

# 内蒙古大兴安岭森林净初级生产力时空格局分析

张少伟<sup>1,2</sup>, 张弓乔<sup>1</sup>, 惠刚盈<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 河南农业职业学院园艺园林学院, 河南 郑州 451450)

**摘要:** [目的] 通过模型模拟分析内蒙古大兴安岭地区森林生产力时空分布格局及其驱动因子。 [方法] 利用优化率定后的生理生态过程模型 Biome-BGC 参数, 模拟了内蒙古大兴安岭地区时间序列(2003—2012 年)森林净初级生产力(NPP)。基于外业实测数据, 在全区域尺度上进行 NPP 模拟结果验证。 [结果] 优化率定后的 Biome-BGC 模拟的该区森林 NPP 具有较高可靠性, 实测数据验证  $R^2$  为 0.81, RMSE 为  $48.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。2003—2012 年间该区森林 NPP 为  $219.3 \sim 399.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 其中针叶林 NPP 为  $218.6 \sim 414.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、阔叶林为  $213.7 \sim 412.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、混交林为  $188.3 \sim 404.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。森林 NPP 与温度和太阳辐射的相关性较高( $R^2$  分别为 0.55 和 0.49), 与降水量和相对湿度的相关性较低。 [结论] 时间序列上该区森林 NPP 年平均总值总体呈缓慢增长趋势; 空间分布呈北高南低, 东部偏低的特征。“天然林保护工程”的实施是该区森林 NPP 增加的主要因素, 而火灾则降低了森林 NPP, 二者造成了该区 NPP 呈现时空差异; 不同森林类型 NPP 差异主要受温度和太阳辐射的影响。

**关键词:** 净初级生产力, Biome-BGC 模型, 时空格局, 气象驱动力

**中图分类号:** S718.55

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2019)05-0074-09

森林碳循环是陆地生态系统物质和能量循环的核心<sup>[1]</sup>, 但由于其受到气候变化、人类活动以及森林生长和退化的影响呈动态变化规律, 导致碳通量模拟有较大的不确定性<sup>[2-4]</sup>, 所以不同区域和森林类型的碳通量精确模拟一直是科学家关注的重点<sup>[5]</sup>。净初级生产力(NPP)决定了植被对大气中的碳吸收率, 是研究森林碳通量的关键指标<sup>[6-7]</sup>。目前模拟森林生产力主要应用参数模型和过程模型<sup>[8]</sup>。参数模型主要利用森林植被吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率( $\epsilon$ )来估测森林生产力<sup>[9]</sup>。代表模型有: GLO-PEM<sup>[10]</sup>、CASA<sup>[11]</sup>、TURC<sup>[12]</sup>、MODIS MOD17<sup>[13]</sup>、C-Fix<sup>[14]</sup>等。这类模型已在区域、国家尺度上得到了广泛应用<sup>[15-16]</sup>。但其存在一定的不足: (1) 模型精度依赖于遥感数据质量; (2) 不同类型森林植被光能利用率缺乏率定; (3) 无法表征森林生态生理学机理。过程模型是建立在植被生长机理之上, 可刻画森林植被碳循环全过程及其与土

壤、大气的相互作用。代表模型有: TEM<sup>[17]</sup>、DEME-TER<sup>[18]</sup>、CERTURY<sup>[19]</sup>、DOLY<sup>[20]</sup>、LSM<sup>[21]</sup>、BIOME1, 2, 3, 4<sup>[22]</sup>、IBIS<sup>[23]</sup>、SiB2<sup>[24]</sup>、BEPS<sup>[25]</sup>以及 Biome-BGC<sup>[26]</sup>等。这类模型被认为机理过程复杂, 模型参数化方案较繁琐, 容易产生较大的不确定性。但 Chiesi 等<sup>[27]</sup>和 Yan 等<sup>[28]</sup>提出了基于遥感模型 MODIS MOD17 模型和过程模型(Biome-BGC)融合的方法, 在一定程度上抑制了由于模型参数化方案带来的模拟结果不确定性, 使模拟精度得到较大改善。气候条件是影响 NPP 变化的主要因子<sup>[29-34]</sup>, 分析主导气候因素对不同区域森林 NPP 的扰动也成为研究热点<sup>[35-36]</sup>。

本研究基于 Yan 等<sup>[28]</sup>优化后的 MODIS MOD17 和机理过程模型(Biome-BGC)耦合率定的模型参数, 进行了参数的优化验证, 对寒温带内蒙古大兴安岭地区 2003—2012 年森林 NPP 进行模拟和精度验证, 并分析该地区森林 NPP 时空分布格局及其与气

收稿日期: 2019-02-26 修回日期: 2019-04-28

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费“陕西主要森林类型空间分布及其生态效益评价”(CAFYBB2017MB039)

\* 通讯作者: 研究员, 主要从事森林经营理论与技术研究, E-mail: hui@caf.ac.cn

候因素的关系。

## 1 研究区概况及数据

### 1.1 研究区概况

研究区选定在内蒙古大兴安岭地区,  $119^{\circ} 36' 26'' \sim 125^{\circ} 24' 10''$  E,  $47^{\circ} 03' 26'' \sim 53^{\circ} 20' 00''$  N。该区森林覆盖率 79.56%, 是我国东北地区重要的森林生态功能保障区, 也是寒温带森林类型的典型代表。森林类型以兴安落叶松 (*Larix gemelinii* (Rupr.) Kuzen) 构成的明亮针叶林为主, 优势树种为兴安落叶松, 伴生白桦 (*Betula platylla* Suk.), 山杨 (*Populus davidaana* Dode in Bull.)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica* Litv.)、黑桦 (*Betula davurica* Pall.) 和蒙古栎 (*Quercus mongolica* Fisch. ex Ledeb.) 等。

