

基于过程模型的气候变化对长白落叶松人工林净初级生产力的影响

解雅麟¹ 王海燕^{1*} 雷相东²

¹北京林业大学林学院, 北京 100083; ²中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091

摘要 气候变化对净初级生产力(NPP)会产生显著的影响, 但影响的方向和程度存在较大的不确定性。过程模型是揭示气候变化对森林生产力影响的重要工具。该文以吉林省四平、临江、白山等地10个林区30块长白落叶松(*Larix olgensis*)人工林固定样地为研究对象, 基于气候、土壤、林分生长等观测数据, 运用3-PG模型模拟了长白落叶松人工林NPP在一个轮伐期(40年)内随林龄的动态变化, 以及在未来不同气候情景条件下NPP的变化情况。结果表明: 通过本地参数化后的3-PG模型模拟的长白落叶松林NPP为272.79–844.80 g·m⁻²·a⁻¹, 与基于样地实测的NPP具有很好的一致性, 平均相对误差和相对均方根误差均小于12%。在未来CO₂浓度、温度及降水同时增加的情景下, 长白落叶松林NPP明显增加。单独增加温度会减小长白落叶松林的NPP, 而降水及CO₂浓度增加能够在一定程度上促进NPP的增加, 但降水增加的正效应明显弱于温度升高的负效应。参数敏感性分析表明: 生长最适温度、林分比叶面积达(年龄为0时比叶面积+成熟叶比叶面积)/2时的林龄、每次霜冻导致生产力流失天数是模型的关键参数。因此, 3-PG模型可以准确地模拟长白落叶松的NPP, 模拟结果可为应对气候变化的长白落叶松经营管理提供依据。

关键词 过程模型; 长白落叶松; 气候变化; 净初级生产力

引用格式: 解雅麟, 王海燕, 雷相东 (2017). 基于过程模型的气候变化对长白落叶松人工林净初级生产力的影响. 植物生态学报, 41, 826–839. doi: 10.17521/cjpe.2016.0382

Effects of climate change on net primary productivity in *Larix olgensis* plantations based on process modeling

XIE Ya-Lin¹, WANG Hai-Yan^{1*}, and LEI Xiang-Dong²

¹College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; and ²Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

Abstract

Aims Climate change has significant effects on net primary productivity (NPP) in forests, but there is a large uncertainty in the direction and magnitude of the effects. Process-based models are important tools for understanding the responses of forests to climate change. The objective of the study is to simulate changes in NPP of *Larix olgensis* plantations under future climate scenarios using 3-PG model in order to guide the management of *L. olgensis* plantations in the context of global climate change.

Methods Data were obtained for 30 permanent plots of *L. olgensis* plantations in Siping, Linjiang, Baishan, etc. of Jilin Province, and a process model, 3-PG model, was applied to simulate changes in NPP over a rotation period of 40 years under different climate scenarios. Parameter sensitivity was also determined.

Important findings The locally parameterized 3-PG model well simulates the changes in NPP against the measured NPP data, with values between 272.79–844.80 g·m⁻²·a⁻¹ and both mean relative error and relative root mean square error within 12%. The NPP in *L. olgensis* plantations would increase significantly with increases in atmospheric CO₂ concentration, temperature and precipitation collectively. However, an increase in temperature alone would lead to a decrease in NPP, but increases in precipitation and atmospheric CO₂ concentration would increase NPP; the positive effect of increasing precipitation appears to be weaker than the negative effect of increasing temperature. Sensitivity analysis shows that the model performance is sensitive to the optimum temperature, stand age at which specific leaf area equals to half of the sum of specific leaf area at age 0 (*SLA*₀) and that for mature leaves (*SLA*₁), and days of production loss due to frost.

收稿日期Received: 2016-12-14 接受日期Accepted: 2017-06-01

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: haiyanwang72@aliyun.com)

Key words process-based model; *Larix olgensis*; climate change; net primary productivity (NPP)

Citation: Xie YL, Wang HY, Lei XD (2017). Effects of climate change on net primary productivity in *Larix olgensis* plantations based on process modeling. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 826–839. doi: 10.17521/cjpe.2016.0382

温室效应引起的气候变化影响着森林生态系统的结构和功能。在全球变暖的大背景下,近30年来中国地表平均气温较以往有明显的增加,增温速率为 $0.025\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。东北地区是全国增温最显著的一个区域,增温速率为 $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。降水量整体上呈减少的趋势,但变化不明显,而吉林省总体降水略有增加的趋势(贾建英和郭建平, 2011)。气温升高及降水减少逐步加剧了东北地区的暖干化发展态势,这必然引起森林生态系统结构及功能的变化,进而影响到森林碳平衡及生产力水平。植被净初级生产力(NPP)是表征生态系统固定大气 CO_2 能力的关键变量,是评价植物群落在自然环境条件下的生产能力及可持续发展潜力的重要指标(董丹和倪健, 2011)。用基于过程模型的方法研究NPP,在近10年来得到快速发展(Turner *et al.*, 2006; Shvidenko *et al.*, 2008; Härkönen *et al.*, 2010),其中FORECAST模型(王伟峰等, 2016)、3-PG模型(Landsberg & Waring, 1997)、CASA模型(尹锴等, 2015)、MODIS模型(Coops *et al.*, 2009; 孙成明等, 2015)、BIOME-BGC模型(曾慧卿等, 2008; 苏薇等, 2012; 何丽鸿等, 2016)已被广泛地应用于研究森林生态系统NPP对气候变化的响应。研究表明气候变化由诸多环境因子(如大气组成成分、温度、降水、氮沉降以及土地利用等)共同决定。这些环境因子的共同作用对森林NPP会产生显著的影响,但影响的方向和程度并不相同,存在较大的不确定性(González-García *et al.*, 2016)。源于大气污染的氮沉降会刺激缺氮林区林分生产力增加。对不同地区、不同树种而言,大气 CO_2 浓度、降水、温度的增加或减少对生产力的影响并不同(Medlyn *et al.*, 2011)。

3-PG模型是目前应用最广的过程模型。它由Landsberg和Waring于1997年开发,是以月为时间尺度,以林分为空间尺度,同时结合气象因子、立地条件、经营措施、树种特性来预测林分生产力、生物量分配、种群动态和土壤水分平衡的模型,也是一个考虑了实际环境条件的完整的森林碳分配与平衡模型(Sands & Landsberg, 2002)。它可以准确地预测人工林的生产力及环境变化和营林措施对生产力的影响。虽然3-PG模型活跃于国外森林生长动态研究

领域,但是目前3-PG模型在我国应用较少(花利忠等, 2007; 刘坤等, 2015)。

长白落叶松(*Larix olgensis*)是北方和山地寒温带干燥寒冷气候条件下最具有代表性的森林植被。因其易栽植、生长快等优点,在东北地区人工林中得到广泛应用,成为中国重要的商业性用材树种(吴正方等, 2003)。据统计,仅吉林省就有长白落叶松人工林37万 hm^2 ,约占全省人工林总面积的65%以上(陈传国等, 1986)。因此,长白落叶松人工林生态系统的NPP变化将对我国的森林碳储量产生重要影响,估算该区域NPP的动态变化将有助于揭示整个森林生态系统碳循环过程。孙志虎(2012)等基于FORECAST模型对长白落叶松林NPP开展了研究,但因局限在局部尺度,并未模拟未来气候变化对NPP的影响。未来气候变化如何影响区域长白落叶松的生产力,尚不清楚。

本文以长白落叶松为研究对象,对3-PG模型进行本地参数化及验证,基于吉林省30块固定样地,模拟了长白落叶松人工林NPP在一个轮伐期(40年)内随林龄的动态变化,以及在不同气候情景条件下,NPP的变化情况,并模拟分析 CO_2 浓度、降水量及温度变化对长白落叶松人工林NPP的影响,以评价该模型对长白落叶松生长模拟的适用性,并为应对气候变化条件下的落叶松人工林经营管理提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省,数据来源于吉林省第六次、第七次和第八次森林资源清查固定样地,为长白落叶松人工纯林。共30块固定样地,在四平、临江、白山、龙井、辽源、舒兰、长春、汪清、和龙、通化林区均有分布,具有一定的代表性。研究区域及样地位置详见图1。林区多位于长白山山脉的中低丘陵区,属温带大陆性季风气候,土壤类型主要是暗棕壤和棕壤。样地均为矩形,面积 0.06 hm^2 。每次调查的因子包括每木胸径、林分平均高、林龄及样地环境因子(海拔、坡向、坡位、土壤类型、质地和厚度等)。样地生物量通过已经建立的长白落叶松生物量方程获得(陈传国等, 1986),NPP通过生物量计

doi: 10.17521/cjpe.2016.0382

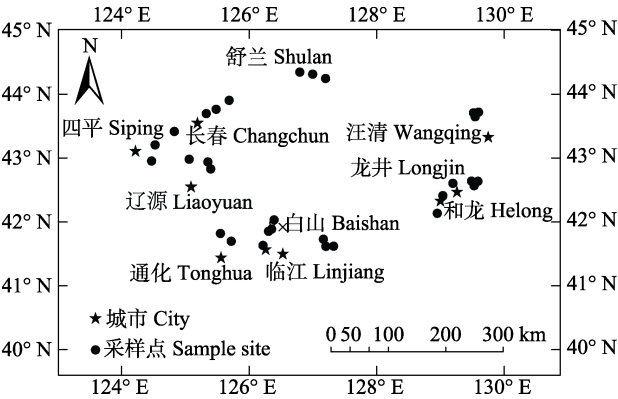


图1 采样点的分布。
Fig. 1 Location of the sampling plots.

