

基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林 GPP 和 NPP

曾慧卿^{1,2,3}, 刘琪璟^{4,*}, 冯宗炜^{2,3}, 王效科^{2,3}, 马泽清⁴

(1. 南昌大学环境科学与工程学院 南昌 330031; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要:应用生物地球化学模型 BIOME-BGC 模型估算了 1993~2004 年红壤丘陵区湿地松林总第一性生产力(GPP)、净第一性生产力(NPP), 并分析 GPP、NPP 年际变化对气候的响应以及未来气候变化情景下 GPP、NPP 的响应。结果表明, 湿地松林 1993~2004 年 GPP、NPP 的总量变化波动于 $1\,777 \sim 2\,160 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间和 $453 \sim 828 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间, 平均值分别为 $1\,941 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 和 $695 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在研究时段内, GPP、NPP 有缓慢增长趋势, GPP、NPP 总量平均值从 1990 年代初期(1993~1996 年)的 $1\,826$ 、 $687 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 上升到 21 世纪初期(2001~2004 年)的 $2\,026$ 、 $693 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。这主要是由于研究时段内 GPP、NPP 对降水缓慢增长的正响应造成的。未来气候变化情景分析表明, CO_2 浓度倍增不利于湿地松林 GPP、NPP 的增长, 但均不超过 1.5%。在 CO_2 浓度不增加条件下, GPP 正向响应了降水单独变化和温度升高 1.5°C 且降水增加情景, 正向响应 NPP 的情景条件是降水的单独变化; 当 CO_2 浓度倍增和气候改变时, 预测的 GPP 正向响应了降水的变化, 同时正向响应了温度升高 1.5°C 且降水变化; 正向响应 NPP 的情景条件是降水的变化。

关键词:气候变化; 总初级生产力; 净初级生产力; 湿地松林; 红壤丘陵区

文章编号: 1000-0933(2008)11-5314-08 中图分类号: Q948 文献标识码: A

GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region based on BIOME-BGC model

ZENG Hui-Qing^{1,2,3}, LIU Qi-Jing^{4,*}, FENG Zong-Wei^{2,3}, WANG Xiao-Ke^{2,3}, MA Ze-Qing⁴

1 College of Environmental Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China

2 State Key Laboratory of Urban and Region Ecology, Research Center for Eco-Environmental Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

3 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

4 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(11): 5314~5321.

Abstract: In this study, we used a biogeochemical model, BIOME-BGC model, that was validated to estimate GPP (Gross Primary Productivity) and NPP (Net Primary Productivity) of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region and their responses to interannual climate variability during the period of 1993–2004 and climate change scenario in the future. Results showed that the average annual total GPP and NPP were $1\,941 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $695 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$. GPP and NPP showed an increasing trend during the study period. The precipitation was the key factor controlling the GPP and NPP

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB4125); 国家科技部国际合作资助项目(2006DFB91920)

收稿日期: 2008-01-22; 修订日期: 2008-09-16

作者简介: 曾慧卿(1974~), 女, 江西上犹人, 博士生, 主要从事生态模拟与 3S 研究. E-mail: hqzeng@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuqijing@gmail.com

Foundation item: The project was financially supported by the National Key Basic Research Special Foundation of China (No. 2002CB4125); International Joint Research Project (No. 2006DFB91920) by Ministry of Science and Technology of China

Received date: 2008-01-22; **Accepted date:** 2008-09-16

Biography: ZENG Hui-Qing, Ph. D candidate, mainly engaged in ecology simulation and 3S study. E-mail: hqzeng@126.com

variations. Scenario analysis showed that double CO₂ would not benefit for GPP and NPP with less than 1.5% decrease. When CO₂ concentration fixed, GPP responded positively to precipitation change only, temperature increase by 1.5°C while precipitation increase and NPP responded positively to precipitation change only. When CO₂ concentration doubled and climate changed, GPP and NPP responded positively to precipitation changed and GPP also responded positively to temperature increased by 1.5°C while precipitation changed.

Key Words: climate change; GPP; NPP; *Pinus elliottii* forest; red soil hilly region

