

东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应

赵俊芳^{1, 2}, 延晓冬^{1, *}, 贾根锁¹

(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:以东北地区 ($38^{\circ}43'N \sim 53^{\circ}34'N$, $115^{\circ}37'E \sim 135^{\circ}5'E$) 为研究对象, 利用当前气候状况和不同气候情景下的气象数据驱动基于个体生长过程的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN, 模拟了气候变化对东北森林生态系统净第一性生产力 (NPP) 和碳收支 (NEP) 的影响。结果表明: 1981 ~ 2002 年期间, 东北森林 NPP 总量位于 $0.27 \sim 0.40 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 平均值为 $0.34 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$; 土壤呼吸总量在 $0.11 \sim 0.27 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均为 $0.19 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$; NEP 总量位于 $0.11 \sim 0.18 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间, 且近 20 多年来该区森林起着 CO_2 汇的作用, 平均每年吸收 0.15 Pg C 的 CO_2 ; 该区森林 NPP 和 NEP 对温度升高比对降雨变化的反应更为敏感; 综合降雨增加 (20%) 和气温增加 (3°C) 的情况, 该区各点森林的 NPP 和 NEP 增加的幅度最大; 温度不变、降水增加 (不变) 情景下最小。

关键词: 东北森林; 碳收支; 净第一性生产力; 气候变化; 响应

文章编号: 1000-0933(2008)01-0092-11 中图分类号: Q142, Q945, Q948, S718.5 文献标识码: A

Simulating the responses of forest net primary productivity and carbon budget to climate change in Northeast China

ZHAO Jun-Fang^{1, 2}, YAN Xiao-Dong^{1, *}, JIA Gen-Suo¹

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 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(1): 0092 ~ 0102.

Abstract: The impacts of climate change on net primary productivity (NPP) and carbon budget (NEP) of forest ecosystems in Northeast China ($38^{\circ}43'N \sim 53^{\circ}34'N$, $115^{\circ}37'E \sim 135^{\circ}5'E$) were simulated under present climate condition and different climate scenarios using forest carbon budget model FORCCHN that based on growth process of individual trees. The results showed that: from 1981 to 2002, the total amount of NPP in study area fluctuated between 0.27 and $0.40 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$, and the mean value was $0.34 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$. The total soil respiration was from 0.11 to $0.27 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$, and the mean value was $0.19 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$. The total amount of NEP was from 0.11 to $0.18 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$; The forest played a positive role in absorbing carbon dioxide during past twenty years, and every year it absorbed 0.15 Pg C carbon dioxide on average. NPP and NEP were more sensitive to increase of air temperature than the change of precipitation; Synthesizing 20% increase in precipitation and 3°C increase in temperature, NPP and NEP enhanced rapidly, and finally minimal changes were found under scenarios of no change in air temperature and increase or no change in precipitation.

基金项目: 国家重点基础研究发展资助项目 (973 计划) (2006CB400500); 国家自然科学基金资助项目 (40675408)

收稿日期: 2007-04-10; **修订日期:** 2007-10-08

作者简介: 赵俊芳 (1977 ~), 女, 内蒙古凉城人, 博士生, 主要从事全球变化与碳循环模拟研究. E-mail: zhaojf@tea.ac.cn

* 通讯作者 Corresponding author. 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. 2006CB400500); National Natural Science Foundation of China (No. 40675408)

Received date: 2007-04-10; **Accepted date:** 2007-10-08

Biography: ZHAO Jun-Fang, Ph. D. candidate, mainly engaged in global change and carbon cycle. E-mail: zhaojf@tea.ac.cn

Key Words: forests in Northeast China; carbon budget; net primary productivity; climate change; response

尽管目前关于气候变化的预测还存在很多的不确定性^[1],但是,温室效应的存在以及全球气候变暖的可能性和趋势已为众人所接受。温室效应和气候变化通过影响植物生长发育过程和水分循环过程,对植被生产力的形成产生重大影响^[2~4]。因此,气候变化对陆地生态系统的影响,生态系统对全球变化的反馈机理等已成为近年来国际和国内研究的重点^[5]。

森林生态系统是地球陆地生态系统的主题,它具有很高的生物生产力和生物量以及丰富的生物多样性,其碳储量占整个陆地植被碳储量的 80% 以上,每年的碳固定量约占着整个陆地生物碳固定量的 2/3^[6],因此,森林在维护全球碳平衡具有重大作用。森林与气候之间存在着密切的关系,研究表明,大气中 CO₂ 平均每 7a 通过光合作用与陆地生物圈交换一次,而其中 70% 是与森林进行的^[7],故由气候变化引起的森林分布、林地土壤呼吸和生产力诸方面的变化反过来可对地球气候产生重大的反馈作用^[8]。

东北地区是中国纬度最高、精度最大的部分,森林资源面积为 $6 \times 10^{11} \text{ hm}^2$,占全国森林总面积的 28.1%,有林地面积为 $3.34 \times 10^7 \text{ hm}^2$,是全国最大的林区^[9],同时该区也是温带、寒温带的过渡地带,属于针阔叶混交林与北方针叶林的过渡区域,处于我国受气候变化影响最显著的地区,这使得气候变化对东北地区森林生态系统的影响成为生产和科研部门共同关注的问题。目前对东北森林的研究中,大多集中于森林植被与气候变化相互关系上面^[10~13],对林窗模型在东北地区森林上的应用工作开展较早较多^[14~18],以及用模型估算森林的碳循环上^[19~21]。在估算碳循环时,这些模型本质上都把森林生态系统看成具有不变的吸收碳的能力,即用近似顶极森林的碳收支资料推算幼龄林的碳收支,因此可能低估森林生态系统的碳收支,且目前对东北森林碳收支与气候变化关系的研究工作还比较缺乏。基于此,本文试图采用基于个体的合理解释幼龄林碳收支动态机理森林生态系统模型,在区域尺度上模拟东北地区森林净第一性生产力和碳收支对气候变化的敏感性,旨在加深对气候影响植物生产力过程的理解,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东北森林生态系统碳吸收能力及未来动态提供科学依据。

