

DOI: 10.5846/stxb202102070399

吕富成, 马建勇, 曹云, 延晓冬. 基于 FORCCHN 模型的中国典型森林生态系统碳通量模拟. 生态学报, 2022, 42(7): 2810-2821.

Lü F C, Ma J Y, Cao Y, Yan X D. Carbon fluxes simulation of China's typical forest ecosystem based on FORCCHN model. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(7): 2810-2821.

基于 FORCCHN 模型的中国典型森林生态系统碳通量模拟

吕富成¹, 马建勇², 曹云³, 延晓冬^{1,*}

1 北京师范大学地理科学学部地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 华中农业大学植物科学技术学院, 武汉 430070

3 国家气象中心, 北京 100081

摘要: 森林生态系统是陆地碳循环的重要组成部分, 其固碳能力显著高于其他陆地生态系统, 研究森林生态系统碳通量是认识和理解全球变化对碳循环影响的关键。碳循环模型是研究森林生态系统碳通量有效工具。以长白山温带落叶阔叶林、千烟洲亚热带常绿针叶林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林和西双版纳热带雨林等 4 种中国典型森林生态系统为研究对象, 利用涡度相关 2003—2012 年观测数据, 评估 FORCCHN 模型对生态系统呼吸 (ER), 总初级生产力 (GPP), 净生态系统生产力 (NEP) 的模型效果。结果表明: (1) FORCCHN 模型能够较好的模拟中国 4 种典型森林生态系统不同时间尺度的碳通量。落叶阔叶林和常绿针叶林 ER 和 GPP 的逐日变化模拟效果较好 (ER 的相关系数分别为 0.94 和 0.92, GPP 的相关系数分别为 0.86 和 0.74); (2) 4 种森林生态系统碳通量季节动态模拟值和观测值显著相关 ($P < 0.01$), ER、GPP、NEP 的观测值和模拟值的 R^2 分别为 0.77—0.93、0.54—0.88 和 0.15—0.38; 模型可以很好地模拟森林生态系统不同季节碳汇 (NEP > 0), 碳源 (NEP < 0) 的变化规律; (3) 4 种森林生态系统碳通量模拟值与观测值的年际变化有很好的吻合度, 但在数值大小上存在差异, 模型高估了常绿阔叶林的 ER 和 GPP, 略微低估了其他 3 种森林生态系统 ER 和 GPP。

关键词: 碳通量; 总初级生产力; 森林生态系统; 碳循环模型

Carbon fluxes simulation of China's typical forest ecosystem based on FORCCHN model

LÜ Fucheng¹, MA Jianyong², CAO Yun³, YAN Xiaodong^{1,*}

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 College of Plant Sciences and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

3 National Meteorological Center of China, Beijing 100081, China

Abstract: Forest ecosystem is an important part of terrestrial carbon cycle, and its carbon sequestration capacity is significantly higher than other terrestrial ecosystems. Studying forest ecosystem carbon fluxes is the key to understand global carbon cycle. Carbon cycle model is an effective tool to study forest ecosystem carbon fluxes. In this paper, four typical forest ecosystems in China, including the temperate broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain, the subtropical evergreen coniferous forest in Qianyanzhou, the subtropical evergreen broad-leaved forest in Dinghushan, and the tropical rainforest in Xishuangbanna, are the research objects, using Eddy Covariance technique (EC) observation data to evaluate the effects of the FORCCHN model on the ecosystem total respiration (ER), gross primary productivity (GPP), and net

基金项目: 国家重点研发计划重大自然灾害专项项目 (2018YFC1509000); 国家自然科学基金资助 (31570473)

收稿日期: 2021-02-07; **网络出版日期:** 2021-12-15

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yxd@bnu.edu.cn

ecosystem productivity (NEP) of different forest ecosystems. (1) The FORCCHN model can better simulate the carbon fluxes of the four typical forest ecosystems at different time scales. The simulation results of the daily changes of ER and GPP in deciduous broad-leaved forest and evergreen coniferous forest are the best (the correlation coefficients of ER are 0.94 and 0.92, respectively, and the correlation coefficients of GPP are 0.86 and 0.74, respectively). (2) The seasonal dynamic simulation find that the simulated and observed carbon fluxes of the four different forest ecosystems are significantly correlated ($P < 0.01$), the R^2 value of the ER GPP, NEP observation and simulation are 0.77—0.93, 0.54—0.88, 0.15—0.38, respectively. The model can well simulate the changing laws of carbon sources (NEP>0) and carbon sinks (NEP<0) of the forest ecosystem in different seasons. (3) In the simulation of inter-annual changes, there is a good agreement between the simulated value and the observed value of the inter-annual variation trend line. The model overestimates the ER and GPP of evergreen broad-leaved forest, while it slightly underestimates the ER and GPP of the other three forest ecosystems.

Key Words: carbon fluxes; gross primary productivity; forest ecosystem; carbon cycle model

森林作为陆地上面积最大、生产力最高、结构和功能最为复杂的生态系统,在调节全球碳平衡、吸收温室气体等方面具有重要作用^[1]。据测算,森林生态系统植被碳库(包括地上和地下部分)约为 363 Pg C,占全球陆地植被碳库的 70%;总初级生产力约为 90 Pg C/a,超过全球陆地生态系统的一半^[2-3];全球森林生态系统固碳量约为 2.4 Pg C/a,其固碳能力高于海洋和其他生态系统^[4]。中国森林生态系统是陆地生态圈的巨大碳汇,尤其是西南林区和东北林区在固碳中扮演了重要角色^[5]。因此,精确量化森林生态系统碳通量,有助于理解陆地生态系统碳循环对全球变化的响应与适应,寻求最合理的碳中和措施,具有重要的科学意义^[6]。

森林生态系统碳循环模型是研究和预测森林碳通量及其循环过程机制的有效工具^[7-8]。按照研究的空间尺度,森林生态系统碳循环模型可以分为斑块尺度和区域尺度的碳循环模型^[9-11],以往对中国森林生态系统碳收支研究主要集中在区域尺度碳循环模型^[12-15],且不同模型验证工作比较简单粗糙,缺乏不同时间尺度碳通量的验证工作。以个体为基础的斑块模型模拟所有时间内每株树木的出生、生长和死亡的全过程,每株树木的生长是通过对光照、水分及土壤的养分竞争获得,模拟的森林动态演替过程及其碳收支变化相对合理。FORCCHN 模型(FORest ecosystem Carbon budget model for CHiNa, FORCCHN)是一个由我国自主研发的,基于个体生长过程和气象资料驱动的斑块模型^[16],具有 4 个主要特征:(1)有机结合了碳、氮、水在大气—植物—土壤不同界面的循环与转化过程;(2)森林生态系统碳收支的驱动因素并非由当前气候和生态系统简单的统计关系预先确定,而是基于个体生理生态过程机制耦合;(3)森林的碳通量是由林分个体生长来确定的,进而使碳收支进行更为科学合理的模拟;(4)模型可用于预测未来气候变化下的森林生态系统碳收支的动态波动和未来平衡态。目前,该模型已在一些区域对森林碳收支进行模拟^[17-19],但主要集中在单一森林生态系统和短时间序列的模拟,缺乏对不同类型森林生态系统长时间序列模拟验证。

本文旨在加深斑块模型对中国典型森林生态系统碳通量的模拟研究工作,通过对局部森林生态系统的模拟,检验模型在站点不同时间尺度的模拟性能,为研究大范围森林生态系统碳收支提供依据。以长白山温带阔叶红松林(CBS)、鼎湖山亚热带常绿阔叶林(DHS)、千烟洲中亚热带常绿针叶林(QYZ)和西双版纳热带雨林(XSBN)为研究对象,着重评估模型对森林生态系统呼吸(Ecosystem Respiration: ER),总初级生产力(Gross Primary Productivity: GPP),净生态系统生产力(Net Ecosystem Productivity: NEP)的模拟效果,以期对未来气候变化下我国森林生态系统碳收支提供参考。

