

# 江西省森林净初级生产力动态变化特征及其驱动因子分析

李登秋<sup>1,2\*</sup> 张春华<sup>3</sup> 居为民<sup>2</sup> 刘丽娟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>浙江农林大学环境与资源学院, 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江临安 311300; <sup>2</sup>南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210023; <sup>3</sup>鲁东大学资源与环境工程学院, 山东烟台 264025

**摘要** 亚热带森林生态系统具有巨大的固碳潜力。净初级生产力(*NPP*)在碳循环过程中具有重要的作用, 受到气候变化、大气成分、森林扰动的强度和频度、林龄等因子的综合影响, 然而目前上述各因子对亚热带森林*NPP*变化的贡献尚不明确, 需要鉴别森林*NPP*时空变化的主要驱动因子, 以准确认识亚热带森林生态系统碳循环。该文综合气象数据、年最大叶面积指数(*LAI*)、参考年*NPP* (BEPS模型模拟)、林龄、森林类型、土地覆盖、数字高程模型(DEM)、土壤质地、CO<sub>2</sub>浓度、氮沉降等多源数据, 利用InTEC模型(Integrated Terrestrial Ecosystem Carbon-budget Model)研究亚热带典型地区江西省森林生态系统1901–2010年*NPP*时空动态变化特征, 通过模拟情景设计, 着重讨论1970–2010年气候变化、林龄、CO<sub>2</sub>浓度和氮沉降对森林*NPP*动态变化的影响。研究结果如下: (1) InTEC模型能较好地模拟研究区*NPP*的时空变化; (2) 江西省森林*NPP* 1901–2010年为(47.7 ± 4.2) Tg C·a<sup>-1</sup> (平均值±标准偏差), 其中20世纪70年代、80年代、90年代分别为50.7、48.8、45.4 Tg C·a<sup>-1</sup>, 2000–2009年平均为55.2 Tg C·a<sup>-1</sup>; 随着森林干扰后的恢复再生长, 江西省森林*NPP*显著上升, 2000–2009年*NPP*增加的森林面积占森林总面积的60%; (3) 1970–2010年, 仅考虑森林干扰因子和仅考虑非干扰因子(气候、氮沉降、CO<sub>2</sub>浓度)情景下*NPP*分别为43.1和53.9 Tg C·a<sup>-1</sup>, 比综合考虑干扰因子和非干扰因子作用下的*NPP*分别低估7.3 Tg C·a<sup>-1</sup> (低估的*NPP*与综合考虑干扰因子和非干扰因子作用下*NPP*的比值为14.5%, 下同)和高估3.6 Tg C·a<sup>-1</sup> (7.1%); 气候因子导致平均*NPP*减少2.0 Tg C·a<sup>-1</sup> (4.7%), 氮沉降导致平均*NPP*增加4.5 Tg C·a<sup>-1</sup> (10.4%), CO<sub>2</sub>浓度变化及耦合效应(氮沉降+ CO<sub>2</sub>浓度变化)分别导致平均*NPP*增加4.4 Tg C·a<sup>-1</sup> (10.3%)和9.4 Tg C·a<sup>-1</sup> (21.8%)。

**关键词** 气候变化; CO<sub>2</sub>; 林龄; 江西省; 净初级生产力; 氮沉降

**引用格式:** 李登秋, 张春华, 居为民, 刘丽娟 (2016). 江西省森林净初级生产力动态变化特征及其驱动因子分析. 植物生态学报, 40, 643–657. doi: 10.17521/cjpe.2015.0348

## Forest net primary productivity dynamics and driving forces in Jiangxi Province, China

LI Deng-Qiu<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Chun-Hua<sup>3</sup>, JU Wei-Min<sup>2</sup>, and LIU Li-Juan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystem and Carbon Sequestration of Zhejiang Province, Lin'an, Zhejiang 311300, China; <sup>2</sup>International Institute for Earth System Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China; and <sup>3</sup>School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 264025, China

### Abstract

**Aims** Subtropical forest ecosystem has great carbon sequestration capacity. Net primary productivity (*NPP*) plays a critical role in forest carbon cycle and is affected by a number of factors, including climate change, atmospheric composition, forest disturbance intensity and frequency, and forest age, etc. However, the contribution of these factors to the temporal-spatial dynamics of *NPP* is still not clear. Quantifying the main driving forces on the temporal-spatial dynamics of *NPP* for subtropical forest ecosystems is a critical foundation for understanding their carbon cycle.

**Methods** We utilized multi-sources dataset, including observed meteorological data, inversed annual maximum leaf area index (*LAI*), referenced *NPP* (simulated by Boreal Ecosystem Productivity Simulator (BEPS) model), forest age and forest types, land cover, digital elevation model (DEM), soil texture, CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen deposition. We used the InTEC (integrated terrestrial ecosystem carbon-budget) model to simulate the *NPP* dynamics for forest ecosystems in Jiangxi Province during the period of 1901–2010. The effects of climate change, forest age, CO<sub>2</sub> concentration and nitrogen (N) deposition on forest *NPP* from 1970 to 2010 were

收稿日期Received: 2015-10-07 接受日期Accepted: 2016-02-19

\* E-mail: dqli@zafu.edu.cn

discussed through designed scenarios.

**Important findings** (1) Validations by flux measurements and forest inventory data indicated that the InTEC model was able to capture the interannual and spatial variations of forest *NPP*. (2) The average forest *NPP* was  $47.7 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $\pm 4.2 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ) during 1901–2010. The *NPP* in the 1970s, 1980s, 1990s and 2000s was 50.7, 48.8, 45.4, and  $55.2 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ , respectively. As forest regrows, *NPP* significantly increased for forests in Jiangxi Province in the 2000s, and exceed that in the 1970s for more than 60% of the forest area. (3) During 1970–2010, under the scenarios of disturbance and non-disturbance, the forest *NPP* were underestimated by  $7.3 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (14.5%) and overestimated by  $3.6 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (7.1%) compared to the scenarios of all disturbance and non-disturbance factors, respectively. Compared to the average *NPP* during 1970–2010, climate change decreased *NPP* by  $-2.0 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (−4.7%), N deposition increased *NPP* by  $4.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (10.4%),  $\text{CO}_2$  concentration change, and the integrated fertilization of  $\text{CO}_2$  and N deposition increased *NPP* by  $4.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (10.3%) and  $9.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (21.8%), respectively.

**Key words** climate change;  $\text{CO}_2$ ; forest age; Jiangxi Province; net primary productivity; nitrogen deposition

**Citation:** Li DQ, Zhang CH, Ju WM, Liu LJ (2016). Forest net primary productivity dynamics and driving forces in Jiangxi Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 643–657. doi: 10.17521/cjpe.2015.0348

森林生态系统是陆地生态系统的主体, 在调节全球碳平衡、减缓大气中 $\text{CO}_2$ 等温室气体浓度上升, 以及维护全球气候等方面具有重要作用(Houghton, 2007; Pan *et al.*, 2011)。森林净初级生产力(*NPP*)是植物光合作用有机物质的净积累, 反映了森林碳汇功能强度, 是理解森林生态系统碳循环过程的关键参数, 其时空变化受到气候、 $\text{CO}_2$ 浓度、氮沉降、地形、土壤等非干扰因子(环境因子)和森林砍伐、虫灾、火灾等干扰因子, 以及干扰后森林恢复的影响(Pretzsch *et al.*, 2014; Liang *et al.*, 2015)。明确这些因子对森林*NPP*动态变化的影响是认识森林碳收支和陆地生态系统碳循环的基础。目前, 针对气候和 $\text{CO}_2$ 浓度变化对森林*NPP*影响开展了大量研究(Nemani *et al.*, 2003; Albani *et al.*, 2006; Piao *et al.*, 2013; Fang *et al.*, 2014), 但对于林龄和氮沉降以及与气候等因子的耦合作用对森林*NPP*变化特征的影响研究还较少, 缺乏对不同影响因子的综合考虑, 因此难以准确评价各因子对区域碳循环过程的贡献。

不同因子对森林碳循环影响研究的技术手段包括控制实验、野外调查、涡度相关通量观测、森林清查、模型模拟、大气反演等。在区域尺度, 森林清查数据估算和模型模拟是研究森林生态系统碳收支的重要方法。基于森林清查数据估算生物量碳汇和*NPP*的研究虽然有了较大的发展(Fang *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2010), 但分析其时间变化依然比较困难, 尤其在当前 $\text{CO}_2$ 浓度升高、全球气候变暖的背景下, 难以从机制上解释不同因子对森林碳源汇变化的影响。模型模拟可以在

不同的时空尺度上研究生态系统碳收支对环境 and 气候变化以及扰动的响应和影响, 通过分离气候因子、 $\text{CO}_2$ 浓度变化、氮沉降等对生态系统的光合作用、呼吸作用、光合产物分配、凋落物分解和土壤碳库分解等方面的影响来理解森林碳循环的时空特征及其成因(Felzer *et al.*, 2004; Pan *et al.*, 2009)。目前大多数生态过程模型仅考虑环境因子的影响(Dufresne *et al.*, 2002; Canadell & Raupach, 2008; Lindner *et al.*, 2010), 而很少考虑森林扰动及林龄的作用(Zaehle *et al.*, 2006; Williams *et al.*, 2012), 但越来越多的学者在尝试将这些因子加入生态过程模型(Masek & Collatz, 2006; Petritsch *et al.*, 2007; Coursolle *et al.*, 2012; 李明泽等, 2015), 以更准确地认识森林碳循环动态变化。

近年的研究表明, 东亚季风区( $20^{\circ}$ – $40^{\circ}$  N)的亚热带森林生态系统碳吸收能力高于亚洲热带和温带森林, 也高于欧洲、非洲和北美同纬度地区森林(Yu *et al.*, 2014), 其固碳能力已受到国内外学者的广泛关注(蒋琰等, 2011; Zhang *et al.*, 2011; Yu *et al.*, 2014)。较小的林龄结构、较高的氮沉降和充沛的雨热条件被认为是增强我国亚热带地区森林碳吸收的主要驱动因子, 并使该地区森林生态系统可能成为继中高纬度地区的欧洲和北美森林碳汇区之外的另一较大碳吸收区(Yu *et al.*, 2014), 然而, 不同因子对森林*NPP*的影响尚不明确, 亟需开展影响亚热带森林*NPP*动态变化驱动机制的综合研究。本文以亚热带典型区域江西省为研究区, 综合采用遥感反演、数据分析和InTEC (integrated terrestrial ecosystem

