

植被光合呼吸模型在千烟洲亚热带常绿针叶林的优化及验证

刘 诚^{1*} 黄建平^{1**} 刁一伟¹ 温学发² 肖 薇¹ 张 弥¹ 李旭辉¹ 刘寿东¹

¹南京信息工程大学大气环境中心, 南京 210044; ²中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

摘 要 碳循环模型参数的确定和优化对生态系统净CO₂交换(*NEE*)的模型计算至关重要。该文利用2010–2012年ChinaFLUX千烟洲站点的通量观测资料, 对植被光合呼吸模型(VPRM)的参数进行了优化。通过比较两种不同的拟合方案, 发现利用传统光响应方程得到的参数不适用于VPRM, 而利用模型自身反演方案拟合得到的参数最大光量子效率(λ)达0.203, 大于C₃植物平均值, 但与其他相关研究结果吻合。采用VPRM模型反演方案优化得到的参数后, VPRM能较准确地模拟千烟洲站不同季节的*NEE*。其对全年半小时*NEE*模拟的平均误差为 $-0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 相关系数为0.72。模型可准确地模拟生长旺季*NEE*平均日变化, 但低估了非生长旺季白天吸收峰值约52%。通过个例分析发现, VPRM模型可以准确模拟晴天条件下*NEE*的时间变化, 但对阴雨天条件下*NEE*的模拟还存在较大的不确定性。该研究将有助于进一步改进CO₂通量及浓度的区域数值模拟。

关键词 生态系统净交换, 参数优化, 千烟洲, 植被光合呼吸模型

引用格式: 刘诚, 黄建平, 刁一伟, 温学发, 肖薇, 张弥, 李旭辉, 刘寿东 (2015). 植被光合呼吸模型在千烟洲亚热带常绿针叶林的优化及验证. 植物生态学报, 39, 388–397. doi: 10.17521/cjpe.2015.0038

Optimization and evaluation of vegetation photosynthesis and respiration model using the measurements collected from the forest site of subtropical coniferous-evergreen

LIU Cheng^{1*}, HUANG Jian-Ping^{1**}, DIAO Yi-Wei¹, WEN Xue-Fa², XIAO Wei¹, ZHANG Mi¹, LEE Xu-Hui¹, and LIU Shou-Dong¹

¹Yale-NUIST Center on Atmospheric Environment, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; and ²Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract

Aims Determination of carbon cycling model parameters is critical to simulate the net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*). The objectives of this study were to determine the parameters of vegetation photosynthesis and respiration model (VPRM) and improve the calculation of *NEE* to benefit regional modeling of CO₂.

Methods Two schemes are examined in optimization of the parameters in VPRM. Two years CO₂ flux and meteorological observational data in 2010–2011 at the Qianyanzhou (QYZ) eddy tower site are used to determine the parameters in VPRM and another full year flux observational data in 2012 are used to evaluate the model performance. Several statistics metrics are calculated to evaluate the model performance on *NEE* simulations.

Important findings The results indicate, traditional method with Michaelis-Menten equation is not suitable to determine the parameters of VPRM, whereas the method with parameters retrieved from the VPRM calculation equation provides much more reasonable results. The parameter of maximum light use efficiency (λ) is critical for the VPRM calculation of *NEE*. Our result is larger than the typical value of C₃ plant (1/6), but consistent with the other studies. Using the optimized parameters, VPRM is able to capture *NEE* variations for different seasons. The statistics calculation with one-year *NEE* simulation shows that, the mean bias is $-0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ and correlation coefficient is 0.72. Overall, the VPRM performs much better in growing season than the non-growing season when the peak value of *NEE* is underestimated by 52%. The VPRM simulated *NEE* shows better agreement with observations on sunny days than rainy or cloudy days.