1 数据与方法

1.1 基本过程和模拟策略

模型由每日气象资料驱动,通过求和固定斑块面积上每株树木的碳收支,再耦合土壤碳收支,进而得到森林生态系统斑块面积上的碳收支,其涉及的主要特征如图 1。

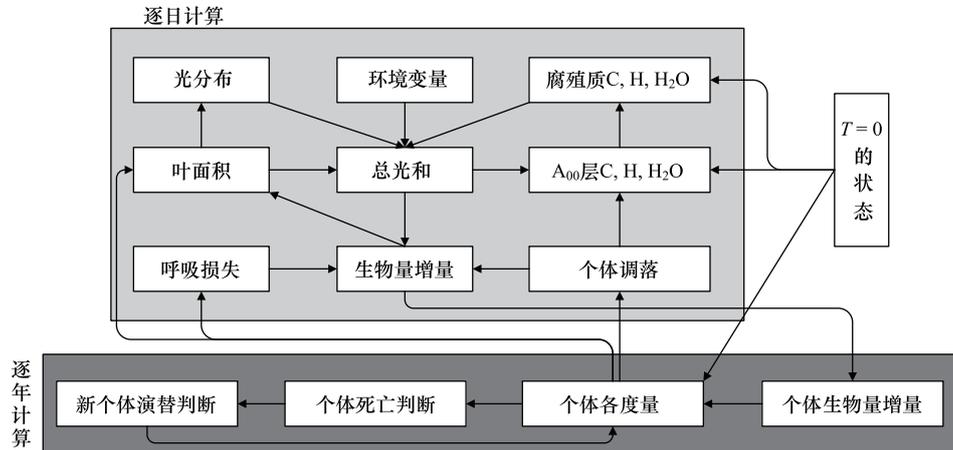


图1 模型的主要生态过程及时间步长

Fig.1 The main ecological processes and time steps of the model

T 代表时间; 枯枝落叶层(Litter layer: A00)(土壤分层学中的专业代号)

模型通过两种时间步长进行积分,对于每株树木而言,每天计算一次光合作用,维持呼吸,氮吸收和部分凋落物通量,土壤水,有机质的分解和氮的矿化都是以日为步长发生的。模型假定每株树木每日不同时间内维持呼吸,部分叶,细根凋落,土壤有机质分解和氮矿化速率恒定不变,从而避免在较短的步长上计算有关通量。模型所计算的树木个体碳氮的年净增加量,需要加上前一年储存的碳量,在每年最后一天分配到不同的树木成分内。当树木没有足够的碳用于光合作用产生叶片时,认为树木已经死亡并停止生长,从而树木的碳储存下降。死亡的树木所包含的碳氮含量,以及活的木质部分,花,果,叶和根的凋落物通量在每年最后一天加入到土壤枯枝落叶库中。由于本研究模拟时间较短,小于 50 年,因此假定树木不发生更新。

1.2 模型输入与输出

FORCCHN 模型的输入参数主要包括气象数据、土壤数据、遥感数据及其它数据。模型所需每日气象数据包括:太阳总辐射(W/m^2)、平均气温($^{\circ}C$)、最高气温($^{\circ}C$)、最低气温($^{\circ}C$)、降水量(mm)、空气相对湿度(%)、平均风速(m/s)、平均气压(hPa);土壤数据包括:土壤碳密度($g C/cm^2$)、土壤氮密度($g N/cm^2$)、田间持水量(cm)、萎蔫系数(cm)、土壤容重(g/cm^3)、砂粒含量(%)、粉粒含量(%)、黏粒含量(%) ;遥感数据包括:不同森林植被类型分布图、模拟初始年的最大叶面积和最小叶面积指数(m^2/m^2) ;其它数据还有:站点的平均大气 CO_2 浓度($\mu L/L$),经纬度及海拔高度(m)。FORCCHN 模型可输出日尺度和年尺度的碳通量数据,主要参数包括:地上生物量($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、地下生物量($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、总初级生产力($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、植被地上呼吸($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、植被地下呼吸($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、土壤异养呼吸($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、凋落通量($g C m^{-2}d^{-1}$ 或 $g C m^{-2}a^{-1}$)、土壤碳库量($g C/m^2$)。

1.3 数据来源

涡度相关技术是测定大气与生态系统之间 CO_2 交换,水分和能量通量最直接的方法,所提供的通量观测数据已广泛应用于陆地生态系统的碳循环研究^[20]。本文使用的观测数据是利用涡度相关技术和基于 ChinaFLUX 数据处理体系形成标准化的生态系统碳水通量和关键气象要素数据集^[21],主要包括 2003—2012 年日尺度,月尺度,年尺度的气象数据和通量数据。通量数据主要包括生态系统呼吸(ER)和生态系统净 CO_2 交换量(NEE)。生态系统总初级生产力(GPP)和生态系统净初级生产力(NEP)计算方法^[22]如下:

$$NEE = -NEP = ER - GPP$$

模型所需的土壤数据、遥感数据及其它数据主要来源于中国通量数据网(<http://www.cnern.org.cn>)和 IGBP-DIS 发布的 Global Gridded Surfaces of Selected Soil Characteristics 数据集。通量站基本信息参见表 1。

表 1 4 个通量站基本信息

Table 1 Basic information of 4 forest eddy covariance sites in this study

站点 Site	长白山 CBS	鼎湖山 DHS	千烟洲 QYZ	西双版纳 XSBN
地理位置 Location	128°05'E,42°24'N	112°32'E,23°10'N	115°03'E,26°44'N	101°15'E,21°55'N
海拔 Elevation/m	738	300	100	750
年均温 Annual temperature/°C	3.6	20.9	17	21
年降水 Annual precipitation/mm	713	1956	1542	1493
气候类型 Climate type	温带大陆性气候	亚热带季风气候	亚热带季风气候	热带季风气候
植被类型 Vegetation type	落叶阔叶林	常绿阔叶林	常绿针叶林	热带雨林
土壤类型 Soil type	山地暗棕壤	赤红壤	红壤	砖红壤
数据时段 Data period/a	2003—2011	2003—2012	2003—2012	2003—2012

1.4 分析方法

为评估模型对森林生态系统碳通量的模拟性能,本文分别采用模拟结果与观测值的相关系数(Corr),均方根误差(RMSE),以及偏差(Bias)等指标。具体计算公式如下:

$$\text{Corr} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2}} \quad (1)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$\text{Bias} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i) \quad (3)$$

式中, n 为年份序号, S_i 与 O_i 分别表示第 i 年模拟与观测的碳通量, \bar{S} 与 \bar{O} 为对应的碳通量平均值。Corr 通过 0.01 或 0.05 的显著性检验($P < 0.01$ 或 $P < 0.05$),则表示模拟与观测之间相关关系越好;RMSE 一般用来衡量模拟与观测的精度, RMSE 值越接近于 0,表明模拟效果越精确。Bias 用于度量模拟值与观测值的偏离程度,即刻画模拟值对观测值的拟合能力。

2 结果

2.1 碳通量日尺度模拟

总体而言,模型较好的模拟了 4 种典型森林生态系统的逐日碳通量。图 2 和表 2 展示了以年为周期森林生态系统的逐日碳通量观测值与模拟值的相关系数,均方根误差及偏差。森林生态系统 3 个碳通量指标的相关系数从高到低依次为 ER、GPP、NEP。4 种森林生态系统 ER 的相关系数均超过 0.85,且对应四分位距(IQR)最小,表明其模拟效果最好。不同森林生态系统 GPP 的相关系数略有差异:落叶阔叶林和常绿针叶林相关系数分别为 0.86 和 0.73;常绿阔叶林和热带雨林相关系数在 0.50 左右。NEP 相关系数较低,4 种森林生态系统 NEP 的相关系数均小于 0.5,从大到小其次为:落叶阔叶林,常绿阔叶林,常绿针叶林和热带雨林。