### 1.2 实验数据

1.2.1 遥感数据产品 获取了 2003—2012 年研究区的 MODIS 土地覆被类型年合成产品 (MCD12Q1) (<http://modis.gsfc.nasa.gov>), 空间分辨率为 500 m。为保持与 Biome-BGC 模拟单元大小一致, 将其尺度扩展到 1 km (采用 Albers 投影, WGS-84 坐标系, 下同)。

1.2.2 气象数据 2003—2012 年的气象数据来自寒区旱区科学数据中心发布的中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集 (空间分辨率为  $0.1^{\circ}$ )。为保持与 Biome-BGC 模拟网格大小一致, 利用 Biome-BGC 模型附带的山地气象插值模块 (MTCLIM 4.3) 将上述气象要素降尺度到 1 km, 提取了 Biome-BGC 模型运行所需要的气象数据, 包括逐日最高温、最低温、日均温、降水、饱和水气压差、短波辐射和日照时数等。

1.2.3 土壤质地数据 土壤质地数据为生态过程模型 Biome-BGC 的重要输入参数, 模型模拟过程中需逐网格输入砂土、粘土和粉土的百分比含量。本

文所采用的土壤质地数据从中国科学院资源环境科学数据中心获得 (<http://www.resdc.cn>), 该数据是根据我国 1:100 万土壤类型图以及全国第二次土壤普查数据综合编制生成 (空间分辨率为 1 km)。

1.2.4 验证数据 为验证 Biome-BGC 模型参数可行性及模拟结果的准确性, 2013 年 8 月, 在内蒙古根河市设置方形样地 (面积:  $45 \text{ m} \times 45 \text{ m}$ ) 18 块, 主要森林类型包括落叶松和白桦纯林、松桦混交林等。对样地进行每木检尺。并将样地内林木分为 6 个等级 ( $5 \sim 10, 10 \sim 15, 15 \sim 20, 20 \sim 25, 25 \sim 30 \text{ cm}$ ,  $> 30 \text{ cm}$ ), 每个等级选取 3 株标准样木, 在其胸径处沿东西、南北两个方向钻取树芯。此外, 为验证火灾区域森林净初级生产力的预测精度, 2016 年 8 月还对该研究区受林火干扰较重的地方, 设置 45 个圆形样地 (半径 15 m), 并分别对样地中的树木按照上述方法钻取木芯。

野外获取的树芯称质量后风干, 然后进行打磨修正, 直到年轮清晰。采用 WinDENDRO 年轮分析仪测量得出年轮宽度, 测量精度 0.001 mm。利用 COFECHA 算法进行手动交叉定年, 得到每株标准样木逐年胸径值。

基于样地调查的胸径、树高数据, 拟合得到研究区主要树种兴安落叶松和白桦的树高-胸径函数关系, 兴安落叶松树高方程:  $H = 2.325 \text{ DBH}^{0.648}$  ( $R^2 = 0.73$ )、白桦树高方程:  $H = 2.618 \text{ DBH}^{0.621}$  ( $R^2 = 0.67$ )。然后由逐年胸径数据计算每株标准木逐年树高。应用已有的兴安落叶松和白桦生物量模型计算生物量<sup>[37-38]</sup> (表 1), 根据兴安落叶松和白桦生物量与各组分含碳量的平均比值 0.521 1 和 0.491 4<sup>[39]</sup>, 作为生物量与净初级生产力的转换系数, 由此得到各样地的森林 NPP, 用于验证模型模拟结果。

表 1 兴安落叶松和白桦各组分生物量方程

Table 1 Biomass functions of *Larix gemelinii* and *Betula platylla* organs

组分 Organs	兴安落叶松 <i>Larix gemelinii</i>		白桦 <i>Betula platylla</i>	
	回归方程 Equation	相关系数 Coefficient	回归方程 Equation	相关系数 Coefficient
树干 Stem	$AGBS = 0.0138(D^2H)^{1.0107}$	0.99	$AGBS = 0.02853(D^2H)^{0.89271}$	0.99
树枝 Branch	$AGBB = 0.0008(D^2H)^{1.1272}$	0.98	$AGBB = 0.00278(D^2H)^{1.02568}$	0.99
树叶 Leaf	$AGBL = 0.00229(D^2H)^{0.3659}$	0.94	$AGBL = 0.01545(D^2H)^{0.61265}$	0.98
树根 Root	$AGBR = 0.0017(D^2H)^{1.1793}$	0.98	$AGBR = 0.04577(D^2H)^{0.69612}$	0.98
树皮 Bark	$AGBT = 0.02601(D^2H)^{0.7206}$	0.99	$AGBT = 0.02392(D^2H)^{0.71131}$	0.99

## 2 研究方法

### 2.1 Biome-BGC 模型

Biome-BGC 模型以 Farquhar 光合酶促反应机理<sup>[40]</sup>为基础,计算植被光合作用强度和 GPP。已被广泛用于森林、草地、农田的生产力模拟<sup>[41-42]</sup>。Biome-BGC 模型以日尺度为步长,可模拟多级时间尺度的森林植被生态系统 GPP 和 NPP。在空间尺度上,其模拟的网格大小一般为 1km(取决于可获取的输入参数,如气象因子,土壤质地因子等产品的空间分辨率)。Biome-BGC 模型的驱动参数包括 3 个方面:初始化参数、气象因子和森林植被生理生态参数(44 个)。初始化文件参数提供模型模拟的基本属性信息,如模拟网格(或站点)的海拔、土壤质地组成、有效土壤深度,模拟的时间跨度、CO<sub>2</sub> 浓度、N 沉降等;气象因子包括日尺度的最高、最低、平均温度,饱和水汽压差,降水量,短波辐射和日照时数;生理生态参数包括更新与死亡、分配参数,碳氮比,易分解质、纤维素、木质素的比例,叶片与冠层形态参数以及传导速率相关的参数等。

