

长白落叶松林生态系统净初级生产力对气候变化的响应

何丽鸿 王海燕 王璐 王岳

(北京林业大学林学院)

摘要:应用 BIOME-BGC 模型和样地调查数据,模拟并验证了吉林省汪清林业局长白落叶松林生态系统净初级生产力(NPP)在 1980—2013 年间的动态变化情况,分析了 NPP 对区域气候变化的响应以及在 SRES A2 和 B2 排放情景下长白落叶松林生态系统 NPP 的动态变化。结果表明:BIOME-BGC 模型较好地模拟了样地 NPP 的动态变化,且模拟 NPP 与样地实测生产力的动态变化规律相似;在 1980—2013 年间,长白落叶松林生态系统 NPP(以碳计算)均值为 $477.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,波动范围是 $286.60 \sim 566.27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$;研究区内长白落叶松林生态系统 NPP 与年降水量呈显著正相关;在未来 A2 和 B2 排放情景下,NPP 对未来降水量增加的响应呈正向,对年均温度增加呈负相关,其中温度升高对 NPP 的负效应要大于降水量增加对 NPP 的正效应;此外, CO_2 浓度增加有利于长白落叶松林生态系统 NPP 的增加。

关键词:净初级生产力;气候变化;BIOME-BGC

中图分类号:S718.51 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)09-0028-09

HE Li-hong; WANG Hai-yan; WANG Lu; WANG Yue. **Response of net primary productivity of *Larix olgensis* forest ecosystem to climate change.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(9) 28-36 [Ch,34 ref.] College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Based on the BIOME-BGC model and field-measured productivity data, a modeling study was conducted and tested to estimate the dynamic changes of net primary productivity (NPP) of *Larix olgensis* forest ecosystem in Wangqing Forestry Bureau, Jilin Province in northeastern China during the period of 1980-2013. The response of NPP to regional climate change and the dynamics of NPP under the SRES A2 and B2 scenarios were explored. The results were shown as follows: 1) the model-simulated NPPs were in accordance with the field-measured productivity, suggesting a successful modeling of NPP patterns by the BIOME-BGC model. 2) The mean NPP of *L. olgensis* was $477.74 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, fluctuating between 286.60 and $566.27 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ during 1980-2013. 3) There was a significant correlation between the NPP of *L. olgensis* forest ecosystem and annual precipitation. Under the SRES A2 and B2 scenarios, the NPP would have a positive response to the increase of annual precipitation. The temperature would have a stronger effect than the precipitation. The elevated CO_2 would benefit the increase of NPP.

Key words net primary productivity (NPP); climate change; BIOME-BGC

气候变化和大气 CO_2 浓度升高是影响陆地森林生态系统的重要因子。在全球变暖背景下,近百年来中国年地表平均气温明显增加,温度增加幅度约为 $0.5 \sim 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$,增温的速率为 $0.08 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ a}$,而降水量表现出较大的年际波动^[1]。此外,IPCC 第五次评

估报告(AR5)^[2]也进一步明确了自工业革命以来,大气中 CO_2 浓度显著增加,由工业革命前期的 $280 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 上升到 2011 年的 $391 \mu\text{mol}/\text{mol}$ 。这些气候要素的变化必然会导致森林生态系统的结构和功能发生变化,进而影响森林生态系统的碳水平

收稿日期:2014-12-01 修回日期:2015-02-05

基金项目:国家自然科学基金项目(31270697)。

第一作者:何丽鸿。主要研究方向:土壤学、植物营养生态学。Email:leehomh@163.com 地址:100083 北京市清华东路 35 号北京林业大学林学院。

责任作者:王海燕,博士,副教授。主要研究方向:土壤学、植物营养学。Email:haiyanwang72@aliyun.com 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

衡^[3]。植被净初级生产力(Net primary productivity, NPP)是判定森林生态系统碳循环和调节生态过程的主要因子,也是表征植物活动的重要变量,其变化会显著影响陆-气之间的碳循环过程^[4]。因此,研究森林生态系统 NPP 对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应以及预测其在未来气候情景下的可能变化情况具有重要的理论和现实意义。

长白落叶松(*Larix olgensis*)在我国速生用材树种中占据着重要位置。在截至 2000 年的全国营造速生丰产林计划中,长白落叶松占造林总面积的 10% 左右^[5],其 NPP 变化对我国木材总蓄积量有重要影响。在对森林 NPP 时空动态变化的研究中,传统的测定森林 NPP 方法只能获得特定时间地点的 NPP,无法直接全面地测量区域以及全球尺度上的森林生态系统 NPP,更不能就森林生态系统 NPP 对未来气候变化情景的响应做出机理性的预测。而基于植被生理生态过程的模型能够准确地模拟植被对不同气候情景下的响应,这也成为研究森林生产力动态变化的重要方法^[5-6],其中 BIOME-BGC 模型是典型的过程模型,它是从植物机理出发而建立的植被净初级生产力的机理模型,在研究大尺度植被净初级生产力和全球碳循环过程中被广泛应用^[7]。有研究发现,全球气候变化对森林生态系统产生的影响在中高纬度地区表现得更为显著^[8],而我国东北地区处于中高纬度地区,是我国气候变暖影响最显著的地区之一^[9]。