不同森林生态系统均方根误差(RMSE)分析得出,3 个碳通量的均方根误差 $\text{GPP} > \text{NEP} > \text{ER}$ 。其中,常绿阔叶林的 3 个碳通量均方根误差最大($\text{RMSE} > 2 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$),表明模型对该森林生态系统模拟误差较大,对其他 3 种森林生态系统碳通量模拟的均方根误差在 $1.67\text{—}1.77 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间,其中常绿针叶林 ER 均方根误差最小, $\text{RMSE} = 0.83 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。

对偏差(Bias)分析发现,除常绿阔叶林外,其他 3 种森林生态系统 ER 和 GPP 偏差在 $-1.41\text{—}-0.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之间,表明模拟值略低于观测值,常绿阔叶林 ER 和 GPP 偏差分别为 $2.47 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $1.08 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$,模型高估了该生态系统碳通量。不同森林生态系统 NEP 偏差略有不同,落叶阔叶林和热带雨林的 NEP

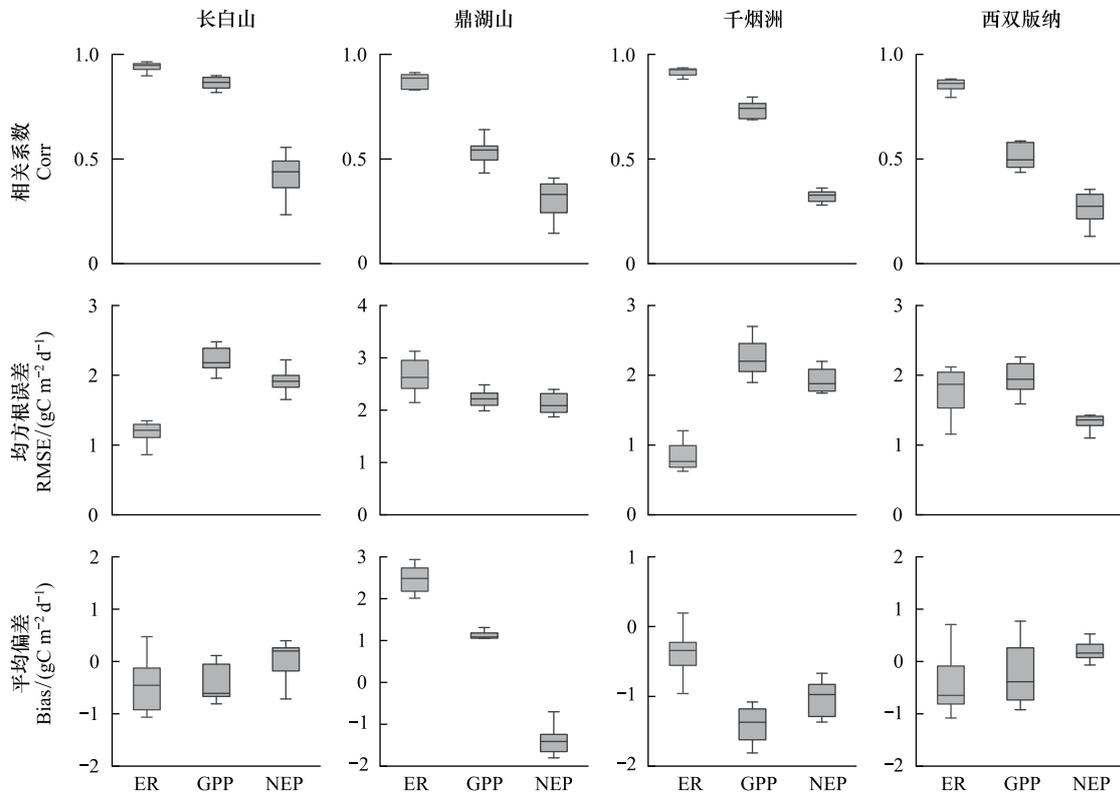


图2 每日碳通量模拟值与观测值的关系

Fig.2 The relationship between the simulated and observed values of daily carbon fluxes

图中盒子 3/4 分位点与 1/4 分位点的差值称为四分位距 (IQR), 中间的线段表示中位数, 上下须分别表示 3/4 分位点加上 1.5IQR 和 1/4 分位点减少 1.5IQR; Corr: 相关系数 Correlation Coefficient; RMSE: 均方根误差 Root Mean Square Error; Bias: 偏差 Bias; ER: 生态系统呼吸 Ecosystem Respiration; GPP: 总初级生产力 Gross Primary Productivity; NEP: 净生态系统生产力 (Net Ecosystem Productivity); IQR: 四分位距 Interquartile Range

偏差略大于 0, 模拟值基本与观测值持平; 常绿阔叶林和常绿针叶林的 NEP 偏差均小于 $-1 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Bias 分别为 $-1.38 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 和 $-1.03 \text{ g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 说明模型低估了 NEP。

表 2 不同森林生态系统碳通量以年为周期日尺度模拟结果

Table 2 Day-scale simulation of carbon fluxes in different forest ecosystems

站点 Site	碳通量 Carbon fluxes	相关系数 Corr	均方根误差 RMSE($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	平均偏差 Bias($\text{g C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)	模拟年数 Stimulation period
长白山	ER	0.94	1.18	-0.45	9
	GPP	0.86	2.22	-0.42	9
	NEP	0.42	1.92	0.03	9
鼎湖山	ER	0.86	2.65	2.47	10
	GPP	0.53	2.22	1.08	10
	NEP	0.31	2.12	-1.38	10
千烟洲	ER	0.92	0.83	-0.37	10
	GPP	0.74	2.25	-1.41	10
	NEP	0.32	1.92	-1.03	10
西双版纳	ER	0.85	1.77	-0.43	10
	GPP	0.51	1.96	-0.23	10
	NEP	0.27	1.39	0.19	10

ER: 森林生态系统呼吸 Ecosystem Respiration; GPP: 总初级生产力 Gross Primary Productivity; NEP: 净生态系统生产力 Net Ecosystem Productivity

基于以上分析,可以得到以下简要结论:FORCCHN 模型基本可以再现不同森林类型日尺度的碳通量,但大部分森林生态系统 ER 和 GPP 存在不同程度的低估,而高估了常绿阔叶林的 ER 和 GPP。

2.2 碳通量季节变化模拟

总体而言,模型能够较好地模拟森林生态系统碳通量的季节动态。对不同森林生态系统逐月碳通量观测值和模拟值进行了相关分析(图 3),结果表明,落叶阔叶林,常绿针叶林,常绿阔叶林和热带雨林 ER,GPP 和 NEP 的观测值和模拟值呈显著相关($P<0.01$),ER 观测值和模拟值的 R^2 分别为 0.93,0.91,0.84,0.77;GPP 观测值和模拟值的 R^2 分别为 0.88,0.82,0.61,0.54;NEP 观测值和模拟值 R^2 最低,均小于 0.4。碳通量观测值和模拟值对比发现,落叶阔叶林和常绿针叶林 3 个碳通量指标模拟值低于观测值,回归方程斜率略低于 1;常绿阔叶林和热带雨林 ER 和 GPP 模拟值大于观测值,回归方程斜率大于 1,两者的 NEP 模拟值小于观测值,回归方程斜率小于 1。