### 2.2 Biome-BGC 模型生理生态参数优化和模型拟合

Biome-BGC 模型生理生态参数优化应用模型-模型交叉率定法。本研究首先应用扩展的傅里叶幅度分析法(EFAST)对该研究区 Biome-BGC 模型的生理生态参数进行敏感性分析,根据以往研究得到的生理生态参数的概率密度分布生成样本<sup>[28]</sup>,在此基础上运行 Biome-BGC 模型,计算得到内蒙古大兴安岭地区 10 年(2003~2012)的 NPP 值,输入到 SimLab2.2 中进行参数敏感性分析。将参数分为低敏感度(敏感度指数小于 0.1)、中敏感度(0.1~0.2)和高敏感度(敏感度指数大于 0.2)3 个等级。然后将 Biome-BGC 模型中敏感度大于 0.1 的参数,针对该区特定植被类型(兴安落叶松和白桦)对敏感性参数进行校正。兴安落叶松林选取了 30 个森林样本点(样本个数:23 层×5 年×30 个=3 450 个),白桦林选取了 10 个森林样本点(样本个数:23 层×5 年×10 个=1 150 个),分别进行 2003—2007 年 GPP 的模拟。利用优化的 MOD\_17 模型输出的森林样本点生长季的 NPP 拟合 Biome-BGC 模型对应生长季输出的 NPP 结果,拟合过程中不断调整生理生态参数,当两者拟合结果达到稳定时,得到文中该区域兴安落叶松和白桦的最优参数组合。其他敏

感度低于 0.1 的参数采用模型默认值。然后基于木芯样品实测资料计算各样地 NPP,与 Biome-BGC 参数优化后的模型进行精度验证,模拟效果较好, $R^2$  达 0.81, $RMSE$  为  $48.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (图 1)。优化后的 Biome-BGC 模型适合预测内蒙古大兴安岭地区净初级生产力。

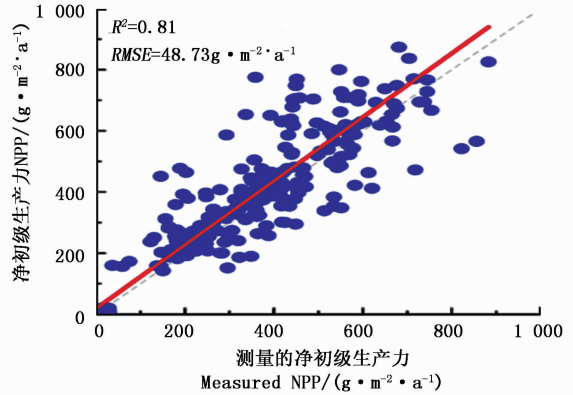


图 1 树轮数据推算 NPP 与模型模拟 NPP 值对比  
Fig.1 Comparison of the tree ring calculated NPP with the simulated NPP

本研究基于 Biome-BGC 的 4.3 版本,利用初始化参数文件、研究区气象和土壤质地数据,以及在该区域应用经敏感性分析后模型-模型交叉率定的生理生态参数,对 2003—2012 年的内蒙古大兴安岭的森林植被净初级生产力(NPP)进行模拟。分析该区 NPP 的时空分布特点,并采用相关分析描述气象因素对其影响。

## 3 结果与分析

### 3.1 内蒙古大兴安岭森林植被生产力(NPP)时空分布特征

2003—2012 年内蒙古大兴安岭地区森林 NPP 空间平均值呈不显著增长趋势,其中以 2009 年的最大( $399.5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ),2007 年的最小( $219.3 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )(表 2)。从空间分布来看,该区森林 NPP 呈现北高南低,东部偏低的空间差异(图 2)。从该区森林 NPP 时空分布特征来看,火灾是影响内蒙古大兴安岭地区森林 NPP 空间分布差异的重要因素之一,如图 2 中 2006 年内蒙古大兴安岭东部和中部以及 2007 年中部出现的范围较大的 NPP 低值区域,其分别是 2006 年松岭坎都河特大森林火烧迹地,以及 2007 年的松岭以及罕诺河管护区森林火灾区。天保工程是影响该区森林 NPP 空间分布差异的另