本研究在对 BIOME-BGC 模型进行本地参数化以及验证后,模拟 1980—2013 年间吉林汪清林业局长白落叶松人工林的生长变化,明确了影响该地区生态系统净初级生产力的主要气候限制因子,论述了长白落叶松林对区域气候变暖的响应,并通过模型模拟了在未来不同气候情景下 NPP 的变化特征,旨在为长白落叶松林的科学经营和管理提供理论依据。

1 研究区概况

研究地点位于吉林省汪清林业局金沟岭林场(130°05'~130°20'E,43°17'~43°36'N),属于长白山系老罗岭山脉雪岭支脉,海拔 550~1 100 m。属季风气候,全年平均气温 3.9℃,积温 2 144℃,年降雨量为 600~700 mm,多集中在 7 月份,植物生长期为 120 d 左右。林内优势树种为长白落叶松,主要伴生树种有云杉(*Picea jezoensis*)、冷杉(*Abies nephrolepis*)、色木槭(*Acer mono*)、水曲柳(*Fraxinus manschurica*)等。地貌属低山丘陵地,土壤类型以暗棕壤为主。

2 模型与方法

2.1 BIOME-BGC 模型简介

BIOME-BGC 模型是由 FOREST-BGC 模型演变而来,是用来模拟全球和区域生态系统碳、氮和水循环的生物地球化学循环过程模型^[10]。模型主要驱动数据分为 3 类:气候日变化数据、样地参数及植被的生理生态参数。模型模拟包括 2 个阶段:Spin-up 模式和常规模式。Spin-up 模式过程是为了使模型的状态变量达到稳定状态,主要过程是根据已设定的植被生理生态参数,然后运用工业革命前 CO₂ 浓度值、氮沉降值以及研究样地的气象数据进行长期模拟,直至达到稳定状态。常规模式是运用实际的气象数据和 CO₂ 浓度数据模拟生态系统的碳水动态变化。BIOME-BGC 模型根据不同的生态系统类型,将自然植被划分为落叶阔叶林、常绿阔叶林、常绿针叶林、灌木林、落叶针叶林、C3 草地和 C4 草地 7 种类型,不同类型对应有不同的生理参数文件^[11]。

2.2 数据来源与处理

本研究采用汪清林业局金沟岭林场 3 块长白落叶松林纯林样地的历年实测生产力数据,对 BIOME-BGC 模拟的 NPP 年际变化进行验证。3 块长白落叶松林林龄在 48~50 a 之间,林相较好。样地面积在 0.078~0.250 hm² 之间,数据为 1988—2010 年的观测数据,复测期为 2~3 年。3 块长白落叶松林样地 1988—2010 年实测生产力数据由中国林业科学研究院资源信息研究所提供。每次调查的因子包括树种、5 cm 以上树木的胸径、林分平均高和立地因子。样地 NPP 数据通过该区主要树种的生物量方程和调查间隔计算获得。BIOME-BGC 模型所需的气候驱动数据包括:最高温度、最低温度、平均温度、降水量、饱和水汽压差和短波辐射,这些数据来自国家气象信息中心,利用距离 3 块样地最近的国家基准气候站延吉气象站气象数据,通过山地气候模型 MT-CLIM 估算得到。研究样地 1980—2013 年区域气候分析所需的气象资料来自国家气象信息中心,通过 1980—2013 年间的年均气温和降水量值,分别得到研究区域 33 年的温度和降水量的时间平均值,再求出研究区域年均温度和降水量值分别对其时间平均值的偏差,得到该地区的年均温度和降水量距平,用于分析研究区域内气候变化。模型所需样地参数:海拔高度、坡度、土壤机械组成、土壤自然含水率等均采用实地调查和测定的方式获取(表 1)。BIOME-BGC 模型中所需生理生态参数部分采用和借鉴模型中提供的落叶针叶林参数,由于模型并没有单独针对长白落叶松林生态系统而提供参数,为

为了使模型能够更精准地模拟长白落叶松林生态系统净初级生产力,通过查阅文献找出模型所需要的各项生理生态参数,通过这些参数来驱动模型计算长

白落叶松林 NPP。本文中使用的长白落叶松生理生态参数见表 2。

表 1 长白落叶松林样地概况
Tab. 1 Survey of *L. olgensis* stands

样地号 Plot No.	海拔 Elevation/m	面积 Area/hm ²	林龄 Age/a	林分密度 Stand density/(tree·hm ⁻²)	土壤机械组成 Soil mechanical composition/%			土壤自然含水量 Soil moisture content/%
					砂粒 Sand	粉粒 Silt	粘粒 Clay	
1	760	0.078	50	452	39	37	24	27.7
2	660	0.250	48	372	41	37	22	24.2
3	640	0.203	48	415	38	39	23	24.3

表 2 长白落叶松的 BIOME-BGC 模型参数值
Tab. 2 Ecophysiological values of *L. olgensis* used to parameterize BIOME-BGC