算得到(Zhou *et al.*, 2002)。第六次森林资源清查时样地基本概况详见附录I。

气象数据由中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)中距离调查样地最近的10个气象台站获取, 样点距离气象台站的平均距离为42.7 km, 最小距离为21.3 km, 最大距离为60.7 km。由于样点到气象台站的距离差异不明显, 采用气象站点提供的原始观测数据。驱动数据包括1980–2015年间的月平均最高气温、月平均最低气温、月降水量、月蒸散量、月霜冻日数、月降雨日数和月短波辐射等。

1.2 未来气候变化情景设置

为了预估未来气候变化对长白落叶松林生态系统NPP的影响, 本研究选用《长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读》(董思言和高学杰, 2014)中的最新排放情景, 即高排放(RCP 8.5)、中等排放(RCP 6.0)和低排放(RCP 2.6)作为未来主要的气候变化情景。各气候排放情景变化模式见表1。为了研究CO₂浓度、温度、降水量对NPP的单独影响及其交互作用, 根据表1的排放情景, 组合设计了8种气候情景(表2), 以1986–2005年间气候变化为基准, 分别模拟在2081–2100年间RCP 8.5、RCP 6.0及RCP 2.6排放情景下, 长白落叶松人工林生态系统NPP对气候变化的响应。

表1 三种最新排放情景变化模式
Table 1 Pattern of changes under three latest climate emission scenarios

排放情景 Emission scenarios	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration (mg·L ⁻¹)	CO ₂ 浓度基准值 CO ₂ concentration reference value (mg·L ⁻¹)	气温增加 Air temperature increment (°C)	气温增加基准值 Air temperature increment reference value (°C)	降水量增加 Precipitation increment (%)	降水量增加基准值 Precipitation increment reference value (%)
RCP 2.6	440–480	460	0.3–1.7	1.0	0.3–5.1	2.7
RCP 6.0	510–570	540	1.4–3.1	2.3	1.4–9.3	5.4
RCP 8.5	560–630	595	2.6–4.8	3.7	2.6–14.4	8.5

RCP, 浓度路径。
RCP, concentration pathway.

1.3 3-PG模型

1.3.1 模型简介

3-PG模型的关键就在于通过一系列动态方程模拟太阳辐射的逐级递减、林分冠层吸收的碳分配和水分循环与利用, 进而模拟在全球变暖、大气CO₂浓度上升、土壤肥力下降的潜在影响下森林生态系统NPP的年际变化(图2)。3-PG模型针对生物量积累及分配有相应的模块, 它主要是通过各种修正因子(蒸腾修正因子 f_D 、土壤水分修正因子 f_{θ} 、温度修正因子 f_T 、霜冻修正因子 f_F 、养分修正因子 f_N 、林龄修正因子 f_{age} 以及光能利用率)计算林分的NPP, 并模拟养分在林木根、茎、叶间的分配, 从而调控林木的生长。此外, 模型基于Beer-Lambert日光消减规律模拟林分冠层吸收的光合有效辐射(PAR), 根据林分土壤水贮量变化模拟了森林每月水量平衡, 它主要包括大气降水、地下水、人工灌溉和林分蒸散与土壤水之间的动态变化。

1.3.2 模型参数

3-PG模型运行需要的数据包括样地的气候数据、立地数据、林分初始数据和参数。本研究使用的长白落叶松生理生态参数和初始数据详见表3。参数主要通过以下5种方法获取: 1)样地实测得到, 主要是易于获取的参数; 2)查阅相关文献资料获得; 3)参照相似树种类推得到; 4)模型默认值; 5)优化调整确定。在了解参数的生物学意义及其对模型输出结果的具体影响(敏感性等级)的基础上, 根据模型的预测结果, 在参数允许的范围内, 系统、客观地进行校正, 以实现模型预测结果与相应实测数据的最佳拟合。主要检查参数值的选取及所有模型的输出是否符合生物学原理; 并用独立样本进行验证, 观察预测效果是否令人满意。文中的本地化参数由第六次、第七次森林资源清查数据校准拟合获取, 将第八次森林资源清查数据作为验证数据。模型参数的详细介绍见文献(Feikema *et al.*, 2010)。

表2 不同未来气候变化情景设置

Table 2 Different climate change scenarios

气候变化情景 Climate change scenarios	排放情景 Emission scenarios	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration	气温 Air temperature	降水量 Precipitation
C ₀ T ₀ P ₀		不变 No change	不变 No change	不变 No change
C ₁ T ₀ P ₀	RCP 2.6	460 mg·L ⁻¹	不变 No change	不变 No change
	RCP 6.0	540 mg·L ⁻¹	不变 No change	不变 No change
	RCP 8.5	595 mg·L ⁻¹	不变 No change	不变 No change
C ₀ T ₁ P ₀	RCP 2.6	不变 No change	+1.0 °C	不变 No change
	RCP 6.0	不变 No change	+2.3 °C	不变 No change
	RCP 8.5	不变 No change	+3.7 °C	不变 No change
C ₀ T ₀ P ₁	RCP 2.6	不变 No change	不变 No change	+2.7%
	RCP 6.0	不变 No change	不变 No change	+5.4%
	RCP 8.5	不变 No change	不变 No change	+8.5%
C ₀ T ₁ P ₁	RCP 2.6	不变 No change	+1.0 °C	+2.7%
	RCP 6.0	不变 No change	+2.3 °C	+5.4%
	RCP 8.5	不变 No change	+3.7 °C	+8.5%
C ₁ T ₁ P ₀	RCP 2.6	460 mg·L ⁻¹	+1.0 °C	不变 No change
	RCP 6.0	540 mg·L ⁻¹	+2.3 °C	不变 No change
	RCP 8.5	595 mg·L ⁻¹	+3.7 °C	不变 No change
C ₁ T ₀ P ₁	RCP 2.6	460 mg·L ⁻¹	不变 No change	+2.7%
	RCP 6.0	540 mg·L ⁻¹	不变 No change	+5.4%
	RCP 8.5	595 mg·L ⁻¹	不变 No change	+8.5%
C ₁ T ₁ P ₁	RCP 2.6	460 mg·L ⁻¹	+1.0 °C	+2.7 %
	RCP 6.0	540 mg·L ⁻¹	+2.3 °C	+5.4 %
	RCP 8.5	595 mg·L ⁻¹	+3.7 °C	+8.5 %

RCP, 浓度路径。+, 增加。

RCP, concentration pathway. +, increment.