1 研究方法和资料

1.1 模型介绍

本文采用基于个体生长过程的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN (FORest Ecosystem Carbon Budget Model For CHiNa)^[22]。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文献^[22]。

该模型具有四个主要特点: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。该模型与 Hybrid 模型^[23]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)。

该模型的主要控制方程分别为:

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

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

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 ($\text{kg C} \cdot \text{d}^{-1}$); 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。

模型通过两种步长运行,在步长为日时的基本过程包括林分的光合作用、呼吸作用、凋落、光合产物分配和土壤有机物呼吸和转移过程;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、大凋落物生成过程。

1.1.1 光合作用:树木个体及单位面积林分的总光合可以表示为:

$$GPP_i = \min(GPPM_i \times f_c \times f_{dry} \times f_T, an \times aNS)$$

$$GPPM_i = \frac{2 \times Am_j \times DL}{KL_j} \ln \left[\frac{1 + \sqrt{1 + KL_j \times SL_j \times PAR_i / Am_j}}{1 + \sqrt{1 + KL_j \times SL_j \times PAR_i \times \exp(-KL_j \times LAI_i) / Am_j}} \right]$$

式中, GPP_i 为树木个体日总光合($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$); $GPPM_i$ 为林分日总光合($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$); 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($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$); Am_j 为第 j 类树木单叶最大可能光合($\text{kgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); 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[$\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h}) / (\text{W} \cdot \text{m}^{-2})$]; 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、土壤有效氮对总光合的影响,其中 aNS 为土壤有效氮量($\text{kgN} \cdot \text{m}^{-2}$),本研究取 $an = 150$ 作为表示同化作用碳氮比的一个参数。

1.1.2 呼吸作用

植物的自养呼吸可以分为维持呼吸和生长呼吸。维持呼吸、生长呼吸可由下式计算:

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

式中, RM_{ik} 为日维持呼吸量($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$); T_d 为白天平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_n 为夜间平均气温($^{\circ}\text{C}$); DL 为日长(h); r_k 为在气温为 15°C 时叶、枝、干、根和细根的相对呼吸速率(d^{-1}); 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,当代表指枝、干、根时对应的 C_{ik} 为边材量(kgC); RG_i 为日生长呼吸量($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$); r_g 为生长呼吸系数,取 0.25 ;GPP为日总光合($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$)。

1.1.3 凋落过程

每叶、细根凋落通量可以表示为:

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

式中, L_{ik} 为生长季或非生长季每叶、细根凋落通量($\text{kgC} \cdot \text{d}^{-1}$); C_{ik} 为相应碳库的库量(kg C); l_k 为对应的相对凋落速率(d^{-1})。

1.1.4 光合产物分配过程

$$\Delta C_{ik} = \begin{cases} \min(C_{ik\max} - C_{ik}, d_k \cdot BF_i) & BF_i > 0 \\ 0 & BF_i = 0 \end{cases}$$

$$C_{ik\max} = e_k D_{bi}^2$$

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

1.1.5 土壤有机物呼吸和转移过程

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。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:

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

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 数据来源

在本研究中, FORCCHN 模型的空间分辨率为 $10\text{km} \times 10\text{km}$, 模型运行需要气象数据、土壤特征数据和植被特征三方面的输入数据。

1.2.1 气象数据

本研究所用的基础数据来源于中国气象局, 时间序列为 1981 年 1 月 ~ 2002 年 12 月, 数据内容包括日降水量、日最高、最低、平均气温、日空气相对湿度、日平均风速、日总辐射量以及气象站点的经纬度和海拔高度, 根据东北 94 个气象站点的经纬度信息, 按照 Thornton 和 Running^[24] 的方法对气象数据进行 Kriging 插值, 获取模型输入所需 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 的气象要素值。

1.2.2 植被特征数据

包括最大叶面积指数、最小叶面积指数和初始的叶面积指数, 根据 1981 年图像空间分辨率 $16\text{km} \times 16\text{km}$ 气象卫星 NOAA/AVHRR NDVI 的中国植被分类数据得到。

1.2.3 土壤特征数据

包括主要土壤类型的颗粒组成数据, 即沙粒含量、粉粒含量、粘粒含量, 土壤田间持水量、萎蔫含水量和容重, 来源于中国科学院南京土壤研究所 1:100 万土壤质地图, 数字化后得到分辨率为 0.1° 经纬网格。

1.3 研究区气候变化趋势及气候情景确定

东北地区行政上包括辽宁、吉林、黑龙江三省和内蒙古自治区东部的呼伦贝尔盟、兴安盟、哲里木盟、赤峰市。北起北纬 $53^{\circ}34'$ 的黑龙江主航道中心线, 南抵北纬 $38^{\circ}43'$ 的辽东半岛南端, 跨纬度 $14^{\circ}51'$, 西起东经 $115^{\circ}37'$ 的内蒙古新巴尔虎右旗以西与蒙古人民共和国交界处, 东至东经 $135^{\circ}5'$ 的黑龙江省抚远以东乌苏里江汇入黑龙江处的耶字碑东角, 跨经度 $19^{\circ}28'$ 。东北森林主要由大兴安岭森林、小兴安岭森林和长白山森林等部分组成, 横跨温带和寒温带两个气候带, 从而形成温带落叶阔叶林、温带针阔混交林和寒温带针叶林 3 个基本林区。

为了估算气候变化对森林碳收支的可能影响, 必须定量地表示气候本身的变化, 以便作为森林碳收支的输入。本文采用了适用于小尺度研究的综合情景设置的方法反映未来气候的可能变化^[25,26]。通过对研究区 1980 ~ 2002 年 23a 的气象数据统计分析, 可以看出 1980 ~ 2002 年间研究区的年平均气温有明显的波动升高趋势, 而年均降雨量呈现较大的波动 (图 1)。

