

东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究

李明泽 王 斌 范文义* 赵丹丹

东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

摘 要 森林净初级生产力(*NPP*)是衡量陆地碳源/汇的重要参数, 准确地估算森林生态系统的*NPP*, 同时通过引入干扰因子以期更加完整地描述生态学过程及其响应是目前森林生态系统碳循环研究的重点。因此, 该研究基于北方生态系统生产力(BEPS)模型, 结合遥感数据和气象数据等模拟2003年东北林区*NPP*; 将BEPS模型模拟的结果作为整合陆地生态系统碳收支(InTEC)模型的参考年数据, 模拟东北林区1901–2008年的*NPP*, 并在InTEC模型中加入林火干扰数据, 模拟大兴安岭地区1966–2008年的森林*NPP*。结果显示: 在1901年, 东北林区*NPP*平均值仅为 $278.8 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 到了1950年, *NPP*平均值增加到 $338.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 2008年*NPP*平均值进一步增加到 $378.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。其中长白山地区的*NPP*平均值始终最高, 大兴安岭次之, 小兴安岭始终最低。到了2008年, 大、小兴安岭和长白山地区的*NPP*平均值都有较大涨幅, 其中涨幅最高的是长白山地区, 达到 $200\text{--}300 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; 东北三省中, 黑龙江和吉林的*NPP*平均值和总量都比较高, 辽宁相对较低, 但相比于1901年的涨幅最高, 达到70%; 重大火灾($100\text{--}1000 \text{ hm}^2$)对*NPP*的影响不是很大, 而特大火灾($>1000 \text{ hm}^2$)的影响比较大, 使*NPP*下降幅度达到10%左右, 其他火灾年份, *NPP*增长迅速并保持在较高水平; 对火灾面积在 100000 hm^2 以上的4个年份的*NPP*进行分析, 发现*NPP*平均值都大幅度下降, 其中1987年下降幅度最大, 为11%以上。

关键词 北方生态系统生产力模型, 碳循环, 大兴安岭, 林火干扰, 整合陆地生态系统碳收支模型, 净初级生产力, 东北林区

引用格式: 李明泽, 王斌, 范文义, 赵丹丹 (2015). 东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究. 植物生态学报, 39, 322–332. doi: 10.17521/cjpe.2015.0031

Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in Northeast China

LI Ming-Ze, WANG Bin, FAN Wen-Yi*, and ZHAO Dan-Dan

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract

Aims Forest net primary production (*NPP*) is an important parameter on measuring the terrestrial carbon source/sink. More accurately estimating *NPP* of forest ecosystems is the focus of carbon cycle. Our objective was to explore how to use remote sensing process model to simulate *NPP* of the northeast forest more accurately, and what impacts of forest fire disturbance have on *NPP*.

Methods In this study, based on remote sensing data and meteorological data, Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPs) model was used to simulate *NPP* of the northeast forest in 2003; The result of BEPs model acted as the reference year data of Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget (InTEC) model to simulate *NPP* from 1901 to 2008 of the northeast forest. Then forest fire disturbance data was incorporated in the InTEC model to simulate *NPP* from 1966 to 2008 of Daxing'an Mountain.

Important findings The average value of *NPP* of the northeast forest was only $278.8 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ in 1901. In 1950, average *NPP* had reached to $338.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. The average *NPP* of the northeast forest in 2008 was $378.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$; Substantial increase was evidenced for Daxing'an Mountain, Xiaoxing'an Mountain and Changbai Mountain with $200 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ to $300 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ increase for Changbai Mountain. The average and total value of *NPP* of Liaoning in 2008 was relatively low, but was still 70 percent higher than that in 1901. Moderate and large fires did not drastically reduce *NPP*, with less than 10 percent reduction during the year of fire occurrence. In the following years, *NPP* recovered quickly and maintained at a high level. *NPP* reduced substantially in each of the

four years with burned area exceeding 100 000 hm² in Daxing'an Mountain.

Key words Boreal Ecosystem Productivity Simulator model, carbon cycle, Daxing'an Mountain, forest fire disturbance, Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget model, net primary productivity, northeast forest

Citation: Li MZ, Wang B, Fan WY, Zhao DD (2015). Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in Northeast China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 322–332. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0031

森林植被是陆地生物圈的主体, 整个陆地生物量的85%都在森林植被中(Lieth & Whittaker, 1975)。净初级生产力(NPP)是地表碳循环的重要组成部分, 是指绿色植被在单位时间、单位面积上所积累的有机物数量(Liu *et al.*, 1999)。不仅直接反应植被在自然环境条件下的生产能力, 而且是衡量生态系统碳源\汇, 调节生态过程的主要因子, 在全球碳循环研究中占据着举足轻重的位置(Ruimy *et al.*, 1994)。

近年来, 利用模型模拟陆地生态系统NPP已经成为研究的焦点, 这是因为陆地碳循环对全球碳收支和气候变化有着重要的影响(Chen *et al.*, 1999), 并且气候变化、森林年龄等因素也会直接或间接影响NPP的变化(Michaletz *et al.*, 2014), 因此利用模型来模拟NPP与气候等各个因素之间的相互作用显得尤其重要, 其中遥感过程模型目前已经成为NPP模拟研究的主要方向(冯险峰等, 2004)。北方生态系统生产力(BEPS)模型和整合陆地生态系统碳收支(InTEC)模型是两个极具代表性的遥感过程模型, BEPS模型(Chen *et al.*, 1999)是Liu和Chen等人在FOREST-BGC模型(Running & Coughlan, 1988)基础上发展起来的, 适合对全球或区域尺度生态系统碳循环的日动态模拟和监测, 该模型不仅成功地耦合了碳水过程, 而且与其他模型相比解决了生态过程模拟中时间、空间尺度转换的难题。InTEC模型是Chen等(2000b)开发的整合陆地生态系统碳循环模型, 适合对不同区域尺度生态系统碳收支的中长期监测, 能够有效地衡量砍伐、火灾、病虫害等干扰对NPP的影响, 该模型对不同树种、海拔高度采用不同的参数, 进而提高了森林碳循环模拟的精度。国内外很多学者利用BEPS模型和InTEC模型对不同区域的NPP进行了模拟。周蕾等(2009)利用BEPS模型, 模拟了中国陆地生态系统不同时间尺度蒸发散(ET)的空间分布格局, 分析了1991–2000年10年间中国陆地生态系统ET的时空分布特征; 王培娟等(2008)利用BEPS模型对长白山地区2002年的NPP进行了模拟, 并进行了敏感性分析; 松下文经等

(2004)利用BEPS模型准确估算了1998年北海道地区的NPP; Higuchi等(2005)利用BEPS模型对日本高山市1998–2002年的总初级生产量(GPP)进行了有效的模拟; Wang等(2007)利用InTEC模型对中国森林1901–2001的碳源\汇的分布进行了模拟, 并估算了森林生态系统土壤有机碳密度; Ju等(2007)利用InTEC模型预测了未来气候变化和CO₂浓度增加后, 中国森林碳收支的动态变化; 黄麟等(2012)利用InTEC模型对江西省1950–2008年的森林碳蓄积过程进行了模拟; Chen等(2000a)利用InTEC模型对加拿大1985年–1996年的森林碳平衡进行了模拟。