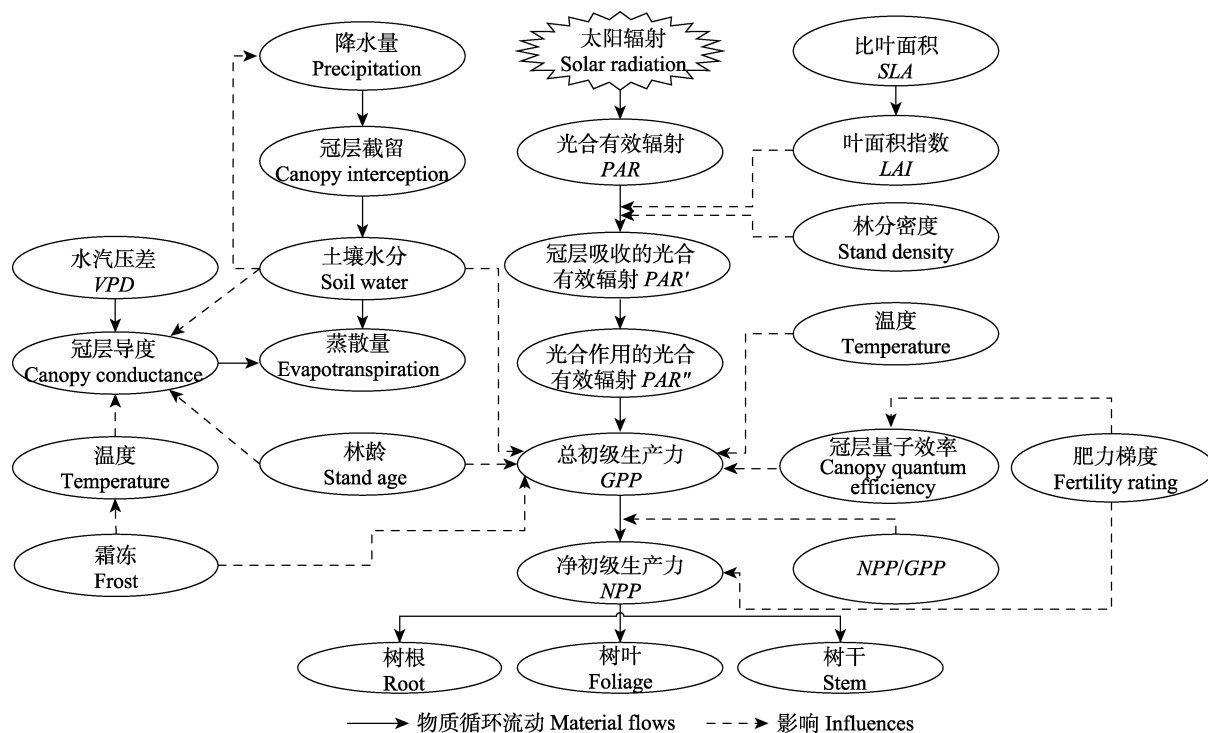


图2 3-PG模型原理(改编自Sands和Landsberg (2002))。

Fig. 2 Principles of 3-PG model (based on Sands & Landsberg, 2002). *GPP*, gross primary productivity; *LAI*, leaf area index; *NPP*, net primary productivity; *PAR*, photosynthetically active radiation; *PAR'*, photosynthetically active radiation of canopy absorption; *PAR''*, photosynthetically active radiation of photosynthesis; *SLA*, specific leaf area; *VPD*, vapor pressure deficiency.

doi: 10.17521/cjpe.2016.0382

表3 长白落叶松人工林3-PG模型参数和初始数据
Table 3 3-PG model parameters and the initial values for *Larix olgensis* plantations

参数 Parameter	值 Value	分类 Category	来源 Source
生物量的分配关系和比例 Allometric relationships and partitioning			
胸径2 cm树叶与干分配比 Foliage: stem partitioning ratio when DBH = 2 cm	1.00	A	本文拟合 Fitted in this study
胸径20 cm树叶与干分配比 Foliage: stem partitioning ratio when DBH = 20 cm	0.5	A	本文拟合 Fitted in this study
干生物量与胸径关系中常数值 Constant in the stem biomass and DBH relationship	0.007 3	A	本文拟合 Fitted in this study
干生物量与胸径关系中幂值 Power in the stem biomass and DBH relationship	3.409	A	本文拟合 Fitted in this study
净初级生产量分配给根的最大值 Maximum fraction of net primary productivity to roots	0.95	A	本文拟合 Fitted in this study
净初级生产量分配给根最小值 Minimum fraction of net primary productivity to roots	0.5	A	本文拟合 Fitted in this study
气温修正因子 Air temperature modifier			
生长最低气温 Minimum air temperature for growth (°C)	−25	L	Xu <i>et al.</i> , 2012
生长最适气温 Optimum air temperature for growth (°C)	17	L	Sun <i>et al.</i> , 2009
生长最高气温 Maximum air temperature for growth (°C)	27	L	Xu <i>et al.</i> , 2012
霜冻修正因子 Frost modifier			
每次霜冻导致生产力流失天数 Production lost days per frost day (d)	1	C	默认参数 Default parameters
冠层结构和过程 Canopy structure and process			
比叶面积 Specific leaf area (SLA)			
年龄为0时比叶面积 Specific leaf area at age 0 (m ² ·kg ^{−1})	12.93	L	Song & Sun, 2012
成熟叶比叶面积 Specific leaf area for mature leaves (m ² ·kg ^{−1})	5	L	Song & Sun, 2012
年龄为(SLA ₀ + SLA ₁)/2比叶面积 Age at which specific leaf area = (SLA ₀ + SLA ₁)/2	8	L	Song & Sun, 2012
光截获 Light interception			
消光系数 Extinction coefficient	0.5	L	Amichev <i>et al.</i> , 2011
郁闭度年龄 Age at canopy cover (a)	5	L	Gonzalez-Benecke <i>et al.</i> , 2014
从林冠降水蒸发的最大比例 Maximum proportion of rainfall evaporated from canopy	0.15	C	默认参数 Default parameters
最大降水截留时叶面积指数 Leaf area index for maximum rainfall interception	5	C	默认参数 Default parameters
光合生产和呼吸 Photosynthesis production and respiration			
冠层量子效率 Canopy quantum efficiency (mol·mol ^{−1})	0.035	L	Ma <i>et al.</i> , 2008
净初级生产力/总初级生产力 Ratio of net primary productivity to gross primary productivity	0.47	L	Liu <i>et al.</i> , 2015
树枝在干中的比例 Fraction of stem biomass as branch and bark	0.15	L	
林分初生时树枝占干生物量的比例 Fraction of branch and bark at age = 0	0.15	L	Coops & Waring, 2011
林分成熟时树枝占干生物量的比例 Fraction of branch and bark for mature stands			Coops & Waring, 2011
树枝占平均值时的林龄 Age at which fraction = (Branch and bark fraction at age = 0+Branch and bark fraction for mature stands)/2	1.5	L	Coops & Waring, 2011
立地初始化条件 Stand initialization			
初始种植年 Years of initial plantation	1973–1983	M	本研究测定 Measurements in this study
初始密度 Initial stocking (trees·hm ^{−2})	3300	M	本研究测定 Measurements in this study
海拔 Altitude (m)	230–751	M	本研究测定 Measurements in this study
纬度 Latitude (°)	41.61–43.88	M	本研究测定 Measurements in this study
肥力等级 Fertility rating	0.7 ± 0.1	M	本研究测定 Measurements in this study
土壤质地类型 Soil texture	Clay loam	M	本研究测定 Measurements in this study

用于3-PG模型的参数大致可分为4个等级(A、C、L、M)。A表示此类参数是可调整的; C表示此类参数是通用的, 可以运用在所有树种; L表示此类参数是通过查阅相关文献获得的数据; M表示此类参数是通过测量或间接推算所得数据。样地初始密度、海拔、纬度和土壤质地类型由森林资源清查一并获取。林分初始种植年由林龄及调查时间推算而来, 肥力等级由立地指数推算而来(Subedi *et al.*, 2015)。

Parameters in 3-PG model are roughly divided into four categories (A, C, L and M). Category A means the parameters are adjustable; Category C means the parameters are common and can be applied to all tree species; Category L means the parameters are found from literatures; and Category M means the parameters can be calculated from measurements. The initial tree density, elevation, latitude and soil texture of sample plots are derived from forest resource inventory. The initial planting years of stands were estimated from forest age and investigation time. Fertility rating was converted from site index (Subedi *et al.*, 2015). DBH, diameter at breast height.

1.3.3 模型评价

通过将样地实测数据(y_i)与3-PG模型的模拟值(\hat{y}_i)进行回归分析, 计算模型的决定系数(R^2)、平均误差(ME)、平均相对误差(MRE)、均方误($RMSE$)、相对均方误差($RRMSE$)来评估模型的预测能力。

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \tag{1}$$

$$MRE = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n y_i} \tag{2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \tag{3}$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}}}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i / n} \tag{4}$$

式中: i 为样本号, n 为样本数, y_i 代表实测数据, \hat{y}_i 代表模型模拟值。

1.4 3-PG模型参数敏感性分析

通过参数敏感性分析可以找到模型的关键和敏感参数, 为模型的准确预测和应用提供依据。主要是选取模型参数调整中不同取值对模型预测结果影响较明显的参数来进行。方法是在模型的其他运行参数不变的情况下, 仅通过改变以上参数的取值大小, 对30块固定样地的NPP进行模拟, 分析不同参数取值模拟结果的差异显著性(t 检验)。

2 结果和分析

2.1 模型验证

通过收集吉林省10个林区共30块长白落叶松人工林样地(林龄在8–44年) 1999–2013年的实测调查数据, 计算得到长白落叶松林净初级生产力数值。基于3-PG模型模拟30块长白落叶松人工林样地NPP, 再对两者进行回归分析得到以下结果(图3): 模型模拟NPP与样地实测NPP呈极显著相关关系($R^2 = 0.86$, $p < 0.001$), ME 为 $-8.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, MRE 为 -1.50% , $RMSE$ 为 $65.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, $RRMSE$ 为 11.26% 。总体来看, 模型模拟NPP的大小和范围与实测数值基本相似, 变