Key words net ecosystems exchange (*NEE*), parameter optimization, Qianyanzhou, vegetation photosynthesis and respiration model

收稿日期Received: 2014-09-04 接受日期Accepted: 2015-01-10

* E-mail: chengliu6542@gmail.com

** 通讯作者Author for correspondence (E-mail: hjpfwj@gmail.com)

Citation: Liu C, Huang JP, Diao YW, Wen XF, Xiao W, Zhang M, Lee XH, Liu SD (2015). Optimization and evaluation of vegetation photosynthesis and respiration model using the measurements collected from the forest site of subtropical coniferous-evergreen. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 388–397. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0038

自工业革命以来, 大量化石燃料的燃烧导致大气中 CO_2 浓度不断上升。然而, 海洋及陆地的绿色植被通过光合作用对 CO_2 的吸收, 极大地减缓了大气中 CO_2 浓度的上升幅度(IPCC, 2007)。生态系统净 CO_2 交换(net ecosystem CO_2 exchange, *NEE*)是定量描述植被-大气之间 CO_2 交换的一个重要变量。由于影响因子众多, 确定*NEE*的主要控制因子并对其进行准确估算是陆地碳循环模型模拟研究的主要内容(Wofsy & Harriss, 2002; Mahadevan *et al.*, 2008)。而明确模型的驱动变量及参数的优化是模型准确模拟*NEE*的关键(Li & Wu, 2006; 张黎等, 2009)。

目前模拟碳循环的模型主要包括统计模型、过程模型及遥感模型等。统计模型相对简单, 气候因子易获取, 但生态生理机制不是很清楚, 且估算误差大。而过程模型过于复杂, 所需参数太多, 且难以获得(朱文泉等, 2005)。自Monteith (1972)提出净初级生产力(*NPP*)与植物吸收的光合有效辐射(*FAPAR*)线性相关理论以来, 随着遥感技术和产品的推广与应用, 基于卫星遥感数据的光能利用率(*LUE*)模型迅速发展起来。CASA (Carnegie-Ames-Stanford Approach; Potter *et al.*, 1993; Potter and Klooster, 1998)、CFix (Carbon Fix; Veroustraete *et al.*, 2002)、CFlux (Carbon Flux; Turner *et al.*, 2006; King *et al.*, 2011)、EC-LUE (Eddy Covariance-Light Use Efficiency; Yuan *et al.*, 2007, 2010)等均将*FAPAR*考虑为归一化植被指数(*NDVI*)的线性函数。然而, *NDVI*对大气条件、土壤背景及闭合冠层饱和等非常敏感(Huete *et al.*, 1997), 可能导致利用*NDVI*数据模拟总生态系统 CO_2 交换量(*GEE*)存在较大的不确定性。Xiao等(2004a, 2004b)发展了一个植被光合模型(VPM), 并利用*FAPAR*与增强型植被指数(*EVI*)的函数关系代替*NDVI*, 结果表明对*GEE*的模拟得到了较大的改进(Xiao *et al.*, 2004a, 2004b, 2005a, 2005b)。而Mahadevan等(2008)在VPM的基础上发展了植被光合呼吸模型(VPRM), 此模型考虑了*GEE*对光的非线性响应函数关系, 并添加了呼吸项, 可以直接计算*NEE*。VPRM具有两大特点: 一是需要的参数少, 二是输入变量如空气温度、光合有效辐射(*PAR*)、植被和水分指数等均可通过观测或由卫星反

演资料获取。这些优势使得VPRM在区域碳通量模拟等方面得到了广泛的应用(Mahadevan *et al.*, 2008; Hilton *et al.*, 2013)。此外, VPRM还被耦合到天气预报模式(WRF, Weather Research and Forecasting Model)中, 用于反演分析大气 CO_2 浓度的变化(Ahmadov *et al.*, 2007, 2009; Pilla *et al.*, 2011)。刁一伟等(2015)将WRF-VPRM耦合模式用于长江三角洲地区 CO_2 通量及浓度的模拟, 发现*NEE*的模拟偏差是导致 CO_2 浓度预报误差的主要原因之一。因此, 优化VPRM模型中的关键参数, 可改进*NEE*的模拟, 并为三维模式提供准确的生物 CO_2 源。

过去20多年, 涡度相关技术被广泛用于*NEE*观测(Goulden *et al.*, 1997; Hollinger *et al.*, 1999; Baldocchi *et al.*, 2001; Law *et al.*, 2002)。 CO_2 通量观测资料已被成功用于包括VPRM模型在内的各种陆地生态系统模型参数的优化。Mahadevan等(2008)利用北美地区22个不同植被类型站点的通量观测资料对VPRM的4个关键参数(最大光量子效率(λ), 光合作用到达半饱和值时对应的光合有效辐射(PAR_0), 呼吸参数(α 和 β))进行了优化, 参数优化后的VPRM较好地模拟了各站点的*NEE*时空变化。Hilton等(2013)利用北美65个通量站点观测资料对VPRM不同植被类型的参数进行了不同时间及空间尺度优化拟合, 提出了一组较为完整且适合于北美地区不同植被类型的模型参数(λ , PAR_0 , α , β)。而Yuan等(2013, 2014)将相关研究扩展到全球范围, 他们利用全球150个通量站点资料及VPRM中*GEE*计算公式反演得到一组与*GEE*有关的VPRM参数 λ , PAR_0 。这些研究表明, VPRM参数随各地的气候条件存在较大的变化。相对而言, 我国在这方面的研究还存在明显不足。