C-budget model)模型模拟的方法, 模拟分析江西省1901–2010年森林NPP时空变化特征, 鉴别气候、大气CO<sub>2</sub>浓度变化、氮沉降、森林扰动等因子对森林NPP变化的影响, 明确不同因子对江西省森林NPP动态变化的贡献, 为准确认识亚热带森林生态系统碳循环提供科学依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

江西省(24.13°–29.15° N, 114.05°–118.47° E)属中亚热带湿润季风气候, 年降水量1 341–1 940 mm, 年蒸发量700–800 mm, 全年太阳总辐射量为3 800–4 515 MJ·m<sup>-2</sup>, 年平均日照时间为1 722 h, 日照百分率为33%–47%, 年平均气温16.3–19.7 °C。江西省森林资源丰富, 是我国南方重点林区, 森林植被类型主要有暖性针叶林、暖性针阔混交林、常绿阔叶林、混交林、落叶阔叶林、竹林和山顶矮林等。根据江西省乔木林优势树种统计结果, 杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林和湿地松(*Pinus elliottii*)林面积分别占乔木林面积的23.3%、14.6%和6.5%。人工乔木林中, 杉木林、湿地松林和马尾松林占江西省人工乔木林面积的67.2% (173.5 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>); 天然乔木林中, 马尾松林、杉木林和栎类(*Quercus* spp.)林占江西省天然乔木林面积的36.2% (192.7 × 10<sup>4</sup> hm<sup>2</sup>)。江西省森林以幼龄林和中龄林为主, 面积分别占乔木林面积的46.1%和41.3%。

### 1.2 InTEC模型

InTEC模型是由气候、森林植被类型、林龄、土壤属性等数据驱动, 模拟森林生态系统碳、氮、水循环的生物地球化学过程的模型(Chen *et al.*, 2000), 它包括3个主要部分: (1)根据CENTURY模型改进的土壤碳氮动态模拟模块; (2)基于Farquhar叶片瞬时光合作用生物化学模型的冠层尺度光合作用模拟模块; (3)利用土壤三维水文模型模拟土壤水平方向和垂直方向上温度、含水量的空间分布模块。InTEC模型中, 气候变化对NPP的影响是通过改变生长季长度和光合作用速率实现的; 大气CO<sub>2</sub>浓度直接影响细胞间的CO<sub>2</sub>浓度, 大气CO<sub>2</sub>浓度升高对光合作用速率产生积极影响; 氮沉降通过影响植被吸收可利用的氮对植被的光合速率产生影响, 同时, 叶与细根碳库的碳氮比决定叶与细根凋落物被划分

为结构碳库和代谢碳库的比例, 对碳库的转移分解速率产生影响。InTEC模型中采用固定土地覆盖类型, 假定干扰后的森林再生类型不发生变化。

InTEC模型中将森林火灾、虫害、砍伐等扰动事件及导致的林龄的变化称为扰动因子, 扰动因子对碳循环的影响定义为扰动作用, 将气候变化、大气CO<sub>2</sub>浓度、氮沉降等称为非扰动因子, 对碳循环的影响定义为非扰动作用。基于森林生态系统在工业革命前处于碳平衡状态(NPP与异养呼吸相等)的假设, 进行各碳库的初始化。InTEC模型碳库的初始化分两种情形: (1)森林的年龄大于从工业革命到现在的时间, 假设森林碳收支在上次干扰前处于平衡状态; (2)森林的年龄小于从工业革命到现在的时间, 假设在工业革命前森林碳收支处于平衡状态, 其后直到最近一次干扰前, 森林碳收支主要受非干扰因子(气候、CO<sub>2</sub>浓度和氮沉降)的影响, 在受到干扰之后, 森林碳收支同时受非干扰和干扰因子的影响。

#### 1.2.1 总初级生产力(GPP)的计算

Farquhar光化学模型是InTEC模型模拟森林碳循环的理论基础。森林冠层的瞬时光合速率 $P_{can}$ (Chen *et al.*, 1999)可表示为:

$$P_{can} = P_{can1} \times f_p + P_{can2} \times (1 - f_p) \quad (1)$$

$$P_{can1} = (J_{sun} \times L_{sun} + J_{sh} \times L_{sh}) \times \frac{c_i - \Gamma}{4.5c_i + 10.5\Gamma} \quad (2)$$

$$P_{can2} = V_m \times \frac{c_i - \Gamma}{c_i + k_{co}} \times L_t \quad (3)$$

其中,  $P_{can1}$ 和 $P_{can2}$ 分别为受到电子传输限制和羧化作用限制的冠层光合速率;  $f_p$ 为冠层光合作用受到电子传输限制的比例;  $L_t$ 、 $L_{sun}$ 和 $L_{sh}$ 分别为总叶面积指数、阳叶叶面积指数和阴叶叶面积指数;  $J_{sun}$ 和 $J_{sh}$ 分别为阳叶和阴叶的电子传输速率;  $V_m$ 是最大羧化速率;  $c_i$ 是细胞间CO<sub>2</sub>浓度;  $\Gamma$ 是叶片CO<sub>2</sub>浓度补偿点;  $k_{co}$ 是酶动力参数,  $J$ 、 $V_m$ 、 $c_i$ 、 $\Gamma$ 和 $k_{co}$ 的计算方法参考Bonan (1995)文献。

森林每年的GPP可看作是生长季光合速率 $P_{can}$ 的总和, 即:

$$GPP(i) = \int_t P_{can}(t) dt \quad (4)$$

式中,  $GPP(i)$ 为第*i*年的GPP;  $t$ 表示光合作用时间。

GPP的年际变化可以表示为:

$$\frac{dGPP(i)}{di} = \int_t \frac{dP_{can}(t)}{di} dt + P_{can}(t) \frac{\partial t_g}{\partial i} \quad (5)$$

其中, 公式右侧第一项表示由于光合速率的变化引

起的GPP变化量; 右侧第二项表示由于生长季长度( $l_g$ )的变化而引起的GPP变化量。根据Chen等(2000)的时间尺度转换方法, GPP的年际变化表示为:

$$\frac{dGPP(i)}{di} = \chi(i) \left[ \frac{GPP(i) + GPP(i-1)}{2} \right] \quad (6)$$

每年的GPP计算为:

$$GPP(i) = GPP(i-1) \times \frac{2 + \chi(i)}{2 - \chi(i)} = GPP(i-1) \times \varphi_{GPPn}(i) \quad (7)$$

其中,  $\varphi_{GPPn}(i)$ 为第*i*年非干扰因子对GPP的综合影响因子;  $\chi(i)$ 与气候因子、大气CO<sub>2</sub>浓度( $c_a$ )、细胞间CO<sub>2</sub>浓度与大气CO<sub>2</sub>浓度比值( $\alpha$ )、生长季长度( $l_g$ )、氮含量( $N_l$ )、土壤温度、土壤水分等因子有关, 表示为:

$$\begin{aligned} \chi(i) = & \{ f_p(i) \times [\xi_{L_{1,1}} \times \overline{L_{1,1}}(i) \times \Delta C_a + \xi_{L_{2,1}} \times \overline{L_{2,1}}(i) \times \Delta \alpha + \xi_{L_{3,1}} \times \overline{L_{3,1}}(i) \times \Delta \Gamma + \xi_{L_{5,1}} \times \overline{L_{5,1}}(i) \times \Delta J_{mt} + \xi_{L_{N,1}} \times \overline{L_{N,1}}(i) \times \Delta N_l(i) + \xi_{L_{L,1,1}} \times \overline{L_{L,1,1}}(i) \times \Delta L_{sun}(i) + \xi_{L_{L,2,1}} \times \overline{L_{L,2,1}}(i) \times \Delta L_{shad}(i)] \\ & + (1 - f_p(i)) \times [\xi_{L_{1,2}} \times \overline{L_{1,2}}(i) \times \Delta C_a + \xi_{L_{2,2}} \times \overline{L_{2,2}}(i) \times \Delta \alpha + \xi_{L_{3,2}} \times \overline{L_{3,2}}(i) \times \Delta \Gamma + \xi_{L_{4,2}} \times \overline{L_{4,2}}(i) \times \Delta k_{co} + \xi_{L_{5,2}} \times \overline{L_{5,2}}(i) \times \Delta V_{mt} + \xi_{L_{N,2}} \times \overline{L_{N,2}}(i) \times \Delta N_l(i)] \} \\ & + L_g \times \Delta l_g \end{aligned} \quad (8)$$

其中,  $\alpha$ 为细胞间CO<sub>2</sub>浓度与大气CO<sub>2</sub>浓度的比值;  $\xi_{L_x}$ 是对 $\overline{L_x}$ 的订正系数;  $\Delta x$ 表示因子*x*的年际变化( $x$ 包括 $C_a$ 、 $\alpha$ 、 $\Gamma$ 、 $J_{mt}$ 、 $N_l$ 、 $L_{sun}$ 、 $L_{shad}$ 、 $k_{co}$ 、 $V_{mt}$ 、 $l_g$ 等因子),  $J_{mt}$ 和 $V_{mt}$ 分别为电子传输速率和羧化速率;  $\overline{L_{x,1(2)}}$ 是上述各因子影响的比重系数, 其中1和2分别表示冠层光合作用受到电子传输限制和羧化作用限制的部分;  $L_g$ 是生长季长度比重系数, 上述各比重系数的计算方法见Ju等(2007)的文献。