总第一性生产力(GPP, Gross primary productivity)是指一定时期内植物从无机物生产出来的有机物质的总量。其中包括同期间内植物呼吸所引起的有机物质消耗量(respiration)。净第一性生产力(NPP, net primary productivity)是指从总生产量减去植物呼吸的消费量后剩下来的数量。也即一定时期内,经植物的组织或贮藏物质的形式所表现而蓄积起来的有机物质的数量^[1]。NPP 是表示植被活动的关键变量,代表了生态系统固定 CO₂的能力,NPP 与异养呼吸速率的平衡(即净生态系统生产力 NEP)决定了是否有生物圈对过量大气 CO₂的累积,是大气中 CO₂浓度季节变化的主要原因。准确估算 NPP 有助于了解全球碳循环,此外,NPP 也是陆地生态系统中物质与能量运转研究的基础,除了供给植物本身外,还为所有有机体生命提供了能量和物质,因而陆地 NPP 的研究也为合理开发、利用自然资源提供科学依据。国内外学者采用不同方法对全球或区域净第一性生产力进行研究^[2~9]。应用模型对 NPP 的研究在近几十年得到了迅速的发展,从最初的 MIAMI 模型^[2]、Chikugo 模型^[10]到基于卫星遥感数据的 NPP 模型^[11],目前基于过程的陆地生物地球化学模型较为流行,这些模型能比较准确和详细地描述植物生长的过程,对 GPP 和 NPP 的估算有较高的可信度。

BIOME-BGC 模型是模拟全球生态系统不同尺度(局地生态系统、区域生态系统、全球生态系统)植被、凋落物、土壤中水、碳、氮储量和通量的生物地球化学模型。在 BIOME-BGC 模型中,NPP 是 GPP 与植被呼吸之差,GPP 是大气 CO₂浓度、太阳辐射、气温、植被叶面积以及水分和氮素有效性的函数。该模型是一种平衡态的生态系统模型,应用空间分布资料,包括气候、海拔高度、植被和水分条件对每年、每天的碳进行估计。本研究试图利用中国科学院千烟洲生态定位站(简称千烟洲站)1985~2004 年气候资料作为 BIOME-BGC 模型的气候驱动数据,估算红壤丘陵区湿地松人工林 NPP 的变化规律,并探讨基于大气环流模型(GCMs, general circulation models)不同气候变化情景下 GPP 和 NPP 的响应,有助于研究人为干扰在全球变化中所起的作用,为评价红壤丘陵区植被恢复对生态环境的影响以及人工林的管理提供科学依据。

1 研究区概况

研究区位于中国科学院千烟洲生态定位研究站(简称千烟洲站)(115°04'13"E, 26°44'48"N)。平均海拔多在 100 m 左右,相对高度 20~50 m,属典型的红壤丘陵地貌。地带性土壤为红壤,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物。气候具有典型亚热带季风气候特征,根据千烟洲站 1985~2004 年气象资料,年平均降水 1487 mm,年平均气温 18°C,≥0°C 活动积温 6523°C,≥10°C 活动积温 6015°C,年日照时数 1406 h,年日照百分率 43%,太阳年总辐射量 4349 MJ·m⁻²,无霜期 323 d。千烟洲站现在林分主要为 1985 年前后营造的人工林,主要树种有马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelm)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、枫香(*Liquidambar formosana* Hance)、板栗(*Castanea mollissima* Blume),伴有少量木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、山鸡椒(*Litsea cubeba* (Lour.) Pers.)等,常绿植被覆盖面积占土地总面积的 76%。据 1999 年调查,湿地松活立木平均高度为 12.2 m,胸径 16.3 cm,密度 1736 株/hm²。

2 研究方法

2.1 BIOME-BGC 模型

BIOME-BGC 模型由 FOREST-BGC 模型发展而来,其模型构建的机理见于文献^[12,13],经过 20 多年的发展,模型不断地进行改进,目前最新 BIOME-BGC 模型(版本为 4.1.2)以日为步长对生态系统进行有效模拟,

模型的主要驱动包括 3 部分: (1) 初始化文件: 主要包括研究地的经纬度、海拔、土壤有效深度、土壤颗粒组成、大气中 CO₂ 浓度年际变化、植被类型的选择以及对输入输出文件的设定等等; (2) 以日为步长的气象数据: 最高温、最低温、白天平均温、降水、饱和蒸气压差、太阳辐射等等; (3) 生态生理指标参数: 包括 44 个参数, 如叶片 C:N 比、细根 C:N 比、气孔导度、冠层消光系数、冠层比叶面积、叶氮在羧化酶中的百分含量等等。本文以干烟洲的气候数据、土壤指标以及生态生理指标输入模型进行 GPP 和 NPP 的计算。具体的参数见表 1, 包括地方参数以及 38 个生态生理指标参数(另外 6 个参数是以 0 和 1 对植被类型的选择性参数)。其中以下常绿针叶林(ENF)的生态生理参数为样地实测参数: 叶片 C:N 68.3 (kg C/kgN); 细根 C:N 118 (kg C/kgN); 活立木 C:N 179 (kg C/kgN); 冠层光吸收系数 0.5053 (DIM); 冠层平均比叶面积 12.08 (m²/kgC); 投影叶面积与叶片表面积比 2.57 (DIM)。其他生态生理参数为模型本身的常绿针叶林参数。