类别 Classification	参数 Parameter	值 Value
年更新与死亡率 Yearly turnover and mortality	叶与细根周转率 Leaf and fine root turnover	0.50 ^[12]
	活立木周转率 Live wood turnover	0.70
	整株植物死亡率 Whole plant mortality	0.005
	火烧死亡率 Fire mortality	0
碳分配比例 Carbon allocation	新生细根与叶片的碳分配比 New fine root carbon to new leaf carbon allocation	1.0 ^[13]
	新生茎与叶片的碳分配比 New stem carbon to new leaf carbon allocation	2.2 ^[13]
	新生木质组织与所有木质组织的碳分配比 New live wood carbon to new total wood carbon allocation	0.1 ^[13]
	粗根与茎的碳分配比 Coarse root carbon to stem carbon allocation	0.23 ^[13]
碳氮比 Carbon to nitrogen ratio	叶片碳氮比 Leaf carbon to nitrogen ratio	25.8 ^[14]
	叶片枯落物碳氮比 Litter carbon to nitrogen ratio	111.9 ^[14]
	细根碳氮比 Fine root carbon to nitrogen ratio	42.0 ^[15]
	活立木碳氮比 Live wood carbon to nitrogen ratio	42.0 ^[15]
	枯死木碳氮比 Dead wood carbon to nitrogen ratio	442 ^[16]
易分解物质、纤维素和木质素比例 Allocation of labile, cellulose and lignin	细根中易分解物质所占比例 Fine root labile proportion/%	34
	细根中纤维素所占比例 Fine root cellulose proportion/%	44
	细根中木质素所占比例 Fine root lignin proportion/%	22
	叶片枯落物中易分解物质所占比例 Leaf litter labile proportion/%	39 ^[17]
	叶片枯落物中纤维素所占比例 Leaf litter cellulose proportion/%	44 ^[17]
	叶片枯落物中木质素所占比例 Leaf litter lignin proportion/%	17
	枯死木中纤维素所占比例 Dead wood cellulose proportion/%	71
	枯死木中木质素所占比例 Dead wood lignin proportion/%	29
叶片与冠层参数 Parameter of leaf and canopy	比叶面积 Specific leaf area/(m ² ·kg ⁻¹)	8.2
	叶表面积与投影叶面积比 All sided to projected leaf area index ratio	2.6
	阴生与阳生叶比叶面积比例 Shaded to sunlit specific leaf area ratio	2.0
	截留系数(每天) Daily water interception coefficient	0.045
	消光系数 Light extinction coefficient	0.51
	Rubisco 氮含量与叶片氮含量比 Fraction of leaf nitrogen in Rubisco	3.3
导度、水势和饱和水汽压差 Conductance, water potential and VPD	最大气孔导度 Maximum stomatal conductance/(m·s ⁻¹)	0.002 2 ^[18]
	表皮导度 Cuticular conductance/(m·s ⁻¹)	0.000 06
	边界层导度 Boundary layer conductance/(m·s ⁻¹)	0.09
	气孔开始缩小时叶片水势 Leaf water potential at initial g_{smax} reduction/KPa	-700
	气孔完全闭合时叶片水势 Leaf water potential at final g_{smax} reduction/KPa	-2 600
	气孔开始缩小时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit at initial g_{smax} reduction/Pa	800 ^[18]
气孔完全闭合时饱和水汽压差 Vapor pressure deficit at final g_{smax} reduction/Pa	3 200 ^[18]	

关系。如图2所示,模拟 NPP 与实测值的年际变化波动趋势基本一致,通过相关性分析发现,3 块长白落叶松林样地模拟的 NPP 与实测值之间都有显著的相关关系($P < 0.05$)。同时对 3 块样地模拟 NPP 与实测值进行相对误差分析发现,3 样地的相对误

差波动范围分别是 0.47% ~ 17.38%、0.44% ~ 17.36% 和 0.60% ~ 18.17%。这些结果表明, BIOME-BGC 模型经过参数化后可以较好地模拟长白落叶松林 NPP 的变化趋势。