综上所述, 国内外大部分学者都是利用单独模型对森林NPP进行模拟, 并且在利用InTEC模型对NPP进行模拟时大多以森林年龄来体现干扰的影响。因此, 本研究将利用BEPS模型对2003年东北林区的NPP进行模拟, 并将结果作为InTEC模型的参考年NPP数据对东北林区1901–2008年的NPP进行模拟, 此外通过对模型的改进, 将实际林火干扰数据加入到模型中, 从而提高东北林区NPP模拟的精度, 准确评估林火干扰对森林NPP的影响, 对我国东北林区的NPP做出精确的评价, 为东北林区碳循环的模拟提供科学依据。

东北林区位于我国的最北面, 与俄罗斯接壤, 分布于黑龙江、吉林、辽宁三省, 是我国重要的木材、矿产生产基地, 林业用地面积达3 875万hm², 占全国的14.7%, 森林覆盖率达39.6%, 远远高出全国森林覆盖率16.55%。拥有全国最大的林区: 小兴安岭、大兴安岭和长白山林区, 以天然林为主(于颖, 2013)。

大兴安岭是森林火灾易发多发区, 是全国森林火险等级最高的地区, 森林火灾面积较大, 森林火灾损失也比较严重。大兴安岭地区1966–2008年43年间共发生森林火灾1 561次, 总过火林地面积达到3 377 403.27 hm², 年火灾次数平均约为36次, 平均年过火面积为 7.85×10^4 hm², 约占全国平均年过火林地面积的27.32%, 森林火灾次数和森林火灾

面积占我国同期比例较高。同时重大森林火灾(面积100–1000 hm²)和特别重大森林火灾(面积1000 hm²以上)发生次数较多。该地区春秋两季干旱且大风,森林火灾一般发生在3–6月和9–11月,夏季雷击火呈增多趋势,一旦发生火灾,将面临火源管理的难度较大,林区道路网密度小,森林火灾扑救难度较大等问题。大兴安岭地区是我国林业重地,随着近年来森林火灾防控机制的初步建立,已无特别重大森林火灾发生,损失较以前大幅下降(魏书精, 2013)。

1 材料和方法

1.1 研究方法

1.1.1 BEPS模型

BEPS模型最初应用于加拿大北方森林生产力的基础研究,之后在东亚、中国等地区得到广泛的应用。BEPS模型在对森林NPP进行模拟时,最重要的就是对森林植被光合作用过程的模拟。模型首先对叶片尺度的瞬时光合作用进行模拟,然后对时间进行积分,得到每日光合作用,从而实现时间尺度的扩展。针对植被不同部位光照条件的不同,在模型中将叶片分为光照叶片和阴影叶片,分别对两种叶片的光合作用进行模拟,从而扩展到整个冠层,得到总GPP。用GPP减去植被的自养呼吸(R_a),最终得到植被的NPP (Chen *et al.*, 1999)。

本研究BEPS模型中的叶片聚集度指数(Ω)和叶、干、根中含碳量(M_{leaf} 、 M_{stem} 、 M_{root})经过实测获得,25 °C时最大羧化速率($V_{m,25}$)经过迭代获得,其他参数采用经验值,具体见表1。

1.1.2 InTEC模型

InTEC模型是在基于光合作用的Farquhar模型、冠层辐射传输模型、土壤碳氮循环(CENTURY)模型、净氮矿化模型以及年龄(Age)-NPP关系模型的

基础上发展起来的。InTEC模型最初应用于加拿大北方森林碳、氮循环的中长期尺度的模拟。Chen等(2000a)利用该模型对加拿大1859–1996年间的陆地生态系统碳收支情况进行了模拟,其模拟结果和精度得到初步的校验。之后,Wang等(2007)将其应用在中国,用来模拟中国陆地生态系统1901–2001年的碳源汇情况,并对模拟精度进行了充分的说明和肯定。此后美国农业部与加拿大多伦多大学合作,利用InTEC模型模拟了美国1901–2010年间的碳收支情况,其模拟方法和精度得到进一步的肯定(Zhang *et al.*, 2012)。由于我国东北林区与加拿大北方森林处于同一纬度,气候条件类似,InTEC模型中大部分参数适用于我国东北林区,因此本研究采用该模型对我国东北林区1901–2008年的NPP进行模拟。

InTEC模型之所以能模拟百年间的森林NPP主要在于NPP与年龄关系的模拟。由于缺乏1901年的森林年龄、干扰、气象、CO₂浓度和氮沉降数据,InTEC模型采用一种碳收支动态平衡的方法来模拟工业前期的森林碳库变化,通过对初始年NPP的反复迭代,使模型模拟的基准年NPP与参考年NPP输入数据之间的误差小于1%,再通过森林年龄与NPP的关系来估算其他年份的NPP。InTEC模型对干扰有3个假设: (1)所有干扰导致林地的完全死亡; (2)干扰后的森林再生不伴随着覆盖类型的变化; (3) InTEC模型用的是固定的土地覆盖类型(Ju *et al.*, 2007)。

本研究InTEC模型中最大羧化速率(V_{cmax})、比叶面积(SLA)参数通过迭代获得,氮固化速率(QN_{fix})、电子传输对温度的敏感度(a_{jm})、酶活性对温度的敏感度(a_{vm})、真实叶片氮含量(N_l)通过实测获得,其他参数采用经验值,具体见表2。

1.1.3 林火干扰

InTEC模型是通过森林年龄的变化来体现干扰,

表1 北方生态系统生产力(BEPS)模型参数
Table 1 Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) model parameters

符号 Symbol	单位 Unit	含义 Description	针叶 Conifers	阔叶 Boreal	针阔混交 Deciduous species	唯一值 Unique value	获取方法 Acquisition Method
Ω	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	叶片聚集度指数 Foliage clumping	0.5	0.7	0.9	–	实测 Measure
$V_{m,25}$	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	25 °C时最大羧化速率 Maximum carboxylation rate at 25 °C	25	50	50	–	迭代 Iteration
M_{leaf}	$\text{kg C}\cdot\text{m}^{-2}$	叶片含碳量 Leaf carbon content	–	–	–	0.1	实测 Measure
M_{stem}	$\text{kg C}\cdot\text{m}^{-2}$	干中含碳量 Stem carbon content	–	–	–	5.00	实测 Measure
M_{root}	$\text{kg C}\cdot\text{m}^{-2}$	根中含碳量 Root carbon content	–	–	–	1.5	实测 Measure

表2 整合陆地生态系统碳收支(InTEC)模型参数
Table 2 Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget (InTEC) model parameters