气温和降雨是该区域气候变化情景模拟的两个基本要素。据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第 3 次评估报告的权威预测, 全球平均气温在 1990 ~ 2100 年将升高 $1.4 \sim 5.8^{\circ}\text{C}$, 预计 21 世纪全球平均年降水量会增加, 但在区域尺度上降水的增加和减少都有可能, 主要介于增加 $5\% \sim 20\%$ ^[27]。因此, 本研究在确定气候情景时综合考虑了温度增加, 降雨量变化 (增加和减少) 的情况 (表 1)。

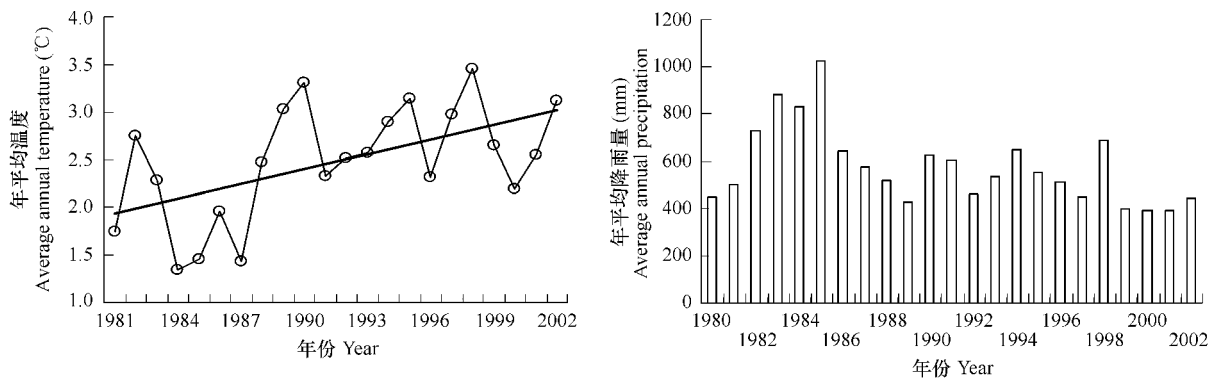


图1 研究区 1980 ~ 2002 年间年平均气温和年平均降雨量的变化趋势
Fig. 1 The changes of mean annual precipitation and temperature in study area from 1980 to 2002

表 1 模型模拟采用的不同气候情景
Table 1 Climate scenarios used in the model

代码 Code	气候情景 Climate scenarios
T0P0	当前气候情景 Current climate condition
T3P0	日平均气温增加 3℃ Daily temperature increased 3℃
T0P2	日平均气温不变降雨量增加 20% Daily average temperature unchanged and precipitation increased 20%
T0P-2	日平均气温不变降雨量减少 20% Daily average temperature unchanged and precipitation decreased 20%
T3P2	日平均气温增加 3℃降雨量增加 20% Daily average temperature increased 3℃ and precipitation increased 20%

* T 气温 Air temperature, P 降雨量 Rainfall, 下同 the same below

2 结果与分析

2.1 研究区净第一性生产力及其对气候变化的敏感性

图 2 给出了不同气候情景下 1981 ~ 2002 年间东北地区森林生态系统净第一性生产力的年际变化趋势与年平均净第一性生产力的空间分布图。从图中可以看出,不同气候情景下 1981 ~ 2002 年间东北地区森林生态系统净第一性生产力的年际变化趋势相一致,都呈波动上升趋势,在当前气候状况下,该区森林净第一性生产力的总量位于 $0.27 \sim 0.40 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.34 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,小于 Fang^[28] 利用森林清查资料估算全国森林净第一性生产力总量的研究结果 ($0.4 \sim 0.64 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$),高于 Potter 等^[29] 计算的世界陆地相应森林类型净第一性生产力(单位换算后为 $0.25 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$),如果取全球植被年净第一性生产力为 $50 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[29],那么本研究区森林第一性生产力约占全球植被的 0.68% 左右。

就平均状况而言,温度升高对东北森林生态系统净第一性生产力的影响最为显著,气温增加 3℃ (T3P0) 情景下,平均年净第一性生产力比当前情景 (T0P0) 增加 $0.032 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 9.37%;在平均气温增加 3℃ 的同时,降雨量增加 20% (T3P2) 情景下,平均年净第一性生产力比当前情景增加 $0.037 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 10.99%,较 T3P0、T0P2 情景分别增加 17.4%、92.1%;而日平均气温不变降雨增加 20% (T0P2) 或减少 20% (T0P-2) 情景下,平均年净第一性生产力的总量也相应的增加和降低,但与当前情景比增加和降低的幅度都很小,只有 5.72% 和 3.14%。

图 3 给出了不同气候情景下该区各点森林净第一性生产力的多年变化平均状况,即用不同气候情景下模拟得到的东北 1981 ~ 2002 年多年平均净第一性生产力减去当前气候情景下相应的净第一性生产力。从图中可知,温度增加,降水不变 (T3P0) 或增加 (T3P2),该区森林净第一性生产力大部分都显著增加,最大增加量分别高达 $411 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $301 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均增加量分别为 $93.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $84.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,标准差分别为 $84.8 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $42.2 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$;而温度不变,降水增加 (T0P2) 或减少 (T0P-2),该区各点净第一性生产力都有不同程度的增加(平均增加 $6.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 或减少(平均减少 $34.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),标准差分别为 $38.1 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $69.9 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这说明降水的变化对该区森林生态系统净第一性生产力的影响明显小于温度升高的影响。