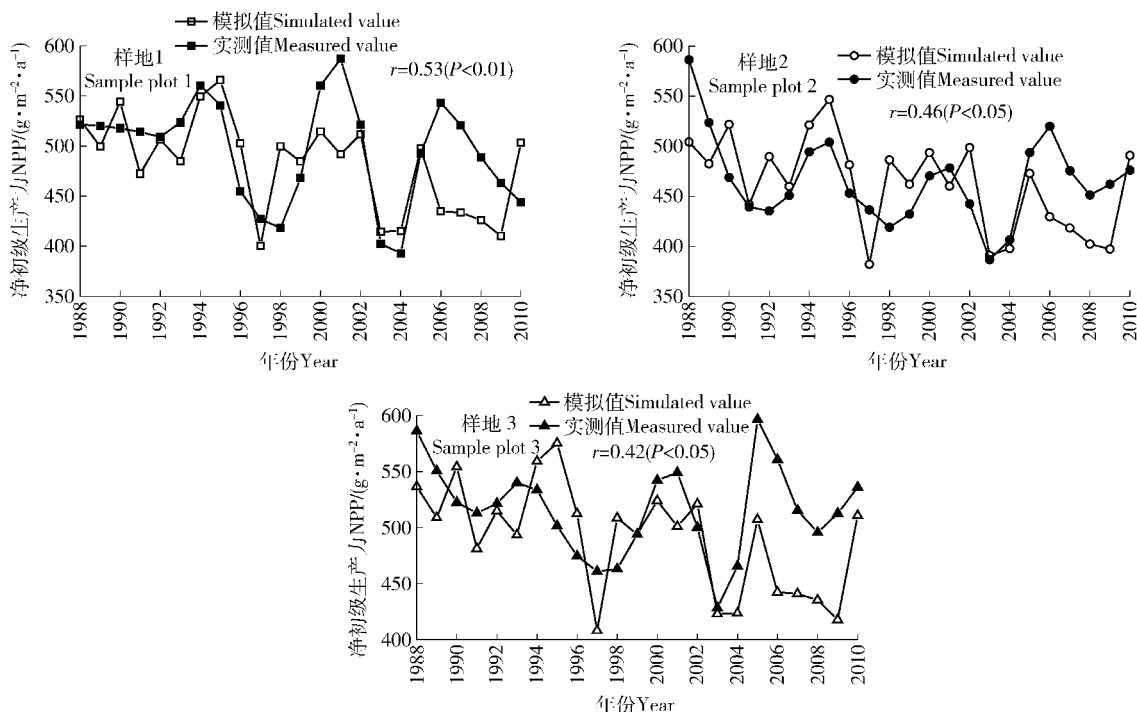


图2 1988—2010年3块长白落叶松林样地模拟 NPP 与实测值的年际动态变化

Fig. 2 Inter-annual change of the *L. olgensis* forest simulated NPP and the measured data in three sample plots during the period of 1988—2010

3.2 区域气候资料分析

通过金沟岭林场在 1980—2013 年间的年均气温和降水量值,分别得到该区域 33 年的温度和降水量的时间平均值,再求出该区域年均温度和降水量值分别对其时间平均值的偏差,即得到该地区的年均温度和降水量距平(图 3)。在 1980—2013 年期间,金沟岭林场地区气温波动较大,年均气温为 6.2 °C,变化范围为 5.2 ~ 7.2 °C,并且年均温以 0.02 °C/a ($P < 0.01$) 的速度递增。在 1980、1984 和 1987 年,年均温度相对较低,之后除了 2000 和 2012 年外,其他年份的年均气温都基本高于该地区的长期平均水平(1980—2010 年),而且年均气温在 1987—1989 年和 2000—2004 年期间明显上升;在此期间,降水变化趋势较为复杂,年际间的波动幅度较大,年均降水量为 534.9 mm,降水量最低的年份是 2011 年,仅为 319.7 mm,而降水量最高的年份是 2000 年,为 856.8 mm,降水量最高值和最低值相差 321.9 mm。

3.3 长白落叶松林 NPP 年际变化与区域气候变化关系

根据 BIOME-BGC 模拟结果表明(图 4),3 块长

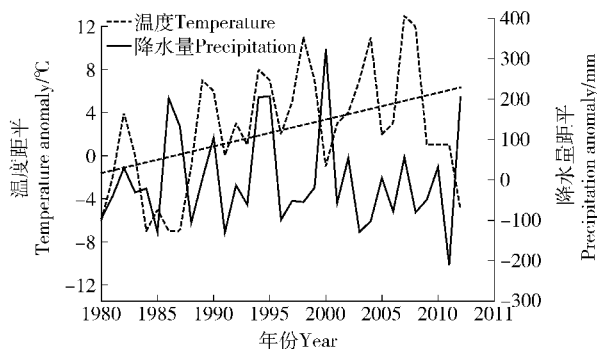


图3 1980—2013年研究区域内年均温度距平和降水量距平的变化

Fig. 3 Inter-annual variations in mean temperature and precipitation anomaly in the study area during the period of 1980—2013

白落叶松林样地在 1980—2013 年间的 NPP 均值波动范围为 286.60 ~ 566.27 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,年平均 NPP 为 477.74 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,并且在 1980—2013 年间,3 块样地 NPP 以 1.30 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速率整体呈现下降趋势,最小值出现在 2011 年(286.60 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$),最大值出现在 1995 年(566.27 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)。

分析在 1980—2013 年间 BIOME-BGC 模拟的长白落叶松林 NPP(3 块样地平均值)与气候因子的关

系(图5),结果表明,NPP的年际变化与年降水量之间呈极显著的正相关关系($r = 0.62, P < 0.01$),与年均温度之间无明显相关关系。这说明在1980—2013年间,降水是控制汪清金沟岭林场长白落叶松林NPP年际变化的主要气候因子。

为了进一步了解研究区内长白落叶松林净初级生产力对气候因子的响应情况,本文分析了在1980—2013年期间,长白落叶松林每月NPP与当年每月降水量、每月平均温度之间的关系(图6)。结果表明,在每年4、8和9月份,长白落叶松林NPP与降水量呈显著正相关关系($P < 0.05$),并且在9月份表现出了极显著正相关关系($P < 0.01$);而在每年的1—4月份和11—12月份,长白落叶松林NPP与温度表现出了极显著的负相关关系($P < 0.01$),在6月份NPP与温度呈极显著的正相关

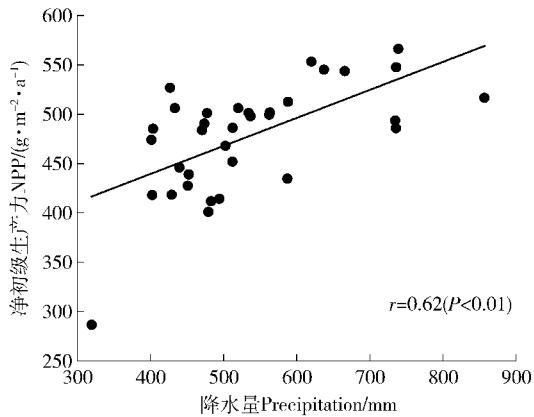


图5 BIOME-BGC 模拟的长白落叶松林 NPP 与年降水量和年平均温度之间的关系

Fig.5 Relationship of simulated NPP by BIOME-BGC with annual precipitation and annual average temperature in *L. olgensis* forest of the study area