符号 Symbol	单位 Unit	含义 Description	针叶 Conifers	阔叶 Boreal	针阔混交 Deciduous species	唯一值 Unique value	获取方法 Acquisition Method
SLA	$m^2 \cdot m^{-2}$	比叶面积参数 Parameter of specific leaf area	70.0	31.5	53.3	—	迭代 Iteration
V_{cmax}	$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	最大羧化速率 Maximum carboxylation rate	33	60	40	—	迭代 Iteration
$Q_{N_{fix}}$	—	氮固定速率对温度的敏感度 Sensitivity of N fixation rate on temperature	—	—	—	2.3	迭代 Iteration
a_{jm}	—	电子传输对温度的敏感度 Sensitivity of electron transport on temperature	—	—	—	1.8	实测 Measure
a_{vm}	—	酶活性对温度的敏感度 Sensitivity of rubisco activity on temperature	—	—	—	2.4	实测 Measure
N_l	$g \cdot N \cdot m^{-2}$	真实叶片氮含量 Actual leaf nitrogen content	—	—	—	1.2	实测 Measure

其设定每个点在模拟期间只被干扰一次。本研究改进了这一设定,通过在模型中嵌入林火数据,可以模拟每个点的多次火灾,每次发生火灾后森林年龄都再次从0开始。这样可以提升模型对火灾干扰模拟的准确性,进而提升模型对森林NPP的模拟精度。

通过对InTEC模型进行改进,以1966–2008年的大兴安岭地区林火数据作为InTEC模型中的干扰数据,模拟得到1966–2008年大兴安岭地区的NPP,并分析林火干扰对大兴安岭地区森林NPP的影响。

在InTEC模型中的干扰因子设定除了林火干扰外还有森林采伐和森林病虫害的干扰,且干扰过程是相互独立的(Chen *et al.*, 2000b)。本研究由于没有获取到森林采伐和病虫害的干扰数据,仅对林火的干扰进行了模拟。

1.2 BEPS模型输入数据

本研究BEPS模型输入数据包括中分辨率成像光谱仪(MODIS)的叶面积指数(LAI)数据、土地覆盖类型数据产品;气象数据包括2003年全年的日最高气温、日最低气温、相对湿度、降雨量、降雪、日太阳总辐射,均来自中国气象数据共享网,利用插值得到;土壤含水量采用毛学刚利用土壤类型数据结合USDA编码和AWC之间的关系制作的土壤含水量分布图,数据具体制作方法参见文献(毛学刚, 2011)。其中LAI数据采用了Chen等(2006)开发的LACC算法对时间序列进行了平滑处理,以消除云层对LAI数据的干扰。图1列出了平滑前、后LAI平均值的变化,可以明显看出平滑后的LAI较平滑前更接近真实值。所有输入数据均采用UTM投影, WGS-84坐标系。

1.3 InTEC模型输入数据

1.3.1 气象数据

InTEC模型中的气象数据包括月平均气温、月

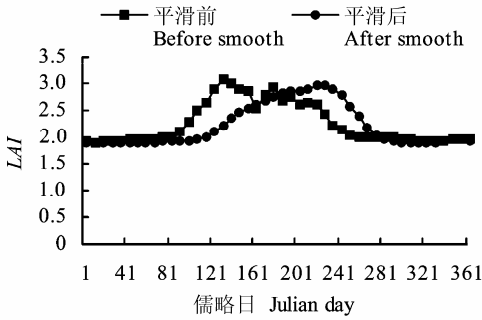


图1 叶面积指数(LAI)平滑前、后平均值对比。
Fig. 1 Comparison of the average leaf area index (LAI) values before smooth with after smooth.

平均太阳辐射、月总降水量、年大气CO₂浓度。其中1901–2008年的月平均气温、月总降水量来自UK气候研究中心全球0.5度分辨率数据集(CRU3.0, UK Climate Research Unit 3.0)(<http://www.cru.uea.ac.uk>), 1901–2008年月平均太阳辐射数据来自NCEP/NCAR (National Center for Atmosphere Research/ National Centers for Environmental Prediction)(<http://www.esrl.noaa.gov>)的T62 高斯再分析数据, 大气CO₂浓度来自于美国夏威夷的冒纳罗亚观测站(20° N, 156° W)(<http://earthobservatory.nasa.gov>)观测数据集。

1.3.2 叶面积指数

2003年东北林区的LAI数据采用Deng等(2006)利用2003年MODIS每8天的LAI产品,通过定量反演得到2003年全年LAI最大值,作为InTEC模型中的LAI数据,具体影像制作方法参见文献(Deng *et al.*, 2006)。

1.3.3 森林覆盖类型数据

图2为东北林区森林覆盖类型数据采用2006年东北地理与农业生态研究所出版的1:1 000 000东北

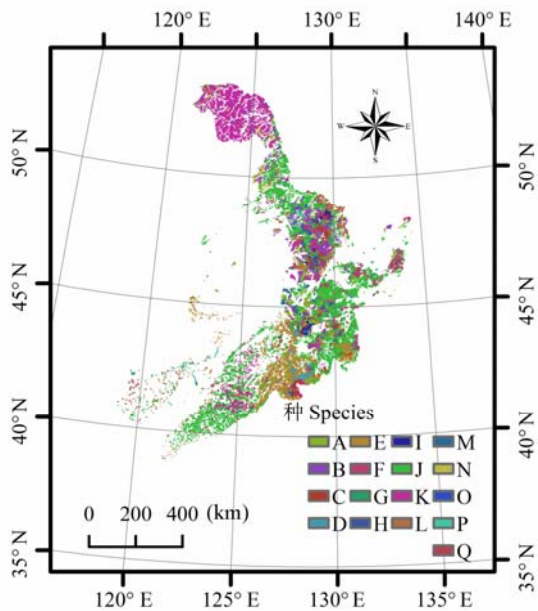


图2 东北森林覆盖类型图。A, 白桦和黑杨; B, 白桦; C, 针叶混交林; D, 针阔混交林; E, 阔叶混交林; F, 紫椴; G, 黑杨; H, 红松和蒙古栎; I, 红松和紫椴; J, 蒙古栎; K, 落叶松; L, 蒙古栎和白桦; M, 山杨; N, 落叶松和白桦; O, 落叶松和蒙古栎; P, 樟子松; Q, 白桦和山杨。

Fig. 2 Northeast forest cover type map. A, *Betula platyphylla* and *Populus nigra*; B, *Betula platyphylla*; C, Coniferous forest; D, Mixed forest; E, Broadleaved forest; F, *Tilia amurensis*; G, *Populus nigra*; H, *Pinus koraiensis* and *Quercus mongolica*; I, *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis*; J, *Quercus mongolica*; K, *Larix gmelinii*; L, *Quercus mongolica* and *Betula platyphylla*; M, *Populus davidiana*; N, *Larix gmelinii* and *Betula platyphylla*; O, *Larix gmelinii* and *Quercus mongolica*; P, *Pinus sylvestris*; Q, *Betula platyphylla* and *Populus davidiana*.