接彩图 2,3

接彩图 2,3

2.2 研究区土壤呼吸

土壤呼吸是陆地植被固定碳后再接着释放 CO_2 返回大气的途径,是与全球变化有关的一个重要过程^[30]。研究表明,温度的升高在增加 NPP 的同时也会使土壤呼吸有所提高^[31]。通过对不同气候情景下东北地区森林生态系统内土壤呼吸年际变化趋势的研究发现(图 4),研究时段内土壤呼吸总量呈波动上升趋势,土壤呼吸对温度的升高较降水更为敏感;平均状况下气温增加 3°C (T3P0) 情景下,平均年土壤呼吸比当前情景(T0P0)增加 $0.008 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 4.05%;在平均气温增加 3°C 的同时,降雨量增加 20% (T3P2) 情景下,平均年土壤呼吸比当前情景增加 $0.011 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 5.70%;而日平均气温不变降雨量增加 20% (T0P2) 或减少 20% (T0P-2) 情景下,平均年土壤呼吸的总量有增加和降低。当前状况(T0P0)下,研究时段内土壤呼吸总量在 $0.11 \sim 0.27 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,平均为 $0.19 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

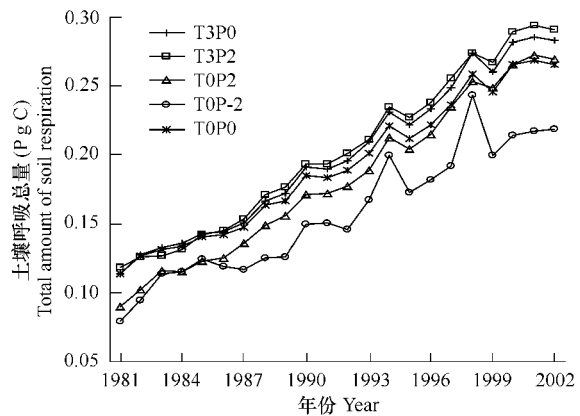


图 4 土壤呼吸年际变化

Fig.4 Interannual variations of soil respiration

2.3 研究区碳收支及其对气候变化的敏感性

对不同气候情景下 1981~2002 年间东北森林主要分布区域碳收支年际变化及年平均碳收支空间分布的研究表明(图 5),与净第一性生产力的年际变化趋势相似,各气候情景下碳收支都呈波动上升趋势。就当前气候状况而言,近 20 多年东北森林起着 CO_2 汇的作用,该区森林 1981~2002 年碳收支的总量位于 $0.11 \sim 0.18 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,平均每年吸收 0.15 Pg C 的 CO_2 ,超过 Turner 等^[32]对美国东部森林每年 0.079 Pg C 碳汇的推算值,大大高于全国森林的平均水平每年 0.022 Pg C ^[33]。

就平均状况而言,与当前气候(T0P0)状况相比,平均气温增加 3°C 降雨量增加 20% (T3P2) 情景下,平均年碳收支增加 $0.026 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 17.93%,较 T3P0 情景下增加 9.76%;气温增加 3°C (T3P0) 情景下,平均年碳收支增加 $0.024 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,增加了 16.33%;日平均气温不变降雨量增加 20% (T0P2) 或减少 20% (T0P-2) 情景下,年碳收支总量都有所增加。

图 6 给出了不同气候情景下森林净第一性生产力的多年变化平均状况,即用不同气候情景下模拟得到的研究区 1981~2002 年多年平均森林碳收支减去当前气候情景下相应的碳收支。从图中可以看出,温度增加,降水不变(T3P0)或增加(T3P2),该区森林碳收支大部分都显著增加,最大增加量分别高达 $230 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $232 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,平均增加量分别为 $64.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、 $67.3 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,标准差分别为 $27.0 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $27.7 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$;而温度不变,降水增加(T0P2)或减少(T0P-2),该区各点碳收支都有不同程度的增加(平均增加 $1.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)或减少(平均减少 $0.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),标准差分别为 $20.5 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $42.6 \text{ gC} \cdot \text{m}^{-2}$ 。这说明温度升高对该区森林生态系统碳收支的影响较降雨变化显著,降水对碳收支的影响很小。

3 结论和讨论

本文以东北地区为研究对象,利用以气候变量为驱动力、基于个体生长过程的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 模拟和分析了当前气候状况和不同气候情景下东北地区森林生态系统净第一性生产力和碳收支对气候变化的响应。模拟结果表明:1981~2002 年期间,该区森林净第一性生产力的总量位于 $0.27 \sim 0.40 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,平均值为 $0.34 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$;土壤呼吸总量在 $0.11 \sim 0.27 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$,平均为 $0.19 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$;碳收支总量位于 $0.11 \sim 0.18 \text{ PgC} \cdot \text{a}^{-1}$ 之间,且近 20 多年来该区森林起着 CO_2 汇的作用,平均每年吸收 0.15 Pg C 的 CO_2 ;该区净第一性生产力和碳收支对温度升高都比对降雨变化的反应更为敏感;综合降雨和气温都增加的情况,该区各点森林的净第一性生产力和碳收支增加的幅度最大;降水增加、温度增加对净第一性生产力和碳收支总量的影响较降水增加、温度不变明显;温度不变、降水增加或减少对净第一性生产力和碳收支影

接图 5,6

响很小,其中温度不变、降水增加对其的影响最小。

过去全球变化研究表明,植被与气候间存在显著的耦合关系^[34]。在千年尺度上,气候变化是区域植被的主要原因,而非气候因子仅处于次要地位。大量的研究表明,影响植被净第一性生产力和碳收支的主要因子有温度、降水、大气 CO₂ 含量等。

温度升高对生态系统生产力的影响存在正负两方面的效应。其正面作用是温度的增加可以延长生长季节,提高光合作用效率,提高植物的生产力,而增温的负面效应主要在于增加水分消耗而引起干旱^[35]。在北半球高纬度地区降水量一般超过植被的水分蒸散^[36],热量往往构成该地区植物生长的限制因子^[37,38],本研究得到的东北森林净第一性生产力和碳收支对温度升高极为敏感印证了这一结论。