2.2 数值模拟

根据亚洲低纬度地区气候的变化情况^[14]以及若干大气环流模型(GCMs)^[15]对未来气候变化的情景设为:

年均气温增加 1.5℃、增加 3.0℃;

年降水量增加 10%、减少 10%;

CO₂ 浓度不变、倍增。

表 1 湿地松的 BIOME-BGC 模型参数值

Table 1 Parameters of *Pinus elliottii* in BIOME-BGC model

参数 Parameters	单位 Unit	值 Value		单位 Unit	值 Value
地方参数 Site parameters					
Effective soil depth	m	1.0	Clay percentage	%	25
Sand percentage	%	40	Site elevation	m	86
Silt percentage	%	35	Site shortwave albedo	DIM	0.18
生态生理参数 Ecophysiological parameters					
Transfer growth period as fraction of growing	prop.	0.3 *	Litterfall as fraction of growing season	prop.	0.3 *
Annual leaf and fine root turnover fraction	1/a	0.26 *	Annual live wood turnover fraction	1/a	0.7 *
Annual whole-plant mortality fraction	1/a	0.005 *	Leaf litter lignin proportion	DIM	0.33 *
Annual fire mortality fraction	1/a	0.005 *	Fine root labile proportion	DIM	0.34 *
New fine root C; new leaf C	ratio	1.4 *	Fine root cellulose proportion	DIM	0.44 *
New stem C; new leaf C	ratio	2.4 *	Fine root lignin proportion	DIM	0.22 *
New live wood C; new total wood C	ratio	0.076 *	Dead wood cellulose proportion	DIM	0.7 *
New croot C; new stem C	ratio	0.31 *	Dead wood lignin proportion	DIM	0.30 *
Current growth proportion	prop.	0.5 *	Canopy water interception coefficient	1/LAI/d	0.05 *
C·N of leaves	kgC/kgN	68.3 *	Canopy light extinction coefficient	DIM	0.5053 *
C·N of leaf litter	kgC/kgN	130 *	All-sided to projected leaf area ratio	DIM	2.57 *
C·N of fine roots	kgC/kgN	118 *	Canopy average specific leaf area	m ² /kgC	12.08 *
C·N of live wood	kgC/kgN	179 *	Fraction of leaf N in Rubisco	DIM	0.033 *
C·N of dead wood	kgC/kgN	710 *	Maximum stomatal conductance	m/s	0.0065 *
Leaf litter labile proportion	DIM	0.39 *	Cuticular conductance	m/s	6 × 10 ⁻⁵ *
Leaf litter cellulose proportion	DIM	0.28 *	Boundary layer conductance	m/s	0.09 *
Leaf water potential: start of conductance reduction	Mpa	-0.7 *	Vapor pressure deficit: start of conductance reduction	pa	610 *
Leaf water potential: complete conductance reduction	Mpa	-2 *	Vapor pressure deficit: complete conductance reduction	pa	3100 *

DIM: dimensionless; LAI: leaf area index

* 数据来源于文献 White *et al.*, 2000^[16]; Data came from White *et al.*, 2000^[16]

3 结果

3.1 模型检验

根据千烟洲站湿地松林研究资料^[17]及 2003、2004 年样地调查实测资料,计算得到湿地松实测的 NPP 结果。与 BIOME-BGC 模型模拟结果比较可见,1985~1992 年模拟值均大于实测值,1993~2004 年模拟值较接近于实测值(图 1)。

研究时段内湿地松林实测 NPP 与 BIOME-BGC 模拟 NPP 线性相关关系显著($R^2 = 0.6391$ $p < 0.01$)(图 2),两者 20a 平均 NPP 值相差 8.12%,估测值与实测值相差范围为 -10.53%~53.78%。湿地松林郁闭后即 1993~2004 年模型值与实测值的相关分析表明,模拟值与实测值线性相关关系显著($R^2 = 0.7603$ $p < 0.01$)(见图 3),模拟值与实测值相差范围为 -11.53%~18.84%,且 1993~2004 年平均 NPP 相差仅为 0.42%。