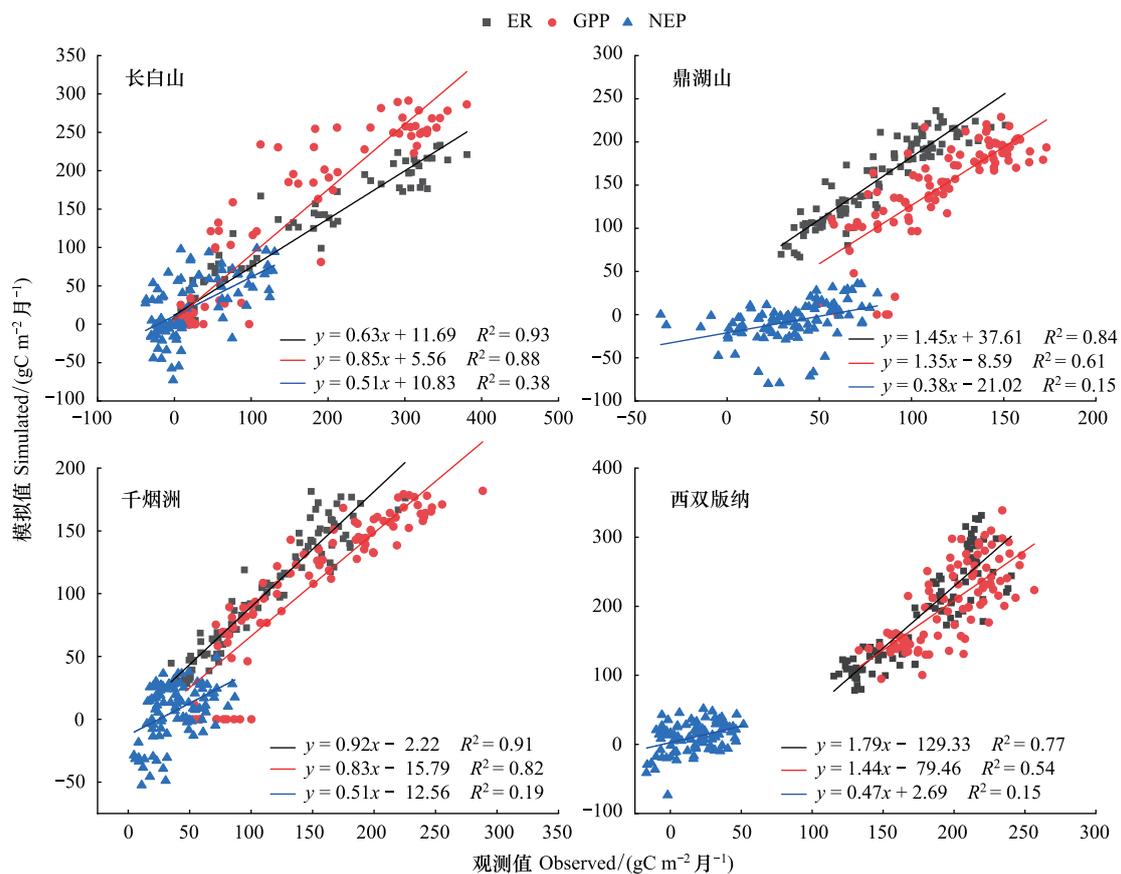


图 3 每月碳通量观测值和模拟值的关系

Fig.3 The relationship between monthly carbon flux observed and simulated values

为进一步探究 FORCCHN 模型对不同森林类型碳通量季节变化的模拟能力,图 4 给出了 4 种森林生态系统典型年份的 ER,GPP 及 NEP 的月变化。结果表明 FORCCHN 对不同森林生态系统碳通量的季节变化具备良好的模拟能力,能够再现中国森林生态系统碳通量由南向北递减、生长期高于非生长期的季节特征,但在少数月份模拟值与观测值存在偏差。

在 ER 模拟方面,模拟与观测曲线波动非常相似,表明模型可以再现不同森林生态系统的季节变化。然而,模型对于 4 种森林生态系统 ER 模拟有一定的差异:模型对于落叶阔叶林,常绿针叶林和热带雨林的 ER 存在小幅度的低估,模拟值分别低于观测值 13.43%,10.19%,6.83%;但模拟明显高估了常绿阔叶混交林的 ER,模拟值高于观测值达 90.06%。

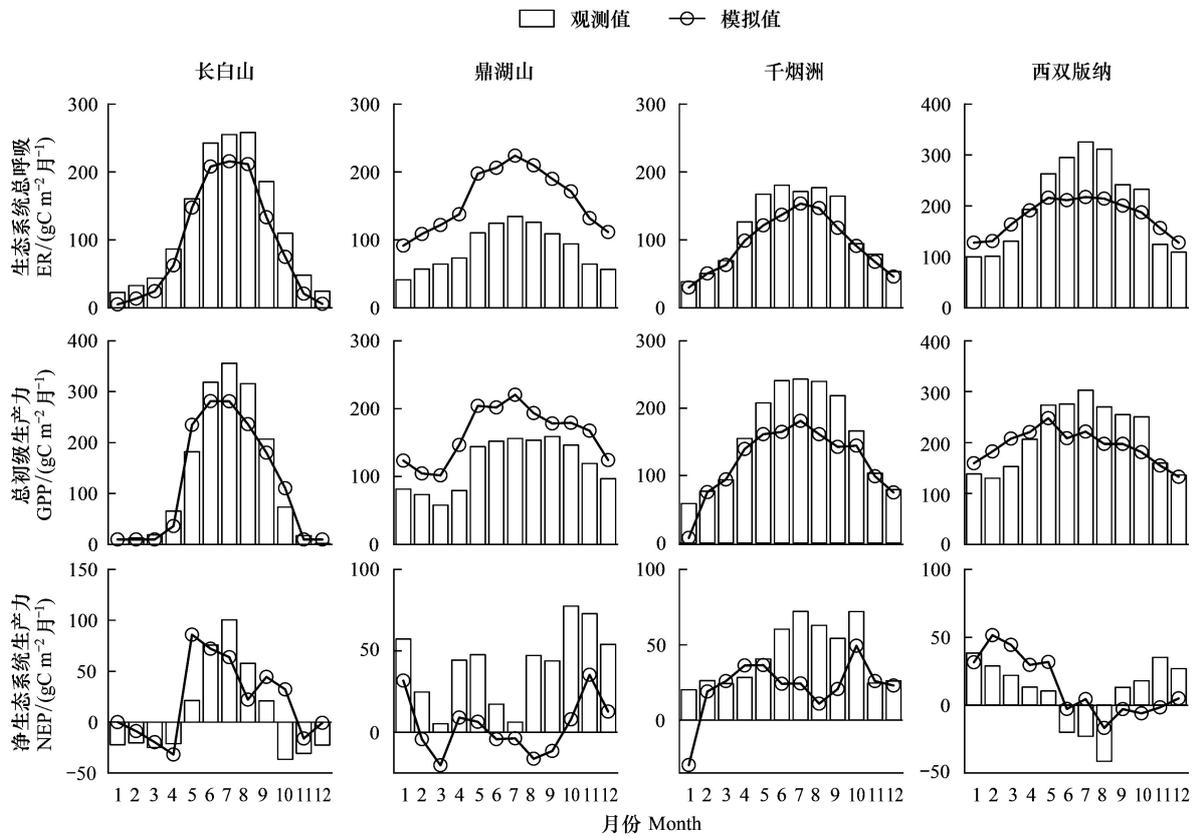


图4 碳通量观测值和模拟值的季节动态

Fig.4 Seasonal dynamics of observed and simulated carbon fluxes

同时,模型对不同森林生态系统的 GPP 和 NEP 均展现良好的季节模拟能力。落叶阔叶林生产期短,GPP 季节差异显著,夏季 6—8 月 GPP 达到最高值,其他季节 GPP 小于 $100\text{g C m}^{-2}\text{月}^{-1}$;随着年均温和降水的增加,常绿阔叶林和常绿针叶林的生长期较长,每年 5—10 月份 GPP 最大;热带雨林一年四季均为生长期,每月 GPP 均大于 $100\text{g C m}^{-2}\text{月}^{-1}$ 。尤为可贵的是,模拟再现常绿阔叶林 3 月份 GPP 和 NEP 为一年最低的生长特征,与观测数据季节变化趋势高度一致。模型能够再现不同森林生态系统在一年四季碳源 ($\text{NEP} < 0$)、碳汇 ($\text{NEP} > 0$) 的变化规律,特别是对于热带雨林,雨季(5—10 月)为碳源,干季(11 月到翌年 3 月)为碳汇^[23],但遗憾的是,模型在数值上存在低估。