### 1.2.2 NPP动态模拟

每年的NPP用下式计算:

$$NPP(i) = NPP_u(i) \times Fnpp(i) \quad (9)$$

式中,  $NPP(i)$ 为第*i*年的NPP;  $NPP_u(i)$ 为受非干扰因子影响的第*i*年的NPP年总量;  $Fnpp(i)$ 是森林NPP随年龄的变化系数, 介于0–1.0之间, 从森林开始生长时逐步增大, 在森林生长达到峰值时为1.0, 随后逐步下降并趋于稳定。

$$\text{根据 } NPP_u(i) = GPP(i) - R_a(i) \quad (10)$$

$$\text{令 } X(i) = GPP(i) / GPP(i-1) \quad (11)$$

$$Y_i = R_a(i) / R_a(i-1) \quad (12)$$

$$\beta(i-1) = \frac{R_a(i-1)}{NPP_u(i-1) + R_a(i-1)} \quad (13)$$

所以

$$\begin{aligned} \frac{NPP_u(i) - NPP_u(i-1)}{NPP_u(i) + NPP_u(i-1)} &= \frac{GPP(i) - GPP(i-1) - R_a(i) + R_a(i-1)}{GPP(i) + GPP(i-1) - R_a(i) - R_a(i-1)} \\ &= \frac{(X(i)-1) - \beta(i-1) \times (Y(i)-1)}{(X(i)+1) - \beta(i-1) \times (Y(i)+1)} = B(i) \end{aligned} \quad (14)$$

因此,

$$NPP_u(i) = NPP_u(i-1) \times \frac{1+B(i)}{1-B(i)} = NPP_u(i-1) \times \varphi_{NPPn}(i) \quad (15)$$

其中,  $NPP_u(i)$ 为受非干扰因子影响的第*i*年的NPP年总量;  $GPP(i-1)$ 为*i*-1年的GPP;  $R_a(i)$ 是第*i*年的自养呼吸总量;  $X(i)$ 表示第*i*年NPP的年际变化率(无量纲);  $\beta(i-1)$ 表示第*i*-1年自养呼吸与NPP的比值;  $Y(i)$ 表示第*i*年 $R_a$ 的年际变化率(无量纲)。自养呼吸( $R_a$ )包括维持性呼吸( $R_m$ )和生长性呼吸( $R_g$ ), 分别包括叶、茎、粗根和细根4个库。  $\varphi_{NPPn}(i)$ 为非扰动因子(气候、大气CO<sub>2</sub>浓度和氮沉降)导致的第*i*年NPP相对于前一年的变化幅度,  $R_m$ 是温度的函数,  $R_g$ 主要与GPP有关(Chen *et al.*, 1999), 即:

$$\begin{cases} R_a(i) = R_m(i) + R_g(i) = \sum_j (R_{m,j}(i) + R_{g,j}(i)) \\ R_{m,j}(i) = M_j(i) \times r_{m,j} \times Q_{10,j}^{\frac{T_a - T_b}{10}} \\ R_{g,j}(i) = r_{g,j} \times r_{a,j} \times GPP(i) \end{cases} \quad (16)$$

其中,  $M_j$ 为第*j*个碳库的生物量;  $r_{m,j}$ 为第*j*个碳库在参考温度 $T_b$ 时的维持性呼吸系数;  $T_a$ 为大气温度;  $Q_{10}$ 是维持性呼吸对温度的敏感性系数;  $r_{g,j}$ 是第*j*个碳库的生长性呼吸系数;  $r_{a,j}$ 是第*j*个碳库的生长性呼吸比例。

通过综合考虑非干扰因子和干扰因子的影响, 不断迭代运算调节 $NPP_0$ 和各碳库, 直到 $|NPP_{refc} - NPP_{ref}| < NPP_{ref} \times 1\%$ , 其中,  $NPP_{refc}$ 和 $NPP_{ref}$ 分别为InTEC模型模拟的参考年NPP和输入的参考年NPP。

### 1.2.3 扰动对碳循环影响的模拟

森林的扰动包括病虫害、砍伐和火灾等, 不同类型的扰动对森林碳循环的影响存在差异。由于缺乏详细的森林扰动类型的空间分布数据, 结合江西省实际情况, 将所有的扰动都假设为砍伐, 并根据林龄推算扰动发生的时间。在扰动发生的当年, 林龄和NPP为0, 植被碳库中的茎碳库(树干部分)有75%的碳被转移走(损失掉), 其余3个植被碳库则转移到相应的土壤碳库中。在扰动的下一年, 森林恢

复生长,以后每年的林龄增加1年。

森林扰动(主要指砍伐、火灾等)会导致林龄的变化,在InTEC模型中林龄对碳收支的影响主要通过NPP与林龄的关系体现。NPP与林龄之间的关系在模拟和预测年尺度、十年尺度、世纪尺度,甚至更长时间尺度的森林碳循环中起着至关重要的作用(Wang *et al.*, 2011)。

#### 1.2.4 InTEC模型的主要参数

根据江西省主要森林类型的已有研究成果设置模型参数(李秀娟等, 2009; 黄麟等, 2012; 李登秋等, 2014), NPP分配到乔木各个器官(干、叶、粗根和细根)的比例以及各碳库的转移、分配系数见表1。

#### 1.3 InTEC模型模拟和结果验证数据

InTEC模型在月尺度上模拟碳循环,输入数据主要包括气象数据(月平均气温,月降水量、月太阳辐射、月平均饱和水汽压差)、年最大叶面积指数(LAI)、参考年NPP、林龄、森林植被类型、土地覆盖类型、数字高程模型(DEM)、土壤质地(土壤中的黏土、砂土的含量百分比)、氮沉降、大气CO<sub>2</sub>浓度(表2)。将以上数据(除大气CO<sub>2</sub>浓度外)统一处理为空间分辨率为463 m × 463 m、UTM投影系统和WGS-84坐标系统,以进行InTEC模型模拟。

##### 1.3.1 气象数据

由于1960年前的气象观测数据较少,1901–1960年的气候数据采用CRU 3.21数据集(该数据由英国东安格利亚大学气象研究中心生成,简称CRU数据),原始分辨率为0.5°,通过反距离加权法生成463

m空间分辨率。地表的太阳总辐射( $Q$ )通过云量计算得到:  $Q = Q_0(a - bn)$ ,  $Q_0$ 为天文辐射,  $n$ 为总云量,  $a$ 、 $b$ 为经验系数。1961–2010年的气象数据采用江西省87个气象站观测资料反距离权重法插值生成数据,由于缺少平均水汽压数据,采用全国702个气象站点观测数据插值生成,掩膜获取江西省平均水汽压数据。为使两个时间段的数据保持连续性,以观测数据为基准对CRU数据进行校正,方法如下:分别计算1961–1970年观测数据各气象要素的月平均值和1961–1970年相应的CRU的气象要素的月平均值;计算1961–1970年时段两种数据的差值,根据差值对1901–1960年CRU各气象要素值进行修正。

图1为1901–2010年各气象要素的变化趋势,近110年来气温、降水、太阳辐射和平均水汽压的变异系数分别为2.7%、13.6%、6.2%和2.5%。气温在1970–1990年低于110年的平均水平,20世纪90年代中期以来呈现整体上升的趋势;降水的年际差异明显,20世纪80年代末降水呈波动上升趋势,20世纪90年代末则呈现波动下降,2003–2009年降水量均低于110年的平均水平;太阳辐射在1901–1923年呈现整体上升的趋势,随后太阳辐射呈下降趋势,与1901–1910年平均值相比,2001–2010年太阳辐射降低7%。

##### 1.3.2 土壤与地形数据

土壤与地形数据主要包括土壤质地、土壤厚度、地形湿度指数、初始地下水位等数据。土壤质地数据来源于北京师范大学全球变化与地球系统科学研

表1 主要森林类型净初级生产力(NPP)分配比例及生物量碳库转移和分解系数

Table 1 Allocation coefficients of net primary productivity (NPP), and turnover rates, decomposition rates of biomass carbon pools for main forest types

碳分配、周转率 Carbon allocation and turnover rate	森林类型 Forest type				
	马尾松、湿地松 <i>Pinus massoniana</i> , <i>Pinus elliotii</i>	杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	常绿阔叶林 Evergreen broadleaf forest	针阔混交林 Conifer and broadleaf mixed forest	针叶混交林 Coniferous mixed forest
木质部分分配比例 Allocation coefficient to wood	0.655 4	0.772 4	0.462 4	0.578 4	0.694 4
粗根分配比例 Allocation coefficient to coarse root	0.118 4	0.126 2	0.222 6	0.171 8	0.121 0
树叶分配比例 Allocation coefficient to leaf	0.228 1	0.109 9	0.119 0	0.153 9	0.188 7
细根分配比例 Allocation coefficient to fine root	0.005 1	0.012 6	0.196 0	0.101 8	0.007 6
木质部分周转率 Wood turnover rate	0.027 9	0.027 9	0.028 8	0.028 4	0.027 9
粗根部分周转率 Coarse root turnover rate	0.026 9	0.026 9	0.044 8	0.035 9	0.026 9
叶子部分周转率 Leaf turnover rate	0.192 5	0.192 5	0.294 8	0.243 7	0.192 5
细根部分周转率 Fine root turnover rate	1.433 0	1.433 0	1	1.216 5	1.433 0

表2 InTEC模型主要输入数据  
Table 2 Input data for InTEC model

输入资料 Input data	描述 Description	时间 Time	空间分辨率 Spatial resolution	来源 Source
CRU 3.21气象数据 CRU 3.21 meteorological data	气温、降水、云量、平均饱和水汽压差 Air temperature, precipitation, cloudiness, average water vapor pressure deficit	1901–1960	0.5°	<a href="http://badc.nerc.ac.uk">http://badc.nerc.ac.uk</a>
气象站观测数据 Meteorological observation data	气温、降水、日照时数 Air temperature, precipitation, sunshine duration	1961–2010	江西87气象站点 87 meteorological sites in Jiangxi	<a href="http://cdc.cma.gov.cn/">http://cdc.cma.gov.cn/</a>
气象站观测数据 Meteorological observation data	平均饱和水汽压 Average water vapor pressure	1961–2010	中国702气象站点 702 meteorological sites in China	<a href="http://cdc.cma.gov.cn/">http://cdc.cma.gov.cn/</a>
叶面积指数数据 Leaf area index data	MODIS数据反演 Inversed from MODIS data	2006	463 m	本文 This study
参考年NPP Referenced NPP	BEPS模型模拟 Simulated by BEPS model	2006	463 m	本文 This study
林龄 Forest age	样地资料、MODIS、K-最近邻法(KNN)算法 Field samples, MODIS data and K-nearest neighborhood method	2006	463 m	本文 This study
森林类型 Forest type	样地资料、MODIS、KNN算法 Field samples, MODIS data and K-nearest neighborhood method	2006	463 m	本文 This study
净初级生产力与林龄关系 Relationship between net primary productivity and forest age	林龄对净初级生产力的影响 Impact of forest age on net primary productivity			本文 This study
土壤质地 Soil texture	黏粒、砂粒百分比 Percentage of clay and sandy		463 m	<a href="http://globalchange.bnu.edu.cn/research/">http://globalchange.bnu.edu.cn/research/</a>
地形湿度指数 Topographic wetness index	基于数字高程模型(DEM)通过ArcGIS计算 Calculate from digital elevation model by ArcGIS		463 m	本文 This study
初始地下水位 Initial groundwater level	地形湿度指数计算 Calculate based on wetness index		463 m	本文 This study
氮沉降 Nitrogen deposition	来源于模拟数据 Modelled data	1960–2010	0.1°	顾峰雪(待发表) From GU Feng-Xue (To be published)
氮沉降 Nitrogen deposition	基于温室气体计算 Calculate based on greenhouse gases	1901–1959	无空间变化 No spatial variation	Chen <i>et al.</i> , 2003
CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration	观测数据 Observation data	1999–2010	无空间变化 No spatial variation	<a href="http://ccliacesd.ornl.gov">http://ccliacesd.ornl.gov</a>
CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration	观测数据 Observation data	1901–1998	无空间变化 No spatial variation	碳循环模型联合计划 Carbon Cycle Model Linkage Project