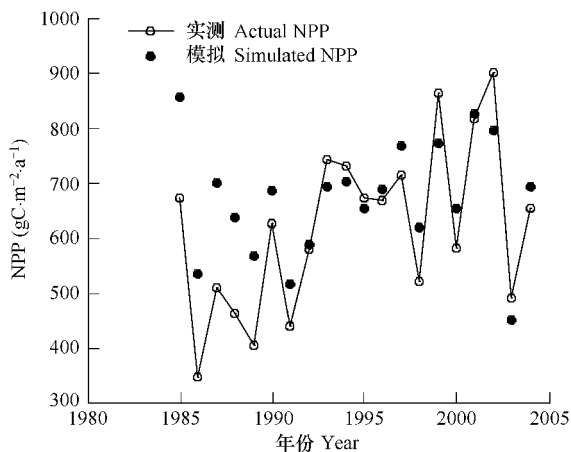


图 1 近 20a 湿地松林实测 NPP 与模拟 NPP

Fig. 1 Actual and simulated NPP of *Pinus elliottii* forest in recent 20 years

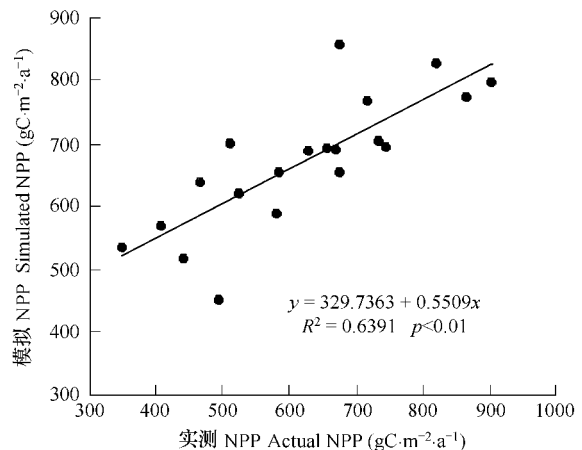


图 2 近 20a 湿地松林实测 NPP 与模拟 NPP 相关分析

Fig. 2 Relation analyze between actual and simulated NPP of *Pinus elliottii* forest in recent 20 years

3.2 湿地松林 GPP、NPP 年际变化

模拟结果表明,1993~2004 年,湿地松林 GPP、NPP 年平均值分别为 $1\,941\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 、 $695\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$; GPP 年总量变化在 $1\,777\sim2\,160\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间, NPP 年总量变化在 $453\sim828\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$ 之间,均表现出十分明显的年际变化,其中 1997 年、1999 年、2001 年和 2002 年 GPP、NPP 总量相对较大,2003 年 GPP、NPP 总量较小;GPP 最大值出现在 2002 年, NPP 最大值出现在 2001 年, GPP 最小值出现在 1993 年, NPP 最小值出现在 2003 年(图 1 和图 4)。

1993~2004 年,湿地松林 GPP、NPP 总量呈现高值、低值波浪变化,但总体上呈缓慢增长趋势。如将研究时段每 4a 分为 1 个时段,可以发现 1993~1996 年、1997~2000 年和 2001~2004 年的 GPP 年总量平均分别为 1826 、 1972 、 $2026\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$, NPP 年总量平均分别为 687 、 705 、 $693\text{ g C m}^{-2}\text{ a}^{-1}$,可见在 1993~2004 年 GPP 和 NPP 总量总的趋势是增长的。

3.3 湿地松林 GPP、NPP 年际变化与气候变化的关系

千烟洲站 1993~2004 年平均温度和降水的分布曲

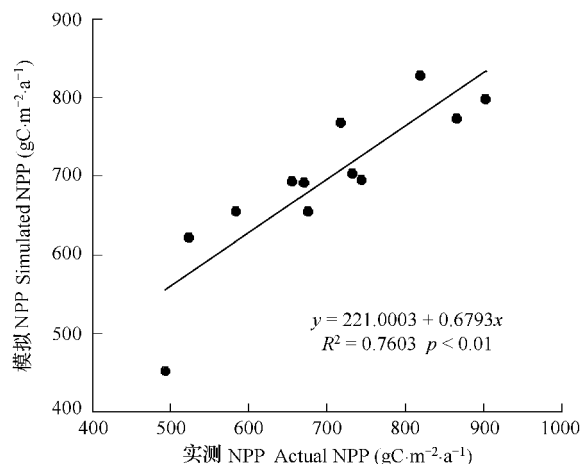


图 3 1993~2004 年湿地松林实测 NPP 与模拟 NPP 相关分析

Fig. 3 Relation analyze between actual and simulated NPP of *Pinus elliottii* forest during 1993~2004

线见图 5。从图 5 中可见,温度的波动幅度较大,总体上亦呈上升的趋势,并呈波浪式增加形式。在 1994 ~ 1996 年和 1998 ~ 2000 年有一个明显的下降时期,1993 年平均温度为 17.46℃,在 1996 年达到历年最低值 17.39℃,1996 年后温度上升迅速,于 1998 年达到最高值 18.97℃。1993 ~ 2004 年平均温度为 17.94℃,从总体上来看,温度呈上升的趋势。降水量在 1993 ~ 2004 年内平均为 1 577.6 mm,从图 5 可见,最大值出现 2002 年,降水量为 2 410.4 mm。最大值出现年份的第二年为降水量最低的 2003 年份,降水量仅为 944.9 mm。