植被分布图, 结合编码原则制作的。如果没有重大的干扰事件发生, 区域尺度上的森林覆盖类型在短时间内不会发生较大变化。我国从1998年开始实行“天保工程”, 严格控制森林的采伐, 可认为2003–2006年期间森林覆盖类型发生变化较小, 因此本文使用2006年的森林覆盖类型数据代替2003年的森林覆盖类型。包括3大森林类型针叶林、阔叶林、针阔混交林和8个树种类型, 分别为红松(*Pinus koraiensis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、山杨(*Populus davidiana*)、黑杨(*Populus nigra*)。

1.3.4 森林年龄数据

图3为东北林区森林年龄数据采用2005年黑龙江省的固定样地清查数据, 2005年吉林省和辽宁省的二类清查数据。

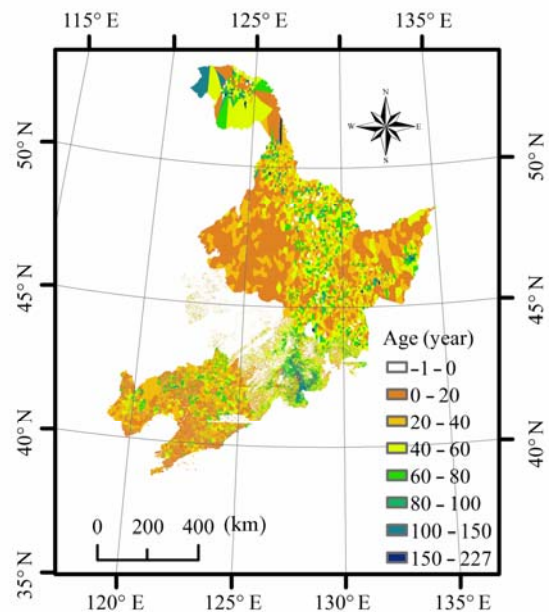


图3 东北森林年龄分布图。

Fig. 3 Northeast forest age distribution map.

1.3.5 NPP数据

本研究利用BEPS模型模拟得到的2003年东北林区的NPP作为InTEC模型中的参考年数据, 从而在一定程度上提高InTEC模型的模拟精度。

1.3.6 地形数据

地形数据采用全国分辨率为0.000 833°的数字高程模型(DEM)数据, 经过重采样生成分辨率为1 km的栅格数据。

1.3.7 林火数据

本研究收集了黑龙江大兴安岭地区1966–2008年的森林火灾数据, 包括经纬度, 过火面积、风速、风向、坡度、可燃物类型等字段。

1.3.8 精度验证数据

本研究的精度验证数据采用2003年MODIS的NPP产品和样地实测数据来对BEPS模型的模拟结果进行精度验证, 另外采用基于BEPS模型模拟的2007年东北林区NPP来对InTEC模型模拟的2007年东北林区NPP进行精度验证。

2 结果

2.1 2003年东北林区NPP空间分布

2003年东北林区的NPP的最大值为735.82 g C·m⁻²·a⁻¹, 最小值为56.6 g C·m⁻²·a⁻¹, 平均值为376.7 g C·m⁻²·a⁻¹。从图4中可以看出, 整个东北林区NPP基

本集中在200–300 g C·m⁻²·a⁻¹和400–600 g C·m⁻²·a⁻¹两个等级, 大兴安岭北部地区NPP比较高, 集中在450–550 g C·m⁻²·a⁻¹之间, 而大兴安岭南部和小兴安岭北部以及中部地区的NPP比较低, 大部分在300 g C·m⁻²·a⁻¹以下, 小兴安岭南部地区相对比较高, 在350–550 g C·m⁻²·a⁻¹之间, 呈现北低南高的趋势, 长白山大部分地区的NPP都在400 g C·m⁻²·a⁻¹以上, 只有北方少部分地区比较低。

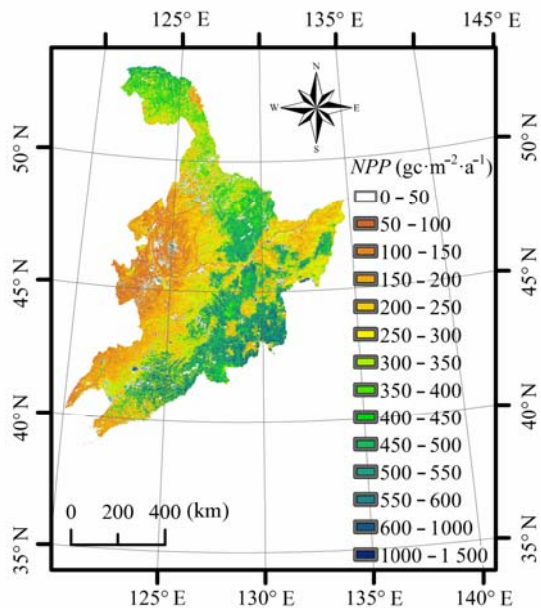


图4 北方生态系统生产力(BEPS)模型模拟的2003年净初级生产力(NPP)空间分布图。
Fig. 4 Spatial distribution of net primary production (NPP) in 2003 simulated by Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS).

分别对黑龙江、吉林、辽宁三省NPP进行统计, 发现吉林2003年的NPP平均值最高, 为402.9 g C·m⁻²·a⁻¹。黑龙江和辽宁相对较低, 平均值分别为351.4 g C·m⁻²·a⁻¹和361.4 g C·m⁻²·a⁻¹。在NPP总量方面, 东北林区中黑龙江最高, 总量达到7.4 × 10¹³ g C·a⁻¹, 是吉林和辽宁总和的两倍还多, 吉林NPP的总量为2.3 × 10¹³ g C·a⁻¹, 而辽宁仅为1.1 × 10¹³ g C·a⁻¹。

利用分类数据对2003年东北林区针叶林、阔叶林以及针阔混交林的NPP进行统计, 从表3中可以看出2003年东北林区针叶林、阔叶林、针阔混交林NPP平均值分别为413.1 g C·m⁻²·a⁻¹、382.8 g C·m⁻²·a⁻¹和380.7 g C·m⁻²·a⁻¹。总量分别为1.8 × 10¹³ g C·a⁻¹、3.3 × 10¹³ g C·a⁻¹和1.7 × 10¹³ g C·a⁻¹。

表3 2003年关于不同森林类型的净初级生产力(NPP)统计
Table 3 Net primary production (NPP) and total NPP for different forest types in 2003

森林类型 Forest types	NPP平均值 Average value of NPP (g C·m ⁻² ·a ⁻¹)	NPP总量 Total NPP (g C·a ⁻¹)
针叶林 Coniferous forest	413.1	1.8 × 10 ¹³
阔叶林 Broadleaved forest	382.8	3.3 × 10 ¹³
针阔混交林 Mixed forest	380.7	1.7 × 10 ¹³

2.2 1901–2008年东北林区NPP的时空分布

2.2.1 1901–2008年东北林区NPP的时间分布

从图5中可以看出在1901年东北林区NPP平均值仅为278.8 g C·m⁻²·a⁻¹, 此后NPP逐年增加。到1950年时, 东北林区NPP平均值增加到338.5 g C·m⁻²·a⁻¹, 增长了约21%。到20世纪60年代, 由于过度采伐, 病虫害以及森林火灾等外界干扰, 东北林区NPP平均值开始长时间地下降, 从1961年的382.3 g C·m⁻²·a⁻¹, 下降到1979年的341.2 g C·m⁻²·a⁻¹, 下降幅度最多时在10%以上。到20世纪80年代初, 情况才有所好转, 东北林区NPP平均值又开始回升。20世纪90年代初期是NPP最高的一段时期, 平均值达到了400 g C·m⁻²·a⁻¹以上。2000年以后, 东北林区NPP平均值基本维持在370–390 g C·m⁻²·a⁻¹之间。