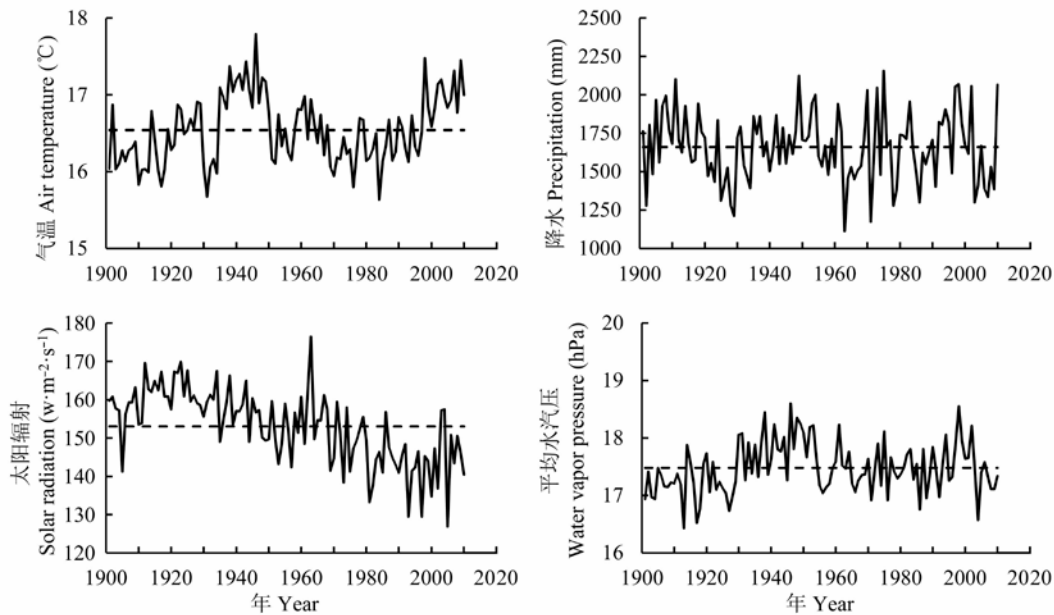


图1 1901–2010年江西省气温、降水量、太阳辐射和平均水汽压的变化趋势。图中虚线为1901–2010年平均值。  
Fig. 1 The change trends of air temperature, precipitation, solar radiation and water vapor pressure during 1901–2010 in Jiangxi Province. The dashed lines are average of 100 years.



究院陆面过程和资源生态实验室(<http://globalchange.bnu.edu.cn/research/>)。土壤厚度采用森林清查数据中样方的土壤厚度数据(共1 045个样点)进行反距离加权插值生成。地形作为影响流域水文过程空间不均匀性的第一主导因子,通过影响土壤水分水平方向移动来改变流域土壤水分含量的空间格局,在InTEC模型中,采用TOPMODEL模型的方法模拟地形对土壤水分水平移动的影响,利用DEM获取地形湿度指数,并计算地下水埋深。DEM数据为SRTM3,从国际科学数据服务平台(<http://datamirror.csdb.cn>)下载得到,空间分辨率为90 m,通过双线性内插重采样到463 m。

### 1.3.3 参考年LAI、NPP和林龄

综合考虑2006年江西省气象无明显异常情况、MODIS数据质量较好及具有LAI地面验证数据,利用2006年的46景基于MODIS数据反演的LAI时间序列数据提取获得2006年最大LAI,作为InTEC模型参考年LAI的输入数据(图2A);以BEPS (boreal ecosystem productivity simulator)模型模拟的2006年NPP作为InTEC模型参考年NPP,两种数据具有较好的精度,能够满足模型模拟的需求(Liu *et al.*, 2012)。采用MODIS反射率和背景反射率生成的归一化植被指数(NDVI)时间序列数据进行谐波分析,综合利用地形、地表覆盖、森林清查等多种数据,采用面向对象的KNN分类(Beaudoin *et al.*, 2014),获取江西省森林类型和林龄空间分布图(图2B和图2C)。利用二类调查数据对遥感提取的每类森林类型面积进行县尺度上的验证(空间分布),马尾松、湿地松、杉木和常绿阔叶林的 $R^2$ 分别为0.72、0.74、0.80和0.73,遥感提取的森林不同龄级面积的县际变化

与森林清查数据一致,马尾松、湿地松、杉木和常绿阔叶林的 $R^2$ 分别为0.75、0.83、0.80和0.86,能够满足模型模拟需求。由于缺乏森林类型及林龄历史数据特征,InTEC模型模拟过程中假设森林干扰后类型保持不变,根据2006年林龄空间分布图加减年份推算其他年份的林龄。

### 1.3.4 氮沉降

1960–2010年氮沉降数据来源于顾峰雪等(待发表)生成的空间分辨率0.1°数据,根据观测数据建立氮沉降估算模型,结合1961–2010年中国的化肥使用量、能源消费量和降水量生成,包括大气氮干沉降和大气氮湿沉降量。本研究采用的氮沉降为大气氮干湿沉降的总和。通过双线性内插成463 m空间分辨率数据。1960年前的氮沉降数据采用Chen等(2003)的算法计算得到。由图3可知,20世纪70年代以来氮沉降显著增加,1970年的氮沉降是 $0.79 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,2000–2009年氮沉降的平均值是 $3.62 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

### 1.3.5 CO<sub>2</sub>浓度

1901–1998年大气CO<sub>2</sub>浓度资料来源于碳循环模型联合计划(CCMLP)提供的结果,1999–2010年的大气CO<sub>2</sub>浓度来源于夏威夷Mauna Loa站(20° N, 156° W)的实测数据。从20世纪60年代初开始CO<sub>2</sub>浓度显著增加,从 $317 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 增加到2010年的 $390 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ (图3)。

### 1.3.6 林龄与NPP的关系

考虑林龄对NPP的影响是InTEC模型有别于其他模型的特征之一。由于野外实测样地和长时间序列森林NPP的观测较少,本文基于邻域竞争理论,建立单木生长方程,综合考虑树木死亡、树木更新

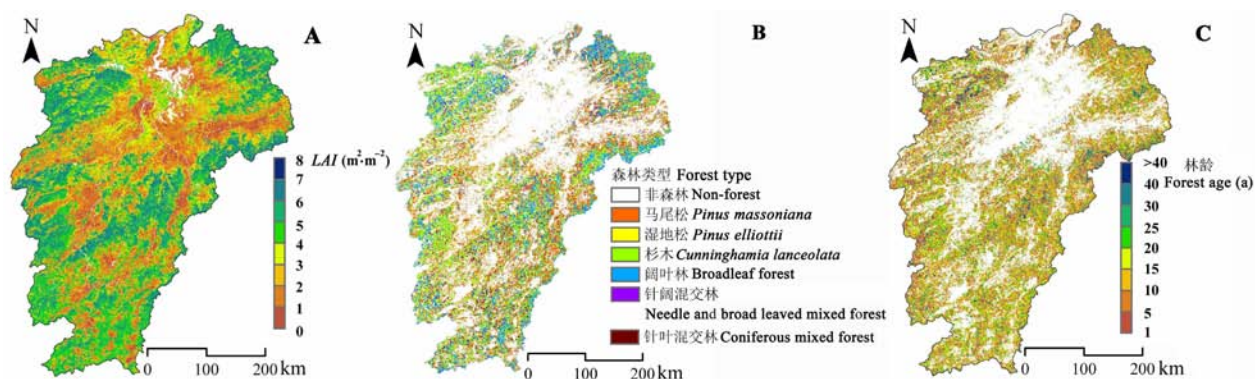


图2 江西省2006年的最大叶面积指数(LAI) (A)、森林类型(B)和林龄空间分布图(C)。

Fig. 2 The spatial distributions of maximum leaf area index (LAI) (A), forest types (B) and forest age (C) maps of Jiangxi Province in 2006.

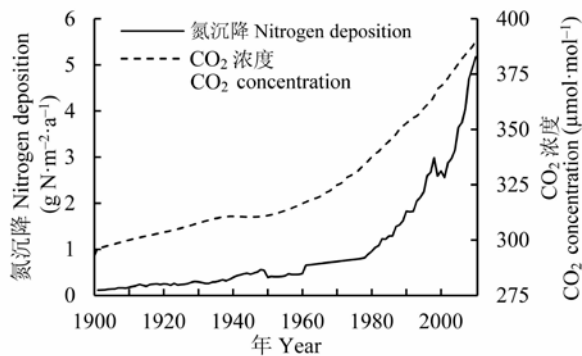


图3 1901–2010年氮沉降量和大气CO<sub>2</sub>浓度变化趋势。  
Fig. 3 N deposition and CO<sub>2</sub> concentration change trends during 1901–2010.