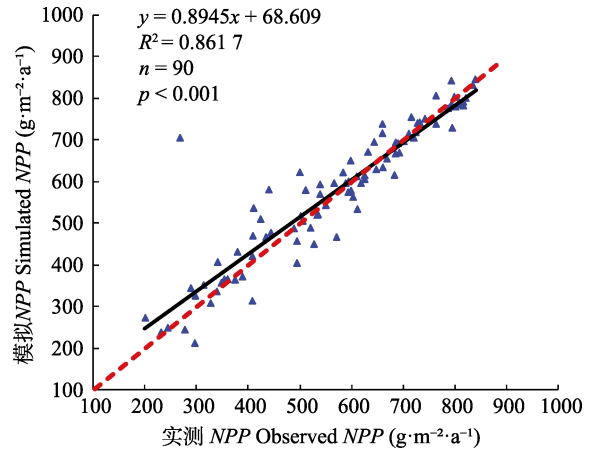


图3 基于3-PG模型模拟30块长白落叶松林样地净初级生产力(NPP)与实测NPP的比较。图中三角代表样点的净初级生产力值, 黑线代表线性回归线, 灰线代表1:1正线性回归线。
Fig. 3 Comparisons between simulated net primary productivity (NPP) by 3-PG model and the measured data for the 30 sample plots in *Larix olgensis* plantations. Triangles mean net primary productivity (NPP) values. The black line means linear regression line, and gray line means 1:1 positive linear regression line.

化趋势基本相同, 模拟效果整体较好。因此, 3-PG模型对长白落叶松人工林NPP的估算较准确且具有较高的统计可靠性。

本研究将吉林省第六次、第七次森林资源清查数据作为校参数据, 在模型拟合的过程中, 获取最优参数值。将第八次森林资源清查数据作为验证数据, 验证3-PG模型对长白落叶松人工林NPP的拟合效果, 校参数据与验证数据的误差分析如表4。可以看出, 校参数据和验证数据的结果有较好的一致性, 相对误差均在5%以内, 较好地模拟了长白落叶松人工林的生产力变化。因此, 3-PG模型可以准确地模拟长白落叶松的生长和生产力。

表4 校参数据与验证数据的误差比较
Table 4 The comparison of errors between calibration data and validation data

指标 Indicator	校参数据 Calibration data	验证数据 Validation data
R^2	0.870 5	0.848 9
p	<0.05 ($n = 60$)	<0.05 ($n = 30$)
平均误差 $ME (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	-9.568	-6.422
平均相对误差 $MRE (\%)$	-1.655	-1.163
均方误 $RMSE (\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$	67.794	60.399
相对均方误差 $RRMSE (\%)$	11.533	10.809

ME , mean error; MRE , mean relative error; $RMSE$, root mean square error; $RRMSE$, relative root mean square error.

2.2 长白落叶松林NPP年际和月际变化模拟

为进一步分析长白落叶松人工林的生产力动态变化,本研究基于3-PG模型的立地初始化参数、气象数据对选取的10个林区长白落叶松人工林NPP在一个轮伐期(40年)内的变化趋势进行了模拟(图4)。图4A为30块长白落叶松人工林样地NPP的平均变化趋势,可以发现:在幼龄阶段,随着林龄的增大,NPP快速增加,到中龄阶段达到最大值($815.6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$),之后随年龄增加逐渐减小,这符合树木生长的生理学特点。分区域模拟(图4B)发现:所有林区的NPP水平遵循先增加后减小的规律,辽源、汪清、龙井、白山林区的NPP变化趋势相似,先增加较快,然后逐渐降低,峰值较明显。舒兰、四平、通化、和龙、长春林区的NPP变化趋势相似,先缓慢增加,达到最大值后有个平稳期,然后缓缓降低,

峰值不明显。临江林区的NPP水平最高,最大值达 $1200.16 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这些差异可能是由于各林区的立地因子(气候条件)不同所导致,说明3-PG模型的模拟结果既有较好的生物合理性,又灵敏地反映了区域差异。

图5是10个林区在1999–2013年间各月的平均气温、降水量及NPP变化情况。可以看出研究区内各月平均气温及降水量变化趋势相似,NPP呈先增大后减小的趋势。在所选林区内,全年降水量及平均气温普遍不高。降水量较小的月份(如1月、2月、12月),降水量均小于10 mm。7月降水量最大,为171 mm,8月次之,全年降水量变幅在15.8%–95.6%之间。长白落叶松人工林NPP的主要积累时期集中在生长季(4–9月),而11–3月研究区内温度较低、降水量少、霜冻期长,落叶松人工林生长较慢,NPP水

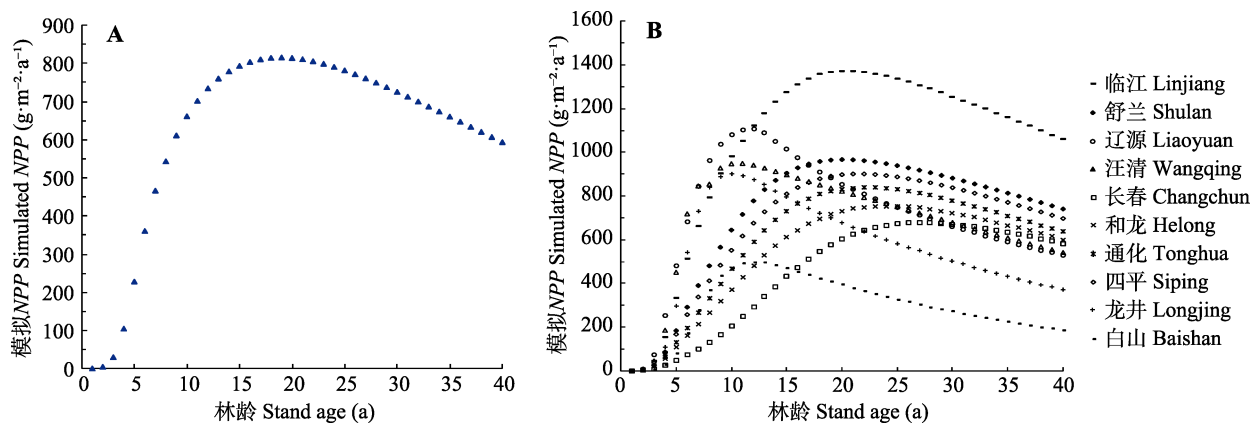


图4 基于3-PG模型模拟30块长白落叶松林样地一个轮伐期净初级生产力(NPP)变化趋势。

Fig. 4 Changes in net primary productivity (NPP) simulated by 3-PG model for the 30 sample plots over a rotation period in *Larix olgensis* plantations.

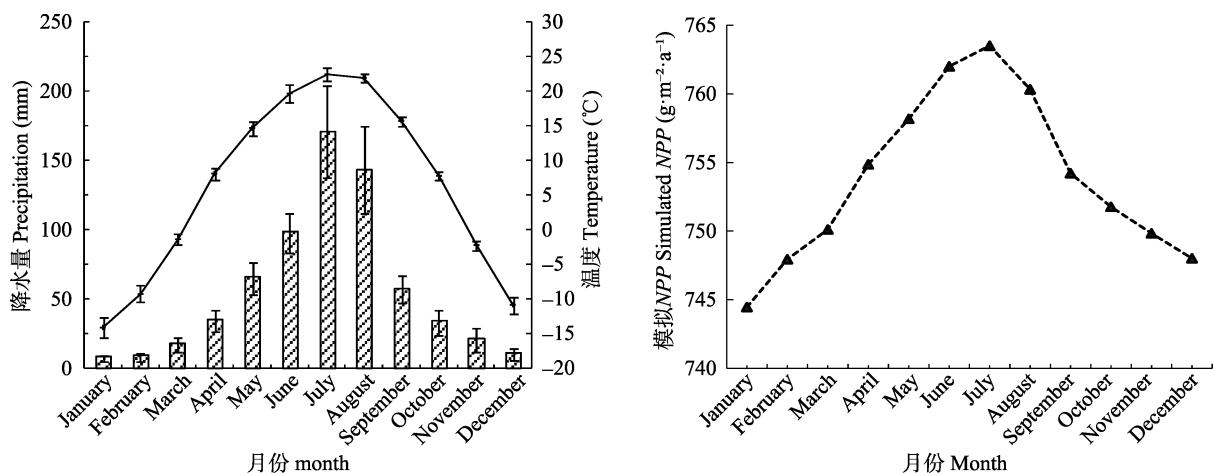


图5 研究区1999–2013年间月平均气温(曲线)、月降水量(柱状图)及相应净初级生产力(NPP)的变化(平均值±标准偏差)。

Fig. 5 Changes in monthly mean temperature (curves), precipitation (bar charts) and net primary productivity (NPP) in the study area during 1999–2013 (mean \pm SD).