为此, 本研究将利用ChinaFLUX千烟洲通量站点(QYZ)的通量观测资料来对VPRM中的各关键参数进行优化处理, 并对模拟结果进行评估。旨在对参数化方法进行探讨, 提出一个适用可靠的参数化方案, 得到一组适合千烟洲亚热带常绿针叶林的VPRM参数, 并提高VPRM在千烟洲人工常绿针叶林及其同类型森林或区域的*NEE*的模拟能力, 为我国同类型森林或区域的*NEE*模拟提供参考, 并为进一步改善WRF-VPRM模拟区域大气 CO_2 浓度的时

空变化打下坚实基础。

1 VPRM简介

VPRM是一种基于LUE的陆地生态系统诊断模型。它是在VPM (Xiao *et al.*, 2004a, 2004b)的基础上发展而来(Mahadevan *et al.*, 2008)的。同VPM相比, VPRM增加了呼吸项(*R*)及其相关呼吸参数 α 和 β (在接近冻结温度时呼吸基础率), 以及用于反映 PAR 与光合作用关系的半饱和值参数 PAR_0 。VPRM的详细描述见Mahadevan等(2008)文献。本文仅对该模型做简单介绍。

如图1所示, 在VPRM中, NEE 的计算包括两部分: 由光照驱动计算的 GEE (式1第一项)和由温度驱动的生态系统呼吸项(R) (式1第二、三项)。其具体表达式如下,

$$NEE = -\lambda \times T_{scale} \times W_{scale} \times P_{scale} \times EVI \times \frac{1}{(1 + PAR/PAR_0)} \times PAR + \alpha \times T + \beta \quad (1)$$

式中, λ 和 PAR_0 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)分别代表最大光量子效率(或最大光能利用率)和光合作用到达半饱和值时对应的光合有效辐射。在最适温度、无水分胁迫下的 C_3 植物 λ 值约为1/6 (Mahadevan *et al.*, 2008)。 PAR ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)代表光合有效辐射, EVI 为增强型植被指数, 可用来表征植被吸收的光合有效辐射与光合有效辐射的比例($EAPAR_{PAV}$)(Xiao *et al.*, 2004a, 2004b)。 T_{scale} 、 W_{scale} 和 P_{scale} 分别表示温度、水分胁迫和叶面性

状对光合作用的影响函数, 其计算公式如下:

$$T_{scale} = \frac{(T - T_{min})(T - T_{max})}{[(T - T_{min})(T - T_{max}) - (T - T_{opt})^2]} \quad (2)$$

$$W_{scale} = \frac{1 + LSWI}{1 + LSWI_{max}} \quad (3)$$

$$P_{scale} = \frac{1 + LSWI}{2} \quad (4)$$

式中, T 代表气温($^{\circ}\text{C}$), T_{min} 、 T_{max} 和 T_{opt} 分别代表光合作用的最小、最大和最适温度。当空气温度低于 T_{min} 时, T_{scale} 取值为0 (Xiao *et al.*, 2004a, 2004b)。我们将千烟洲站2010–2011年生长旺季(4–9月)的温度每隔 3°C 分组, 并分别计算各温度段的平均温度和 GEE , 通过分析它们间的关系, 得出最适温度 T_{opt} 为 30°C , 与刘允芬等(2006)的研究相同。此外, 本研究将 T_{min} 和 T_{max} 分别设为0和 40°C 。 $LSWI$ 为地表水分指数, $LSWI_{max}$ 是每个站点(或模式格点)生长季内最大的 $LSWI$ 值。 T_{scale} 、 W_{scale} 和 P_{scale} 的取值范围为0.0–1.0。由于千烟洲站点大部分为马尾松(*Pinus massoniana*)、湿地松(*P. elliotii*)和杉木(*Cunninghamia lanceolata*)等常绿松树林(刘允芬等, 2006), 因此在模拟中, P_{scale} 设为1。(1)式等号右边第二、三项代表呼吸过程对 NEE 的贡献。与其他模型相比, VPRM将呼吸作用简化为温度的线性函数。其中 α ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 β ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)可根据观测资料进行优化调整。