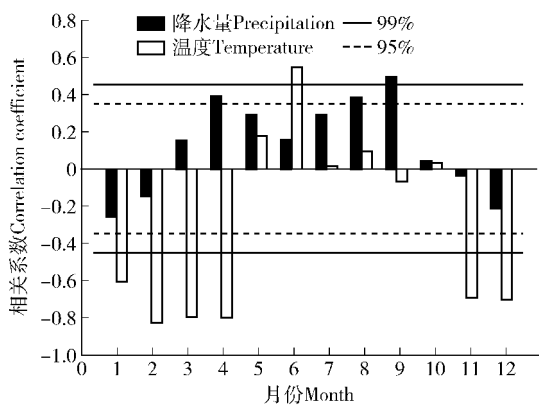


图6 模拟的长白落叶松林 NPP 与每月降水量(P)和每月平均温度(T)之间的相关关系

Fig.6 Correlation of simulated NPP of *L. olgensis* forest with monthly precipitation and monthly average temperature

3.4 未来气候情景下长白落叶松林 NPP 变化

BIOME-BGC 模拟预测在未来 CO₂浓度增加、降水增加和温度升高的情况下,长白落叶松林 NPP 变

化趋势如图7所示。在 SRES A2 和 B2 排放情景下,单独 CO₂浓度升高(C1T0P0)时,长白落叶松林 NPP 分别增加了 0.8% 和 0.54%;单独温度增加(C0T1P0)时,长白落叶松林 NPP 有减少趋势,分别减少了 5.14% 和 4.09%;单独降水量增加的情况下(C0T0P1),长白落叶松林 NPP 都有增加,分别增加了 1.53% 和 1.96%,但增加量要小于单独增加温度(C0T1P0)时 NPP 的减少量;当温度和降水量同时增加时(C0T1P1),长白落叶松林的 NPP 分别增加了 4.24% 和 2.52%,增加的幅度要小于单独增加降水量时(C0T0P1) NPP 增加的幅度;当 CO₂浓度和温度协同增加时(C1T1P0),长白落叶松林 NPP 分别减少了 4.34% 和 3.52%,减少幅度介于单独增加温度(C0T1P0)和 CO₂浓度与温度同时增加(C1T1P0)这2种情况之间;当 CO₂浓度、温度和降水量三者同时增加(C1T1P1)时,长白落叶松林 NPP 分别减少了 3.44% 和 1.97%。

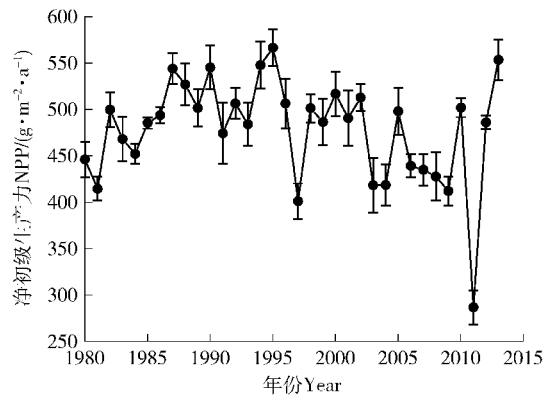
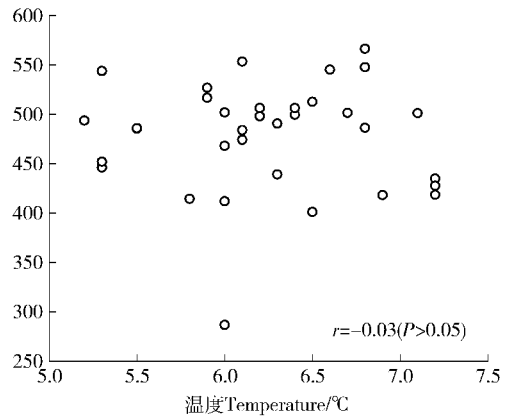


图4 基于 BIOME-BGC 模拟 1980—2013 年间 3 块长白落叶松林样地 NPP 平均值年际变化

Fig.4 Inter-annual variations in the mean simulated NPP of *L. olgensis* forest based on BIOME-BGC model in three sample plots during the period of 1980—2013



化趋势如图7所示。在 SRES A2 和 B2 排放情景下,单独 CO₂浓度升高(C1T0P0)时,长白落叶松林 NPP 分别增加了 0.8% 和 0.54%;单独温度增加(C0T1P0)时,长白落叶松林 NPP 有减少趋势,分别减少了 5.14% 和 4.09%;单独降水量增加的情况下(C0T0P1),长白落叶松林 NPP 都有增加,分别增加了 1.53% 和 1.96%,但增加量要小于单独增加温度(C0T1P0)时 NPP 的减少量;当温度和降水量同时增加时(C0T1P1),长白落叶松林的 NPP 分别增加了 4.24% 和 2.52%,增加的幅度要小于单独增加降水量时(C0T0P1) NPP 增加的幅度;当 CO₂浓度和温度协同增加时(C1T1P0),长白落叶松林 NPP 分别减少了 4.34% 和 3.52%,减少幅度介于单独增加温度(C0T1P0)和 CO₂浓度与温度同时增加(C1T1P0)这2种情况之间;当 CO₂浓度、温度和降水量三者同时增加(C1T1P1)时,长白落叶松林 NPP 分别减少了 3.44% 和 1.97%。