平较低。5、6月是落叶松人工林的营养生长期, 随着温度的升高、降水量的增加, 6月落叶松人工林生长最快, NPP 增幅最大; 7月太阳辐射充足、水热条件充分, 适合植被的生长, NPP 在整个生长季达到最大; 此后, 随着降水量的减小、温度的降低、冠层吸收的太阳辐射量少, 落叶松人工林 NPP 迅速下降, 到1月份降到最低。研究区全年气温普遍不高, 在7–8月达到峰值, 约23.5 °C。由图5可以看出: NPP 的月际变化与温度及降水量变化趋势相似, 它们之间存在一定相关性。

2.3 参数敏感性分析

在进行模型参数调整时, 我们发现一些参数的不同取值对模型预测有较大影响, 如林分生长最适温度(T_{opt})、林分比叶面积达 $(SLA_0 + SLA_1)/2$ 时的林龄($tSLA$)和每次霜冻导致生产力流失天数(kF)。为检验模型的应用效果及了解模型参数的取值变化对3-PG模型模拟结果的影响, 本研究选取以上3个参数进行参数敏感性分析。

通过查阅文献得知, 长白落叶松人工林 T_{opt} 约为17 °C (孙志虎, 2009)。本文在运用模型进行 NPP 预测时, 参数 T_{opt} 取值均为17 °C。为探讨 T_{opt} 对3-PG模型模拟长白落叶松人工林 NPP 的影响, 本研究基于最适温度设置了4个等级, 分别是10.2 °C (–40%)、13.6 °C (–20%)、20.4 °C (+20%)、23.8 °C (+40%)。从图6可以看出: 温度升高对模型预测的负效应大于温度降低对模型预测的正效应, 温度因子对模型预测 NPP 的影响随时间先增加后降低。过高(23.8 °C)或过低(10.2 °C)的温度都会显著影响长白落叶松人工林生物量积累($n = 40, p < 0.05$), 小幅度的温度改变对模型预测的影响不显著($n = 40, p > 0.05$)。在未来, 气温升高意味着全球变暖加剧, 适当的增加温度(0–2 °C)会加快林分的生长速率, 提高 NPP 水平。而当温度增加超过5 °C时, 将导致林分生长速率减缓。

$tSLA$ 在一定程度上反映了叶片截获光的能力及在强光下的自我保护能力, 往往与植物的生长和生存有密切的联系。通过查阅文献得知: 长白落叶松人工林的比叶面积一般在12.23–13.63之间, 比叶面积达1/2时林龄大约在5年(宋林和孙志虎, 2012)。本研究设定了4个林龄等级探讨参数 $tSLA$ 取值对模型预测的影响, 它们分别是: 3 (–40%)、4 (–20%)、6 (+20%)、7 (+40%), 括号中的百分数是指在默认值的基础上改变的百分比, 负值表示减少, 正值表示

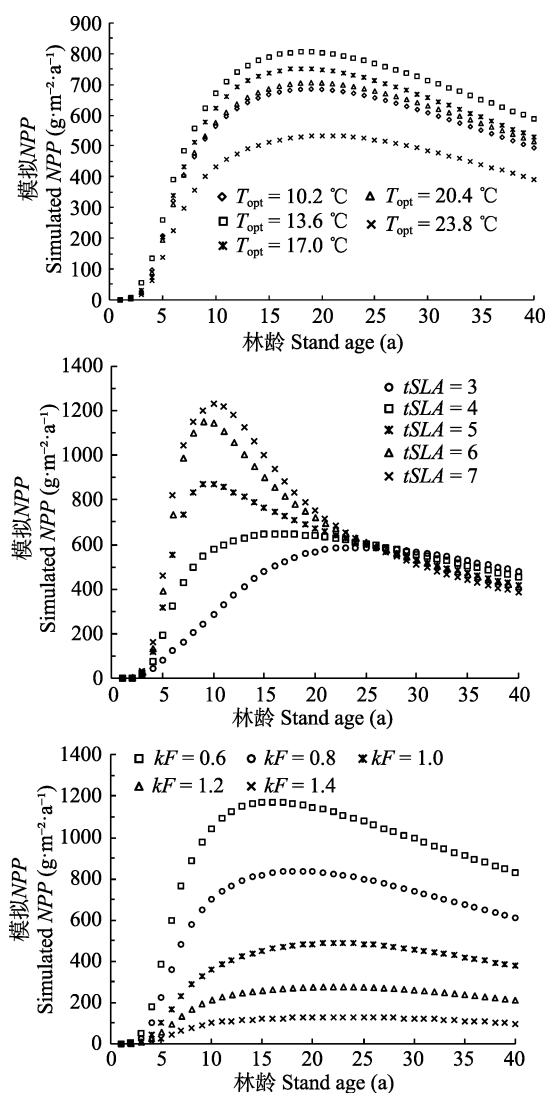


图6 参数林分生长最适温度(T_{opt})、林分比叶面积达一定比例时林龄($tSLA$)、霜冻导致生产力损失天数(kF)取值变化对长白落叶松人工林模拟净初级生产力(NPP)的影响。

Fig. 6 The influences of optimum temperature for growth (T_{opt}), age at which specific leaf area = $(SLA_0 + SLA_1)/2$ ($tSLA$) and days of production loss due to frost (kF) on simulated net primary productivity (NPP) in *Larix olgensis* plantations.

增加。从图6可以发现: 参数 $tSLA$ 取值显著影响长白落叶松幼龄林和中龄林的 NPP 水平($n = 40, p < 0.05$), 且 $tSLA$ 取值与模型模拟值成正比; 对近熟林之后的阶段影响不显著($n = 40, p > 0.05$), 且 $tSLA$ 取值与模型模拟值成反比。

kF 模型默认取值为1。为探索霜冻现象对模型预测的影响, 本研究假定4个等级: 0.6 (–40%)、0.8 (–20%)、1.2 (+20%)、1.4 (+40%), 括号中的百分数是指在默认值的基础上改变的百分比, 负值表示减少, 正值表示增加。3-PG模型理论认为, 大多数树种在霜冻来临时即停止光合作用。细胞低温结冰后

将造成细胞生理干旱、叶绿体机械损伤以及细胞通透性改变,从而保卫细胞运动变慢直至气孔关闭。从图6可以看出:参数 kF 取值与模型模拟值成反比,且模拟结果之间差异显著($n = 40, p < 0.05$)。

2.4 未来气候情景下的NPP变化

以1986–2005年气候为基准,基于3-PG模型模拟预测在2081–2100年间大气 CO_2 浓度、降水量和温度变化的情况下,各林区长白落叶松人工林NPP的相对变化情况(图7)。在代表浓度路径(RCP)为2.6、6.0及8.5的排放情景下,单独 CO_2 浓度升高而温度和降水不变($\text{C}_1\text{T}_0\text{P}_0$)时,长白落叶松林NPP分别增加6.24%–58.17% (平均值39.22%)、20.94%–72.52% (平均值50.80%)和44.35%–76.85% (平均值60.61%)。可见, CO_2 浓度增加有利于长白落叶松林NPP的积累,且 CO_2 浓度越高,NPP增加的幅度越大。

在 CO_2 浓度和降水量不变、温度分别升高1℃、2.3℃和3.7℃($\text{C}_0\text{T}_1\text{P}_0$)时,长白落叶松林NPP较原来($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0$)降低了0.12%–20.98% (平均值10.28%)、11.91%–40.42% (平均值24.57%)和31.14%–59.59% (平均值45.35%)。可见,单独温度升高不利于长白落叶松林NPP的积累。原因是温度升高加速了植被的光合作用,枯枝落叶分解加快,干物质积累减少。此外,温度升高易引起土壤水分快速蒸发,植物干旱缺水不利于NPP的积累。单独降水量增加($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_1$)

时,各林区内长白落叶松人工林NPP都有不同程度的增加,增加幅度均小于10%。可见,降水的单独增加有利于长白落叶松林NPP的积累,原因在于大气降水能够缓解水分胁迫,从而促进植物吸收养分。当温度和降水量同时增加($\text{C}_0\text{T}_1\text{P}_1$)时,长白落叶松林NPP分别减小2.59%–9.91% (平均值5.96%)、7.83%–29.09% (平均值16.89%)和24.69%–50.97% (平均值36.88%),NPP减小的幅度要大于降水量单独增加时NPP增加的幅度。可见,温度和降水的协同增加不利于NPP的积累。