一个重要因素,2012年额尔古纳市、根河市和牙克石市等森林NPP呈增长趋势,则是由于该区域全面

贯彻落实“国家天然林保护工程”,开展了荒山造林、森林抚育等项目。

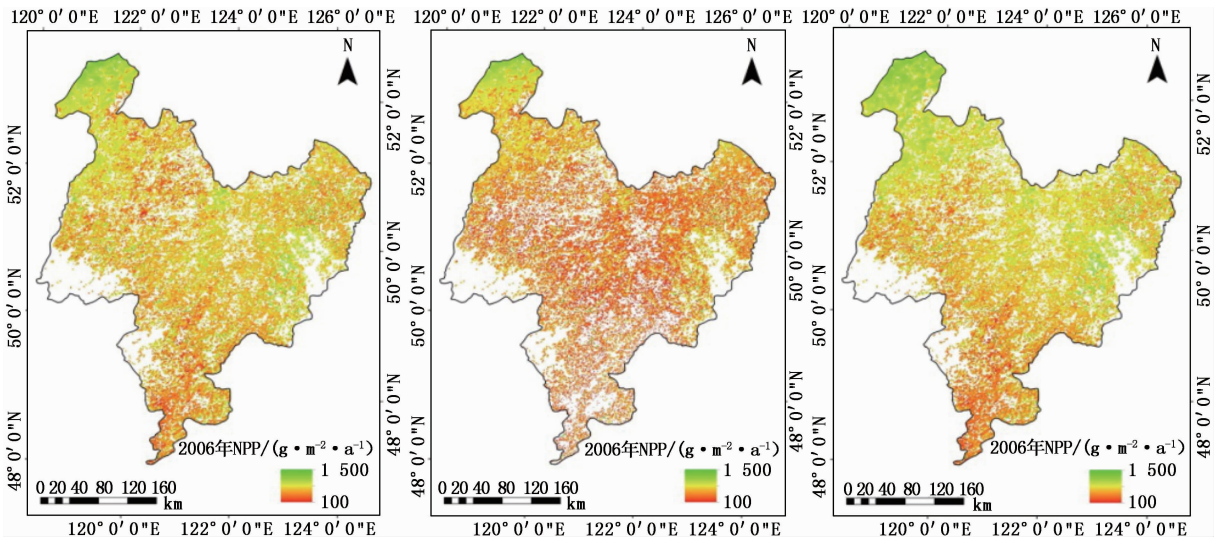


图2 内蒙古大兴安岭地区2003—2012年森林NPP空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of annual forest NPPs over the Great Khingan within the Inner Monolia from 2003 to 2012

表2 2003—2012年内蒙古大兴安岭地区森林NPP均值统计

Table 2 Statistical information of forest NPP averages over the Great Khingan in Inner Monolia from 2003 to 2012

年份 Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
NPP/(g·m <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	334.2	264.3	278.5	296.9	219.3	244.9	399.5	228.8	322.4	333.4

### 3.2 内蒙古大兴安岭地区不同森林类型NPP动态变化

根据该区的土地覆盖类型和森林NPP的平均值分别计算得到该区域针叶林、阔叶林和混交林的NPP区域平均值(表3)。其中针叶林、阔叶林和混

交林2009年的NPP区域平均值最大,分别为414.9, 412.3, 404.7 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 2007年的NPP区域平均值最小,分别为218.6, 213.7, 188.3 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>, 2003—2012年间不同森林类型的NPP空间平均值也呈不显著增长趋势。

表3 2003—2012年内蒙古大兴安岭地区各森林类型NPP均值统计

Table 3 Statistics of NPP of different forest types over the Great Khingan within the Inner Monolia from 2003 to 2012

年份 Year	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
针叶林 Needle-leaf forest	349.0	274.2	286.4	312.5	218.6	263.3	414.9	238.1	341.4	351.9
阔叶林 Broad-leaf forest	348.0	277.7	291.6	309.9	213.7	256.4	412.3	232.5	339.3	348.1
混交林 Mixed forest	340.0	245.9	280.6	308.2	188.3	251.3	404.7	204.5	333.4	333.6

### 3.3 NPP与气候因子的相关性

3.3.1 总体NPP与气候因子的相关性 2003—2012年研究区生长季平均温度在11.02~13.15℃之间,温度的年际变化与生长季NPP的年际变化均呈上升趋势,相关性R<sup>2</sup>达0.55(图3(a));生长季太阳辐射量在3.41~4.05MJ之间,变化较小,整体比较稳定,但与生长季NPP相关性较大,R<sup>2</sup>达0.49(图3(c)所示);生长季总降水量与平均相对湿度分别在294.29~501.86mm、59.64%~66.54%之间,

整体均表现为上升趋势,但其变化趋势与年际的生长季植被NPP的变化不一致,且相关性较小,R<sup>2</sup>分别为0.05和0.04(图3(b)(d)所示)。植被NPP的最低值出现在2003年,该年虽然降水充足、湿度适宜,但平均温度和太阳辐射均为历年最低;2007年的温度和辐射量都处于历年的最高值,但是降水偏少,相对湿度也较小,但是植被NPP却达到一个高值。综上所述,温度和太阳辐射是影响该区植被NPP变化的主要因子。