2.3 碳通量年尺度模拟

分析森林生态系统 2003—2012 年碳通量年际变化及偏差(图 5—图 7),结果表明,FORCCHN 模型对不同森林生态系统碳通量模拟能力存在差异。在 ER 年通量模拟中(图 5),落叶阔叶林、常绿针叶林、热带雨林模拟值与观测值的年通量差异较小,热带雨林观测 ER 年通量为 $2052.59\text{—}2629.68\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,模拟 ER 年通量为 $2062.20\text{—}2339.3\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,年均偏差为 -7.29% ,仅在 2009 年和 2010 年模拟的 ER 通量高于观测值;常绿针叶林观测 ER 年通量为 $1212.79\text{—}1571.19\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,模拟 ER 年通量为 $1122.90\text{—}1306.71\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,两者呈显著相关($P < 0.05$),年均偏差为 -10.11% ,仅在 2005 年模拟值略高于观测值;落叶阔叶林观测 ER 年通量为 $842.99\text{—}1546.51\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,模拟 ER 年通量为 $945.70\text{—}1146.01\text{gC m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 之间,年均偏差率为 -12.75% ,仅在 2005 年模拟值高于观测值,同时落叶阔叶林 ER 年通量波动较大,模拟的年通量年际变化相对稳定。表明模型对 3 种森林生态系统 ER 年通量存在不同程度的低估,常绿阔叶林年均偏差率达 93.87% ,说明模拟值明显高于观测值。GPP 年际动态模拟结果(图 6)与 ER 模拟结果相对一致,即模型低估了热带雨林,常绿针叶林和落叶阔叶林 GPP,平均偏差分别为 -5.50% , -29.78% , -12.97% 。主要原因在于夏

季模拟的碳通量低于观测值,导致模拟的年通量低于观测值。同时高估了常绿阔叶林的 GPP,平均偏差为 25.71%。对比模拟和观测 NEP 发现(图 7),落叶阔叶林观测年均 NEP 为 $252.51 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,模拟年均 NEP 为 $224.85 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,模拟值低于观测值 10.95%;常绿阔叶林和常绿针叶林观测和模拟 NEP 年际波动趋势相对一致,但具体数值存在较大差异,模拟值均低于观测值。热带雨林观测和模拟 NEP 显著相关($P < 0.05$),观测年均 NEP 为 $91.70 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,模拟年均 NEP 为 $128.93 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,模拟值高于观测值 40.60%。

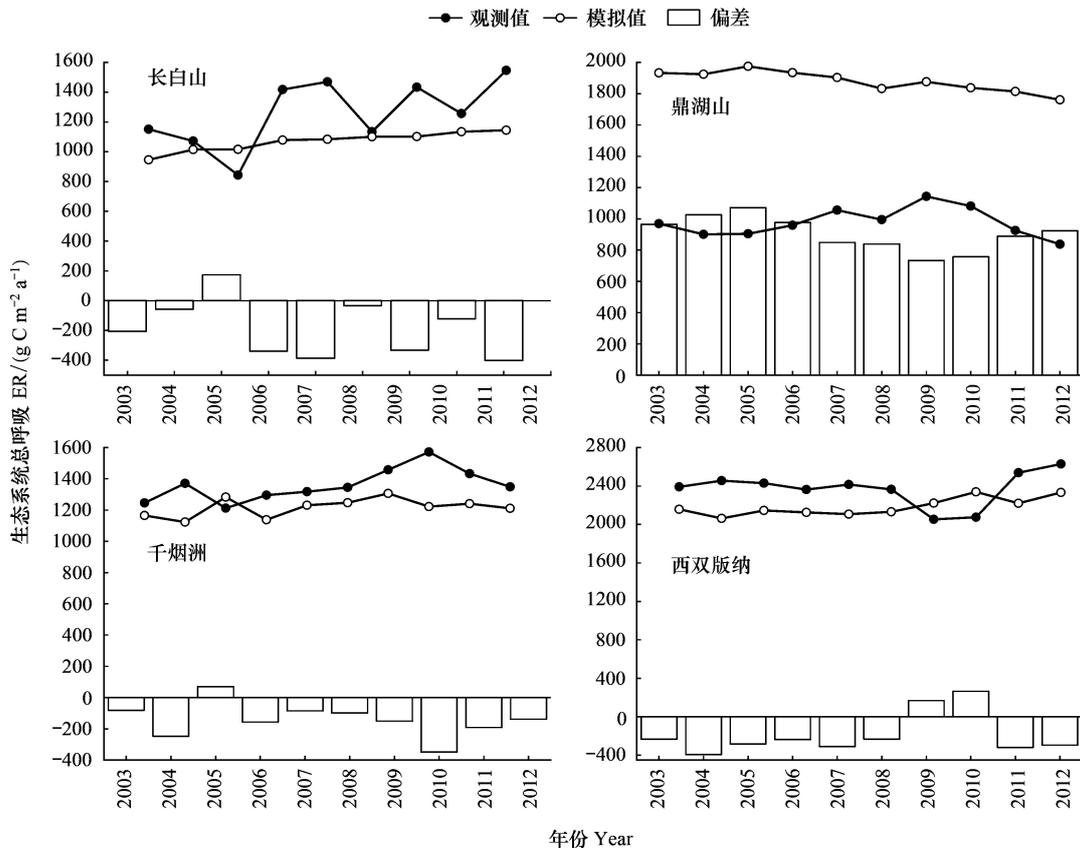


图 5 生态系统呼吸观测值和模拟值的年际变化及偏差

Fig.5 Inter-annual variation and deviation of the observed and simulated values of ecosystem respiration

ER: 生态系统呼吸 Ecosystem Respiration

3 讨论

本文以长白山温带阔叶红松林、千烟洲亚热带常绿针叶林、鼎湖山亚热带常绿阔叶林和西双版纳热带雨林等 4 种中国典型森林生态系统为研究对象,利用涡度相关 2003—2012 年观测数据,评估 FORCCHN 模型对不同森林生态系统生态系统呼吸(ER),总初级生产力(GPP),净生态系统生产力(NEP)不同时间尺度的模拟效果。

不同时间尺度碳通量模拟效果对比,FORCCHN 模型可以很好的捕捉森林生态系统碳通量逐日变化和季节性动态,但在每年和更长的时间尺度上表现一般,这与前人的研究结论一致^[24-26]。已有研究表明,碳循环模型通常无法充分模拟观察到的落叶冠层物候的年际变化^[27],并且落叶阔叶林的 GPP 和常绿阔叶林的 ER 春季的差异很大,同时 GPP 与 NEP 的年际变化存在协同性^[28-29],这是导致碳通量模拟值和观测值年际变化一致性低的重要原因,也有人把年际模拟的不确定性归因于建模过程的偏差和碳分配机制的不明确^[30]。为此,需要提高模型与物候的耦合程度和植被对热量的敏感性^[27,31]。