在 CO_2 浓度增加、温度升高、降水不变($\text{C}_1\text{T}_1\text{P}_0$)的情况下,长白落叶松林NPP较原来($\text{C}_0\text{T}_0\text{P}_0$)增加了6.12%–37.19% (平均值28.94%)、9.03%–32.10% (平均值26.23%)和13.21%–17.26% (平均值15.26%);在 CO_2 浓度增加、温度不变、降水量增加($\text{C}_1\text{T}_0\text{P}_1$)的情况下,长白落叶松林NPP分别增加了8.95%–69.24% (平均值44.54%)、25.02%–83.85% (平均值58.48%)和49.80%–88.47% (平均值69.08%);当大气 CO_2 浓度、温度及降水量同时增加($\text{C}_1\text{T}_1\text{P}_1$)时,长白落叶松林NPP分别增加34.26%、33.91%及23.73%。可见, CO_2 浓度、降水和温度的协同增加有利于长白落叶松林NPP的积累,且大气 CO_2 浓度及降水量的协同增加对NPP的正效应大于温度升高对NPP的负效应。

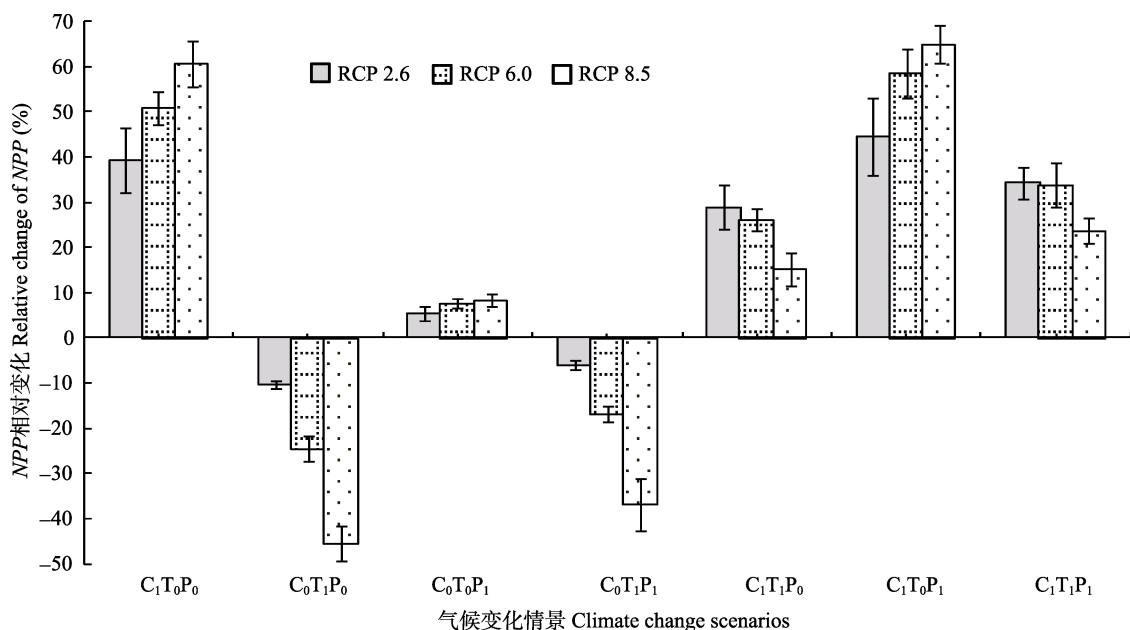


图7 在RCP 2.6、RCP 6.0和RCP 8.5排放情景下长白落叶松人工林模拟净初级生产力(NPP)的相对变化(平均值±标准偏差)。C, CO_2 ; P, 降水; T, 气温。1, 改变; 0, 不变。

Fig. 7 Relative changes in simulated net primary productivity (NPP) for *Larix olgensis* plantations under RCP 2.6, RCP 6.0 and RCP 8.5 scenarios (mean ± SD). C, CO_2 ; P, precipitation; T, air temperature. 1, change; 0, no change.

3 讨论

3.1 长白落叶松人工林NPP的模拟

本研究基于30块固定样地, 首次运用3-PG过程模型探索了吉林省四平、临江、白山等地10个林区长白落叶松人工林NPP水平, 并模拟分析一个轮伐期(40年)内NPP的变化。发现3-PG模型模拟的NPP与样地实测NPP极显著相关($R^2 = 0.86$, $p < 0.001$), ME为 $-8.52 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, MRE为 -1.50% , RMSE为 $65.08 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, RRMSE为 11.26% , 可见模型对NPP的估算较准确, 且具有一定的统计可靠性。预测的NPP变动范围是 $272.79\text{--}844.80 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均值为 $578.12 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 与何丽鸿等(2016)的结果($286.60\text{--}566.27 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 平均值为 $477.74 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)接近。误差产生的原因可能有: 长白落叶松属落叶树种, 参数设置仅考虑了树种的年凋落速率, 并未针对特定的季节设置落叶参数; 气象数据采用距离样地最近的气象站数据; 模型本身并未考虑自然灾害(如风害、病虫害、大气污染等)对林分生长的影响, 然而这些因素会在很大程度上限制林分的正常生长; 树木的生理生态学过程十分复杂, 到目前为止, 我们对许多过程知之甚少; 在小尺度范围内, 尤其是在山区, 林地的生长环境(如海拔、地形、地貌等)会不同程度地影响林分NPP的大小及分配, 而模型在模拟时并未充分考虑这些因素。这些方面将在后续的工作中完善, 以更准确地模拟林分生产力。

NPP随年龄增加的变化趋势表现为先增加较快, 达到最大值后, 逐渐降低。因此, 3-PG模型的模拟结果具有较好的生物合理性, 并能灵敏地反映不同地区的差异。在大尺度上NPP的空间分布及时间序列上的动态变化不可能通过实测的方法获得, 但机理模型与遥感反演手段的结合应用可以获得NPP的时空变化及分布特征。因此模型就成为研究NPP时空动态不可或缺的手段(Wang *et al.*, 2013)。上述研究结果说明3-PG过程模型在模拟吉林省长白落叶松林NPP的时空动态上有着良好的潜力。考虑到这一区域在气候变化和森林碳汇研究中的重要性, 有必要进一步加强这方面的研究。未来, 我们将在扩大样本量的基础上, 尝试3-PG过程模型与遥感反演技术的结合, 模拟抚育间伐和施肥等营林措施的影响。

3.2 参数敏感性分析

本研究发现: $tSLA$ 、 kF 和 T_{opt} 是3-PG模型的重要参数。它们不同程度地影响着模型对长白落叶松人工林NPP的预测。这与以往的部分研究结果一致, 如Zhao等(2009)基于3-PG模型较好地模拟了中国杉木NPP随林龄的动态变化, 证实 kF 及 T_{opt} 是影响3-PG模型预测的重要参数。Potitthep和Yasuoka (2011)研究发现: 最大树冠量子效率、平均温度、 T_{opt} 是影响落叶阔叶林生物量生产和分配的主要参数。Paul等(2007)基于3-PG模型较好地完成对桉树(*Eucalyptus robusta*)胸径的模拟分析, 发现 T_{opt} 、NPP分配到根的比例及叶片凋落速率是影响模型预测林分胸径的重要参数。

3.3 长白落叶松人工林NPP对气候变化的响应

温度和降水作为两大主要的环境因子, 对陆地生态系统植被的生长和碳积累有重要的影响。本研究发现: 长白落叶松人工林NPP与生长季的降水量正相关, 与生长季温度负相关, 这与吴玉莲等(2014)、冯险峰等(2014)的结论基本一致。3-PG模型模拟结果表明: 温度及降水对长白落叶松人工林的影响不同。具体表现为: 单独温度升高时, 长白落叶松林NPP较原来有所降低。温度升高对NPP的影响表现为先增加后降低, 且温度升高对NPP的负效应大于温度降低对NPP的正效应。单独降水量增加时, 长白落叶松林NPP有小幅增加。诸多学者的研究证实影响森林生态系统NPP水平及格局的主导因素是降水量(王玉辉等, 2001; 苏薇等, 2012), 本文的研究结果表明, 降水量较多的月份, NPP积累也相对较大。同时, 温度和降水的协同增加不利于NPP的积累。

除了温度和降水的变化, 大气 CO_2 浓度增加是气候变化的另一个重要方面。关于 CO_2 浓度的增加对森林NPP的影响, 一直都存在较大的争议(Peng *et al.*, 2009)。本文的研究结果表明: 单独 CO_2 浓度升高有利于长白落叶松林NPP的积累, 且 CO_2 浓度越高, NPP增加的幅度越大。 CO_2 浓度每增加 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NPP增加 $2.6\text{--}3.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。这与一些研究结果(王秀云等, 2011; Chen *et al.*, 2016; 何丽鸿等, 2016)一致。

综上所述, 在未来RCP2.6、RCP6.0和RCP8.5排放情景下, 当 CO_2 浓度、降水量及温度同时升高时, 长白落叶松林NPP积累增加, 且 CO_2 浓度及降水量对落叶松人工林NPP的正效应大于温度升高对其产