等过程,模拟江西主要树种林分水平上NPP随林龄的变化趋势,建立马尾松、湿地松、杉木3种主要树种的NPP-林龄关系(图4),其余森林类型(阔叶林、针叶混交林、针阔混交林)采用张春华(2015)建立的中国东南部地区NPP-林龄关系。

### 1.3.7 模拟结果验证数据

利用2003–2010年千烟洲碳通量观测数据计算年GPP和NPP,在站点尺度上对InTEC模型模拟的NPP年际变化进行验证;利用吉安市2009年二类森林清查数据计算NPP,其中,NPP为森林群落生长量与年凋落量之和(假定枯死量较小而忽略该部分的影响),利用Wang等(2010)建立的不同森林类型森林群落生长量、年凋落量与生物量的函数关系计算所得,在区域尺度上对InTEC模型模拟的NPP空间变化能力进行验证(李登秋等,2013)。

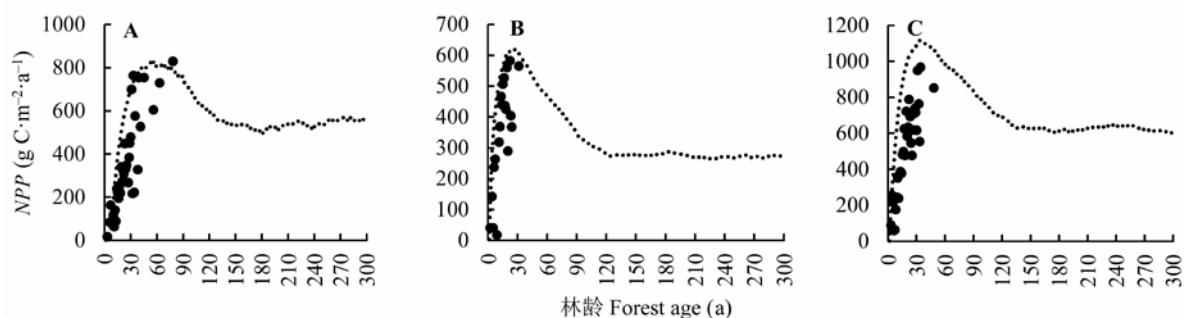


图4 江西省主要树种净初级生产力(NPP)随林龄变化的特征。图中粗圆点为基于森林清查数据计算的NPP (Wang *et al.*, 2010)。A, 马尾松。B, 湿地松。C, 杉木。

Fig. 4 The changes of net primary productivity (NPP) with forest age for main forest types in Jiangxi Province. The black spot in the figure is NPP calculated based on forest inventory data referencing (Wang *et al.*, 2010). A, *Pinus massoniana*. B, *Pinus elliottii*. C, *Cunninghamia lanceolata*.

## 1.4 模型模拟情景设计

通过设计不同的模拟情景(表3),利用InTEC模型定量分析1901–2010年不同因子对江西省森林NPP变化的影响及贡献。所有情景均采用相同的方法和输入数据对各碳库进行初始化,除情景2不受干扰和林龄影响外,其余情景下均考虑林龄的影响,林龄在最近一次干扰后随时间增加。情景3减情景1表示非干扰因子(气候、氮沉降和CO<sub>2</sub>)对NPP变化的贡献,情景3减情景2表示干扰因子(林龄)对NPP变化的贡献,情景4、5、6、7减情景1分别代表气候变化、氮沉降、CO<sub>2</sub>和氮沉降与CO<sub>2</sub>两者对NPP变化的贡献。

## 2 结果和分析

### 2.1 模型模拟结果验证

以往研究表明可采用转换系数(0.45–0.50)将通量观测NPP转换为GPP (Carnieli *et al.*, 2011)。本文采用转换系数0.49将千烟洲通量观测GPP转换为NPP, InTEC模型模拟的2003–2010年研究区NPP与观测NPP的 $R^2$ 为0.81 ( $p < 0.01$ )(图5A),平均偏差(MBE)和均方根误差(RMSE)分别为–0.42和5.74 g C·m<sup>–2</sup>·a<sup>–1</sup>,表明InTEC能够准确地模拟NPP年际变化。为避免模型模拟与森林清查样地数据的尺度差异带来的不确定性,利用江西省吉安市二类森林清查数据计算的各乡镇NPP与模型模拟NPP进行比较(图5B),结果表明InTEC模型能够较好地模拟NPP的空间分布特征( $R^2 = 0.45$ )。与Zhou等(2013)模拟的1981–2000年江西省NPP平均值52.1 Tg C·a<sup>–1</sup>(1981–



表3 不同因子对江西省森林净初级生产力(NPP)影响的驱动力分析情景设计  
Table 3 Scenarios for quantifying each driver factor in forest net primary productivity (NPP) in Jiangxi Province

情景 Scenario	描述 Description	非干扰因子 Non-disturbance factors						干扰因子 Disturbance factor
		气候要素 Climate elements				氮沉降 Nitrogen deposition	CO <sub>2</sub> 浓度 CO <sub>2</sub> concentration	
		气温 Air temperature	降水 Precipitation	太阳辐射 Solar radiation	平均水汽压 Average water vapor pressure			
1	干扰因子效应 Disturbance factor effect	B	B	B	B	B	B	林龄变化 Forest age changed
2	非干扰因子效应 Non-disturbance factors effect	H	H	H	H	H	H	林龄不变 Forest age unchanged
3	综合因子 Disturbance and non-disturbance factors effect	H	H	H	H	H	H	林龄变化 Forest age changed
4	气候变化效应 Climate change effect	H	H	H	H	B	B	林龄变化 Forest age changed
5	氮沉降效应 Nitrogen deposition effect	B	B	B	B	H	B	林龄变化 Forest age changed
6	CO <sub>2</sub> 效应 CO <sub>2</sub> effect	B	B	B	B	B	H	林龄变化 Forest age changed
7	氮沉降+CO <sub>2</sub> Nitrogen deposition and CO <sub>2</sub> effect	B	B	B	B	H	H	林龄变化 Forest age changed

B表示采用1901–1910年平均值; H表示采用历史变化数据。  
B indicates using mean values of 1901–1910; H indicates using historical actual data.

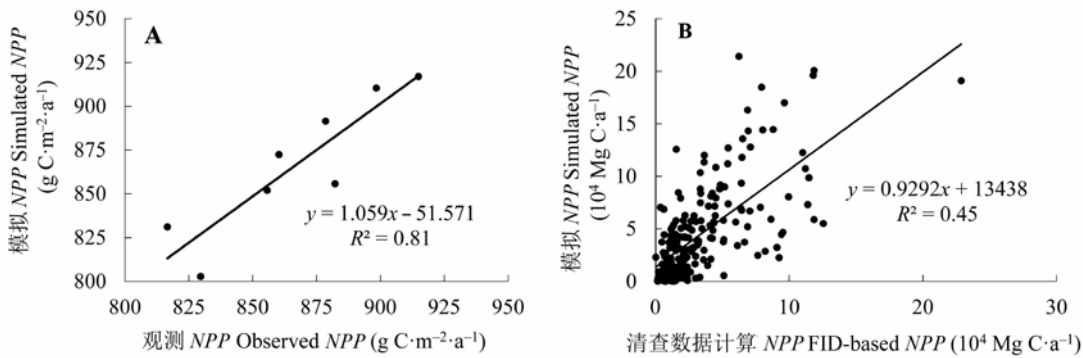


图5 InTEC模型净初级生产力(NPP)模拟结果验证。**A**, 2003–2009年千烟洲通量站观测NPP与InTEC模型模拟结果比较。**B**, 江西省吉安市2009年二类森林清查数据计算的各乡镇NPP与InTEC模型模拟结果比较。  
Fig. 5 Validation of net primary productivity (NPP) simulated by the InTEC model. **A**, Simulated NPP by InTEC model comparison with observed NPP at Qianyanzhou eddy tower site during 2003–2009. **B**, Simulated NPP by InTEC model comparison with NPP calculated from forest inventory data at town level of Ji'an City, Jiangxi Province in 2009.

2000年NPP的变化范围是42.0–54.2 Tg C·a<sup>-1</sup>)相比, 本文同时期模拟结果47.2 Tg C·a<sup>-1</sup>(1981–2000年NPP的变化范围是42.0–53.5 Tg C·a<sup>-1</sup>)略低, 年际变化范围相近。

2.2 森林NPP的时空变化特征

1901–1970年, NPP平均为46.2 Tg C·a<sup>-1</sup> (标准偏差为3.0 Tg C·a<sup>-1</sup>), 最低值和最高值分别出现在1946年(39.0 Tg C·a<sup>-1</sup>)和1931年(52.5 Tg C·a<sup>-1</sup>)。20世纪60年代初到70年代中期, NPP呈现上升趋势, 在1976年达到最大值(56.3 Tg C·a<sup>-1</sup>)。此后呈现急剧下降并持续到1994年(42.8 Tg C·a<sup>-1</sup>), 而后呈现显著上升(1998年NPP受极端气候影响出现显著降低)(图6)。20世纪70年代、20世纪80年代、20世纪90年

代和2000–2009年NPP分别为50.7、48.8、45.4和55.2 Tg C·a<sup>-1</sup>。经过大面积砍伐及森林恢复工程的实施, 目前江西省森林NPP已得到显著恢复, 并超过20世纪70年代的NPP水平。

图7为江西省2000–2009年NPP (10年平均)空间分布图, NPP高值区域分布在研究区南部和西部地区, 并向北呈放射状分布, NPP呈现出由外围向内部递减的趋势, 这与江西省热量资源南部多北部少、水分资源东部多西部少、中部人类活动干扰多有关; 相比于20世纪70年代, 2000–2009年江西省森林NPP呈现增加趋势(图7), NPP增加的面积占总面积的60%, 尤其在九连山(赣州大部)、武功山、怀玉山脉及武夷山等海拔较高地区增加明显, 在中部海

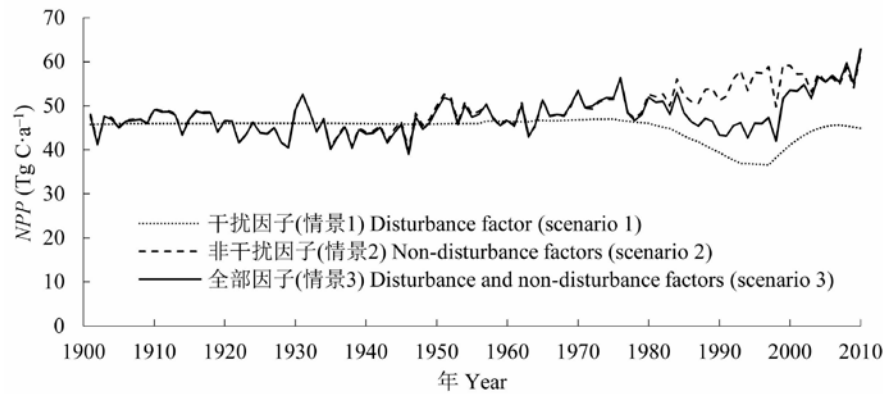


图6 三种模拟情景下1901–2010年江西省森林净初级生产力(NPP)变化特征。情景1、情景2、情景3同表3。  
Fig. 6 Change characteristics of net primary productivity (NPP) of forests in Jiangxi Province during 1901–2010 under scenarios 1, 2 and 3. Scenario 1, scenario 2, and scenario 3 see Table 3.