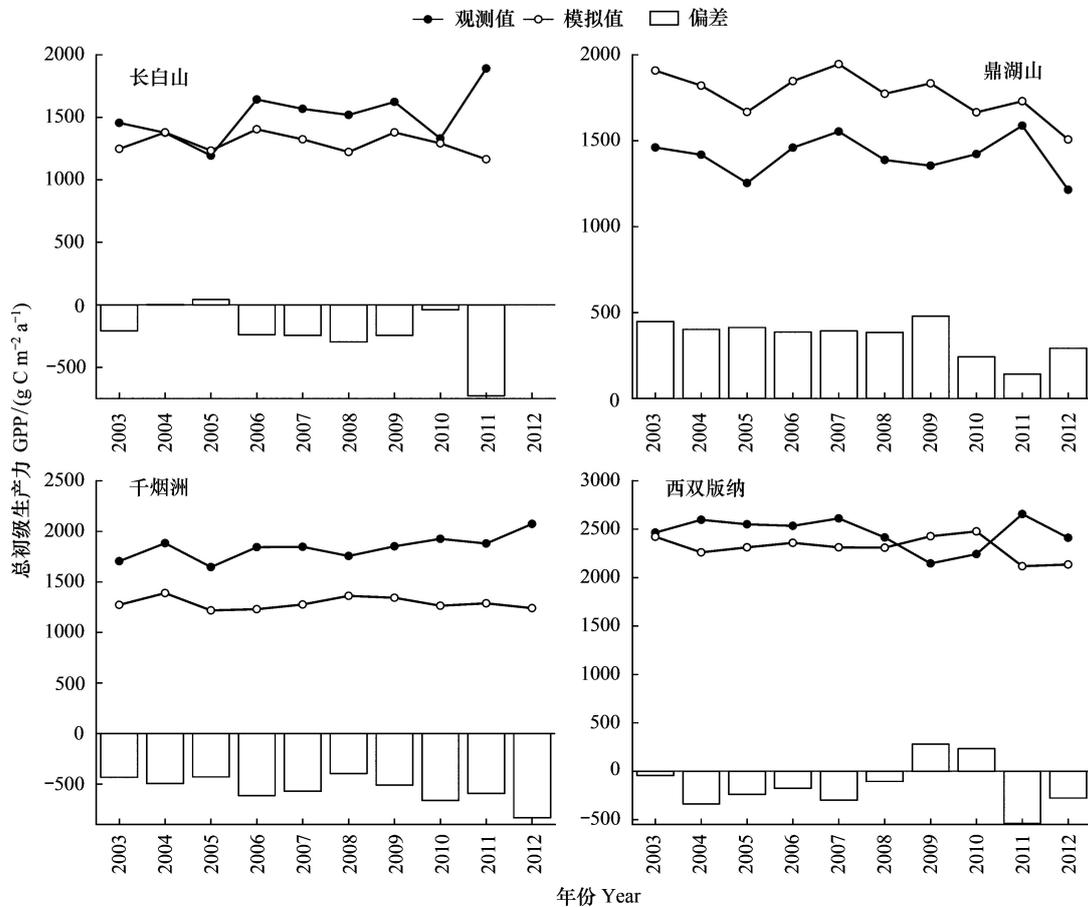


图 6 总初级生产力观测值和模拟值的年际变化及偏差

Fig. 6 Inter-annual variation and deviation of the observed and simulated values of gross primary productivity

从森林类型上看, FORCCHN 模型在落叶阔叶林模拟效果好于常绿阔叶林, 这个模拟结论得到了一些模型评估的支持^[32-33]。落叶阔叶林具有明显的物候季节动态, 模型可以通过明确不同时期植被生长的主导因素, 模拟植被的生理生态过程, 从而再现生态系统的碳通量动态。相反, 常绿阔叶林受制于季节性叶片物候的细微变化, 多种环境因素共同调控植物的光合作用, 常绿阔叶林夏季的碳通量通常较高, 并且存在较大的不确定性^[31], 这增加了模型模拟的难度。

ER 在逐日尺度和季节尺度的精度高于 GPP 和 NEP, 关键在于模型改进了植物生长过程中呼吸量计算方法。生态系统呼吸由植被维持呼吸, 植被生长呼吸和土壤异养呼吸 3 部分构成^[34]。多数植物生长模型将维持呼吸与生物量建立线性关系, 通过生物量去计算植物的维持呼吸量^[35-36]。然而, 有研究表明, 对树木而言, 呼吸作用主要用以维持边材软组织细胞的生长, 这些细胞在所有活的树木内都存在^[37], 因此, 在 FORCCHN 模型中, 将维持呼吸表达为一个与边材量成正相关的函数, 这有利于提高维持呼吸模拟精度。相对于 ER 和 GPP, 模型对森林生态系统 NEP 模拟误差相对偏大。有研究表明, ER 和 GPP 的模拟误差可以影响 NEP 模拟的不确定性^[38-40], 因此, 造成了 NEP 模拟精度低于 ER 和 GPP。

模型对一些森林生态系统碳通量存在一定的偏差。原因可能在于: (1) 模型参数不能完全解释个体树木的生理和生态特征, 因为统一参数无法表征单株之间的生长差异^[30]。比如, 在 12 月至 3 月, 落叶阔叶林模拟 ER 和 GPP 接近零, 与观测结果存在一定差异。(2) ER 和 GPP 受多种环境因素 (比如氮沉降) 影响, 模型只能利用有限的参数和方程模拟植被生理生态过程, 未考虑氮沉降对植物生长的影响。比如, Luysaert 等^[41]对欧洲森林研究发现, 与不考虑氮沉降相比, 考虑氮沉降影响的森林生产力平均增加 11%。(3) 空气温度作为

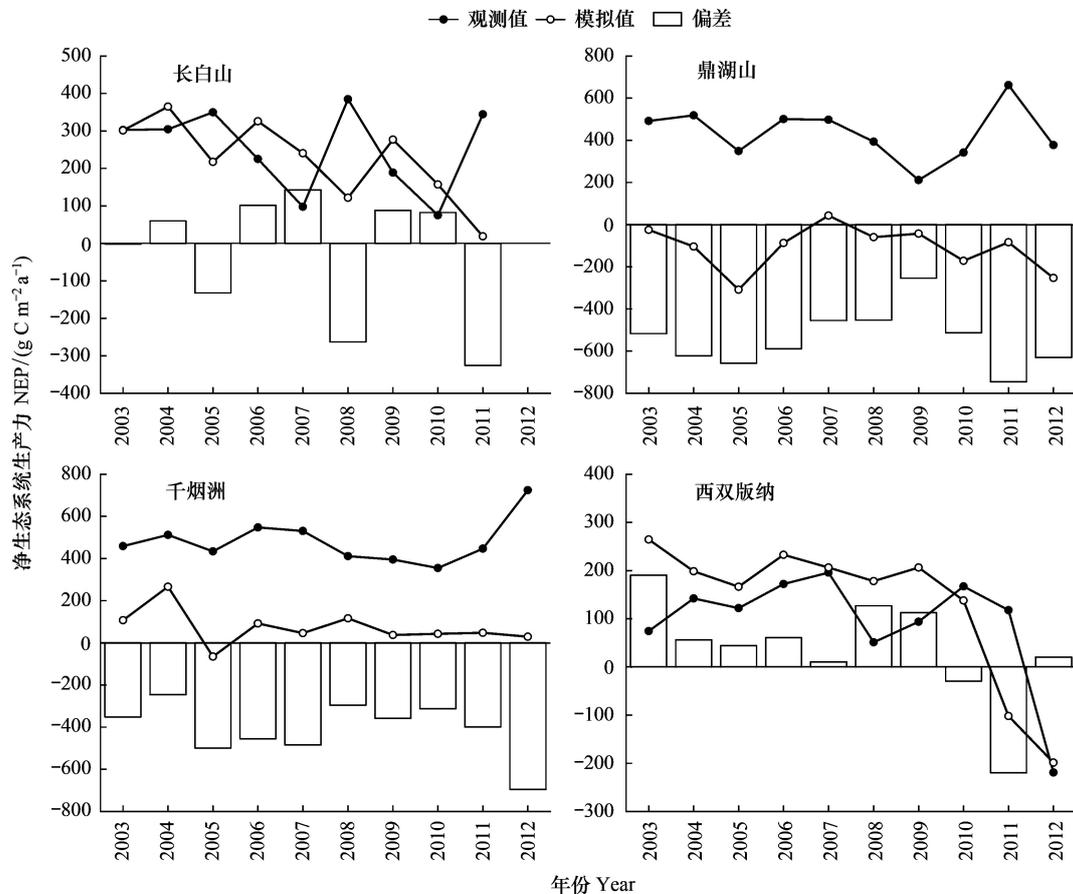


图7 净生态系统生产力观测值和模拟值的年际变化及偏差

Fig.7 Inter-annual variation and deviation of the observed and simulated values of net ecosystem productivity