生的负效应。诸多研究结果证实,未来气候变化将导致我国东北地区森林的NPP明显增加(Peng *et al.*, 2009, Peng & Dan, 2015; Hao *et al.*, 2016)。

4 结论

通过本地参数化后的3-PG模型模拟的长白落叶松林NPP为272.79–844.80 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,与基于样地实测的NPP具有很好的一致性。同时,3-PG模型能够较好地模拟长白落叶松林NPP随林龄的动态变化,NPP呈现先增加后减小的规律。温度、降水和CO₂浓度影响长白落叶松的NPP。长白落叶松林NPP对生长季的温度、降水的响应明显不同,而这种差异将对长白落叶松林应对未来气候变化产生重要影响。在未来CO₂浓度、温度及降水同时增加的情景下,长白落叶松林NPP明显增加。单独增加温度会减小长白落叶松林NPP,而降水及CO₂浓度增加能够在一定程度上促进NPP的增加,但降水的正效应明显弱于温度的负效应。参数敏感性分析表明: T_{opt} 、 t_{SLA} 、 kF 是3-PG模型的关键参数。研究结果可为应对未来气候变化的长白落叶松经营管理提供依据。

基金项目 国家林业公益性行业科研专项(201504303)和国家自然科学基金(31270679)。

参考文献

- Amichev BY, Hangs RD, van Rees KCJ (2011). A novel approach to simulate growth of multi-stem willow in bio-energy production systems with a simple process-based model (3-PG). *Biomass and Bioenergy*, 35, 473–488.
- Chen CG, Li XD, Zhang Z (1986). The research on the relationship between growth and ecological factors of *Larix olgensis*. *Forest Science and Technology*, 5(9), 6–8. (in Chinese) [陈传国, 李晓东, 张孜 (1986). 长白落叶松人工林的生长与生态因子相关关系的研究. 林业科技通讯, 5(9), 6–8.]
- Chen Z, Zhang J, Xiong Z, Pan G, Müller C (2016). Enhanced gross nitrogen transformation rates and nitrogen supply in paddy field under elevated atmospheric carbon dioxide and temperature. *Soil Biology & Biochemistry*, 94, 80–87.
- Coops NC, Ferster CJ, Waring RH, Nightingale J (2009). Comparison of three models for predicting gross primary production across and within forested ecoregions in the contiguous United States. *Remote Sensing of Environment*, 113, 680–690.
- Coops NC, Waring RH (2011). A process-based approach to estimate lodgepole pine (*Pinus contorta* Dougl.) distribution in the Pacific Northwest under climate change. *Climatic Change*, 105, 313–328.
- Dong D, Ni J (2011). Modeling changes of net primary productivity of karst vegetation in southwestern China using the CASA model. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 1855–1866. (in Chinese with English abstract) [董丹, 倪健 (2011). 利用CASA模型模拟西南喀斯特植被净第一性生产力. 生态学报, 31, 1855–1866.]
- Dong SY, Gao XJ (2014). Long-term climate change: Interpretation of IPCC fifth assessment report. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 10(1), 56–59. (in Chinese with English abstract) [董思言, 高学杰 (2014). 长期气候变化——IPCC第五次评估报告解读. 气候变化研究进展, 10(1), 56–59.]
- Feikema PM, Morris JD, Beverly CR, Collopy JJ, Baker TG, Lane PNJ (2010). Validation of plantation transpiration in south-eastern Australia estimated using the 3-PG forest growth model. *Forest Ecology and Management*, 260, 663–678.
- Feng XF, Sun QL, Lin B (2014). NPP process models applied in regional and global scales and responses of NPP to the global change. *Ecology and Environmental Sciences*, 23, 496–503. (in Chinese with English abstract) [冯险峰, 孙庆龄, 林斌 (2014). 区域及全球尺度的NPP过程模型和NPP对全球变化的响应. 生态环境学报, 23, 496–503.]
- Gonzalez-Benecke CA, Jokela EJ, Cropper WP, Bracho R, Leduc DJ (2014). Parameterization of the 3-PG model for *Pinus elliottii* stands using alternative methods to estimate fertility rating, biomass partitioning and canopy closure. *Forest Ecology and Management*, 327, 55–75.
- González-García M, Almeida AC, Hevia A, Majada J, Beadle C (2016). Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. *GCB Bioenergy*, 8, 194–210.
- Härkönen S, Pulkkinen M, Duursma R, M Kel A (2010). Estimating annual GPP, NPP and stem growth in Finland using summary models. *Forest Ecology and Management*, 259, 524–533.
- Hao Y, Chen H, Wei Y, Li Y (2016). The influence of climate change on CO₂ (carbon dioxide) emissions: An empirical estimation based on Chinese provincial panel data. *Journal of Cleaner Production*, 131, 667–677.
- He LH, Wang HY, Lei XD (2016). Parameter sensitivity of simulating net primary productivity of *Larix olgensis* forest based on BIOME-BGC model. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 27, 412–420. (in Chinese with English abstract) [何丽鸿, 王海燕, 雷相东 (2016). 基于BIOME-BGC模型的长白落叶松林净初级生产力模拟参数敏感性. 应用生态学报, 27, 412–420.]
- Hua LZ, Jiang XD, He XB (2007). Application of 3-PG model in *Eucalyptus urophylla* plantations of southern China. *Journal of Beijing Forestry University*, 29(2), 100–104. (in Chinese with English abstract) [花利忠, 江希钿, 贺秀斌

- (2007). 3-PG模型在华南尾叶桉人工林的应用研究. 北京林业大学学报, 29(2), 100–104.]
- Jia JY, Guo JP (2011). Characteristics of climate change in northeast China for last 46 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 25(10), 109–115. (in Chinese with English abstract) [贾建英, 郭建平 (2011). 东北地区近46年气候变化特征分析. 干旱区资源与环境, 25(10), 109–115.]
- Landsberg JJ, Waring RH (1997). A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95, 209–228.
- Liu K, Cao L, Wang GB, Shen X, Cao FL (2015). Estimating biomass components and *LAI* of Chinese fir plantation based on 3-PG model. *Journal of Northwest A&F University*, 43(9), 57–64. (in Chinese with English abstract) [刘坤, 曹林, 汪贵斌, 申鑫, 曹福亮 (2015). 基于3-PG模型的杉木人工林各器官生物量和*LAI*估算. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 43(9), 57–64.]
- Ma HW, Xu CQ, Li HC (2008). Photosynthesis characteristics of *Larix olgensis* under different site conditions. *Journal of Northeast Forestry University*, 36(8), 4–7. (in Chinese with English abstract) [马华文, 许翠清, 李海朝 (2008). 立地条件对长白落叶松光合特性的影响. 东北林业大学学报, 36(8), 4–7.]
- Medlyn BE, Duursma RA, Zeppel MJB (2011). Forest productivity under climate change: A checklist for evaluating model studies. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2, 332–355.
- Paul KI, Booth TH, Jovanovic T, Sands PJ, Morris JD (2007). Calibration of the forest growth model 3-PG to *Eucalyptus* plantations growing in low rainfall regions of Australia. *Forest Ecology and Management*, 243, 237–247.
- Peng C, Zhou X, Zhao S, Wang X, Zhu B, Piao S, Fang J (2009). Quantifying the response of forest carbon balance to future climate change in Northeastern China: Model validation and prediction. *Global and Planetary Change*, 66, 179–194.
- Peng J, Dan L (2015). Impacts of CO₂ concentration and climate change on the terrestrial carbon flux using six global climate—Carbon coupled models. *Ecological Modelling*, 304, 69–83.
- Potitsep S, Yasuoka Y (2011). Application of the 3-PG model for gross primary productivity estimation in deciduous broadleaf forests: A study area in Japan. *Forests*, 2, 590–609.
- Sands PJ, Landsberg JJ (2002). Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, 163, 273–292.
- Shvidenko AZ, Schepashchenko DG, Vaganov EA, Nilsson S (2008). Net primary production of forest ecosystems of Russia: A new estimate. *Doklady Earth Sciences*, 421, 1009–1012.
- Song L, Sun ZH (2012). Measurement of leaf area index of *Larix olgensis* plantations in hilly area of Sanjiang Plain. *Journal of Northeast Forestry University*, 40(9), 6–9. (in Chinese with English abstract) [宋林, 孙志虎 (2012). 长白落叶松人工林叶面积指数测定. 东北林业大学学报, 40(9), 6–9.]
- Su W, Xu XX, Lü XZ, Fan MR, Zhang Y (2012). Study on the impact of climate change on net primary productivity of *Larix principis-rupprechtii* forest in Beijing mountain area. *Guangdong Agricultural Sciences*, 39(7), 69–72. (in Chinese with English abstract) [苏薇, 余新晓, 吕锡芝, 范敏锐, 张艺 (2012). 气候变化对北京山区华北落叶松林*NPP*影响研究. 广东农业科学, 39(7), 69–72.]
- Subedi S, Fox T, Wynne R (2015). Determination of fertility rating (*FR*) in the 3-PG model for loblolly pine plantations in the Southeastern United States based on site index. *Forests*, 6, 3002–3027.
- Sun CM, Sun ZG, Liu T, Wang LJ, Chen YY, Guo DD, Tian T, Li JL (2015). Comprehensive estimation model of grassland *NPP* based on MODIS in China. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1079–1085. (in Chinese with English abstract) [孙成明, 孙政国, 刘涛, 王力坚, 陈瑛瑛, 郭斗斗, 田婷, 李建龙 (2015). 基于MODIS的中国草地*NPP*综合估算模型. 生态学报, 35, 1079–1085.]
- Sun ZH, Bi YJ, Mou CC, Cai TJ (2012). Using an ecosystem simulation model FORECAST to evaluate the effects of forest management strategies on long-term productivity of Korean larch plantations. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(6), 1–6. (in Chinese with English abstract) [孙志虎, 毕永娟, 牟长城, 蔡体久 (2012). 基于FORECAST模型的长白落叶松人工林经营措施对长期生产力的影响. 北京林业大学学报, 34(6), 1–6.]
- Sun ZH, Jin GZ, Mu CC (2009). *Long-Term Productivity Maintenance of Monoculture Olga Hay Larch Timber Forest in Northeastern China*. Science Press, Beijing. 113. (in Chinese) [孙志虎, 金光泽, 牟长城 (2009). 长白落叶松人工林长期生产力维持的研究. 科学出版社, 北京. 113.]
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Running SW, Zhao M, Costa MH, Kirschbaum AA, Ham JM, Saleska SR, Ahl DE (2006). Evaluation of MODIS *NPP* and *GPP* products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282–292.
- Wang L, Gong W, Ma Y, Zhang M (2013). Modeling regional vegetation *NPP* variations and their relationships with climatic parameters in Wuhan, China. *Earth Interactions*, 17(4), 1–20.
- Wang WF, Duan YX, Zhang LX, Wang B, Li XJ (2016). Effects of different rotations on carbon sequestration in Chinese fir plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 669–678. (in Chinese with English abstract) [王伟峰, 段