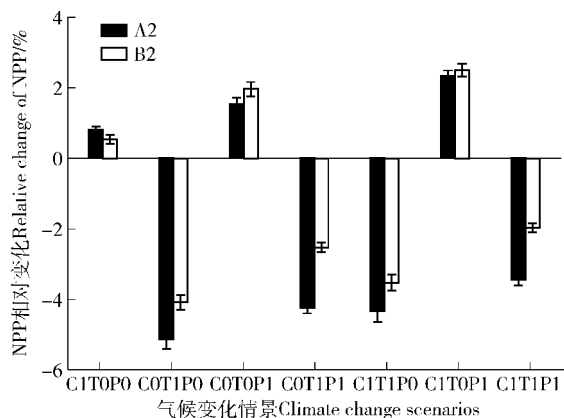


图7 在SRES A2和B2排放情景下长白落叶松林模拟NPP的相对变化

Fig. 7 Relative change of simulated NPP for *L. olgensis* forest under SRES A2 and B2 scenarios

4 讨论

4.1 长白落叶松林NPP的模拟

在过去,使用过程模型对森林生态系统NPP的模拟研究中,由于难以获得固定样地较长时间序列的生产力数据,在验证模型能否较好模拟NPP的过程中,大多数研究仅对模拟的NPP大小进行验证,很少检验模型能否模拟生产力的时间动态变化过程。本研究通过BIOME-BGC模型模拟的长白落叶松林生态系统NPP变化范围为286.60~566.27 g/(m²·a),这与范敏锐^[20]通过BIOME-BGC模型得到北京山区华北落叶松林(*Larix principis-rupprechtii*)NPP的变化范围225.49~519.38 g/(m²·a)较为一致。朱文泉等^[21]利用遥感估算模型得到中国典型落叶针叶林NPP实测平均值为490 g/(m²·a),本研究结果477.74 g/(m²·a)与其结果十分接近。在1988—2010年间,长白落叶松林生态系统模拟的NPP与样地生产力具有相似的时间动态过程,二者的相关系数在0.42~0.53之间($P < 0.05$),3块样地模拟NPP与实测NPP的相关系数都达到显著,这些都表明BIOME-BGC模型能较好地模拟研究区内长白落叶松林NPP在时间序列上的动态变化趋势。

4.2 长白落叶松林对区域气候变化的响应

作为影响森林生态系统变化的2大主要气候因子,温度和降水对森林生态系统植被的生长和碳、水循环过程有重要的影响。有证据表明,当前气候因子的变化已经引起森林生态系统植被分布和生产力等多方面的变化^[22]。对长白落叶松林生态系统的研究表明,NPP与年降水量变化之间呈显著正相关($r = 0.62, P < 0.01$),而与年均温度无明显相关性($r = -0.03, P > 0.05$),说明在1980—2013年之间,

降水量是控制研究区内长白落叶松林生态系统NPP年际变化的主要气候因子。这主要是因为研究区内土层较薄、石砾含量较多,不利于水分的保持,尤其在生长季的7—9月期间,随着温度升高,树木的蒸腾作用加剧,土壤水分蒸发加快,致使树木在生长发育期间所需的水分得不到充足供应,随着降水量的增加,可以及时补充土壤水分,减小树木生长期间的水分胁迫效应,同时能部分抵消高温对树木生长的抑制作用,促进树木的生长。而在上年11月到当年4月份期间,长白落叶松林生态系统NPP与温度呈显著负相关关系,这是由于随着温度的升高,呼吸作用增强,不利于树木有机物的积累。

4.3 未来气候变化情景下长白落叶松林生产力的动态

通过BIOME-BGC模拟发现(图6),在SRES A2和B2排放情景下,大气CO₂浓度增加和降水量增加都会促进长白落叶松林生态系统的NPP增加,而温度升高会导致长白落叶松林NPP减小。降水是森林生态系统植被生长和演变的主要限制性因子之一,降水量增加可以改善土壤水分条件,同时可提高土壤水分的有效性和土壤水分利用效率,降低土壤水分胁迫^[23]。降雨增加还能够部分或者完全补偿因温度引起的生产力下降。增加降水量对长白落叶松林生态系统生产力具有显著的促进作用,在SRES A2和B2情景中单独增加降水量(即COT0P1情景),促进了研究区内长白落叶松林生态系统NPP的增加。

温度升高对长白落叶松林生态系统NPP产生抑制作用,温度升高时可增大植被的呼吸速率,加速植被的干物质消耗,不利于森林植被对营养物质的累积,同时也会加剧土壤水分蒸发,导致森林植被水分胁迫增强,降低光合作用速率,最终限制植被生长^[24]。范敏锐等^[25]对北京主要森林类型净初级生产力的研究过程中也得到同样结果,单独温度升高对NPP影响表现为负效应。然而温度升高也可以加快森林生态系统内部物质循环进程,加快植被的光合作用速率,延长植被的生长季,从而提高植被的净初级生产力^[26]。蒋延玲等^[27]通过CENTURY模型模拟全球变化对兴安落叶松林(*Larix gmelinii*)碳循环的影响,结果表明:温度上升2℃时,兴安落叶松林的生物量和生产力均增加。赵国帅等^[28]利用GLOPEM-CEVSA模型模拟并分析了中国东北地区落叶针叶林NPP的时空分布格局及其影响因素时发现,当研究地区气温较往年偏高1~2℃时,落叶针叶林年均NPP会大幅增加。此外,温度升高在一定程度上还可加速土壤凋落物的分解,促进土壤养