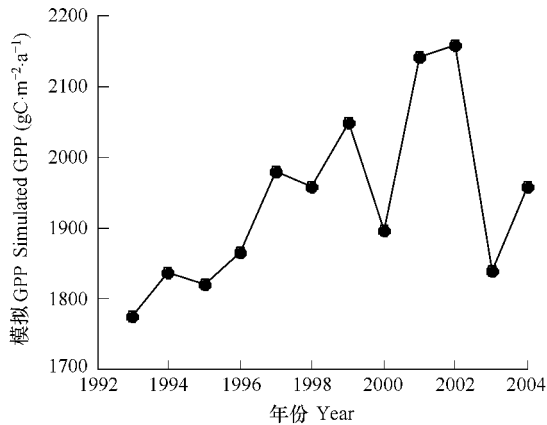


图 4 1993 ~ 2004 年湿地松林 GPP 变化曲线图

Fig. 4 Curve of GPP change of *Pinus elliotii* forest during 1993 ~ 2004

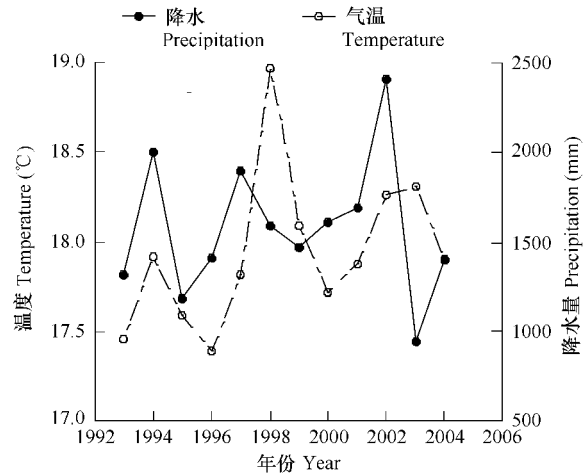


图 5 1993 ~ 2004 年温度和降水量变化曲线图

Fig. 5 Curve of temperature and precipitation change during 1993 ~ 2004

将湿地松林 GPP、NPP 年际变化图与降水量年际变化图进行比较,可以发现:年降水量与 GPP、NPP 的相关拟合曲线十分相似。图 6 和图 7 分别为 GPP、NPP 估算值与研究时段内的年降水量相关关系图,相关分析表明,GPP、NPP 年际变化同降水量显著正相关(GPP: $R = 0.5988$ $p < 0.05$; NPP: $R = 0.6746$ $p < 0.01$)。但温度与 GPP、NPP 年际变化相关性较弱。这说明在研究时段内,降水量是控制该地区湿地松林 GPP、NPP 年际变化的主要气候因子。

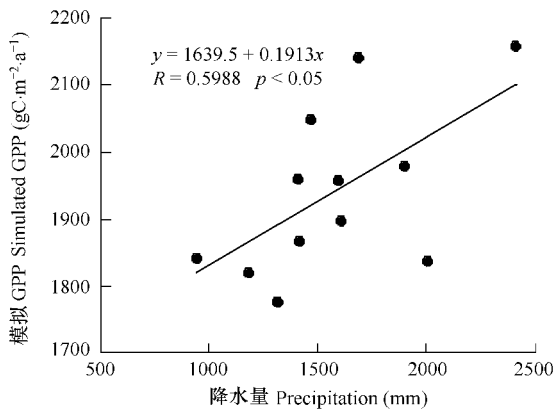


图 6 湿地松林模拟 GPP 与降水相关分析

Fig. 6 Relation analyze between simulated GPP of *Pinus elliotii* forest and precipitation

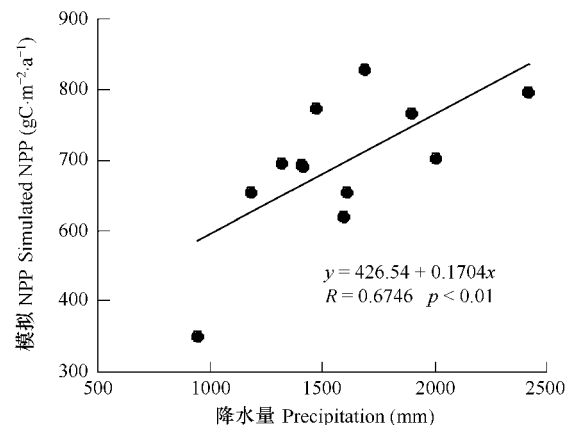


图 7 湿地松林模拟 NPP 与降水相关分析

Fig. 7 Relation analyze between simulated NPP of *Pinus elliotii* forest and precipitation