- 玉玺, 张立欣, 王博, 李晓晶 (2016). 不同轮伐期对杉木人工林碳固存的影响. *植物生态学报*, 40, 669–678.]
- Wang XY, Sun YJ, Ma W (2011). Biomass and carbon storage distribution of different density in *Larix olgensis* plantation. *Journal of Fujian College of Forestry*, 31(3), 221–226. (in Chinese with English abstract) [王秀云, 孙玉军, 马炜 (2011). 不同密度长白落叶松林生物量与碳储量分布特征. *福建林学院学报*, 31(3), 221–226.]
- Wang YH, Zhou GS, Jiang YL, Yang ZY (2001). Estimating biomass and NPP of *Larix* forests using forest inventory data (FID). *Acta Phytoecologica Sinica*, 25, 420–425. (in Chinese with English abstract) [王玉辉, 周广胜, 蒋延玲, 杨正宇 (2001). 基于森林资源清查资料的落叶松林生物量和净生长量估算模式. *植物生态学报*, 25, 420–425.]
- Wu YL, Wang XP, Li QY, Sun Y (2014). Response of broad-leaved Korean pine forest productivity of Mt. Changbai to climate change: An analysis based on BIOME-BGC modeling. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 50, 577–586. (in Chinese with English abstract) [吴玉莲, 王襄平, 李巧燕, 孙阎 (2014). 长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应: 基于BIOME-BGC模型的分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 50, 577–586.]
- Wu ZF, Jing YH, Liu JP, Shang LN, Zhao DS (2003). Response of vegetation distribution to global climate change in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 23, 564–570. (in Chinese with English abstract) [吴正方, 靳英华, 刘吉平, 商丽娜, 赵东升 (2003). 东北地区植被分布全球气候变化区域响应. *地理科学*, 23, 564–570.]
- Xu CL, Xun XM, Zhang SG (2012). Comparison in photosynthetic characteristics of *Larix kaempferi*, *L. olgensis* and their hybrids. *Journal of Beijing Forestry University*, 34(4), 62–66. (in Chinese with English abstract) [许晨璐, 孙晓梅, 张守攻 (2012). 日本落叶松与长白落叶松及其杂种光合特性比较. *北京林业大学学报*, 34(4), 62–66.]
- Yin K, Tian YC, Yuan C, Zhang FF, Yuan QZ, Hua LZ (2015). NPP spatial and temporal pattern of vegetation in Beijing and its factor explanation based on CASA model. *Remote Sensing for Land and Resources*, 27(1), 133–139. (in Chinese with English abstract) [尹锴, 田亦陈, 袁超, 张飞飞, 苑全治, 花利忠 (2015). 基于CASA模型的北京植被NPP时空格局及其因子解释. *国土资源遥感*, 27(1), 133–139.]
- Zeng HQ, Liu QJ, Feng ZW, Wang XK, Ma ZQ (2008). GPP and NPP study of *Pinus elliottii* forest in red soil hilly region based on BIOME-BGC model. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 5314–5321. (in Chinese with English abstract) [曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清 (2008). 基于BIOME-BGC模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliottii*)人工林GPP和NPP. *生态学报*, 28, 5314–5321.]
- Zhao M, Xiang W, Peng C, Tian D (2009). Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model. *Forest Ecology and Management*, 257, 1520–1531.
- Zhou G, Wang Y, Jiang Y, Yang Z (2002). Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, 169, 149–157.

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 王 葳

附录I 长白落叶松人工林样地概况

Appendix I Basic information of the *Larix olgensis* plantation stands

样地号 Plot No.	海拔 Elevation (m)	土壤深度 Soil depth (cm)	坡向 Aspect (°)	坡位 Position	坡度 Slope (°)	林龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (stems·hm ⁻²)
四平-1 Siping-1	260	30	6	2	4	31	950
四平-2 Siping-2	319	30	9	6	1	25	1 783
四平-3 Siping-3	280	35	8	2	10	30	1 383
临江-1 Linjiang-1	876	30	9	6	3	13	1 950
临江-2 Linjiang-2	676	40	2	2	8	16	1 000
临江-3 Linjiang-3	880	26	4	3	5	27	983
白山-1 Baishan-1	600	15	2	4	10	8	183
白山-2 Baishan-2	510	25	8	3	5	8	133
白山-3 Baishan-3	680	25	1	2	16	16	533
龙井-1 Longjin-1	660	25	3	2	32	28	633
龙井-2 Longjin-2	630	45	2	2	6	12	633
龙井-3 Longjin-3	630	29	7	3	15	11	333
辽源-1 Liaoyuan-1	300	37	4	5	5	24	633
辽源-2 Liaoyuan-2	380	35	1	2	8	34	1 983
辽源-3 Liaoyuan-3	380	20	3	3	10	25	1 500
和龙-1 Helong-1	510	45	2	2	14	17	1 050
和龙-2 Helong-2	500	32	2	4	11	16	3 516
和龙-3 Helong-3	751	40	8	4	10	11	1 000
舒兰-1 Shulan-1	230	51	8	4	10	17	1 800
舒兰-2 Shulan-2	280	51	8	4	6	25	1 617
舒兰-3 Shulan-3	310	51	6	4	15	17	2 150
通化-1 Tonghua-1	580	42	2	4	20	16	900
通化-2 Tonghua-2	710	50	2	2	17	17	2 267
通化-3 Tonghua-3	512	50	4	3	20	15	900
汪清-1 Wangqing-1	390	40	5	3	3	17	2 250
汪清-2 Wangqing-2	510	51	8	4	5	20	950
汪清-3 Wangqing-3	390	40	5	3	3	18	2 241
长春-1 Changchun-1	338	30	5	1	5	26	1 367
长春-2 Changchun-2	290	32	8	4	20	19	1 567
长春-3 Changchun-3	240	35	9	1	0	26	1 050

坡向(Aspect): 1, 北坡; 2, 东北坡; 3, 东坡; 4, 东南坡; 5, 南坡; 6, 西南坡; 7, 西坡; 8, 西北坡; 9, 无坡向; 坡位(Position): 1, 脊部; 2, 上坡位; 3, 中坡位; 4, 下坡位; 5, 山谷; 6, 平地。

Slope aspect: 1, northern slope; 2, northeastern slope; 3, eastern slope; 4, southeastern slope; 5, southern slope; 6, southwestern slope; 7, western slope; 8, northwestern slope; 9, no slope direction. Slope position: 1, ridge; 2, up slope position; 3, middle slope position; 4, lower slope position; 5, valley; 6, flat ground.



扫码向作者提问