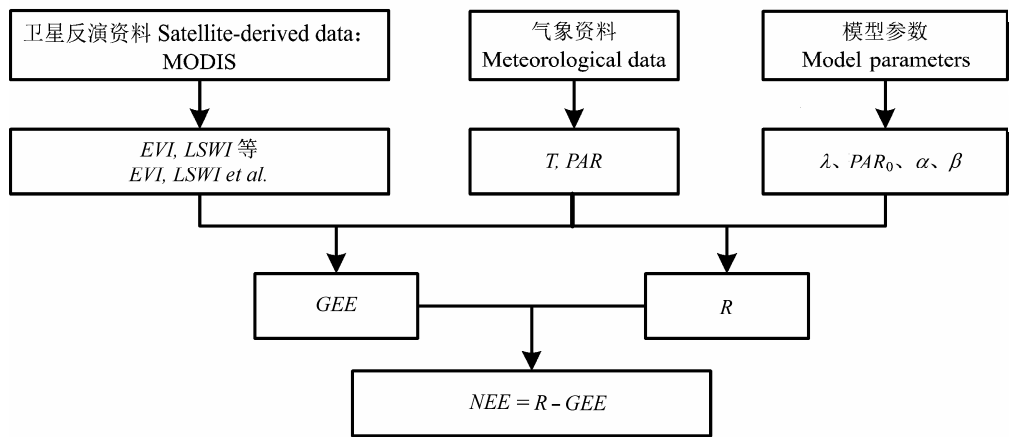


图1 VPRM模型结构示意图。EVI, 增强型植被指数; GEE, 总生态系统CO₂交换; LSWI, 地表水分指数; NEE, 净生态系统CO₂交换; PAR, 光合有效辐射; R, 生态系统呼吸; T, 温度。
Fig. 1 Schematic diagram of the vegetation photosynthesis respiration model (VPRM). EVI, enhanced vegetation index; GEE, gross ecosystem CO₂ exchange; LSWI, land surface water index; NEE, net ecosystem CO₂ exchange; PAR, photosynthetically active radiation; R, respiration; T, temperature.

2 资料来源和方法介绍

2.1 资料来源

千烟洲站(26.73° N, 115.05° E)位于江西省泰和县,是中国生态系统研究网络的常规观测站。风速和温度脉动采用三维超声风速仪(Model CSAT-3, Campbell Scientific, Logan, USA)测定。CO₂/H₂O密度脉动观测用红外线CO₂/H₂O气体分析仪(LI-7500, LI-COR, Lincoln, USA)。仪器安装在通量塔39.6 m高度处,约为冠层高度的3倍。数据为连续采样,采样频率为10 Hz,同时存储10 Hz原始数据及30 min的平均CO₂通量值。同步观测的常规气象要素包括辐射、温度、湿度、降水等。通量塔附近1 km²范围内森林覆盖高达90%,主要树种有马尾松、湿地松和杉木等,平均树高为12 m,树龄为20年左右,属亚热带常绿针叶林。站点详细描述参考中国生态系统研究网络(<http://www.chinaflux.org>)、刘允芬等(2006)及米娜等(2007)文献。

EVI、*LSWI*等指数由MODIS卫星反演数据所得。我们采用的是美国国家航空航天局Terra卫星搭载的MODIS传感器上的8 d平均陆地表面反照率产品MOD09A1,其空间分辨率为500 m。蓝(459–479 nm)、红(620–670 nm)、近红外(841–875 nm)和短波红外(1 628–1 652 nm) 4个波段的数据用于植被指数的计算。植被指数可通过以下公式(Huete *et al.*, 1997; Xiao *et al.*, 2002)计算:

$$EVI = G \times \frac{(\rho_{nir} - \rho_{red})}{\rho_{nir} + (C_1 \times \rho_{red} - C_2 \times \rho_{blue}) + L} \quad (5)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (6)$$