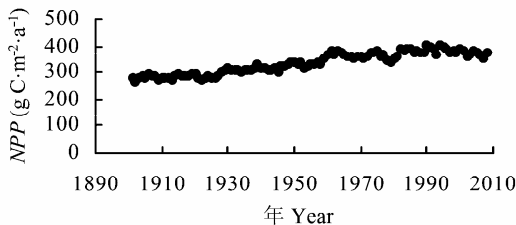


图5 整合陆地生态系统碳收支(InTEC)模型模拟的1901–2008年净初级生产力(NPP)平均值。
Fig. 5 Average value of net primary production (NPP) simulated by Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget (InTEC) model from 1901 to 2008.

2.2.2 1901–2008年东北林区NPP空间分布

图6中给出了1901年、1950年及2008年东北林区NPP的空间分布, 可以看出, 在各个年份, 小兴安岭地区的NPP都要比大兴安岭和长白山略低, 1901年东北林区NPP总体都比较低, 只有大兴安岭西北部的NPP比较高, 在500 g C·m⁻²·a⁻¹以上, 其他地区的NPP都在350 g C·m⁻²·a⁻¹以下; 到了1950年, 东北林区的NPP总体都有显著增加, 其中大兴安岭只有南部地区略低。小兴安岭地区的NPP基本在100–

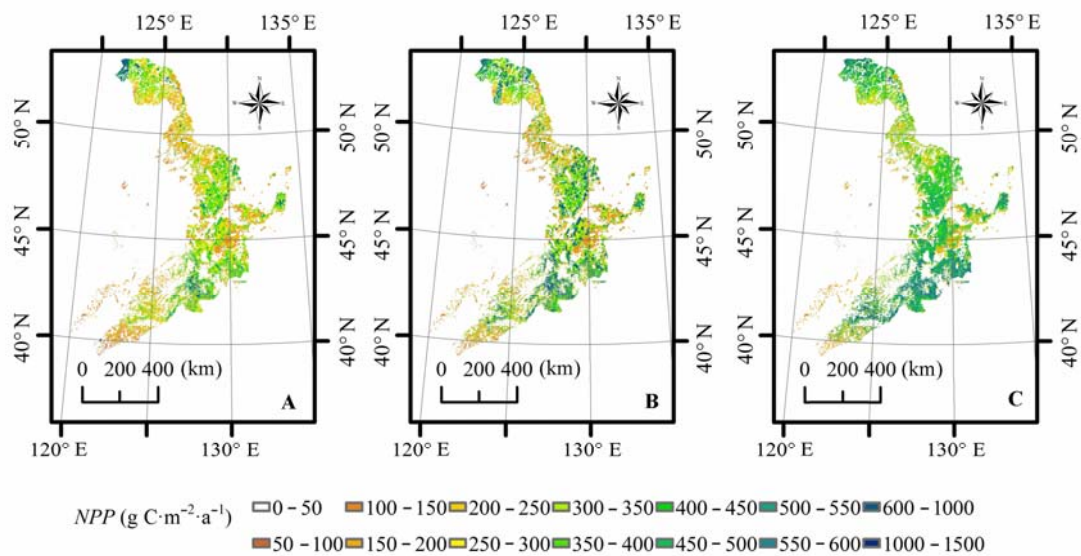


图6 东北林区净初级生产力(NPP)空间分布图。A, 1901年。B, 1950年。C, 2008年。
Fig. 6 Spatial distribution of net primary production (NPP) in Northeastern China. A, 1901. B, 1950. C, 2008.

300 g C·m⁻²·a⁻¹、400–600 g C·m⁻²·a⁻¹两个等级。长白山大部分地区NPP都比较高, 只有北方相对较低; 2008年东北林区NPP进一步增加, 大兴安岭大部分地区都在400 g C·m⁻²·a⁻¹以上。小兴安岭南部和中部地区的情况也有所好转, 达到了300 g C·m⁻²·a⁻¹以上, 长白山地区依然是总体NPP平均值最高的地区。从1901年到2008年, 东北林区中长白山地区增长幅度最大, 达到200–300 g C·m⁻²·a⁻¹。大兴安岭次之, 涨幅在100–200 g C·m⁻²·a⁻¹之间, 小兴安岭增长相对较少, 在100 g C·m⁻²·a⁻¹以下。

1901年黑龙江、吉林、辽宁三省的NPP平均值分别为277.0、279.2、185.8 g C·m⁻²·a⁻¹, 到了1950年NPP平均值分别为348.6、377.7、252.6 g C·m⁻²·a⁻¹, 2008年NPP平均值分别为380.0、419.6、325.2 g C·m⁻²·a⁻¹。1901年黑龙江、吉林、辽宁三省的NPP总量分别为 5.7×10^{13} g C·a⁻¹、 1.8×10^{13} g C·a⁻¹、 7.0×10^{12} g C·a⁻¹, 1950年NPP总量分别增加到 6.8×10^{13} g C·a⁻¹、 2.2×10^{13} g C·a⁻¹、 9.3×10^{12} g C·a⁻¹, 2008年NPP总量分别为 7.5×10^{13} g C·a⁻¹、 2.4×10^{13} g C·a⁻¹、 1.2×10^{13} g C·a⁻¹。可以看出在这108年间, 东北林区的NPP无论在平均值还是总量方面都有显著增加。其中总量方面增长最多的是黑龙江, 涨幅最高的是辽宁, 达到了70%。

2.3 林火干扰的影响

本研究收集到了大兴安岭地区1966–2008年的林火数据, 据统计, 这期间共发生火灾1 561次, 其中重大火灾208次, 特大火灾50次。通过InTEC模型模拟的NPP平均值结果结合林火数据进行分析, 从图7中可以看出对于既无重大火灾也无特大火灾的年份, 森林NPP平均值保持在较高水准, 如1990–1995年间, 这6年的森林NPP平均值基本保持在350 g C·m⁻²·a⁻¹以上, 这43年期间的最高值也出现在这6年间; 对发生重大火灾的年份进行分析发现, 重大火灾对森林NPP的影响不是很大, 如1970年、1983年和1984年, 从图中可以看出, 发生重大火灾险情,

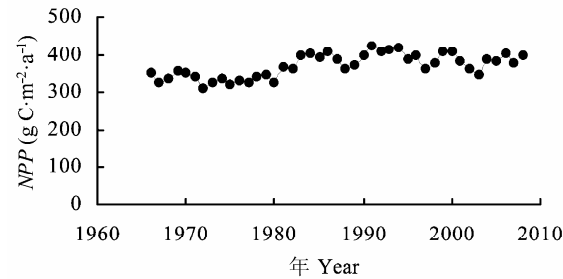


图7 1966–2008年大兴安岭净初级生产力(NPP)平均值。
Fig. 7 Average value of net primary production (NPP) from 1966 to 2008.