水分通过影响植物光合作用水分需求、水分平衡以及碳固定量来影响植被净第一性生产力及其碳收支。水分胁迫导致气孔导度降低甚至关闭、蒸腾和光合作用都显著下降,在防止叶子失水的同时也减少了干物质的积累^[39]。在较干旱地区,降水以及由此导致的土壤水分动态是植被净第一性生产力形成的主要影响因素^[40]。在本研究中降水增加、温度增加对净第一性生产力和碳收支总量的影响较降水增加、温度不变明显,温度不变、降水增加或减少对净第一性生产力和碳收支影响很小,其中温度不变、降水增加对其的影响最小。

CO₂ 作为光合作用的原料参与光合作用,直接与植被净第一性生产力相关联,同时,还通过对温度、植物水分需求以及植物营养物质需求等方面的作用来影响净第一性生产力^[41],最终影响碳收支。但大气中的 CO₂ 对树木生长是否有直接施肥效应是一个重要的、但未有最后结论的问题^[42]。增加 CO₂ 对树木生长的短期直接效应是光合速率增强、光呼吸和暗呼吸均有所减弱,气孔导度降低,水分利用效率提高,从而可提高生产力^[43,44],但长期处于与高 CO₂ 浓度下,其光合速率可能会逐渐恢复到原有的水平^[45],且 CO₂ 增加对大树及生态系统长期直接效应还没有任何实验证据。计算机模拟研究发现:CO₂ 增加对生态系统的影响远小于对小单木生长的影响,在某些情况下,对生态系统没有任何影响^[46]。基于已有研究,考虑到 CO₂ 施肥效应问题的复杂性和不确定性,本研究中没有考虑 CO₂ 对森林生态系统净第一性生产力和碳收支的影响。

References:

- [1] Kerr R A. Greenhouse skeptic out in the cold. *Science*, 1989, 246: 1118—1119.
- [2] Chiew F H S, Whetton P H, McMahon T A, *et al.* Simulation of the impacts of climate change on runoff and soil moisture in Australian catchments. *Journal of Hydrology*, 1995, 176: 121—147.
- [3] Schreider S Y, Jakeman A L, Pittock A B, *et al.* Estimation of possible climate change impacts on water availability, extreme flow and soil moisture in Goulburn and Owen basins, Victoria. *Climate Change*, 1996, 34: 513—546.
- [4] Peng S L, Hou A M, Zhou G Y. Impact of climate change on the net primary production of terrestrial ecosystem. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 5(6): 717—722.
- [5] Steffen W L. Implication of global change for natural and management ecosystem: a synthesis of GCTE and related research. *Global Change Report*, 1997, 29: 6—7.
- [6] Kramer P J. Carbon dioxide concentration, photosynthesis, and dry matter production. *BioScience*, 1981, 31: 29—33.
- [7] Walter H. *Vegetation of the Earth and Ecological Systems of the Geo-biosphere*. Berlin: Springer-Verlag, 1985. 318.
- [8] 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 Phytocologica Sinica*, 24(1): 1—8.
- [9] Editor Committee of Forest in Liaoning Province. *Liaoning Forest*. Beijing: China Forest Press, 1990. 1—20.
- [10] LIU S R, XU D Y, WANG B. Impacts of Climate Change on Productivity of Forests in China I. Simulation of Net Primary Productivity in China. *Forest Research*, 1994, 7(4): 425—430.
- [11] LIU S R, XU D Y, WANG B. Impacts of Climate Change on Productivity of Forests in China II. Geographic Distribution of Actual Productivity of Forests in China. *Forest Research*, 1993, 6(6): 633—642.
- [12] Wu Z F. Assessment of eco-climate suitability and climate change impacts on broad-leaved Korean pine Forest in Northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 771—775.

- [13] Yu D P, Wang S Z, Tang L N, *et al.* Age table of Larch in north slope of ChangBai Mountain and relation between climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 14—20.
- [14] Yan X D. Several basic issues of forest gap model I: Effect of simulated plot area. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 17—22.
- [15] Yan X D, Yu Z L. A study on several basic issues of forest gap model II: Effect of simulated plot number. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 1—6.
- [16] Chen X W, Wang F Y. Simulation of the potential responses of mixed coniferous and broad-leaved Korean Pine communities by BKPF model. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(3): 327—331.
- [17] Hao Z Q, Dai W M, He H S, *et al.* Potential effect of climate warming on major tree species in ChangBai mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 653—658.
- [18] Liu Y C, Yu Z L, Li S X, *et al.* Elementary study of the impact of climate change on forests in northeast China. *Journal of Jilin Forestry University*, 1997, 13(2): 63—69.
- [19] Xia C Z, Xiong L Y, Zhuang D F, *et al.* Study on parameter inversion of terrestrial vegetation photosynthesis progress based MODIS. *Progress in Geography*, 2004, 23(4): 10—18.
- [20] Zhao M, Zhou G S. The change trend of forest productivity in northern China. *Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica*, 2005, 25(3): 466—471.
- [21] Zhang A, Yu G R, Zhao S D, *et al.* Carbon Budget Of Ecosystem in Changbai Mountain Natural Reserve. *Environmental Science*, 2003, 24(1): 24—32.
- [22] Yan X D, Zhao J F. Establishing carbon budget model FORCCHN of forest ecosystem in China based on individual and validation. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2684—2694.
- [23] Friend A D, Stevens A K, Knox R G, *et al.* A process-based, terrestrial biosphere model of ecosystem dynamics (Hybrid v. 3.0). *Ecological Modeling*, 1997, 95: 249—287.
- [24] Thornton E P, Running S W. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain. *Journal of Hydrology*, 1997, 190: 214—251.
- [25] Wu J D, Wang F T. Study on the creation of climate change scenarios for impact analysis: A review. *Meteorological*, 1998, 24(2): 3—8.
- [26] Xu H M, Gao Q Z, Hang Y M, *et al.* Simulated the impact of climate change on net primary production in hilly area of Loess Plateau, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(9): 2939—2947.
- [27] IPCC. *Climate change 2001: The scientific basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [28] Fang J Y, Chen A P. Dynamic forest biomass carbon pools in China and their significance. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(9): 967—973.
- [29] 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 Cycle*, 1993, 7: 811—841.
- [30] Peng S L, Zhao P Ren H, *et al.* The possible heat-driven pattern variation of zonal vegetation and agriculture ecosystem along the north-south transect of China under the global change. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 217—226.
- [31] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249—252.
- [32] Turner D P, Koepper G J, Hanmon M E, *et al.* A carbon budget for forests of the continental United States. *Ecol Appl.*, 1995, 5: 421—436.
- [33] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320—2322.
- [34] Hao Y P, Chen Y F. Progress in estimation of net primary productivity and its responses to climate change. *Advance in Earth Sciences*, 1998, 13(6): 564—571.
- [35] Liang N, Maruyama K. Interactive effects of CO₂ enrichment and drought stress on gas exchange and water-use efficiency in *Alnus Firma*. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35: 353—361.
- [36] Waring R H, Schlesinger W H. *Forest Ecosystem: Concepts and management*. London: Academic Press, 1985. 340.
- [37] Zhou L. *Northeast climate*. Beijing: Meteorology Press, 1991. 1—366.
- [38] Li Z Q, Shi Q W. *Geography pandect of northeast economy region*. Jilin: Northeast Normal University Press, 1998. 1—530.
- [39] Janack J. Stomatal limitation of photosynthesis as affected by water stress and CO₂ concentration. *Photosynthetica*, 1997, 34(3): 473—476.
- [40] Melillo J M, McGuire. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234—240.
- [41] Meier, Fuhrer J. Effect of elevated CO₂ on orchard grass and red clover grown in mixture at two levels of nitrogen or water supply. *Environmental and Experimental Botany*, 1997, 38: 251—262.
- [42] Idso S B, Balling R C. United States temperature precipitation relationship-implications for future greenhouse climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1992, 58(1-2): 143—147.