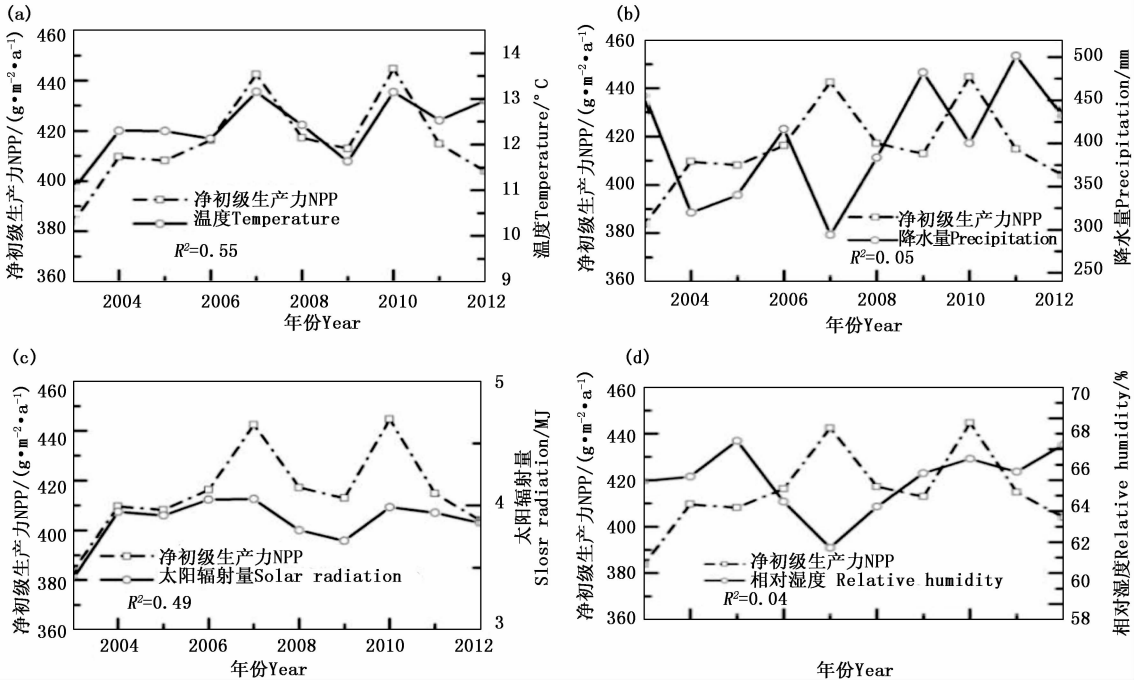


图3 生长季 NPP 与平均温度 (a)、总降水量 (b)、总太阳辐射量 (c)、平均相对湿度 (d) 的年际关系

Fig.3 Correlations between annual vegetation NPPs and annual average temperature (a), total precipitation (b), total solar radiation (c) and average relative humidity (d) over growing season

3.3.2 各森林类型 NPP 与气候因子的相关性 针叶林 NPP 值介于  $378.43 \sim 433.67 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 与温度和太阳辐射量的相关性较好,  $R^2$  分别为 0.41 和 0.30。而与降水量和相对湿度的相关性较差,  $R^2$  分别为 0.03 和 0.12。2007 年由于温度和太阳辐射量都处于较高水平, NPP 值达到了最高值。而 2003 年温度和太阳辐射量是 10 年来的最低值, NPP 也为历年最低值(图 4)。阔叶林的植被 NPP 值也与温度和太阳辐射量的相关性较好,  $R^2$  分别为 0.56 和 0.22。而与降水量不相关, 与相对湿度的相关系数仅为  $-0.02$ 。2010 年阔叶林的 NPP 值为 10 年间的最高值  $450.96 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 该年的温度也为历年最高值, 太阳辐射也处于较高的值。2003 年阔叶林的 NPP 值为 10 年间的最低值  $388.53 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 该年的温度和太阳辐射值均为历年的最低值(图 5)。混交林 NPP 的年际变化与温度和太阳辐射的年际变化情况基本一致, 表现出较高的整体相关性 ( $R^2$  为 0.66 和 0.63); 而与降水量和相对湿度的相关性较低(图 5)。总体来看, 该区各森林类型的 NPP 也主要受到温度和太阳辐射的影响。

## 4 讨论

将优化的遥感模型和基于生态过程的机理模型

相集成来模拟碳通量的时空变异, 这种方法已被证明对热带森林和暖温带森林类型碳通量时空变异的估算是可靠的、有效的<sup>[28,40]</sup>。但对寒温带针叶林碳通量的估算还有待验证。因此, 本研究利用 Yan 等<sup>[28]</sup> 基于优化后的参数模型 MODIS MOD17 模型与过程模型 Biom-BGC 模型耦合, 采用研究区域样地数据经 EFAST 敏感性分析对过程模型参数进行校正, 然后对该区长时间序列的森林 NPP 进行模拟, 得到森林 NPP 经实测数据验证精度较高,  $R^2$  为 0.81, RMSE 为  $48.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 该模型能准确地模拟内蒙古大兴安岭地区不同森林类型 NPP。但不同于前期 Yan 等<sup>[28]</sup> 研究, 本研究主要针对寒温带针叶林区森林 NPP 的模拟, 并采用两次样地调查和树轮数据对模拟结果进行了验证。虽然未能获取到研究区的通量站点等观测资料进行模型验证, 但采用的地面样点实测调查数据具有更多森林类型、多种干扰情景(火灾、抚育、择伐等)以及多生境条件等特点, 且树轮数据验证相比于通量站点验证, 具有较高的时空连续性, 大量的样本数据避免了数据的偶然性, 可证实这种耦合方法率定的模型预测可靠性与全局代表性<sup>[41]</sup>。