分的矿化,加快养分的释放以及增加养分对植物生长的有效性^[29]。许多中高纬度森林的生长均在一定程度受到氮素供给的限制,所以由气候变暖导致土壤氮素有效性的升高可能间接地促进森林植被生产力的增加^[30-31]。本文的研究结果表明,在 SRES A2 和 B2 情景下单独增加温度时(即 COT1P0 情景),长白落叶松林 NPP 会有明显的减小趋势,说明温度升高不利于东北长白落叶松林 NPP 的累积,这可能是温度升高对 NPP 的抑制作用大于促进作用。

除了温度和降水的变化,CO₂浓度变化是影响森林植被 NPP 的另一重要因子。本文研究表明,在 CO₂浓度增加时(即 C1T0P0 情景),研究区内长白落叶松林 NPP 也会增加。这一结果在其他树种对气候变化响应的研究中也得到了验证。彭俊杰等^[32]应用 BIOME-BGC 模型和树木年轮数据探究华北地区典型油松林(*Pinus tabulaeformis*)生态系统 NPP 对未来气候变化的响应研究中发现,CO₂浓度升高有利于油松林生态系统 NPP 的增加。另外,当 CO₂浓度升高时,植物还可能通过降低自身的气孔导度来降低冠层蒸散,从而提高土壤水分的利用效率^[33];CO₂浓度升高还能够提高土壤氮的利用率,进而提高森林植被的光合作用效率,促进森林植被干物质的累积^[34]。

5 结 论

通过 BIOME-BGC 模型模拟长白落叶松林生态系统 NPP 的际年变化与样地实测 NPP 的值没有明显差异,且变化趋势也十分接近,表现出明显的相关关系。这表明在生态系统和区域水平上,BIOME-BGC 模型可以作为一种诊断工具用来研究全球变化背景下长白落叶松林生长响应机制。同时,模型模拟了研究区内 3 块长白落叶松林样地在 1980—2013 年间 NPP 平均值为 477.74 g/(m²·a),波动范围为 286.60~566.27 g/(m²·a)。研究区内长白落叶松林生态系统 NPP 与年降水量表现出明显的正相关关系,与年均温度无明显相关关系。通过分析 1980—2013 年期间长白落叶松林每月 NPP 与当年每月降水量、每月平均温度之间的关系发现,在每年 4、8 和 9 月份,长白落叶松林 NPP 与降水量呈显著正相关关系,并且在 9 月份表现出了极显著正相关关系;而在每年的 1—4 月份和 11—12 月份,长白落叶松林 NPP 与温度表现出了极显著的负相关关系。

另外,在 SRES A2 和 B2 排放情景下,长白落叶松林生态系统 NPP 与大气 CO₂浓度升高和降水量增加呈现正相关关系,与温度升高呈现显著的负相关关系,且温度升高对长白落叶松生产力的负效应

要大于 CO₂浓度升高和降水量增加的正效应。

参 考 文 献

- [1] IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [3] CAO M K, WOODWARD F I. Dynamic responses of terrestrial ecosystem carbon cycling to global climate change [J]. Nature, 1998, 393(6682): 249-252.
- [4] FIELD C B, BEHRENFELD M J, RANDERSON J T, et al. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components [J]. Science, 1998, 281(5374): 237-240.
- [5] PENG C H, ZHOU X L, ZHAO S Q, et al. Quantifying the response of forest carbon balance to future climate change in Northeastern China: model validation and prediction [J]. Global and Planetary Change, 2009, 66(3): 179-194.
- [6] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J]. 植物生态学报, 2001, 25(5): 603-608.
PIAO S L, FANG J Y, GUO Q H. Application of CASA model to the estimation of Chinese terrestrial net primary productivity [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2001, 25(5): 603-608.
- [7] HASENAUER H, PETRITSCH R, ZHAO M S, et al. Reconciling satellite with ground data to estimate forest productivity at national scales [J]. Forest Ecology and Management, 2012, 276: 196-208.
- [8] CHAPIN III F, WOODWELL G, RANDERSON J T, et al. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods [J]. Ecosystems, 2006, 9(7): 1041-1050.
- [9] FANG J Y, PIAO S L, FIELD C B, et al. Increasing net primary production in China from 1982 to 1999 [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2003, 1(6): 293-297.
- [10] 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 [J]. Earth Interactions, 2000, 4(3): 1-85.
- [11] RUNNING S W, HUNT E R. Generalization of a forest ecosystem process model for other biomes, BIOME-BGC, and an application for global-scale models [C]//EHLERINGER J R, FIELD C B. Scaling physiological processes: leaf to globe. San Diego: Academic Press, 1993: 141-158.
- [12] WANG X Y, MA L Y, JIA Z K, et al. Root inclusion net method: novel approach to determine fine root production and turnover in *Larix principis-rupprechtii* Mayr plantation in North China [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2014, 38(3): 388-398.
- [13] HAVRANEK W. Gas exchange and dry matter allocation in larch at the alpine timberline on Mount Patscherkofel [C]//TURNER H, TRANQUILLINI W. Establishment and tending of subalpine forest: research and management. Berichte: IUFRO Workshop, 1985: 135-142.
- [14] KLOEPPPEL B D, GOWER S T, TREICHEL I W, et al. Foliar carbon isotope discrimination in *Larix* species and sympatric evergreen conifers: a global comparison [J]. Oecologia, 1998,