在一定程度上放缓了NPP增长的速度, 但之后森林NPP将得到迅速恢复, 影响程度在5%左右; 对发生特大火灾的年份进行分析发现, 大部分发生特大火灾的年份的NPP平均值都出现了大幅度下降, 且NPP平均值不高于 $360 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。如1967年、1972年、1980年、1987年以及2003年, 下降幅度都在10%左右。其中1972–1980年连续9年发生特大火灾险情, 可以看出这9年是NPP平均值相对较低的一段时期。

大兴安岭地区1966–2008年总过火面积为 $3\,377\,403.27 \text{ hm}^2$, 其中过火面积在 $100\,000 \text{ hm}^2$ 以上的有4次, 分别为1972年、1980年、1987年和2003年。本研究重点对这4次的NPP进行分析。从图7中可以看出1972年大兴安岭地区的NPP平均值从1971年的 $343.7 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 下降到 $313.2 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 到1976年才恢复到火前水平; 1980年NPP平均值从1979年的 $359.80 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 下降到 $326.1 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 下降幅度接近10%; 1987年大兴安岭地区发生有史以来最严重的一次森林火灾, 过火面积为 $758\,000 \text{ hm}^2$, 达到历史总过火面积的32%, NPP平均值从1986年的 $407.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 下降到 $350.4 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 下降幅度达到14%, 到1990年才恢复到火前水平; 2003年大兴安岭地区再次发生森林大火, NPP平均值比2002年下降了接近10%。

2.4 精度检验

本研究利用1995年、2000年、2005年的小兴安岭地区固定样地数据, 采用林分生长与收获预估模型来计算样地蓄积量, 在通过生物量转换因子连续函数法计算出小兴安岭地区2003的NPP, 具体计算方法参见毛学刚(2011)。据统计, 2003年小兴安岭地区样地计算的NPP最大值为 $690.6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $161.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $410.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。本研究BEPS模型模拟的2003年小兴安岭地区NPP的最大值为 $632.82 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $75.2 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $369.9 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 精度为70.64%。随机选取50个样地点进行统计。从图8中可以看出利用样地数据计算的NPP与BEPS模型模拟的NPP具有良好的相关性, 相关系数达到0.79以上。

本研究BEPS模型得到的2003年东北林区NPP最大值为 $735.8 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $56.6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $376.7 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 而MODIS在2003年的NPP产品最大值为 $828.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小

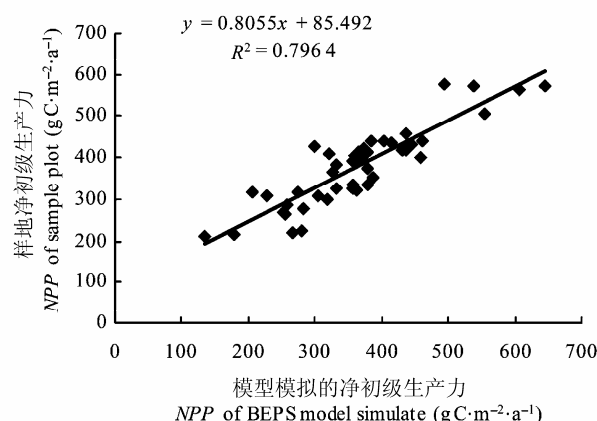


图8 北方生态系统生产力模型估算的净初级生产力与固定样地计算的NPP相关性。

Fig. 8 Correlation between net primary production (NPP) calculated by plot measurement and NPP simulated by Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) model and calculated by plots.

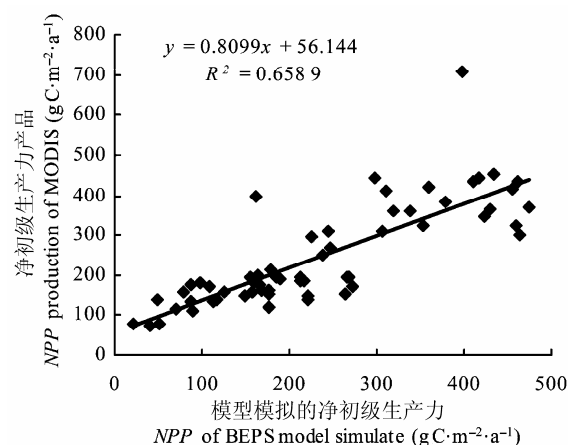


图9 北方生态系统生产力模型估算的净初级生产力与中分辨率成像光谱仪(MODIS)的NPP产品相关性。

Fig. 9 Relationship between net primary production (NPP) from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) and NPP simulated by Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) model.

值为 $3.6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $377.9 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 随机选取60个样本点进行相关性验证, 从图9中可以看出, 本研究的相关性比较好, 相关系数约为0.66。

利用基于BEPS模型制作的2007年东北林区NPP与InTEC模型模拟得到2007年东北林区NPP进行相关性分析。InTEC模型模拟的2007年东北林区NPP最大值为 $721.1 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $49.1 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 $356.6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。BEPS模型模拟得到的2007年东北林区NPP最大值为 $632.8 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 最小值为 $75.2 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 平均值为 369.9

$\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。随机选取100个样本点进行相关性验证,从图10中可以看出,相关系数为0.78,相关性良好。

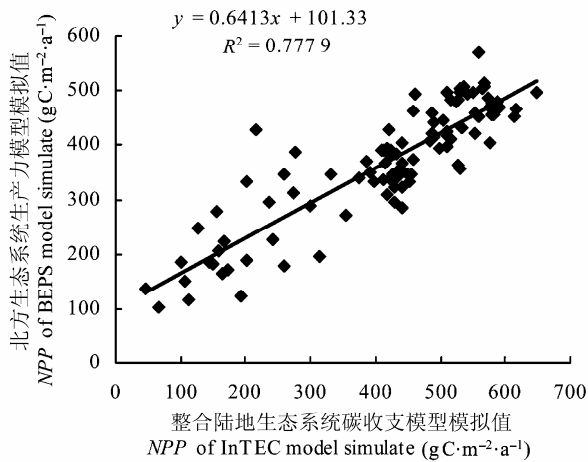


图10 整合陆地生态系统碳收支模型估算的净初级生产力(NPP)与北方生态系统生产力模型估算的NPP相关性。

Fig. 10 Comparison of net primary production (NPP) estimated by Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget (InTEC) model and NPP simulated by Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) model.