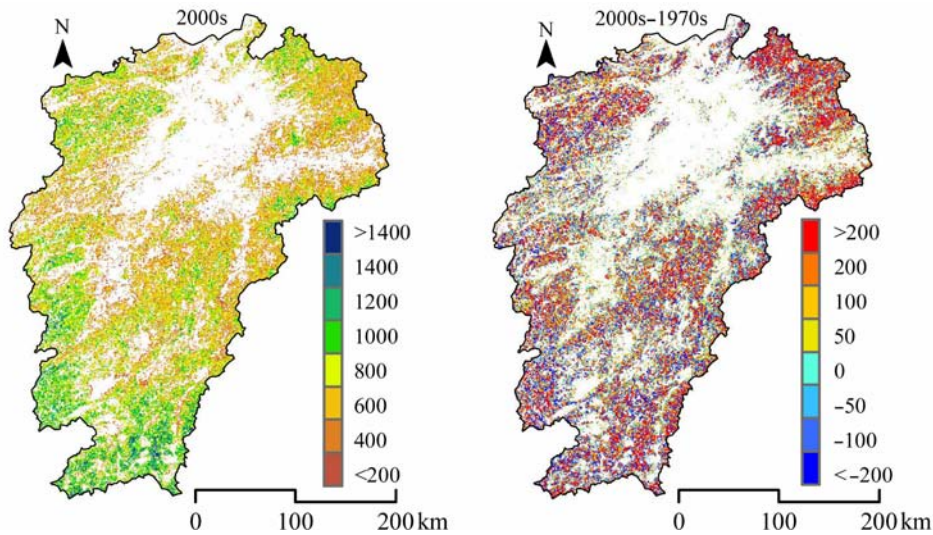


图7 江西省2000–2009年平均净初级生产力(NPP)空间分布特征(左图)和2000–2009年NPP与20世纪70年代的差值空间分布(右图), 图中正值代表2000–2009年的NPP比20世纪70年代增加, 反之亦然( $\text{g C}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )。  
Fig. 7 Spatial distribution of average annual net primary productivity (NPP) during 2000–2009 (left panel) and changes in the 2000s relative to the values in the 1970s (right panel), positive values indicate increases in NPP, and vice versa.

拔较低的地区NPP略有下降。

2.3 不同因子对NPP的影响

江西省森林以中幼龄林为主, 林龄普遍小于40年, InTEC模型模拟的1901–1970年研究区森林NPP主要是受气候变化的影响。1970年后, 森林NPP年际变化受到造林、砍伐、干扰后森林再生长、气候变化、CO<sub>2</sub>施肥效应和氮沉降的综合影响。图8A和8B为非干扰因子和扰动因子对江西省森林NPP的影响, 结果表明: 在1970–2010年, 仅考虑干扰因子影响下(情景1), NPP在20世纪70年代为46.7  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (降低7.9%), 受20世纪80年代和90年代森林干扰的影响, NPP持续降低, 在2000–2009年, NPP呈现增

加趋势, 比20世纪90年代高17.4%, 但依然比考虑综合因子影响情景下的NPP低19.9%; 仅考虑非干扰因子的影响下(情景2), NPP呈现持续增加的趋势, 从20世纪70年代的50.7  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到2000–2009年的56.3  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (增加11.3%), 在考虑全部因子影响下(情景3), NPP从20世纪70年代的50.7  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 增加到2000–2009年的55.2  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (10年平均), 其中在1998年降为最低, 为42.0  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$ 。20世纪70年代以来, 与情景3下的1970–2010年NPP平均值相比, 如仅考虑森林干扰因子的影响, NPP将低估7.3  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (14.5%), 仅考虑非干扰因子的影响, NPP将高估3.6  $\text{Tg C}\cdot\text{a}^{-1}$  (7.1%)。

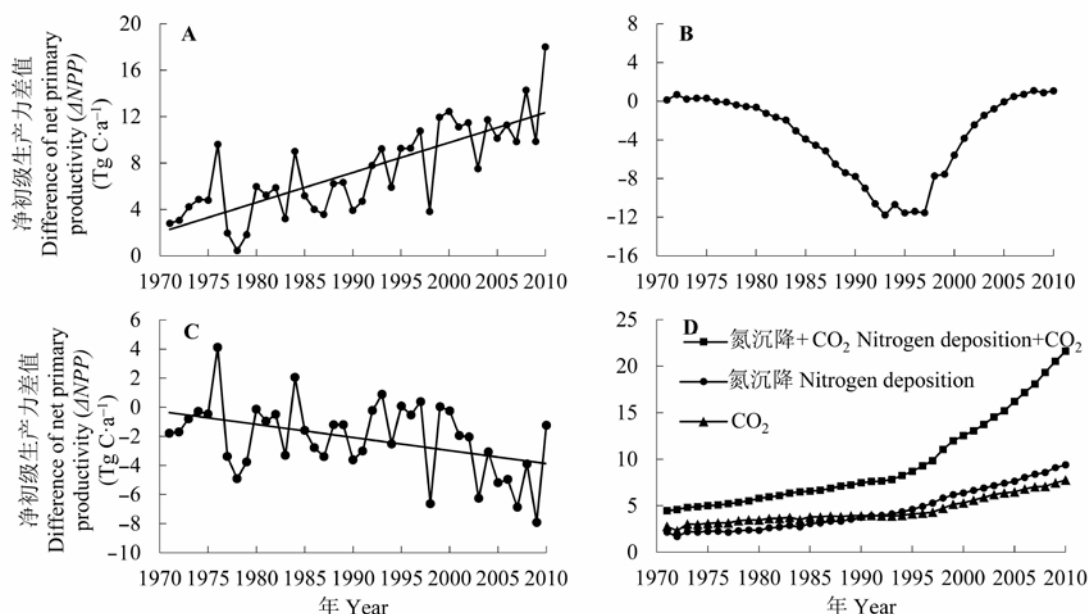


图8 1971–2010年不同驱动因子对江西省森林净初级生产力( $NPP$ )变化的影响。A, 非干扰因子。B, 干扰因子。C, 气候因子。D, 氮沉降、 $CO_2$ 浓度及 $CO_2$ +氮沉降对 $NPP$ 的影响。 $\Delta NPP$ 为正值表示正影响, 负值表示负影响。

Fig. 8 Responses of Jiangxi provincial forest net primary productivity ( $NPP$ ) to non-disturbance and disturbance factors during 1971–2010. A, All non-disturbance factors. B, Disturbance factor. C, Climate factors. D,  $CO_2$ , N deposition, integrated effects of  $CO_2$  and N deposition. The positive  $\Delta NPP$  values indicate enhancement on  $NPP$  and minus  $\Delta NPP$  values indicate negative effect.

图8C和8D为单个非干扰因子对 $NPP$ 的影响, 气候因子导致1970–2010年平均 $NPP$ 减少 $2.0 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $-4.7\%$ ), 氮沉降、 $CO_2$ 浓度变化及耦合效应(氮沉降+ $CO_2$ 浓度变化)分别导致1970–2010年 $NPP$ 平均增加 $4.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $10.4\%$ )、 $4.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $10.3\%$ )和 $9.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $21.8\%$ )。不同因子在不同年代对 $NPP$ 的影响程度不同, 在20世纪70年代, 气候因子对 $NPP$ 的负效应较小, 仅使 $NPP$ 减小 $2.4\%$ , 而在2000–2009年则明显增强( $NPP$ 减少 $9.6\%$ ); 氮沉降和 $CO_2$ 浓度对 $NPP$ 的促进作用呈现显著增加, 分别由20世纪70年代的 $4.6\%$ 和 $6.5\%$ 增加到2000–2009年的 $17.2\%$ 和 $14.5\%$ , 两者的共同作用由20世纪70年代的 $10.6\%$ 增加到2000–2009年的 $36.1\%$ , 20世纪70年代和20世纪80年代 $CO_2$ 施肥效应略高于氮沉降的作用, 20世纪90年代和2000–2009年氮沉降的作用大于 $CO_2$ 施肥效应。总体上, 气候因子对 $NPP$ 的影响程度小于氮沉降和 $CO_2$ 的影响, 但会导致 $NPP$ 的年际波动较大。

### 3 讨论

#### 3.1 不确定性分析

林龄空间分布图是反映森林扰动和林龄对 $NPP$ 影响的重要基础数据, 由于目前缺乏详细的林龄空间分布信息, 遥感数据反演成为获取大尺度林龄空

间分布的重要手段(Li *et al.*, 2014; Zhang *et al.*, 2014)。受遥感时空分辨率和林分结构复杂的影响, 反演的林龄为林分平均年龄, 难以准确反映林分的扰动强度, 随着Landsat数据的积累, 基于长时间序列的遥感数据获取林龄和扰动信息将能够为准确模拟森林碳循环提供更好的数据支撑(Masek *et al.*, 2013)。参考年 $NPP$ 是调控InTEC模型 $NPP$ 模拟的基准数据, 虽然大量研究结果表明BEPS模型能够准确地模拟区域尺度 $NPP$ , 但其模拟结果本身存在的误差会在一定上传递到InTEC模型模拟结果。此外, 在地形复杂的亚热带地区, 环境因子的空间变异性较高, 通过空间插值得到的气候因子、氮沉降有可能对森林 $NPP$ 的空间模拟带来一定的不确定性; 模型结构、参数设置以及验证数据存在不确定性, 会造成不同研究结果间的差异性。本文利用通量观测和森林清查数据对InTEC模型模拟的 $NPP$ 进行了年际和空间变化的验证, 结果表明InTEC模型能够较为准确地模拟研究区 $NPP$ 时空变化, 但模拟结果依然存在一定不确定性, 如何准确评价和量化不同要素对模拟结果不确定性的影响是今后研究的重要内容。