在研究时段内, 温度和太阳辐射对该区森林

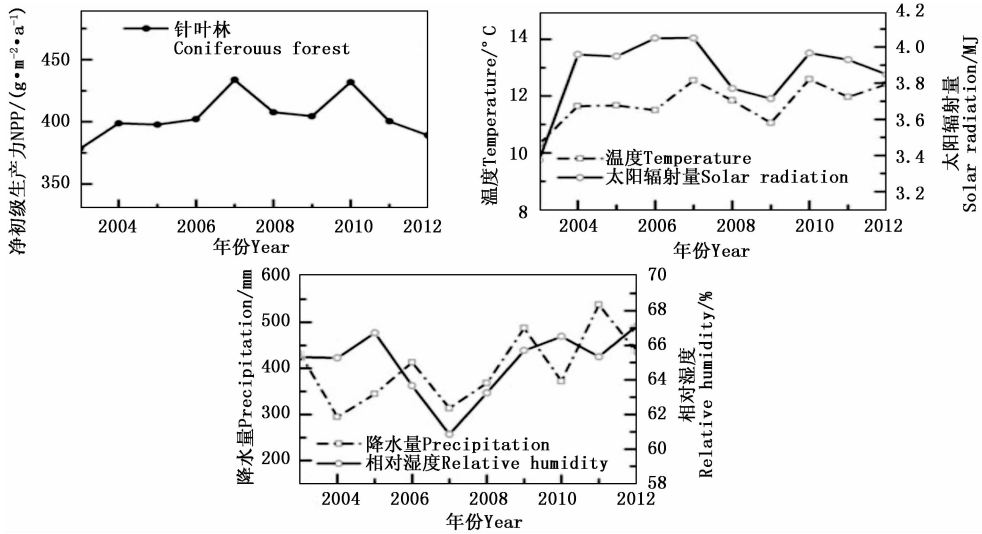


图4 研究区针叶林生长季 NPP 与气候因子的年际变化

Fig. 4 Interannual variation of needle-leaf forest NPP and climate factors during the growing season

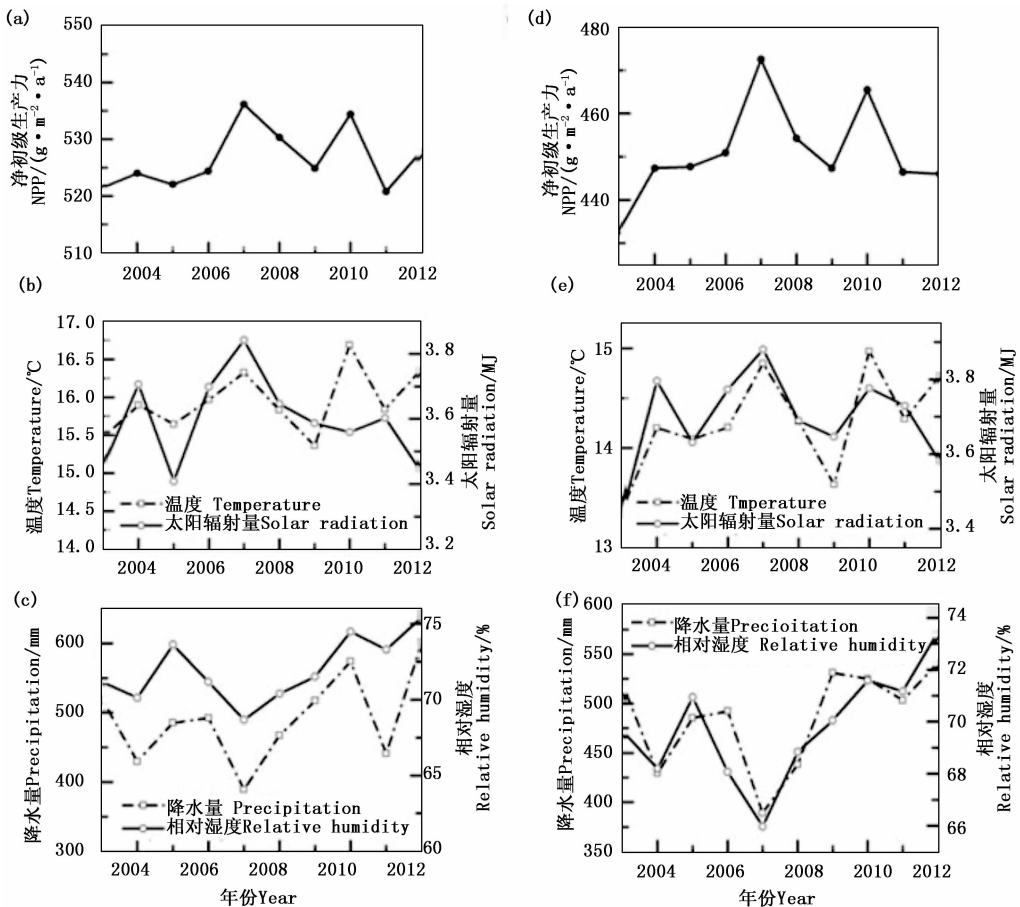


图5 研究区阔叶林(a, b, c)和混交林(d, e, f)生长季 NPP 与气候因子的年际变异

Fig. 5 Annual variation of broad-leaf (a, b, c) and mixed forests (d, e, f) NPP and climate factors during the growing season

NPP 年际变化影响较大,相关系数  $R^2$  达 0.55 和 0.49,而降水和相对湿度对其影响较小。该区的各

种森林类型(针叶林、阔叶林和混交林)对气候因素的响应与总森林 NPP 的一致。该结论也被许多研

究证实,温度升高会导致 NPP 增加<sup>[42-43]</sup>。但曾慧卿等<sup>[44]</sup>对湿地松人工林 NPP 与气候因素关系时认为其主要受降水的影响,而与温度相关性较小。这可能由于研究地区处于不同的纬度带造成的,曾慧卿<sup>[44]</sup>的研究地点在北亚热带,该区域降水充沛,年平均降水量达 1 487 mm,且年度间波动较大;而本研究的试验地在寒温带,年平均降水量仅 300 ~ 450 mm,年间波动很小,导致降水对该区森林 NPP 影响较小。所以对于不同气候区来说,由于气候条件差异较大,森林 NPP 受到气候因素的驱动机制是不同的,这需要我们针对不同气候区域开展森林 NPP 的研究工作。