其中 $G = 2.5$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7.5$, $L = 1$ 。 ρ 代表相应波段的地表反照率,下标nir、red、blue和swir分别代表近红外(841–876 nm)、红(620–670 nm)、蓝(459–479 nm)和短波红外波段(1 628–1 652 nm)。

2.2 资料预处理和参数优化

参照ChinaFLUX通量数据后处理方法(<http://www.chinaflux.org>)以及Falge等(2001)和Zhang等(2006)的方法对2010–2012年千烟洲站的 NEE 数据进行一系列预处理,具体包括密度校正、坐标轴旋转、储存项计算、摩擦风速的筛选及缺测数据的插补。其中2010–2011年的资料用于VPRM参数优化处理,2012年的资料用于VPRM模拟结果验证,为避

免可能的误差,优化时均使用经过摩擦风速筛选、未插补的数据。采用两种不同的参数化方案,即传统的Michaelis-Menten光响应方程(Falge *et al.*, 2001)和VPRM计算 GEE 公式进行反演(式(1)中右边第一项)(Mahadevan *et al.*, 2008)。两种优化过程均用1stOpt软件(7D-Soft High Technology Inc.)完成。由于千烟洲植被属常绿林,因此两种方案均利用全年的资料进行优化拟合。

方案一: 由于夜间没有光合作用,因此夜间的 NEE 数据表示生态系统呼吸,首先,利用全年夜间 NEE 观测值通过线性拟合得到 α 和 β 。接着利用 α 和 β 计算白天的生态系统呼吸 R ,由 NEE 减去 R 得到 GEE 。然后利用Michaelis-Menten光响应方程(Falge *et al.*, 2001)拟合得到 λ 和 PAR_0 ,注意此式中, PAR_0 为 GEE_{max}/λ , GEE_{max} 为光饱和时最大的光合速率。

$$GEE = \lambda \times PAR \times \frac{GEE_{max}}{\lambda \times PAR + GEE_{max}} \quad (7)$$

方案二: 与方案一类似,先利用全年夜间 NEE 观测值通过线性拟合得到参数 α 和 β 。接着算出白天生态系统呼吸,进而得到 GEE 。再利用VPRM中的 GEE 公式(即式(1)中的等号右边第一项),拟合得到 λ 和 PAR_0 ,注意优化过程中 T_{scale} 、 W_{scale} 、 P_{scale} 需根据实际条件进行相应的调整后连同 EVI 代入公式优化。

3 结果和分析

3.1 VPRM参数优化

利用千烟洲站2010–2011年的观测资料对常绿林的VPRM参数进行优化,结果如表1所示。可以发现,两种方案得出的 λ 、 PAR_0 差别很大。其中利用方案一得到的 λ 值为0.048,而由方案二得到的 λ 值为0.203,两者相差4.2倍。同时,利用方案一拟合得到的 PAR_0 为514 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,是方案二拟合值的1.49倍。在VPRM中呼吸作用被简化为温度的线性函数,两种方法拟合得到的呼吸参数 α 和 β 分别为0.164

表1 采用2010–2011年千烟洲观测资料两种不同方案得到的参数对比
Table 1 A comparison of the parameters derived from two schemes at Qianyanzhou site

方案 Scheme	λ	PAR_0 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	α (μmol $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	β (μmol $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	0.048	514	0.164	0.906
2	0.203	345	0.164	0.906

λ , 最大光量子效率; PAR_0 , 光合作用到达半饱和值时对应的光合有效辐射; α 和 β , 光合呼吸参数。

λ , maximum quantum efficiency; PAR_0 , half saturation value of photosynthesis; α and β , respiration parameters.

$\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ 和 $0.906 \mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。导致拟合结果存在较大的差异主要与两个方案所使用的方程有关。其中, 方案一是采用传统光响应方程, 只考虑了光的响应, 而方案二考虑了光、温度、水分等多个环境因子的影响。从理论上来说, 方案二拟合结果更能反映其中的复杂关系。

3.2 VPRM模拟结果分析

3.2.1 全年NEE模拟与观测对比

将两种方案得到的参数代入VPRM模型, 对2012年千烟洲亚热带人工针叶林全年0.5 h的NEE进行模拟。与实测值对比可以看出, 采用方案二优化参数VPRM模拟的NEE相比方案一优化参数模拟的NEE值与观测更为吻合(图2)。而采用方案一参数后, VPRM模拟值明显低估白天NEE的值。由方案二优化参数得到的VPRM模拟值与观测值间的斜率达到0.73, 平均误差为 $-0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 结果明显优于方案一(斜率为0.17, 平均误差达 $6.68 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (表2)。这表明, 传统光响应方程并不适合VPRM参数的拟合。因此, 本文后面只讨论由方案二拟合参数所对应的VPRM模拟结果及与观测值的对比。