- [43] Emanuel. Climate change and the broad-scale distribution of terrestrial ecosystem complexes. *Climatic Change*, 1985, 7: 29—43.
- [44] Prince S D, Goward S N, Goetz S, *et al.* Interannual atmosphere-biosphere variation: implications for observation and modeling. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105 (D15): 20055—20063.
- [45] Smith T M, Shugart H H. The transient response of terrestrial carbon storage to a perturbed climate. *Nature*, 1993, 361: 523—526.
- [46] Shugart H H. CO₂, climatic change and forest ecosystem. In: B. Bolin *et al.* eds. *The Greenhouse Effect, Climatic Change, AND ecosystem*, SCOPE, 1986. 29: 475—521.

参考文献:

- [8] 延晓冬,赵世洞,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.
- [10] 刘世荣,徐德应,王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 I. 中国森林现实生产力的特征及地理格局. *林业科学研究*, 1993, 6(6): 633~642.
- [11] 刘世荣,徐德应,王兵. 气候变化对中国森林生产力的影响 II. 中国森林第一性生产力的模拟. *林业科学研究*, 1994, 7(4): 425~430.
- [12] 吴正方. 东北阔叶红松林分布区生态气候适宜性及全球气候变化影响评价. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 771~775.
- [13] 于大炮,王顺忠,唐立娜,等. 长白山北坡落叶松年表及其与气候变化的关系. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 14~20.
- [14] 延晓冬. 林窗模型的几个基本问题的研究 I. 模拟样地面积的效应. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 17~22.
- [15] 延晓冬,于振良. 林窗模型的几个基本问题的研究 I. 模拟样地个数的效应. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 1~6.
- [16] 陈雄文,王凤友. 林窗模型 BKPF 模型模拟红松林阔叶混交林群落对气候变化的潜在反应. *植物生态学报*, 2000, 24(3): 327~331.
- [17] 郝占庆,代为民,贺红土,等. 气候变暖对长白山主要树种的潜在影响. *应用生态学报*, 2001, 12(5): 653~658.
- [18] 刘延春,于振良,李世学,等. 气候变迁对中国东北森林影响的初步研究. *吉林林学院学报*, 1997, 13(2): 63~69.
- [19] 夏朝宗,熊利亚,庄大方,等. 基于 MODIS 的陆地植被光合过程参数反演研究. *地理科学进展*, 2004, 23(4): 10~18.
- [20] 赵敏,周广胜. 中国北方林生产力变化趋势及其影响因子分析. *西北植物学报*, 2005, 25(3): 466~471.
- [21] 张娜,于贵瑞,赵世洞,等. 长白山自然保护区生态系统碳平衡研究. *环境科学*, 2003, 24(1): 24~32.
- [22] 延晓冬,赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 及模型验证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2684~2694.
- [25] 吴金栋,王馥棠. 气候变化情景生成技术研究综述. *气象*, 1998, 24(2): 3~8.
- [26] 许红梅,高清竹,黄永梅,等. 气候变化对黄土丘陵沟壑区植被净第一性生产力的影响模拟. *生态学报*, 2006, 26(9): 2939~2947.
- [28] 方精云,陈安平. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. *植物学报*, 2001, 43(9): 967~973.
- [30] 彭少麟,赵平,任海,等. 全球变化压力下中国东部样带植被与农业生态系统格局的可能性变化. *地学前缘*, 2002, 9(1): 217~226.
- [34] 郝永萍,陈育峰. 植被净初级生产力估算模型及其对气候变化的响应研究进展. *地球科学进展*, 1998, 13(6): 564~571.
- [37] 周琳. 东北气候. 北京:气象出版社, 1991. 1~366.
- [38] 李振泉,石庆武. 东北经济区地理总论. 吉林:东北师范大学出版社, 1998. 1~530.