#### 3.2 森林扰动对 $NPP$ 的影响

在20世纪七八十年代, 江西省森林受到强烈的

扰动, 通过不断的森林恢复, 其森林覆盖率从36.7% (1974年) 上升到60.0% (2011年)。根据江西省历次森林清查资料, 乔木林单位面积蓄积量从1977年的  $58.7 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  年持续下降到1996年的  $32.3 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 本文模拟结果表明 *NPP* 在此期间也呈现下降趋势, 从1976年的  $56.3 \text{ Tg C}$  下降到1996年的  $46.0 \text{ Tg C}$ , 说明研究区虽然从20世纪80年代中期即开始森林恢复与培育, 但由于恢复时间较短, 森林的蓄积量和 *NPP* 尚未明显增加。本文模拟结果表明, 森林扰动及其引起的林龄变化决定了江西省1970–2010年间森林 *NPP* 的总体变化趋势, 比气候变化对森林 *NPP* 的影响更为显著, 这与 Coomes 等 (2012) 和 Ter-Mikaelian 等 (2014) 对新西兰克雷吉本和加拿大安大略省的研究结果一致。经过森林恢复工程的实施, 目前江西省森林 *NPP* 已得到显著恢复, 并超过20世纪70年代的 *NPP*。黄麟等 (2012) 模拟结果表明江西省森林 *NPP* 虽然逐渐得到恢复, 但仍低于前一阶段的总体水平, 原因可能是未充分考虑研究区氮沉降的施肥效应 (Zhou *et al.*, 2013)。

### 3.3 非扰动因子对 *NPP* 的影响

在仅考虑非干扰因子的影响下, 江西省森林 *NPP* 呈现波动上升的趋势, 年增加速率为0.44%, 这与 Liang 等 (2015) 采用 CASA 模型模拟的中国 *NPP* 在1982–2010年间的年增加速率0.42% 接近。气候因子显著影响 *NPP* 的年际变化, 使江西省森林 *NPP* 呈现明显的年际波动; 氮沉降和  $\text{CO}_2$  浓度升高显著增加 *NPP*, 使得非干扰因子影响下1970–2010年江西省森林 *NPP* 呈现持续增加趋势, 氮沉降与  $\text{CO}_2$  的交互作用进一步增强森林 *NPP*, 这与全国 *NPP* 呈现阶段性变化趋势 (1982–1988年间下降, 1989–1999年间显著增加, 2000年之后, 增加趋势显著降低) 有显著差异 (Liang *et al.*, 2015)。Zhu 等 (2007) 通过对1982–1999年中国陆地植被 *NPP* 及气候数据的分析结果表明, 气候变化导致全国 *NPP* 增加11.5%。本文研究结果表明, 气候因子导致1982–1999年江西省森林 *NPP* 降低3.8%, 2000–2009年森林 *NPP* 下降9.6%。中国的热带和亚热带地区具有明显的季风气候特征, 降雨具有明显的季节和年际变化, 在这些区域, 虽然年降水量充沛, 但经常发生季节性干旱并显著影响森林的碳吸收 (Ju *et al.*, 2010), 本文模拟结果表明, 受高温干旱影响, 江西省森林 *NPP* 在2003、2007和2009年显著低于其他年份 (图6C), 极端异常气候

在影响森林 *NPP* 的同时也会对土壤呼吸产生影响, 最终影响森林生态系统的碳吸收能力, 顾峰雪等 (2008) 研究发现2003和2004年的干旱导致中国亚热带针叶林固碳能力 (*NEP*) 分别下降63%和47%。因此, 随着近年来极端异常气候事件的频繁发生, 准确评价气候变化对亚热带森林生态系统碳循环的影响也受到广泛关注 (Fang *et al.*, 2014)。

大气  $\text{CO}_2$  浓度升高会促进植被的光合作用, 但这种正效应与植被类型和氮水平有关 (Ainsworth & Long, 2005)。研究表明, 当  $\text{CO}_2$  浓度由  $376 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  增加到  $550 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$  时, 全球大部分生态系统的植被 *NPP* 会增加10%–25% (Norby *et al.*, 2005)。本文模拟结果表明在当前  $\text{CO}_2$  浓度增加的背景下 (1970–2010年),  $\text{CO}_2$  施肥效应使江西省森林 *NPP* 增加10.3%, 且随着  $\text{CO}_2$  浓度的增加,  $\text{CO}_2$  施肥效应更为明显。氮沉降对江西省森林 *NPP* 也具有明显的施肥效应, 尤其在1990年以来, 氮沉降对江西森林 *NPP* 的增加作用超过  $\text{CO}_2$  施肥效应。Lü 和 Tian 等 (2007) 研究表明1990–2003年间我国中南部地区是氮沉降最高的区域, 其中江西是中国大陆氮沉降速率最高的省份, 平均为  $30.76 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 然而, 当氮沉降速率超过  $20 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$  时也可能会对森林健康产生危害 (Bobbink *et al.*, 2010)。中国鼎湖山生态定位站的研究显示, 该地大气氮沉降水平是  $36\text{--}38 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 生态系统表现出氮饱和的状态 (Mo *et al.*, 2006), 因此, 需要考虑氮饱和对森林生态系统碳循环的影响。

## 4 结论

本研究利用 InTEC 模型研究了亚热带典型地区江西省森林 *NPP* 的时空动态变化特征, 通过情景模拟分析方法, 明确了气候变化、氮沉降、 $\text{CO}_2$  浓度及林龄对森林 *NPP* 的影响, 主要结论如下:

(1) InTEC 模型能够较为准确地模拟江西省森林 *NPP* 时空变化特征; 1901–1970年模拟的森林 *NPP* 主要受气候变化影响, *NPP* 平均为  $46.2 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  ( $\pm 3.0 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 1960年代初到20世纪70年代中期, *NPP* 呈上升趋势, 在1976年达到最大 ( $56.3 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 此后呈现急剧下降并持续到1994年 ( $42.8 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ ), 随着森林干扰后恢复性生长, 江西森林 *NPP* 呈现显著上升, 目前江西省森林 *NPP* 已得到显著恢复, 并超过20世纪70年代的 *NPP* 水平, *NPP* 增加面积占总

面积的60%, 主要集中在九连山(赣州大部)、武功山、怀玉山脉及武夷山等海拔较高地区。

(2) 20世纪70年代以来, 与考虑全部因子下的1970–2010年 $NPP$ 相比, 如仅考虑森林干扰因子的影响, 则 $NPP$ 低估 $7.3 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (14.5%), 若仅考虑非干扰因子的影响, 则 $NPP$ 高估 $3.6 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (7.1%)。气候因子导致1970–2010年的 $NPP$ 平均值减少 $2.0 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (4.7%), 氮沉降、 $\text{CO}_2$ 浓度变化及耦合效应(氮沉降+ $\text{CO}_2$ 浓度变化)分别导致1970–2010年的 $NPP$ 平均值增加 $4.5 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (10.4%)、 $4.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (10.3%)和 $9.4 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$  (21.8%), 气候变化导致 $NPP$ 减小, 氮沉降和 $\text{CO}_2$ 浓度变化均导致 $NPP$ 增加, 氮沉降和 $\text{CO}_2$ 浓度变化的交互作用进一步增加 $NPP$  (1.1%)。总体上, 江西省森林 $NPP$ 的变化趋势主要受到森林扰动的影响, 气候因子对 $NPP$ 的影响程度小于氮沉降和 $\text{CO}_2$ 的影响, 但会导致 $NPP$ 的年际波动较大。

**基金项目** 国家自然科学基金(41271211)和浙江省自然科学基金(LQ16D010008)。

**致谢** 感谢中国农业科学院顾峰雪老师提供氮沉降数据; 感谢中国气象局气候变化专项(CCSF2-01412)、浙江农林大学科研发展基金人才启动项目(2014FR084)的支持。

## 参考文献

- Ainsworth EA, Long SP (2005). What have we learned from 15 years of free-air  $\text{CO}_2$  enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising  $\text{CO}_2$ . *New Phytologist*, 165, 351–372.
- Albani M, Medvigy D, Hurtt GC, Moorcroft PR (2006). The contributions of land use change,  $\text{CO}_2$  fertilization, and climate variability to the Eastern US carbon sink. *Global Change Biology*, 12, 2370–2390.
- Beaudoin A, Bernier PY, Guindon L, Villemaire P, Guo XJ, Stinson G, Bergeron T, Magnussen S, Hall RJ (2014). Mapping attributes of Canada's forests at moderate resolution through  $kNN$  and MODIS imagery. *Canadian Journal of Forest Research*, 44, 521–532.
- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F (2010). Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: A synthesis. *Ecological Applications*, 20, 30–59.
- Bonan GB (1995). Sensitivity of a GCM simulation to inclusion of inland water surfaces. *Journal of Climate*, 8, 2691–2704.
- Campioli M, Gielen B, Göckede M, Papale D, Bouriaud O, Granier A (2011). Temporal variability of the  $NPP$ - $GPP$  ratio at seasonal and interannual time scales in a temperate beech forest. *Biogeosciences*, 8, 2481–2492.
- Canadell JG, Raupach MR (2008). Managing forests for climate change mitigation. *Science*, 320, 1456–1457.
- Chen J, Liu J, Cihlar J, Goulden M (1999). Daily canopy photosynthesis model through temporal and spatial scaling for remote sensing applications. *Ecological Modelling*, 124, 99–119.
- Chen JM, Ju W, Cihlar J, Price D, Liu J, Chen W, Pan J, Black A, Barr A (2003). Spatial distribution of carbon sources and sinks in Canada's forests. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 55, 622–641.
- Chen W, Chen J, Cihlar J (2000). An integrated terrestrial ecosystem carbon-budget model based on changes in disturbance, climate, and atmospheric chemistry. *Ecological Modelling*, 135, 55–79.
- Coomes DA, Holdaway RJ, Kobe RK, Lines ER, Allen RB (2012). A general integrative framework for modelling woody biomass production and carbon sequestration rates in forests. *Journal of Ecology*, 100, 42–64.
- Coursolle C, Margolis HA, Giasson MA, Bernier PY, Amiro BD, Arain MA, Barr AG, Black TA, Goulden ML, McCaughey JH, Chen JM, Dunn AL, Grant RF, Lafleur PM (2012). Influence of stand age on the magnitude and seasonality of carbon fluxes in Canadian forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165, 136–148.
- Dufresne JL, Fairhead L, Le Treut H, Berthelot M, Bopp L, Ciais P, Friedlingstein P, Monfray P (2002). On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophysical Research Letters*, 29, 43-1–43-4.
- Fang J, Chen A, Peng C, Zhao S, Ci L (2001). Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292, 2320–2322.
- Fang J, Kato T, Guo Z, Yang Y, Hu H, Shen H, Zhao X, Kishimoto-Mo AW, Tang Y, Houghton RA (2014). Evidence for environmentally enhanced forest growth. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 9527–9532.
- Felzer B, Kicklighter D, Melillo J, Wang C, Zhuang Q, Prinn R (2004). Effects of ozone on net primary production and carbon sequestration in the conterminous United States using a biogeochemistry model. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 56, 230–248.
- Gu FX, Yu GR, Wen XF, Tao B, Li KR, Liu YF (2008). Drought effects on carbon exchange in a subtropical coniferous plantation in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 32, 1041–1051. (in Chinese with English abstract) [顾峰雪, 于贵瑞, 温学发, 陶波, 李克让, 刘允芬 (2008). 干旱对亚热带人工针叶林碳交换的影响. 植物生态学报, 32, 1041–1051.]