3.4 未来气候变化情景 GPP 与 NPP 的变化

未来气候变化不同情景下 GPP、NPP 的模拟值见表 2,通过模拟 CO₂ 增加但气候不变化、气候变化而 CO₂ 不增加以及 CO₂ 增加气候也变化来区别和综合 CO₂ 升高和气候变化的效应。

在 CO_2 增加但气候不变的情况下,预测的 GPP、NPP 均有较小的减少($\text{C}_2\text{T}_0\text{P}_0$),但均不超过 1.5%。

在 CO_2 不增加但气候变化的情况下,预测的 GPP、NPP 对温度和降水的变化有不同的响应。温度的单独变化以及与降水的协同变化大都不利于 GPP 的增长,但在温度升高 1.5°C 且降水增加情景下 GPP 增长了 1.13% ($\text{C}_0\text{T}_1\text{P}_1$);降水的单独变化亦有利于 GPP 的增长。温度和降水同时变化以及温度的单独变化都不利于 NPP 的积累,但降水的单独变化有利于 NPP 的积累。

当 CO_2 浓度和气候改变时,预测的 GPP、NPP 对 CO_2 浓度、温度和降水的变化亦有不同的响应。预测的 GPP 正向响应了降水的变化,同时正向响应了温度升高 1.5°C 且降水变化,但反向响应了温度升高 3.0°C 且降水变化;预测的 NPP 仅正向响应了降水的变化。

表 2 湿地松林情景变化前后 NPP 及 GPP 变化表

Table 2 Simulated NPP and GPP of *Pinus elliottii* forest responses to the different climatic scenario in the future

情景 Scenario	GPP 模拟值 Simulated GPP ($\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)			NPP 模拟值 Simulated NPP ($\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$)		
	P_{-1}	P_0	P_1	P_{-1}	P_0	P_1
C_0T_0	1983	1941	1979	711	695	709
C_0T_1	1914	1927	1963	646	651	664
C_0T_2	1751	1787	1812	556	568	577
C_2T_0	1959	1909	1951	708	689	704
C_2T_1	1892	1907	1942	644	649	661
C_2T_2	1738	1772	1794	557	568	576

C_0 为 CO_2 浓度不变, C_2 为 CO_2 浓度倍增; T_0 为温度不变, T_1 为温度增加 1.5°C , T_2 为温度增加 3.0°C ; P_0 为降水不变, P_1 为降水增加 10%, P_{-1} 为降水减少 10% C_0 : CO_2 concentration unchange; C_2 : double CO_2 ; T_0 : temperature unchanged; T_1 : temperature increase 1.5°C ; T_2 : temperature increase 3.0°C ; P_0 : precipitation unchanged; P_1 : precipitation increase 10%, P_{-1} : precipitation decrease 10%

4 结论与讨论

(1) 在 1993 ~ 2004 研究时段内,湿地松林 GPP 和 NPP 的年总量变化在 $1\,777 \sim 2\,160 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间和 $453 \sim 828 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 之间, GPP、NPP 年平均值分别为 $1\,941 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $695 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 随时间变化呈缓慢增长趋势,其原因主要与全球大气 CO_2 浓度增加以及研究时段内该地区降水量有所增加有关。这一变化趋势与朴世龙等^[7]估算的 NPP 变化趋势是一致的。从与其它研究结果的比较来看, BIOME-BGC 对亚热带湿地松林 NPP 的模拟结果高于诸多研究^[4,6,8,18]对常绿针叶林的模拟值,这与大部分学者研究的常绿针叶林分布于温带与寒带有关。尽管研究区域内 NPP 模拟结果大于其他诸多学者模拟值,但仍在实测的常绿针叶林的 NPP 范围之内^[19,20]。

(2) 在研究时段内,温度对于湿地松林 GPP 和 NPP 年际变化的影响不大,降水是控制湿地松林 GPP ($R = 0.5988 \text{ } p < 0.05$)、NPP ($R = 0.6746 \text{ } p < 0.01$) 年际变化的主要影响因子。有研究亦指出影响森林生态系统 NPP 水平和格局的主导因素是降水量^[20],对中国东北净初级生产力年际变化的研究指出^[21], NPP 的年际变化不仅年降水量呈正相关 ($R = 0.3 \text{ } p < 0.01$), 而且与温度呈负相关 ($R = -0.31 \text{ } p < 0.01$)。温度不能成为影响湿地松林 GPP、NPP 年际变化主导因子的原因可能是温度对于物质积累的双重效应引起的:总体上呈上升趋势的温度变化一方面加速了植被的光合作用、呼吸作用,有利于植被干物质的积累;另一方面加速了枯枝落叶的分解、土壤 CO_2 的释放,不利于干物质的积累,同时大气 CO_2 浓度增加亦有可能抵消这种作用。