本研究利用2005年大、小兴安岭265个森林清查固定样地数据(树种组成、林分年龄、林木密度、立地指数、树高、胸径等),通过公式(1)(于颖等,2014)计算出2005年样地NPP。

$$NPP = d_w / d_t + L_f + L_{fr} \quad (1)$$

式中: d_w/d_t 为在特定的年龄(t)下每年树木生物量中干物质总量的变化量; L_f 和 L_{fr} 为每年叶片和细根的更新量。

2005年样地数据计算的大、小兴安岭NPP最大值为 $710.3 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,最小值为 $65.5 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,平均值为 $370.2 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。InTEC模型模拟的2005年大、小兴安岭NPP最大值为 $695.6 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,最小值为 $58.9 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,平均值为 $368.8 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。模拟精度为64.75%。随机选100个样地点对InTEC模型2005的NPP结果进行相关性验证。从图11中可以看出,InTEC模型模拟的2005年NPP结果与2005年样地NPP相关系数约为0.62。

本研究以1987年为例,统计模型在改进前后大兴安岭地区着火区域的NPP。在加入林火数据之前大兴安岭地区1987年着火区域的NPP总量为 $1.7 \times 10^7 \text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$,加入林火数据之后为 $1.5 \times 10^7 \text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$,两者相差 $2 \times 10^6 \text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。根据孙龙等(2009)的研究

发现,1987年大兴安岭地区着火区域碳的释放量为 $2.0 \times 10^6 - 2.5 \times 10^6 \text{ g C}\cdot\text{a}^{-1}$,本研究结果与孙龙等的研究结果吻合,说明修改后的模型能够很好地反映森林火灾干扰对NPP的影响。

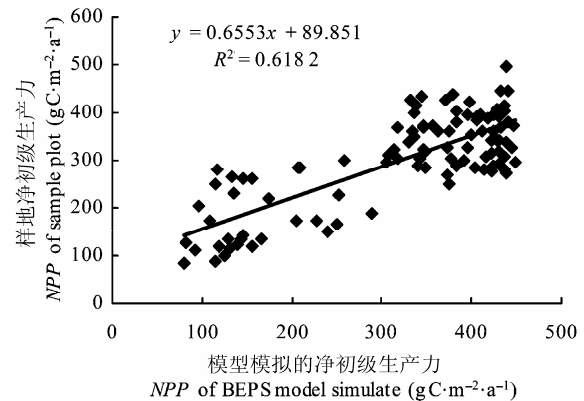


图11 整合陆地生态系统碳收支模型估算的净初级生产力(NPP)与固定样地计算的NPP相关性。

Fig. 11 Comparison of net primary production (NPP) estimated by Integrated Terrestrial Ecosystem C-budget (InTEC) model with NPP calculated by plots.

3 讨论

本研究利用林业数据和遥感数据和气象数据等,采用BEPS模型模拟了2003年东北林区的NPP作为InTEC模型中的参考年数据对1901–2008年东北林区的NPP进行了模拟。针对结果在时间尺度上来讨论:在20世纪初,东北林区NPP平均值较低,且总体增长缓慢,一直到1949年前NPP平均值基本在 $300 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 以下。这可能是由于这段时期大气降水与太阳辐射量较少,植物光合作用较弱,而自养呼吸作用较强所导致的。到了1950年,由于国家大力发展工业,森林火灾、砍伐、病虫害等干扰加剧,森林覆盖面积大幅下降,致使东北林区NPP平均值开始长期的下降,到1979年下降幅度在10%以上。20世纪80年代初,国家采取了一系列有效措施来对森林资源进行保护,东北林区NPP平均值开始回升,并在20世纪90年代初达到最高值。近年来,由于国家对森林资源的保护力度在加大,且火灾、砍伐、病虫害等干扰在日益减少,东北林区NPP平均值基本稳定在 $370-390 \text{ g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 之间,且呈逐年增加的趋势。可以看出,温度、降水、辐射及 CO_2 浓度是促进NPP增长的重要因素,而对森林资源的保护是其决定性因素。

针对结果在空间尺度上来讨论: 本研究重点分析了东北林区1901年、1950年和2008年的空间分布。结果显示大兴安岭地区一直是NPP总量最高的地区, 呈现北高南低的趋势。长白山地区的NPP平均值最高, 且分布比较均匀。小兴安岭无论在总量还是平均值方面都是最低的, 且南部NPP平均值明显高于北部。究其原因可能由地理位置、气候、地形以及森林类型等差异造成。综上所述, 加大小兴安岭地区的森林管理力度, 重点改善小兴安岭北部地区的森林NPP, 才能使NPP在总体上进一步得到提升。对东北三省的森林NPP分别进行分析发现, 黑龙江的NPP总量始终最高, 这是因为黑龙江森林面积广阔, 占据大兴安岭地区和小兴安岭的大部分地区。但在NPP平均值方面, 吉林省则比较高, 这是因为长白山地区森林覆盖率大, 森林类型比较丰富, 生物群落多样性, 且较早得到了有效的保护和管理, 使得该省NPP始终处于较高水平。相比之下, 辽宁由于森林覆盖率小, 且工业化较发达, NPP在总量和平均值方面都比较少。不过东北三省NPP平均值相较1901年和1950年都有大幅度增长, 辽宁的NPP平均值相比1901年的涨幅达到70%, 可以看出辽宁正在努力向林业大省转变。

本研究收集到了大兴安岭地区1966–2008年的林火数据, 将其嵌入到InTEC模型中, 用来模拟大兴安岭地区1966–2008年间的NPP。结果显示, 无重大及特大火灾的年份, NPP平均值能够稳步提升, 并保持在较高的水平, 尤其是特大火灾以后的年份, 森林NPP平均值能够大幅度增加。这是由于火灾改变了森林年龄的结构, 火灾后大量森林植被重新生长, 植被的生长环境得到了很好的保护, 使得NPP在短时间内得到恢复; 对发生重大火灾的年份进行分析发现, 重大火灾对大兴安岭林区整体影响并不大, 影响幅度在5%左右, 在一定程度上抑制了NPP的增长, 但恢复期较短; 经过对发生特大火灾年份的森林NPP平均值进行分析发现, 特大火灾对森林NPP具有较大影响, 森林NPP平均值会出现大幅度下降。综合以上分析得出, 重大及特大火灾会对森林NPP产生一定影响, 而适当的林火干扰有助于NPP的增长, 所以预防重大及特大火灾的发生, 同时加入适当的干扰, 才能从根本上解决火灾干扰的影响。

本研究针对NPP的模拟结果, 分析其不确定性

包括以下几个方面: (1) NPP参考年数据是通过BEPS模型模拟出来的, 该模拟结果本身存在一定误差, 该误差在一定程度上会传递到InTEC模型的模拟结果中; (2) 由于林龄数据的限制, 导致大兴安岭地区的林龄插值略显粗糙, 这会对该地区NPP结果产生一定影响; (3) 植被覆盖类型数据采用2006年的数据, 这是因为并未收集到2003年的植被覆盖类型数据, 所以假设2003–2006年间并未发生较大的植被覆盖类型变化; (4) 只收集到大兴安岭地区的林火数据, 其他地区仍然采用林龄控制干扰, 且不同干扰对NPP的作用程度是不一样的, 由于缺乏其他干扰数据, 这一差别在本研究中并未体现; (5) 大气、氮沉降、CO₂浓度等非干扰因素的分辨率较低, 这会给模型的精度带来一定影响; (6) 两个模型中的大部分参数是通过其他文献获得或采用模型的缺省值, 这会对模拟精度带来一定影响。