- Houghton R (2007). Balancing the global carbon budget. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 35, 313–347.
- 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.]
- Jiang Y, Hu HB, Zhang XS, Xue JH (2011). The carbon flux and its environmental factors in a north subtropical secondary oak forest ecosystem. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition)*, 35(3), 38–42. (in Chinese with English abstract) [蒋琰, 胡海波, 张学仕, 薛建辉 (2011). 北亚热带次生栎林碳通量及其影响因子研究. 南京林业大学学报(自然科学版), 35(3), 38–42.]
- Ju W, Chen J, Harvey D, Wang S (2007). Future carbon balance of China's forests under climate change and increasing CO<sub>2</sub>. *Journal of Environmental Management*, 85, 538–562.
- Ju W, Wang S, Yu G, Zhou Y, Wang H (2010). Modeling the impact of drought on canopy carbon and water fluxes for a subtropical evergreen coniferous plantation in southern China through parameter optimization using an ensemble Kalman filter. *Biogeosciences*, 7, 845–857.
- Lü C, Tian H (2007). Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, doi: 10.1029/2006JD007990.
- Li DQ, Ju WM, Fan WY, Gu ZJ (2014). Estimating the age of deciduous forests in Northeast China with Enhanced Thematic Mapper Plus data acquired in different phenological seasons. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8, 083670. doi: 10.1117/1.JRS.8.083670.
- Li DQ, Ju WM, Zheng G, Liu YB, Zan M, Zhang CH, Huang JL (2013). Comparison of estimated forest biomass increment rate based on a process-based ecological model and forest inventory data. *Ecology and Environmental Sciences*, 22, 1647–1657. (in Chinese with English abstract) [李登秋, 居为民, 郑光, 柳艺博, 咎梅, 张春华, 黄金龙 (2013). 基于生态过程模型和森林清查数据的森林生长量估算对比研究. 生态环境学报, 22, 1647–1657.]
- Li DQ, Zhou YL, Ju WM, Wang HM, Liu YB, Wu XC (2014). Modelling the effects of changes in solar radiation on gross primary production in subtropical evergreen needle-leaf plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 219–230. (in Chinese with English abstract) [李登秋, 周艳莲, 居为民, 王辉民, 柳艺博, 吴小翠 (2014). 太阳辐射变化对亚热带人工常绿针叶林总初级生产力影响的模拟分析. 植物生态学报, 38, 219–230.]
- 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. (in Chinese with English abstract) [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.]
- Li XJ, Zhou T, He XZ (2009). Carbon sink of forest ecosystem driven by NPP increasing in China. *Journal of Natural Resources*, 24, 491–497. (in Chinese with English abstract) [李秀娟, 周涛, 何学兆 (2009). NPP增长驱动下的中国森林生态系统碳汇. 自然资源学报, 24, 491–497.]
- Liang W, Yang Y, Fan D, Guan H, Zhang T, Long D, Zhou Y, Bai D (2015). Analysis of spatial and temporal patterns of net primary production and their climate controls in China from 1982 to 2010. *Agricultural and Forest Meteorology*, 204, 22–36.
- Lindner M, Maroschek M, Netherer S, Kremer A, Barbati A, Garcia-Gonzalo J, Seidl R, Delzon S, Corona P, Kolström M (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698–709.
- Liu YB, Ju WM, Chen JM, Zhu GL, Xing BL, Zhu JF, He MZ (2012). Spatial and temporal variations of forest LAI in China during 2000–2010. *Chinese Science Bulletin*, 57, 2846–2856.
- Masek JG, Collatz GJ (2006). Estimating forest carbon fluxes in a disturbed southeastern landscape: Integration of remote sensing, forest inventory, and biogeochemical modeling. *Journal of Geophysical Research*, 111, G01006. doi: 10.1029/2005JG000062.
- Masek JG, Goward SN, Kennedy RE, Cohen WB, Moisen GG, Schleeweis K, Huang C (2013). United States forest disturbance trends observed using Landsat Time Series. *Ecosystems*, 16, 1087–1104.
- Mo J, Brown S, Xue J, Fang Y, Li Z (2006). Response of litter decomposition to simulated N deposition in disturbed, rehabilitated and mature forests in subtropical China. *Plant & Soil*, 282, 135–151.
- Nemani RR, Keeling CD, Hashimoto H, Jolly WM, Piper SC, Tucker CJ, Myneni RB, Running SW (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560.
- Norby RJ, DeLucia EH, Gielen B, Calfapietra C, Giardina CP, King JS, Ledford J, McCarthy HR, Moore DJ, Ceulemans R (2005). Forest response to elevated CO<sub>2</sub> is conserved across a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102, 18052–18056.
- Pan Y, Birdsey R, Hom J, McCullough K (2009). Separating effects of changes in atmospheric composition, climate



- and land-use on carbon sequestration of US Mid-Atlantic temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259, 151–164.
- Pan Y, Birdsey RA, Fang J, Houghton R, Kauppi PE, Kurz WA, Phillips OL, Shvidenko A, Lewis SL, Canadell JG (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988–993.
- Petritsch R, Hasenauer H, Pietsch SA (2007). Incorporating forest growth response to thinning within biome-BGC. *Forest Ecology and Management*, 242, 324–336.
- Piao S, Sitch S, Ciais P, Friedlingstein P, Peylin P, Wang X, Ahlström A, Anav A, Canadell JG, Cong N (2013). Evaluation of terrestrial carbon cycle models for their response to climate variability and to CO<sub>2</sub> trends. *Global Change Biology*, 19, 2117–2132.
- Pretzsch H, Biber P, Schutze G, Uhl E, Rotzer T (2014). Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications*, 5, 4967.
- Ter-Mikaelian MT, Colombo SJ, Chen J (2014). Effect of age and disturbance on decadal changes in carbon stocks in managed forest landscapes in central Canada. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 19, 1063–1075.
- Wang B, Huang J, Yang X, Zhang B, Liu M (2010). Estimation of biomass, net primary production and net ecosystem production of China's forests based on the 1999–2003 National Forest Inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 25, 544–553.
- Wang S, Zhou L, Chen J, Ju W, Feng X, Wu W (2011). Relationships between net primary productivity and stand age for several forest types and their influence on China's carbon balance. *Journal of Environmental Management*, 92, 1651–1662.
- Williams CA, Collatz GJ, Masek J, Goward SN (2012). Carbon consequences of forest disturbance and recovery across the conterminous United States. *Global Biogeochemical Cycles*, 26, GB1005. doi: 10.1029/2010GB003947.
- Yu G, Chen Z, Piao S, Peng C, Ciais P, Wang Q, Li X, Zhu X (2014). High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 4910–4915.
- Zaehle S, Sitch S, Prentice IC, Liski J, Cramer W, Erhard M, Hickler T, Smith B (2006). The importance of age-related decline in forest NPP for modeling regional carbon balances. *Ecological Applications*, 16, 1555–1574.
- Zhang C, Ju W, Chen JM, Li D, Wang X, Fan W, Li M, Zan M (2014). Mapping forest stand age in China using remotely sensed forest height and observation data. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119, 1163–1179.
- Zhang CH (2015). *Simulating Forest Carbon Sources and Sinks in China with the Integration of Remote Sensing and Inventory Data*. PhD dissertation, Nanjing University, Nanjing. 86–87. (in Chinese with English abstract) [张春华 (2015). 融合遥感和清查数据的中国森林碳源汇模拟研究. 博士学位论文, 南京大学, 南京. 86–87.]
- Zhang WJ, Wang HM, Yang FT, Yi YH, Wen XF, Sun XM, Yu GR, Wang YD, Ning JC (2011). Underestimated effects of low temperature during early growing season on carbon sequestration of a subtropical coniferous plantation. *Biogeosciences*, 8, 1667–1678.
- 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.
- Zhou L, Wang S, Ju W, Xiong Z, Georg K, Chen J, Shi H (2013). Assessment of carbon dynamics of forest ecosystems in the Poyang Lake Basin responding to afforestation and future climate change. *Journal of Resources and Ecology*, 4, 11–19.
- Zhu WQ, Pan YZ, Yang XQ, Song GB (2007). Comprehensive analysis of the impact of climatic changes on Chinese terrestrial net primary productivity. *Chinese Science Bulletin*, 52, 3253–3560.

责任编辑: 孙建新 责任编辑: 王 葳



植物生态学报官网



微信订阅号  
期刊及学科  
相关信息发布



微信服务号  
稿件状态查询  
全文检索浏览