驱动变量模拟不同类型森林生态系统呼吸精度存在差异,这可能是由树龄不同造成的。比如千烟洲人工林种植于1985年前后,其植物呼吸在生态系统呼吸中起着更为重要的作用,空气温度与生态系统呼吸相关性最强,因此本模型对其模拟效果较好。长白山落叶阔叶林为成熟林,树龄大约200年,异养呼吸可能是影响生态系统呼吸的重要成分,土壤温度作为驱动变量应该更为合理^[42]。同时,由于受仪器故障和天气影响等原因,本研究使用的常绿阔叶林碳通量数据存在部分误差,通量数据受随机误差的影响与通量的大小大致成正比^[43—44],这可能是导致常绿阔叶林碳通量模拟与观测偏差较大的原因。

本研究基于观测数据,验证了FORCCHN模型在中国典型森林生态系统碳通量模拟的适用性,对研究碳循环具有重要意义。一方面模型可以利用气象、土壤和植被等历史数据,探究历史时期森林生态系统的碳收支状况,分析更大尺度生态系统的变化特征;另一方面模型可提供对于区域和全球尺度的森林生态系统时空连续分析,有利于对未来气候情景的模拟预测,为制定碳中和政策提供科学支撑。

4 结论

FORCCHN模型能够较好地模拟中国4种典型森林生态系统不同时间尺度的碳通量。模型对落叶阔叶林和常绿针叶林的ER和GPP逐日变化模拟效果较好,ER的相关系数分别为0.94和0.92,GPP的相关系数分别为0.86和0.74。模型对森林生态系统碳通量的季节动态具有良好的模拟能力,不同季节森林生态系统碳通量模拟值和观测值显著相关,ER模拟值和观测值的 R^2 为0.77—0.93,GPP模拟值和观测值的 R^2 为0.54—0.88,NEP模拟值和观测值的 R^2 小于0.4,模型可以模拟森林不同季节碳汇、碳源变化规律。在年尺度

模拟中,热带雨林、常绿针叶林、常绿阔叶林碳通量模拟值与观测值的年通量有很好的吻合度,但在绝对数值上存在差异。

致谢:感谢中国通量观测研究联盟(ChinaFLUX)在通量数据方面提供的帮助。

参考文献 (References):

- [1] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [2] Pan Y D, Birdsey R A, Fang J Y, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S L, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the World's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] Beer C, Reichstein M, Tomelleri E, Ciais P, Jung M, Carvalhais N, Rödenbeck C, Arain M A, Baldocchi D, Bonan G B, Bondeau A, Cescatti A, Lasslop G, Lindroth A, Lomas M, Luysaert S, Margolis H, Oleson K W, Rouspard O, Veenendaal E, Viovy N, Williams C, Woodward F I, Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science*, 2010, 329(5993): 834-838.
- [4] Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni R, Piao S L, Thornton P, Metz N, Wania R. Carbon and other biogeochemical cycles//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, Tignor M, Allen S K, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley P M, eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 465-570.
- [5] Wang J, Feng L, Palmer P I, Liu Y, Fang S X, Bösch H, O'Dell C W, Tang X P, Yang D X, Liu L X, Xia C Z. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data. *Nature*, 2020, 586(7831): 720-723.
- [6] Yu G R, Chen Z, Piao S L, Peng C H, Ciais P, Wang Q F, Li X R, Zhu X J. 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*, 2014, 111(13): 4910-4915.
- [7] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 王秋凤. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [8] 何维, 江飞, 居为民. 利用大气二氧化碳和羧基硫浓度评估陆地生态系统模型碳通量模拟的不确定性. *生态学报*, 2020, 40(13): 4371-4382.
- [9] 王萍. 森林碳循环模型概述. *应用生态学报*, 2009, 20(6): 1505-1510.
- [10] 王绍刚, 何国金, 刘定生, 汪小钦. 森林碳循环模型方法研究进展. *科技导报*, 2008, 26(9): 72-77.
- [11] 谢馨瑶, 李爱农, 靳华安. 大尺度森林碳循环过程模拟模型综述. *生态学报*, 2018, 38(1): 41-54.
- [12] 朴世龙, 方精云, 郭庆华. 1982—1999 年我国植被净第一性生产力及其时空变化. *北京大学学报: 自然科学版*, 2001, 37(4): 563-569.
- [13] 曹明奎, 陶波, 李克让, 邵雪梅, Prience S D. 1981—2000 年中国陆地生态系统碳通量的年际变化. *植物学报*, 2003, 45(5): 552-560.
- [14] 何勇, 董文杰, 季劲均, 丹利. 基于 AVIM 的中国陆地生态系统净初级生产力模拟. *地球科学进展*, 2005, 20(3): 345-349.
- [15] 田汉勤, 刘明亮, 张弛, 任巍, 徐小锋, 陈广生, 吕超群, 陶波. 全球变化与陆地系统综合集成模拟——新一代陆地生态系统动态模型 (DLEM). *地理学报*, 2010, 65(9): 1027-1047.
- [16] 延晓冬, 赵俊芳. 基于个体的中国森林生态系统碳收支模型 FORCCHN 及模型验证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2684-2694.
- [17] 赵俊芳, 延晓冬, 贾根锁. 东北森林净第一性生产力与碳收支对气候变化的响应. *生态学报*, 2008, 28(1): 92-102.
- [18] Ma J Y, Shugart H H, Yan X D, Cao C G, Wu S, Fang J. Evaluating carbon fluxes of global forest ecosystems by using an individual tree-based model FORCCHN. *Science of the Total Environment*, 2017, 586: 939-951.
- [19] Fang J, Lutz J A, Wang L B, Shugart H H, Yan X D. Using climate-driven leaf phenology and growth to improve predictions of gross primary productivity in North American forests. *Global Change Biology*, 2020, 26(12): 6974-6988.
- [20] 于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏. 中国陆地生态系统通量观测研究网络 (China FLUX) 的主要进展及发展展望. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 903-917.
- [21] 张雷明, 罗艺伟, 刘敏, 陈智, 苏文, 何洪林, 朱治林, 孙晓敏, 王艳芬, 周国逸, 赵新全, 韩士杰, 欧阳竹, 张宪洲, 张一平, 刘琪璟, 郝彦宾, 闫俊华, 张德强, 李英年, 王安志, 吴家兵, 李发东, 赵风华, 石培礼, 张扬建, 何永涛, 林露湘, 宋清海, 王辉民, 刘允芬, 于贵瑞. 2003—2005 年中国通量观测研究联盟 (China FLUX) 碳通量观测数据集. *中国科学数据: 中英文网络版*, 2019, 4(1): 14-30.
- [22] 王兴昌, 王传宽. 森林生态系统碳循环的基本概念和野外测定方法评述. *生态学报*, 2015, 35(13): 4241-4256.
- [23] Fei X H, Song Q H, Zhang Y P, Liu Y T, Sha L Q, Yu G R, Zhang L M, Duan C Q, Deng Y, Wu C S, Lu Z Y, Luo K, Chen A G, Xu K, Liu W W, Huang H, Jin Y Q, Zhou R W, Li J, Lin Y X, Zhou L G, Fu Y N, Bai X L, Tang X H, Gao J B, Zhou W J, Grace J. Carbon exchanges and their responses to temperature and precipitation in forest ecosystems in Yunnan, Southwest China. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 824-840.
- [24] Braswell B H, Sacks W J, Linder E, Schimel D S. Estimating diurnal to annual ecosystem parameters by synthesis of a carbon flux model with eddy covariance net ecosystem exchange observations. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 335-355.
- [25] Ricciuto D M, Butler M P, Davis K J, Cook B D, Bakwin P S, Andrews A, Teclaw R M. Causes of interannual variability in ecosystem-atmosphere CO₂ exchange in a northern Wisconsin forest using a Bayesian model calibration. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(2): 309-327.