通过改进模型, 增加参考年数据, 来控制InTEC模型在区间上的模拟, 更加充分的考虑干扰因子的影响, 进一步改进模型中的生态学过程, 细化林龄结构的分布, 深入探究干扰因子和非干扰因子对模型不确定性的影响及生态系统碳循环的动因, 从而提高NPP乃至净生态系统生产力(NEP)的模拟精度将成为今后研究工作中的重点和主要方向, 以此来为中国东北林区生态系统碳循环的模拟、动态监测提供借鉴, 为东北林区的经营、管理策略提供理论依据。

基金项目 国家科技支撑项目(2011BAD37B01)。

参考文献

- Chen JM, Liu J, Cihlar J, Goulden MJ (1999). Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 124, 99–119.
- Chen J, Chen WJ, Liu J, Cihlar J, Gray S (2000a). Annual carbon balance of Canada's forests during 1859–1996. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 839–849.
- Chen MZ, Deng F, Chen MZ (2006). Locally adjusted cubic-spline capping for reconstructing seasonal trajectories of a satellite-derived surface parameter. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2230–2237.
- Chen WJ, Chen J, Liu J, Cihlar J (2000b). Approaches for reducing uncertainties in regional forest carbon balance. *Global Biogeochemical Cycles*, 14, 827–838.
- Deng F, Chen JM, Plummer S, Chen MZ, Pisek J (2006). Algorithm for global leaf area index retrieval using satellite

- imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 2219–2229.
- Feng XF, Liu GH, Chen SP, Zhou WZ (2004). Study on process model of net primary productivity of terrestrial ecosystems. *Journal of Natural Resources*, 19, 369–378. (in Chinese with English abstract) [冯险峰, 刘高焕, 陈述彭, 周文佐 (2004). 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述. 自然资源学报, 19, 369–378.]
- Higuchi K, Shashkov A, Chan D, Chan D, Saigusa N, Murayama S, Yamamoto S, Kondo H, Chen J, Liu J, Chen B (2005). Simulations of seasonal and inter-annual variability of gross primary productivity at Takayama with BEPS ecosystem model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 134, 143–150.
- Huang L, Shao QQ, Liu JY (2012). Forest carbon sequestration and carbon sink/source in Jiangxi Province. *Acta Ecologica Sinica*, 32, 3010–3020. (in Chinese with English abstract) [黄麟, 邵全琴, 刘纪远 (2012). 江西省森林碳蓄积过程及碳源/汇的时空格局. 生态学报, 32, 3010–3020.]
- Ju WM, Chen JM, Harvey D, Wang S (2007). Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO₂. *Journal of Environment Management*, 85, 538–562.
- Lieth H, Whittaker RH (1975). *Primary Productivity of the Biosphere*. Springer-Verlag, New York.
- Liu J, Chen JM, Cihlar J, Chen WJ (1999). Net primary productivity distribution in the boreas region from a process model using satellite and surface data. *Journal of Geophysical Research*, 104, 27735–27754.
- Mao XG (2011). *Study on the Model of Northeast Forest Carbon Cycle at Daily Step and the Integrated Application of Remote Sensing*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese) [毛学刚 (2011). 东北森林碳循环日步长模型与遥感综合应用研究. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Michaletz ST, Cheng DL, Kerkhoff AJ, Enquist BJ (2014). Convergence of terrestrial plant production across global climate gradients. *Nature*, doi: 10.1038/nature13470.
- Panasonic WJ, Yang CF, Chen J, Wang QX, Kameyama Z, Tamura M (2004). Accurate estimation of net primary productivity of terrestrial ecosystem at a regional scale. *Acta Geographica Sinica*, 59, 80–87. (in Chinese with English abstract) [松下文经, 杨翠芬, 陈晋, 王勤学, 龟山哲, 田村正行 (2004). 广域空间尺度上植被净初级生产力的精确推算. 地理学报, 59, 80–87.]
- Ruimy A, Saugier B, Dedieu G (1994). Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research*, 99, 5263–5283.
- Running SW, Coughlan JC (1988). A general model of forest ecosystem processes for regional applications: 1. Hydro-logic balance, canopy gas exchange and primary production processes. *Ecological Modelling*, 42, 125–154.
- Sun L, Zhang Y, Guo QX, Hu HQ (2009). Carbon emission and dynamic of NPP post forest fires in 1987 in Daxing'an Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 45(12), 100–104. (in Chinese with English abstract) [孙龙, 张瑶, 国庆喜, 胡海清 (2009). 1987年大兴安岭林火碳释放及火后NPP恢复. 林业科学, 45(12), 100–104.]
- Wang PJ, Xie DX, Zhang JH, Zhu QJ (2008). Sensitivity analysis for primary factors of the forest net primary productivity in Changbaishan Natural Reserve based on process model. *Geographical Research*, 27, 323–330. (in Chinese with English abstract) [王培娟, 谢东辉, 张佳华, 朱启疆 (2008). 长白山森林植被NPP主要影响因子的敏感性分析. 地理研究, 27, 323–330.]
- Wang SQ, Chen JM, Ju WM, Feng XF, Chen MZ, Chen P, Yu G (2007). Carbon sinks and sources in China's forests during 1901–2001. *Journal of Environment Management*, 85, 524–537.
- Wei SJ (2013). *Quantitative Evaluation Methods of Carbon Emissions from Forest Fires in Heilongjiang Province, China*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese with English abstract) [魏书精 (2013). 黑龙江省森林火灾碳排放定量评价方法研究. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Yu Y (2013). *Based on InTEC Model to Research the Time and Space Distribution of Carbon Source/Sink of Northeastern Forest*. PhD dissertation, Northeast Forestry University, Harbin. (in Chinese with English abstract) [于颖 (2013). 基于InTEC模型东北森林碳源/汇时空分布研究. 博士学位论文, 东北林业大学, 哈尔滨.]
- Yu Y, Fan WY, Yang XG (2014). Estimation of Forest NPP in Xiaoxing'an Mountains in 1901–2008. *Scientia Silvae Sinicae*, 50(10), 16–23. (in Chinese with English abstract) [于颖, 范文义, 杨曦光 (2014). 1901–2008年小兴安岭森林NPP估算. 林业科学, 50(10), 16–23.]
- Zhang FM, Chen JM, Pan YD, Birdsey RA, Shen SH, Ju WM, He LM (2012). Attributing carbon changes in conterminous U.S. forests to disturbance and non-disturbance factors from 1901 to 2010. *Journal of Geographical Research*, 117, doi: 10.1029/2011JG001930.
- Zhou L, Wang SQ, Chen JM, Feng XF, Ju WM, Wu WX (2009). The spatial-temporal characteristics of evapotranspiration of China's terrestrial ecosystems during 1991–2000. *Resources Science*, 31, 962–972. (in Chinese with English abstract) [周蕾, 王绍强, 陈镜明, 冯险峰, 居为民, 伍卫星 (2009). 1991年至2000年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征. 资源科学, 31, 962–972.]

责任编辑: 刘世荣 责任编辑: 李 敏