- 114(2): 153-159.
- [15] NAMBIAR E S. Do nutrients retranslocate from fine roots? [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(8): 913-918.
- [16] ALLISON F, MURPHY R, KLEIN C. Nitrogen requirements for the decomposition of various kinds of finely ground woods in soil [J]. Soil Science, 1963, 96(3): 187-190.
- [17] ABER J D, MELILLO J M, MCCLAUGHERTY C A. Predicting long-term patterns of mass loss, nitrogen dynamics, and soil organic matter formation from initial fine litter chemistry in temperate forest ecosystems [J]. Canadian Journal of Botany, 1990, 68(10): 2201-2208.
- [18] WIESER G. Evaluation of the impact of ozone on conifers in the Alps: a case study on spruce, pine and larch in the Austrian Alps [J]. Phytol. Horn, 1999, 39(4): 241-252.
- [19] 气候变化国家评估报告编委会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 149.
- The Commission of National Assessment Report on Climate Change. National assessment report on climate change prepared by the commission[M]. Beijing: Science Press, 2007: 149.
- [20] 范敏锐. 北京山区森林生态系统净初级生产力对气候变化的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
- FAN M R. The response of net primary productivity on climate change in forest ecosystem of Beijing mountain area [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.
- [21] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算[J]. 植物生态学报, 2007, 31(3): 413-424.
- ZHU W Q, PAN Y Z, ZHANG J S. Estimation of net primary of productivity of Chinese terrestrial vegetation based on remote sensing[J]. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 413-424.
- [22] ZHANG Y J, ZHOU G S. Exploring the effects of water on vegetation change and net primary productivity along the IGBP Northeast China transect [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(7): 1481-1490.
- [23] 刘国华, 傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78.
- LIU G H, FU B J. Effects of global climate change on forest ecosystems [J]. Journal of Natural Resources, 2001, 16(1): 71-78.
- [24] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 等. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征[J]. 中国科学: D辑地球科学, 2004, 34(增刊II): 84-94.
- YU G R, WEN X F, LI Q K, et al. Chinese subtropical and temperate typical forest ecosystem respiration of seasonal patterns and environmental response characteristics[J]. Science in China: Series D Earth Science, 2004, 34 (Suppl. II): 84-94.
- [25] 范敏锐, 余新晓, 张振明, 等. CO₂倍增和气候变化对北京山区栓皮栎林 NPP 影响研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(6): 1278-1283.
- FAN M R, YU X X, ZHANG Z M, et al. The study of the impact of elevated CO₂ concentration and climate change on net primary productivity of *Quercus variabilis* forest in Beijing Mountain Area [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(6): 1278-1283.
- [26] KEYSER A R, KIMBALL J, NEMANI R, et al. Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high latitude forests [J]. Global Change Biology, 2000, 6 (Suppl. 1): 185-195.
- [27] 蒋延玲, 周广胜. 兴安落叶松林碳平衡和全球变化影响研究[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 481-484.
- JIANG Y L, ZHOU G S. Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(4): 481-484.
- [28] 赵国帅, 王军邦, 范文义, 等. 2000—2008年中国东北地区植被净初级生产力的模拟及季节变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 621-630.
- ZHAO G S, WANG J B, FAN W Y, et al. Vegetation net primary productivity in Northeast China in 2000-2008: simulation and seasonal change[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(3): 621-630.
- [29] KNORR W, PRENTICE I, HOUSE J, et al. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming [J]. Nature, 2005, 433 (7023): 298-301.
- [30] 杨金艳, 赵惠勋, 王传宽. 森林对氮饱和的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(4): 507-511.
- YANG J Y, ZHAO H X, WANG C K. Response of forests to nitrogen saturation [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(4): 507-511.
- [31] SCHIMMEL D S, BRASWELL B, MCKEOWN R, et al. Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 677-692.
- [32] 彭俊杰, 何兴元, 陈振举, 等. 华北地区油松林生态系统对气候变化和 CO₂ 浓度升高的响应: 基于 BIOME-BGC 模型和树木年轮的模拟[J]. 应用生态学报, 2012, 23(7): 1733-1742.
- PENG J J, HE X Y, CHEN Z J, et al. Responses of *Pinus tabulaeformis* forest ecosystem in North China to climate change and elevated CO₂: a simulation based on BIOME-BGC model and tree-ring data[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (7): 1733-1742.
- [33] CHURKINA G, RUNNING S W. Contrasting climatic controls on the estimated productivity of global terrestrial biomes [J]. Ecosystems, 1998, 1(2): 206-215.
- [34] ZAK D R, PREGITZER K S, CURTIS P S, et al. Atmospheric CO₂, soil-N availability, and allocation of biomass and nitrogen by *Populus tremuloides* [J]. Ecological Applications, 2000, 10(1): 34-46.

(责任编辑 李 契
责任编辑 臧润国)