- [26] Dietze M C, Vargas R, Richardson A D, Stoy P C, Barr A G, Anderson R S, Arain M A, Baker I T, Black T A, Chen J M, Ciais P, Flanagan L B, Gough C M, Grant R F, Hollinger D, Izaurralde R C, Kucharik C J, Laflour P, Liu S G, Lokupitiya E, Luo Y Q, Munger J W, Peng C H, Poulter B, Price D T, Ricciuto D M, Riley W J, Sahoo A K, Schaefer K, Suyker A E, Tian H Q, Tonitto C, Verbeeck H, Verma S B, Wang W F, Weng E S. Characterizing the performance of ecosystem models across time scales: a spectral analysis of the North American Carbon Program site-level synthesis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116(G4): G04029.
- [27] Richardson A D, Anderson R S, Arain M A, Barr A G, Bohrer G, Chen G S, Chen J M, Ciais P, Davis K J, Desai A R, Dietze M C, Dragoni D, Garrity S R, Gough C M, Grant R, Hollinger D Y, Margolis H A, Mccaughey H, Migliavacca M, Monson R K, Munger J W, Poulter B, Raczka B M, Ricciuto D M, Sahoo A K, Schaefer K, Tian H Q, Vargas R, Verbeeck H, Xiao J F, Xue Y K. Terrestrial biosphere models need better representation of vegetation phenology: results from the North American carbon program site synthesis. *Global Change Biology*, 2012, 18(2): 566-584.
- [28] Krishnan P, Black T A, Barr A G, Grant N J, Gaumont-Guay D, Nesic Z. Factors controlling the interannual variability in the carbon balance of a southern boreal black spruce forest. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere*, 2018, 113(D9): D09109.
- [29] Krishnan P, Black T A, Jassal R S, Chen B Z, Nesic Z. Interannual variability of the carbon balance of three different-aged Douglas-fir stands in the Pacific Northwest. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2009, 114(G4): G04011.
- [30] 高艳妮, 于贵瑞, 张黎, 刘敏, 黄玫, 王秋凤. 中国陆地生态系统净初级生产力变化特征——基于过程模型和遥感模型的评估结果. *地理科学进展*, 2012, 31(1): 109-117.
- [31] Keenan T F, Baker I, Barr A, Ciais P, Davis K, Dietze M, Dragoni D, Gough C M, Grant R, Hollinger D, Hufkens K, Poulter B, Mccaughey H, Raczka B, Ryu Y, Schaefer K, Tian H Q, Verbeeck H, Zhao M S, Richardson A D. Terrestrial biosphere model performance for inter-annual variability of land-atmosphere CO₂ exchange. *Global Change Biology*, 2012, 18(6): 1971-1987.
- [32] Raczka B M, Davis K J, Huntzinger D, Neilson R P, Poulter B, Richardson A D, Xiao J, Baker I, Ciais P, Keenan T F, Law B, Post W M, Ricciuto D, Schaefer K, Tian H, Tomelleri E, Verbeeck H, Viovy N. Evaluation of continental carbon cycle simulations with North American flux tower observations. *Ecological Monographs*, 2013, 83(4): 531-556.
- [33] Yuan W P, Cai W W, Xia J Z, Chen J Q, Liu S G, Dong W J, Merbold L, Law B, Arain A, Beringer J, Bernhofer C, Black A, Blanken P D, Cescatti A, Chen Y, Francois L, Gianelle D, Janssens I A, Jung M, Kato T, Kiely G, Liu D, Marcolla B, Montagnani L, Raschi A, Rouspard O, Varlagin A, Wohlfahrt G. Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 192-193: 108-120.
- [34] 朱先进, 于贵瑞, 王秋凤, 高艳妮, 赵新全, 韩士杰, 闫俊华. 典型森林和草地生态系统呼吸各组分间的相互关系. *生态学报*, 2013, 33(21): 6925-6934.
- [35] Krinner G, Viovy N, de Noblet-Ducoudre N, Ogee J, Polcher J, Friedlingstein P, Ciais P, Sitch S, Prentice I C. A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(1): GB1015.
- [36] Huang M, Ji J J, Li K R, Liu Y F, Yang F T, Tao B. The ecosystem carbon accumulation after conversion of grasslands to pine plantations in subtropical red soil of South China. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2017, 59(3): 439-448.
- [37] Ryan M G. Growth and maintenance respiration in stems of *Pinus contorta* and *Picea engelmannii*. *Canadian Journal of Forest Research*, 1990, 20(1): 48-57.
- [38] Richardson A D, Dail D B, Hollinger D Y. Leaf area index uncertainty estimates for model-data fusion applications. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(9): 1287-1292.
- [39] Schaefer K, Schwalm C R, Williams C, Arain A, Barr A, Chen J M, Davis K J, Dimitrov D, Hilton T W, Hollinger D Y, Humphreys E, Poulter B, Raczka B M, Richardson A D, Sahoo A, Thornton P, Vargas R, Verbeeck H, Anderson R, Baker I, Black T A, Bolstad P, Chen J Q, Curtis P S, Desai A R, Dietze M, Dragoni D, Gough C, Grant R F, Gu L H, Jain A, Kucharik C, Law B, Liu S G, Lokupitiya E, Margolis H A, Matamala R, Mccaughey J H, Monson R, Munger J W, Oechel W, Peng C H, Price D T, Ricciuto D, Riley W J, Roulet N, Tian H Q, Tonitto C, Torn M, Weng E S, Zhou X L. A model-data comparison of gross primary productivity: results from the North American Carbon Program Site Synthesis. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2012, 117(G3): G03010.
- [40] Balzarolo M, Boussetta S, Balsamo G, Beljaars A, Maignan F, Calvet J C, Lafont S, Barbu A, Poulter B, Chevallier F, Szczypta C, Papale D. Evaluating the potential of large-scale simulations to predict carbon fluxes of terrestrial ecosystems over a European Eddy Covariance network. *Biogeosciences*, 2014, 11(10): 2661-2678.
- [41] Luyssaert S, Ciais P, Piao S L, Schulze E D, Jung M, Zaehle S, Schelhaas M J, Reichstein M, Churkina G, Papale D, Abril G, Beer C, Grace J, Loustau D, Matteucci G, Magnani F, Nabuurs G J, Verbeeck H, Sulkava M, van der Werf G R, Janssens I A. The European carbon balance. Part 3: forests. *Global Change Biology*, 2010, 16(5): 1429-1450.
- [42] 于贵瑞, 温学发, 李庆康, 张雷明, 任传友, 刘允芬, 关德新. 中国亚热带和温带典型森林生态系统呼吸的季节模式及环境响应特征. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(S2): 84-94.
- [43] Richardson A D, Hollinger D Y. A method to estimate the additional uncertainty in gap-filled NEE resulting from long gaps in the CO₂ flux record. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 147(3/4): 199-208.
- [44] Richardson A D, Mahecha M D, Falge E, Kattge J, Moffat A M, Papale D, Reichstein M, Stauch V J, Braswell B H, Churkina G, Kruijt B, Hollinger D Y. Statistical properties of random CO₂ flux measurement uncertainty inferred from model residuals. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(1): 38-50.