3.2.2 不同生长季NEE模拟与观测对比

为进一步评价模型在不同生长季的表现, 分别

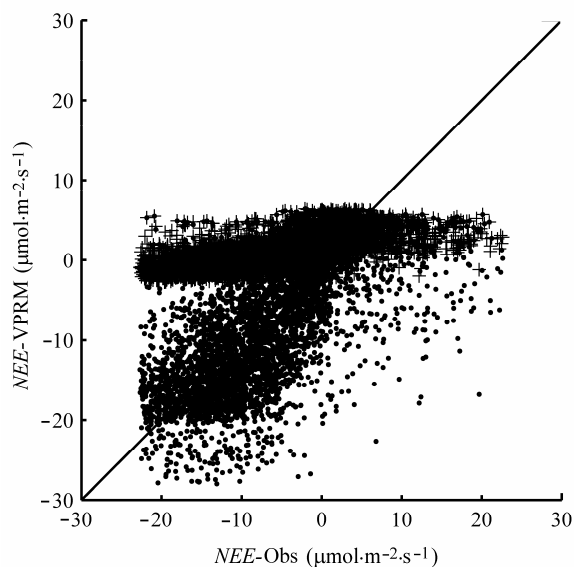


图2 千烟洲2012年全年VPRM模拟的生态系统净CO₂交换(NEE-VPRM)与观测值(NEE-Obs)的对比。+, 方案一参数模拟的NEE; •, 方案二参数模拟的NEE; 黑色实线代表1:1线。
Fig. 2 A comparison of VPRM-simulated net ecosystem CO₂ exchange (NEE-VPRM) with observed NEE (NEE-Obs) for year 2012 at Qianyanzhou site. +, simulated NEE with optimized parameters of scheme 1; •, simulated NEE with optimized parameters of scheme 2; Solid black line, 1:1 line.

对生长旺季(4–9月)与非生长旺季(10月到次年3月)的模拟与实测值进行了比较。首先需对观测数据进行筛选, 以每天有效数据大于60% (即大于29个有效数据)为标准, 对符合条件的各天观测值和相应的模拟值做相同时段平均, 从而得出生长旺季4–9月NEE平均的日变化动态。图3给出了2012年4–9月千烟洲生长旺季期间的NEE平均日变化模拟与观测的比较。从图3可以看出, 方案二参数优化后的VPRM能很好地模拟NEE“单峰”型的日变化。正午前后, NEE峰值达到最大, 观测值平均为 $-14.66 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 参数优化后, VPRM模拟的NEE峰值为 $-13.71 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 与观测值较为一致, 但稍有低估。参数优化得到的VPRM模拟的NEE平均误差为 $0.87 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 均方根误差为 $1.72 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (表2)。另外, 采用优化参数后, VPRM模型对夜间NEE的模拟仍存在一定的偏差。这可能是因为VPRM将呼吸过程简化为温度的线性函数, 而实际中生态系统呼吸过程同时受到生物和非生物过程的控制, 其关系较为复杂(张东秋等, 2005)。

我们进一步给出了VPRM模拟的2012年生长旺季(4–9月)NEE与观测值之间的回归分析图(图4)。可

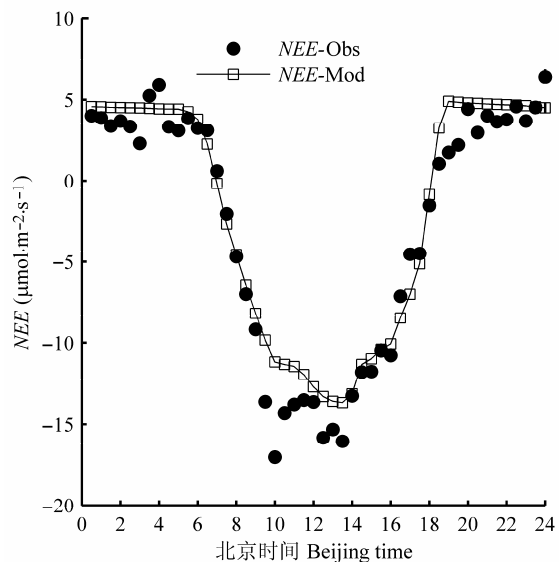


图3 千烟洲2012年生长旺季(4–9月)模拟的生态系统净CO₂交换(NEE)与观测值的平均日变化。NEE-Obs, NEE观测值; NEE-Mod, 方案二得到的VPRM模拟NEE。