## 5 结论

本研究利用优化率定后的生理生态过程模型 Biome-BGC 参数,模拟了内蒙古大兴安岭地区时间序列(2003—2012 年)森林净初级生产力(NPP)。该区森林 NPP 的年变化量为 219.3 ~ 399.5  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,其中针叶林 NPP 的年变化量在 218.6 ~ 414.9  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、阔叶林为 214.7 ~ 412.4  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、混交林为 188.3 ~ 404.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。随时间变化呈现缓慢的增长趋势,年间变化中森林 NPP 的低值出现在林火发生的年份。研究区森林 NPP 呈现北高南低,东部偏低的空间分布格局,东部由于受森林火灾的影响,NPP 均值较低。总体来看,火灾是造成该区森林 NPP 降低的主要因素。林思美等<sup>[45]</sup>也证实火后森林 NPP 会显著下降,平均降低的百分比为 43% ~ 80%。天保工程是影响该区森林 NPP 增加与空间分布差异的另一个重要因素,自实施天然林保护工程以来,该区森林面积净增 67.45 万  $\text{hm}^2$ ,森林质量由蓄积量 86.6  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  提高到 97  $\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ <sup>[46]</sup>。天然林保护工程和火灾二者是造成了该区 NPP 呈现不同时空分布格局的主要因素。不同森林类型的 NPP 值差异较大,总体来看,大小依次为针叶林 > 阔叶林 > 混交林。温度和太阳辐射是寒温带针叶林区森林 NPP 年际变化的主导气候因素。

## 参考文献:

[1] Liu S, Bondlamberty B, Hicke J A, *et al.* Simulating the impacts of disturbances on forest carbon cycling in North America: processes, data, models, and challenges[J]. *Journal of Geophysical Research Biogeosciences*, 2015, 116(G4):127-134.

[2] 施志娟,白彦锋,孙睿,等.杉木人工林伐后 2 种恢复模式碳储

量的比较[J]. *林业科学研究*, 2017, 30(2):214-221

[3] 余超,王斌,刘华,等.中国森林植被净生产量及平均生产力动态变化分析[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(4):542-550

[4] Gray A N, Whittier T R. Carbon stocks and changes on Pacific Northwest national forests and the role of disturbance, management, and growth[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, 328:167-178.

[5] Zhou T, Shi P, Jia G, *et al.* Nonsteady state carbon sequestration in forest ecosystems of China estimated by data assimilation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2013, 118(4):1369-1384.

[6] 方江平.西藏南伊沟林芝云杉林生物量与生产力研究[J]. *林业科学研究*, 2012, 25(5):582-589.

[7] Piao S, Cui M, Chen A, *et al.* Altitude and temperature dependence of change in the spring vegetation green-up date from 1982 to 2006 in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(12):1599-1608.

[8] Jorgensen W L, Gao J. Cis-trans energy difference for the peptide bond in the gas phase and in aqueous solution[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1988, 110(13):4212-4216.

[9] Monteith J L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems [J]. *Journal of Apply Ecology*, 1972, 9(3):747-766.

[10] Prince S D. A model of regional primary production for use with coarse resolution satellite data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1991, 12(6):1313-1330.

[11] Potter C S, Randerson J T, Field C B, *et al.* Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4):811-841.

[12] Ruimy A, Dedieu G, Saugier B. TURC: A diagnostic model of continental gross primary productivity and net primary productivity [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(2):269-285.

[13] Running S W, Glassy J M, Thornton P E. MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17) Algorithm Theoretical Basis Document[M]. Maryland. April, 1999.

[14] Veroustraete F, Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 83(3):376-399.

[15] Bonan G B. Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces[J]. *Journal of Chemical Ecology*, 1995, 8(11):2691-2704.

[16] Fensholt R, Sandholt I, Stisen S, *et al.* Analysing NDVI for the African continent using the geostationary meteosat second generation SEVIRI sensor[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 101(2):212-229.

[17] Melillo J M, Mcguire A D, Kicklighter D W, *et al.* Global climate change and terrestrial net primary production[J]. *Nature*, 1993, 363(6426):234-240.

[18] Foley J A. The sensitivity of the terrestrial biosphere to climatic change: A simulation of the Middle Holocene[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8(4):505-525.