(3) 通常来说,决定模型模拟精度最重要的因素包括数据来源以及模型参数。BIOME-BGC 模型运行需要不同类型的参数^[16],而获得大量的实测参数是较困难的,并且一些参数在国内尚未研究。本文在部分参数实测的情况下,大部分参数参照相关的文献以及模型本身自带的参数。此外,作为驱动模型运转的气象数据,辐射数据只有近 8a 的资料,对其他年份辐射数据进行插补亦会造成一定的误差来源。由于模型从气象因子出发而没有考虑林分的年龄,人工湿地松林幼苗 8a 后才开始逐渐郁闭,模型中的冠层水分截留系数及冠层比叶面积等参数在林分郁闭前为动态变化的参数,而文中采用的是林分郁闭后稳定态的参数,因此 1993 年之前

模型模拟 NPP 值大于实测结果;对于郁闭前林分 NPP 的模拟,应采用相应的幼龄林分冠层参数及叶面积参数。1993 年始林分郁闭后,模型中的生态生理参数接近林分实际情况,因此,1993 年~2004 年 NPP 模型模拟值与实际值十分接近。BIOME-BGC 模型检验结果表明 BIOME-BGC 能较好地模拟已经郁闭的中幼龄林分,这对于以模型手段预测我国南方大面积人工林对全球变化的响应具有重要的启发。

(4) Cao^[22]指出全球 CO₂增加,肥力降低,且当 CO₂浓度超过 500 μmol/mol 时,相对的 NPP 增幅明显地减少。本研究得出的结论为 CO₂浓度倍增(>600 μmol/mol),NPP 基本没有什么增加,甚至还有可能略有减少,即 CO₂浓度增加对 NPP 的积累效应表现并不明显(表 2)。在 CO₂浓度不增加条件下,预测的 GPP、NPP 对温度和降水的变化有不同的响应,GPP 仅在降水单独变化和温度升高 1.5℃且降水增加情景下有少量的增长,有利于 NPP 积累的情景为降水的单独变化。当 CO₂浓度倍增和气候改变时,预测的 GPP 正向响应了降水的变化,同时正向响应了温度升高 1.5℃且降水变化;正向响应 NPP 的情景条件是降水的变化。通常森林植被 NPP 与温度和实际蒸发量均存在正相关关系^[23],温度升高有可能使 NPP 增加,多项研究亦表明植被 GPP、NPP 正向响应于温度的升高和降水的增加^[15,24,25]。但这并不意味着温度升高必然引起生态系统 NPP 的增加,甚至使 NPP 减少。研究表明,温度的升高反向响应于亚热带湿地松林 GPP、NPP 的增长,尤其是温度增加 3.0℃时湿地松林 GPP 增长和 NPP 积累受到抑制。这是因为温度的升高加速了土壤水分的蒸发,降低了土壤的含水量,从而降低了生态系统的生产力。就亚热带森林而言,如果不考虑 CO₂的影响,由于温度升高引起的蒸发加大、呼吸作用加强、云量增加等一系列问题将使光合作用效果下降,导致亚热带湿地松林 GPP、NPP 的下降。

本研究仅仅依据气候与 GPP、NPP 之间的平衡关系进行响应研究,尚未考虑植被对 CO₂浓度和气候的敏感度、生态系统尺度上植被的演替等过程以及植被在气候变化过程中的生理、生态、生长等方面的适应与驯化等因素。因此湿地松林 GPP、NPP 对未来气候变化情景的响应研究还有待于进一步开展。

References:

- [1] Feng Z W, Wang X K, Wu G. Biomass and Productivity of Forest Ecosystem in China. Beijing: Science Press, 1999.
- [2] Lieth H. Modeling primary productivity of the world. In: Lieth H, Whittaker R H. Primary productivity of the Biosphere. Vol. 14. New York: Springer-Verlag, 1975. 237—263.
- [3] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and Terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363: 234—240.
- [4] Xiao X M, Melillo J M, Pan Y, McGuire A D, Helirich J. Net primary production of terrestrial ecosystems in China and its equilibrium responses to changes in climate and atmospheric CO₂ concentration. *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, 22: 97—118.
- [5] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, *et al.* Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): overview and key results. *Global Change Biology*, 1999, 5 (Suppl.): 1—15.
- [6] Liu Mingliang. Land-use/cover change and terrestrial ecosystem phytomass carbon pool and production in China. In: The Doctoral Dissertation of the Institute of Remote Sensing Applications. CAS, 2001.
- [7] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Terrestrial net primary production and its spatio-temporal patterns in China during 1982—1999. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2001, 37(4): 563—569.
- [8] Sun R. Effect of climate change of terrestrial net primary productivity in China. *Journal of Remote Sensing*, 2001, 5(1): 58—61.
- [9] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2002, 292: 2320—2322.
- [10] Uchijima Z, Seino H. Agriclimatic evaluation of net primary productivity of nature vegetation. *The Society of Agricultural meteorology of Japan*, 1985, 40: 343—352.
- [11] Knorr W, Heimann M. Impact of drought stress and other factors on seasonal land biosphere CO₂ exchange studied through an atmospheric tracer transport model. *Tellus*, 1995, 47B: 471—489.
- [12] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications. I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecology Model*, 1988, 42: 125—154.
- [13] Running S W, Hunt R E. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale