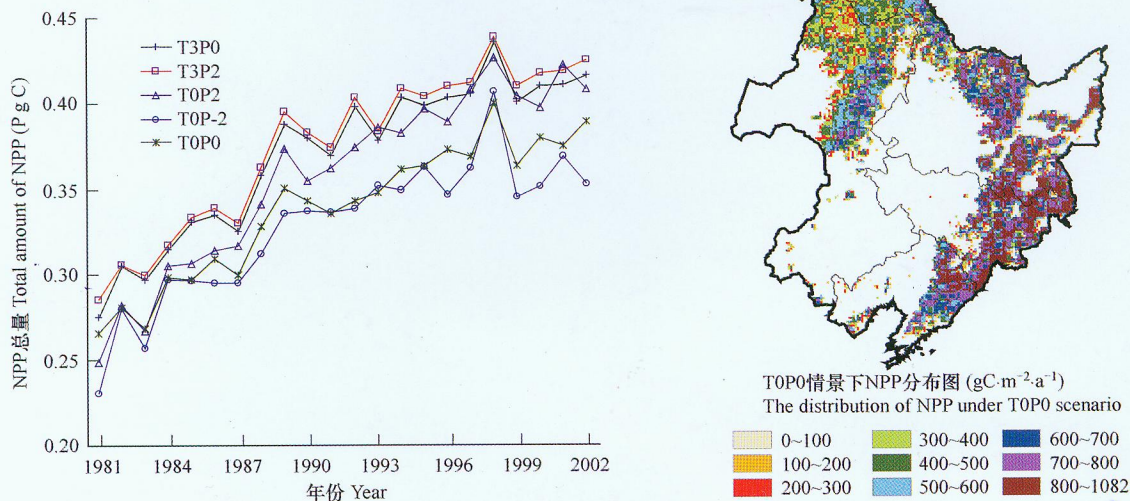


图2 不同气候情景下东北森林净第一性生产力的年际变化与空间分布
Fig.2 The changes of NPP under different climate scenarios and spatial distribution of average NPP of forest at northeast region

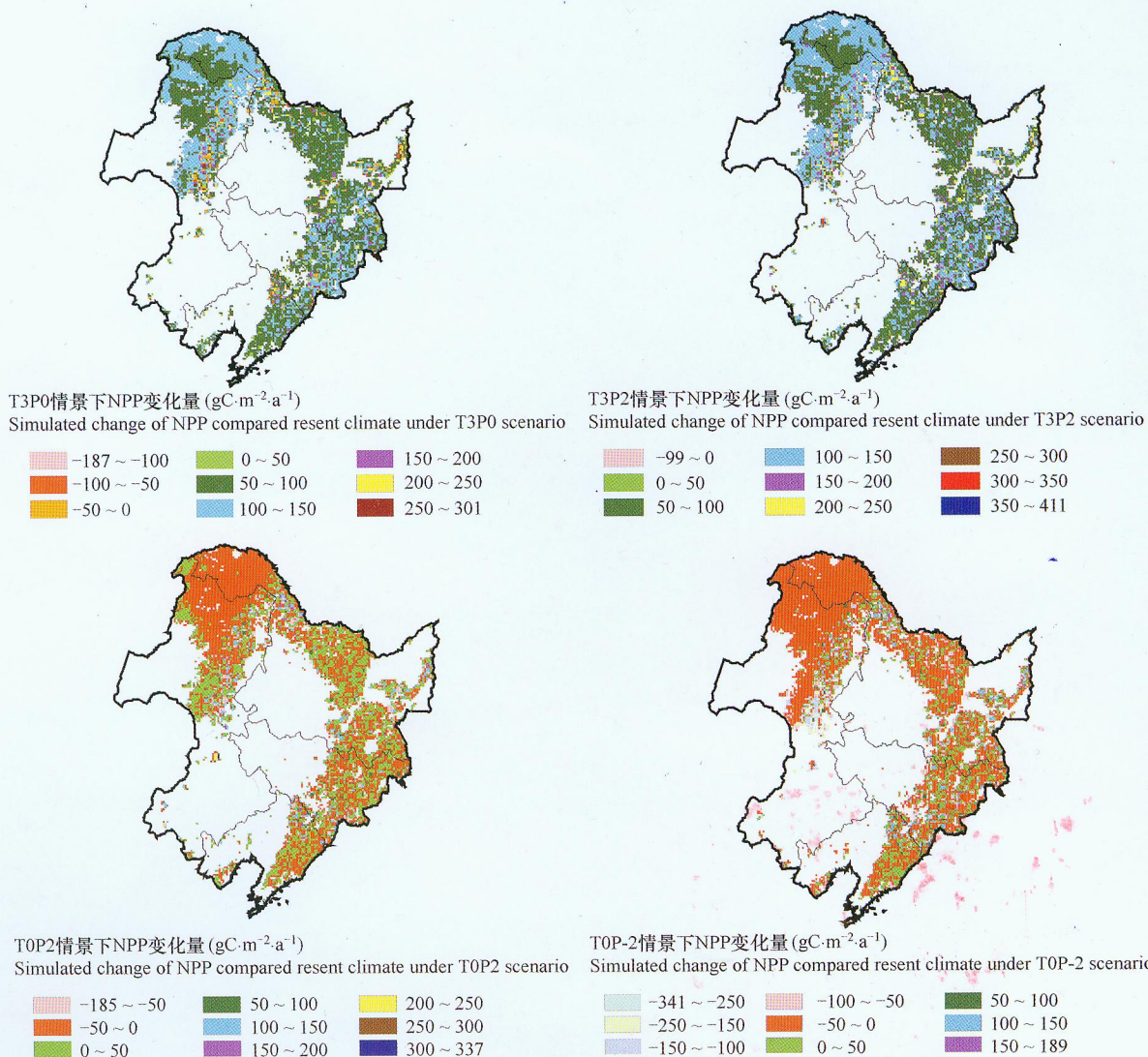


图3 不同气候情景下东北森林主要分布区域净第一性生产力的变化
Fig.3 The changes of net primary production at different climate scenarios