[19] Melillo J M. Terrestrial biotic responses to environmental change

- and feedbacks to climate[J]. *Climate Change*, 1995, 13(3):445-481.
- [20] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4):471-490.
- [21] Haxeltine A, Prentice I C. BIOME3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4):693-709.
- [22] Foley, Simon, Gong, *et al.* A security model of dynamic labeling providing a tiered approach to verification[J]. *Proceedings of the IEEE Symposium on Security & Privacy*, 1996:142-153.
- [23] Sellers P J, Los S O, Tucker C J, *et al.* A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMS. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. [J]. *Journal of Climate*, 1996, 9(4):706-737.
- [24] Liu J, Chen J M, Cihlar J, *et al.* A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. *Rem Sens Environ*, 1997, 62(2):158-175.
- [25] Thornton P E, Law B E, Gholz H L, *et al.* Modeling and measuring the effects of disturbance history and climate on carbon and water budgets in evergreen needleleaf forests[J]. *Agricultural & Forest Meteorology*, 2002, 113(1-4):185-222.
- [26] Chiesi M, Maselli, Moriondo, *et al.* Application of BIOME-BGC to simulate Mediterranean forest processes[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 206(1):179-190.
- [27] Chiesi M, Fibbi L, Genesio L, *et al.* Integration of ground and satellite data to model Mediterranean forest processes[J]. *International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation*, 2011, 13(3):504-515.
- [28] Yan M, Tian X, Li Z Y, *et al.* A long-term simulation of forest carbon fluxes over the Qilian Mountains[J]. *International Journal of Applied Earth Observations & Geoinformation*, 2016, 52:515-526.
- [29] Lu L, Li X, Veroustraete F, *et al.* Analysing the forcing mechanisms for net primary productivity changes in the Heihe River Basin, north-west China[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(3):793-816.
- [30] 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[J]. *林业科学研究*, 1994, 7(4):425-430
- [31] 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分布格局[J]. *林业科学研究*, 1993, 6(6):633-642
- [32] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, *et al.* A large and persistent carbon sink in the world's forests[J]. *Science*, 2011, 333(6045):988-993.
- [33] Tian X. Modeling of forest above-ground biomass and evapotranspiration[D]. Enschede:University of Twente, 2015.
- [34] Ouyang S, Wang X, Wu Y, *et al.* Contrasting responses of net primary productivity to inter-annual variability and changes of climate among three forest types in northern China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 7(3):309-320.
- [35] Berthelot M, Friedlingstein P, Ciais P, *et al.* How uncertainties in future climate change predictions translate into future terrestrial carbon flux[J]. *Global Change Biology*, 2010, 11(6):959-970.
- [36] Zhang G, Kang Y, Han G, *et al.* Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(1):377-389.
- [37] 吴刚,冯宗炜. 中国寒温带-温带落叶松林群落生物量的研究概述[J]. *东北林业大学学报*, 1995, 23(1):95-101.
- [38] 董利虎,李凤日,贾炜玮,等. 含度量误差的黑龙省主要树种生物量相容性模型[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10):2653-2661.
- [39] 代武君. 大兴安岭典型林分生物量生产力研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学, 2015
- [40] Farquhar G D, Von C S, Berry J A. A biochemical model of photosynthetic CO<sub>2</sub> assimilation in leaves of C3 species [J]. *Planta*, 1980, 149(1):78-90.
- [41] 张瑜. 黄土高原降水梯度带典型植物适宜盖度空间分布特征[D]. 西安:西北农林科技大学, 2014.
- [42] 方超. 模拟升温 and 氮沉降对黄土高原半干旱区苜蓿草地净初级生产力和土壤呼吸的影响[D]. 兰州:兰州大学, 2015.
- [43] Maselli F, Chiesi M, Fibbi L, *et al.* Integration of remote sensing and ecosystem modelling techniques to estimate forest net carbon uptake[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(8):2437-2443.
- [44] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, *et al.* Potential Net Primary Productivity in South America: Application of a Global Model [J]. *Ecological Applications*, 1991, 1(4):399-429.
- [45] 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[J]. *山地学报*, 2001, 19(6):227-231.
- [46] Su H X, Sang W G. Simulations and analysis of netprimary productivity in *Quercus liaotungensis* forest of Donglingshan Mountain range in response to different climate change scenarios [J]. *Acta Botanica Sinica*, 2004, 46(11):1281-1291.
- [47] 曾慧卿,刘琪琛,冯宗炜,等. 基于BIOME-BGC模型的红壤丘陵区湿地松(*Pinus elliotii*)人工林GPP和NPP[J]. *生态学报*, 2008, 1(11):5314-5321.
- [48] 林思美,黄华国. 基于3PGS-MTCLIM模型模拟根河林区火后植被净初级生产力恢复及其影响因子[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(11):3712-3722.
- [49] 李政源. 内蒙古大兴安岭林区天保工程建设成效分析[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2012(2):12-13.



# Analysis of Spatial-temporal Pattern of Forest Net Primary Productivity of the Great Khingan in Inner Mongolia

ZHANG Shao-wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Gong-qiao<sup>1</sup>, HUI Gang-ying<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. School of Horticulture and Landscape, Henan Vocational College of Agriculture, Zhengzhou 451450, Henan, China)

**Abstract:** [ **Objective** ] To analyze the spatial and temporal distribution patterns and driving factors of forest productivity in Daxing'anling of Inner Mongolia by model simulation. [ **Method** ] The optimized and calibrated physiological parameters of the ecological process model, the Biome-BGC, performed in a previous study were applied to simulate the long-term (from 2003 to 2012) forest net primary productivity (NPP) over the Daxing'anling region in Inner Mongolia. Based on forest dendrochronological measurements, the simulated NPPs were validated at a regional scale. [ **Result** ] The simulated forest NPPs from the calibrated Biome-BGC model had high reliability with  $R^2 = 0.81$  and  $RMSE = 48.73 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ . From 2003 to 2012, the forest NPP ranged from 219.3 to 399.5  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , of which coniferous forest NPP ranged from 218.6 to 414.9  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , broadleaved forest 213.7 to 412.3  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  and mixed forest 188.3 to 404.7  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  respectively. The correlation between forest NPP and temperature and solar radiation was higher ( $R^2$  was 0.55 and 0.49), and the precipitation and relative humidity was lower. [ **Conclusion** ] In time series, the annual average of forest NPP in this area shows a slow growth trend, while the spatial distribution shows the characteristics of high in the north and low in the south and east. The implementation of "Natural Forest Conservation Project" is the main factor driving the increase of forest NPP in this area, while fire decreases forest NPP, which results in the spatial and temporal differences of NPP in this area. The differences of NPP in different forest types are mainly affected by temperature and solar radiation.

**Keywords:** NPP, Biome-BGC model, spatial-temporal pattern, meteorological driving force

(责任编辑:彭南轩)