- models. Ehleringer J R and Field C B. Scaling Physiologic Processes; Leaf to Globe. San Diego: Academic Press, 1993. 141 — 158.
- [14] Yang X, Wang M X, Huang Y. Modeling study of terrestrial carbon flux response to climate change I. past century. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 2: 270 — 277.
- [15] Zhen Y R, Zhou G S, Zhang X S, *et al.* Sensitivity of terrestrial ecosystem to global change in China. *Acta Botanica Sinica*, 1997, 39(9): 837 — 840.
- [16] White M A, Thornton P E, Running S W. *et al.* Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls. *Earth Interactions*, 2000, 4: 1 — 85.
- [17] Yuan X H. Effects on organic carbon storage in different land use systems in red earth hilly area. The Master Dissertation of the Institute of Remote Sensing Applications. CAS, 1999.
- [18] Luo T X. Distribution of the net primary production of forest ecosystems in China. Ph. D. Thesis of Commission of Integrated Survey of Natural Resources, Chinese Academy of Sciences, 1996.
- [19] Liu S R, Xu D Y, Wang B, *et al.* The impacts of climate change on productivity of the forests in China. In: Xu Deying ed. A Study on the Impacts of Climate Change on Forests in China. Beijing: China Science and Technology Press, 1997. 75 — 93.
- [20] Liu S R, Guo Q S, Wang B. Prediction of net primary productivity of Forests in China in Response to Climate Change. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(5): 478 — 483.
- [21] Gao Z Q, Liu J Y, Cao M K, *et al.* Impacts of land use and climate change on regional net primary productivity. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(4): 581 — 591.
- [22] Cao M K, Woodward F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change. *Nature*, 1998, 393: 249 — 252.
- [23] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, *et al.* Potential net primary production in South America: application of a global model. *Ecological Applications*, 1991, 1(4): 399 — 429.
- [24] Yan S J, Hong E, Wu C Z, *et al.* Impact of climate variation on net primary productivity of natural vegetation in Fujian in recent 41 years. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 522 — 526.
- [25] Su H X, Sang W G. Simulations and analysis of net primary productivity in *Quercus liaotungensis* forest of Donglingshan Mountain range in response to different climate change scenarios. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(11): 1281 — 1291.

参考文献:

- [1] 冯宗炜, 王效科, 吴钢. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] 刘明亮. 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. 中国科学院遥感应用研究所博士论文, 2001
- [7] 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*, 2001, 37(4): 563 ~ 569.
- [8] 孙睿. 气候变化对中国陆地生态系统净第一性生产力影响的初步研究. *遥感学报*, 2001, 5(1): 58 ~ 61.
- [14] 杨昕, 王明星, 黄耀. 地-气间碳通量气候响应的模拟 I. 近百年来气候变化. *生态学报*, 2002, 2: 270 ~ 277.
- [15] 郑元润, 周广胜, 张新时. 等. 中国陆地生态系统对全球变化的敏感性研究. *植物学报*, 1997, 39(9): 837 ~ 840.
- [17] 袁小华. 红壤丘陵区土地利用变化对陆地生态系统有机碳储量的影响. 中国科学院地理科学与研究所硕士论文, 1999
- [18] 罗天祥. 中国主要森林类型生物生产力格局及其数学模型. 中国科学院自然资源综合考察委员会博士论文, 1996.
- [19] 刘世荣, 徐德应, 王兵, 等. 气候变化对中国森林生产力的影响. 见: 徐德应主编, 气候变化对中国森林影响研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1997. 75 ~ 93.
- [20] 刘世荣, 郭泉水, 王兵. 中国森林生产力对气候变化响应的预测研究. *生态学报*, 1998, 18(5): 478 ~ 483.
- [21] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 等. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响. *地理学报*, 2004, 59(4): 581 ~ 591.
- [24] 闫淑君, 洪伟, 吴承祯, 等. 福建近 41 年气候变化对自然植被净第一性生产力的影响. *山地学报*, 2001, 19(6): 522 ~ 526.