2005年5月22日

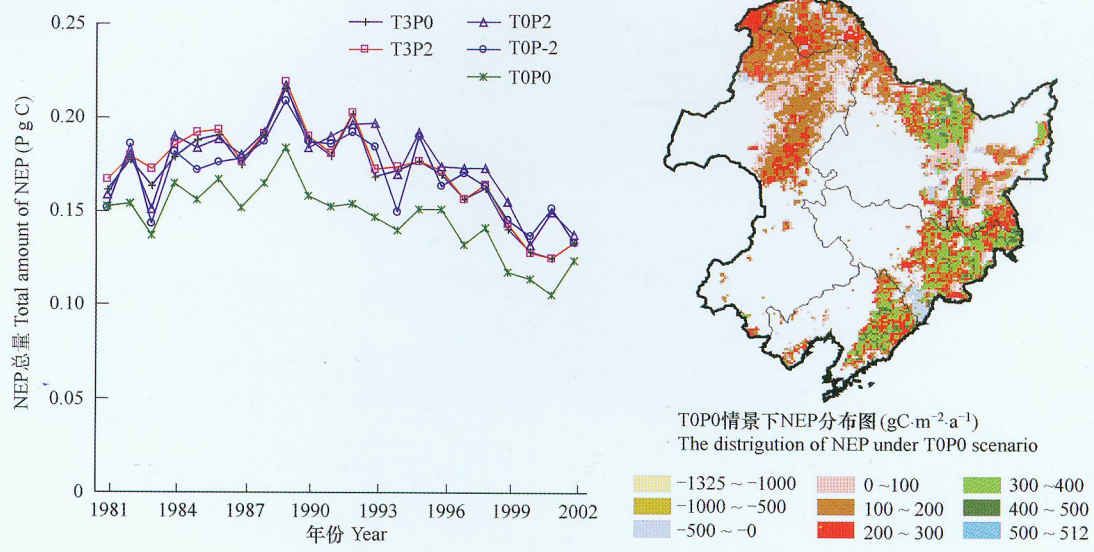


图5 不同气候情景下东北森林碳收支的年际变化与空间分布
Fig.5 The changes of NEP under different climate scenarios and spatial distribution of average NEP of forest at northeast region

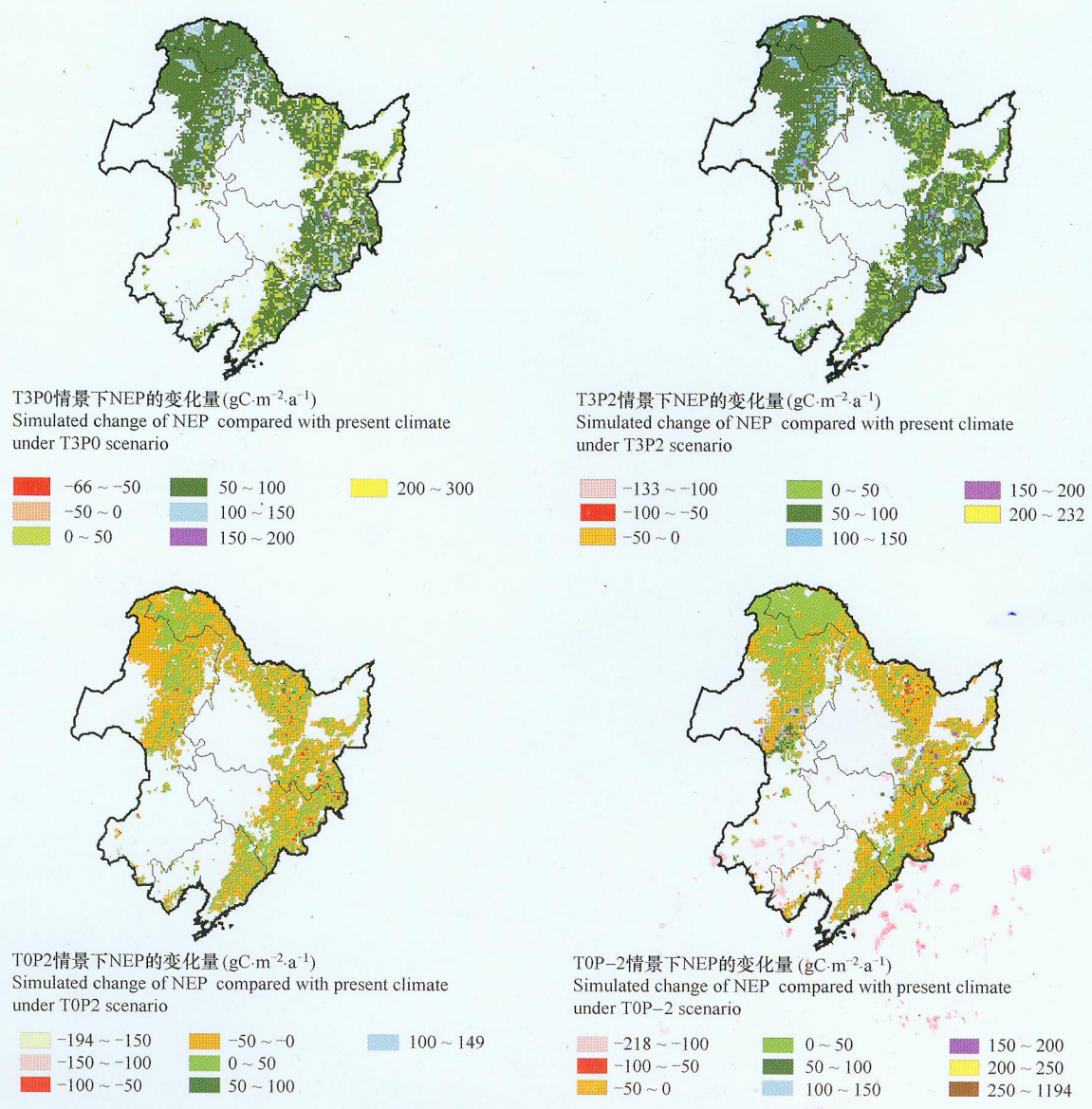


图6 不同气候情景下东北森林碳收支的变化
Fig.6 Simulated the changes of NEP at different climate scenarios