- [33] 慈龙骏, 杨晓辉. 荒漠化与气候变化间反馈机制研究进展. 生态学报, 2004, **24** (4): 755~760
Ci Longjun, Yang Xiaohui. Research advances in feedback mechanism between desertification and climate change. *Acta Ecologica Sinica* (in Chinese), 2004, **24** (4): 755~760
- [34] Tucker C J, Dregne N E, Newcomb W W. Expansion and contraction of the Sahara Desert from 1980 to 1990. *Sci-*

- ence, 1991, **253**: 299~301
- [35] 李晓兵, 史培军. 中国典型植被类型 NDVI 动态变化与气温、降水变化的敏感性分析. 植物生态学报, 2000, **24** (3): 379~382
- Li Xiaobing, Shi Peijun. Sensitivity analysis of variations in NDVI, temperature and precipitation in typical vegetation types across China. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 2000, **24** (3): 379~382
- [36] 中国湿地植被编辑委员会. 中国湿地植被. 北京: 科学出版社, 1999
- Editorial Committee of Wetland Vegetation in China. *Wetland Vegetation in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1999
- [37] Myneni R B, Nemani R R, Running S W. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, **35**: 1380~1393
- [38] Steffen W, Nobel I, Canadell J, et al. The terrestrial carbon cycle: Implications for the Kyoto Protocol. *Sciences*, 1998, **280**: 1393~1394
- [39] 陈利军, 刘高焕, 励惠国. 中国植被净第一性生产力遥感动态监测. 遥感学报, 2002, **6** (2): 129~135
- Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing. *Journal of Remote Sensing* (in Chinese), 2002, **6** (2): 129~135
- [40] Tao Bo, Li Kerang, Shao Xuemei, et al. The temporal and spatial patterns of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, **13** (2): 163~171
- [41] Fang Jingyun, Piao Shilong, Field C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2003, **1** (6): 293~297
- [42] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, **7**: 811~41
- [43] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. 北京大学学报 (自然科学版), 2001, **37** (4): 563~569
- Piao Shilong, Fang Jingyun, Guo Qinghua. Terrestrial net primary productivity and its spatio-temporal patterns in China during 1982—1999. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2001, **37** (4): 563~569
- [44] 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. 植物生态学报, 1995, **20** (1): 11~19
- Zhou Guangsheng, Zhang Xinshi. Study on the net primary productivity of natural vegetation in China with global climate change. *Acta Phytocologica Sinica* (in Chinese), 1995, **20** (1): 11~19