Fig. 3 A comparison between the observed and modeled mean diurnal variation of net ecosystem CO₂ exchange (NEE) during the peak growing season (April to September) of 2012 at Qianyanzhou site. NEE-Obs, observed NEE; NEE-Mod, simulated NEE with optimized parameters of scheme 2.

表2 VPRM模拟生态系统净CO₂交换(*NEE*)与观测值之间统计分析Table 2 Statistical analysis between simulated net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*) and observed *NEE*

2012年 Year 2012		斜率 Slope	截距 Intercept ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	<i>R</i> 平方值 <i>R</i> square	均方根误差 Root mean squared error ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均误差 Mean bias ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	有效数据 Valid data
方案一 Scheme 1	全年0.5 h <i>NEE</i> All year 0.5 h <i>NEE</i>	0.17	2.44	0.51	9.58	6.68	5 909
	生长旺季时刻平均 Mean diurnal variation during the peak growing season	0.27	3.49	0.97	8.01	5.63	48
	非生长旺季时刻平均 Mean diurnal variation during the non-peak growing season	0.06	1.78	0.61	4.12	2.24	48
方案二 Scheme 2	全年0.5 h <i>NEE</i> All year 0.5 h <i>NEE</i>	0.73	-2.23	0.52	6.23	-0.86	5 909
	生长旺季时刻平均 Mean diurnal variation during the peak growing season	0.92	0.65	0.96	1.72	0.87	48
	非生长旺季时刻平均 Mean diurnal variation during the non-peak growing season	0.50	0.66	0.89	2.15	0.91	48

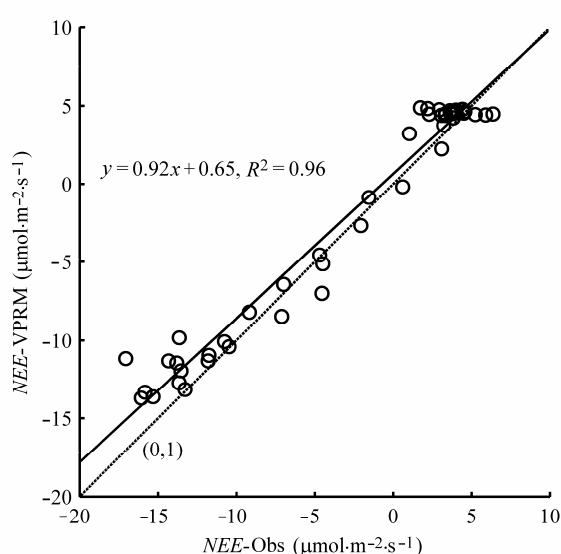


图4 干烟洲2012年生长旺季(4-9月)生态系统净CO₂交换的VPRM模拟值(*NEE*-VPRM)与观测值(*NEE*-Obs)的平均日变化回归分析。黑色圆圈代表方案二得到的VPRM模型模拟*NEE*; 虚线为1:1线。

Fig. 4 Regression analyses between the VPRM modeled net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*-VPRM) and observed *NEE* (*NEE*-Obs) during growing season (April to September) in year 2012 at Qianyanzhou site. Black circle: simulated *NEE* with optimized parameters of scheme 2; dotted line: 1:1 line.

以看到, 参数优化后, VPRM模拟的结果相比观测值基本位于1:1线附近。模型模拟*NEE*与观测值间的回归拟合方程为 $y = 0.92x + 0.65$, 其斜率已趋近于1, 相关系数达0.96, 表明参数优化后VPRM能较好地模拟*NEE*的日变化。表2给出了对*NEE*模拟的详细定量评估结果。

接着, 我们评估了VPRM在非生长旺季(10月到次年3月)的表现。图5为非生长旺季VPRM模拟及观测的*NEE*平均日变化动态。可以看出, 非生长旺季*NEE*中午前后的峰值比生长旺季小, 如观测的平均

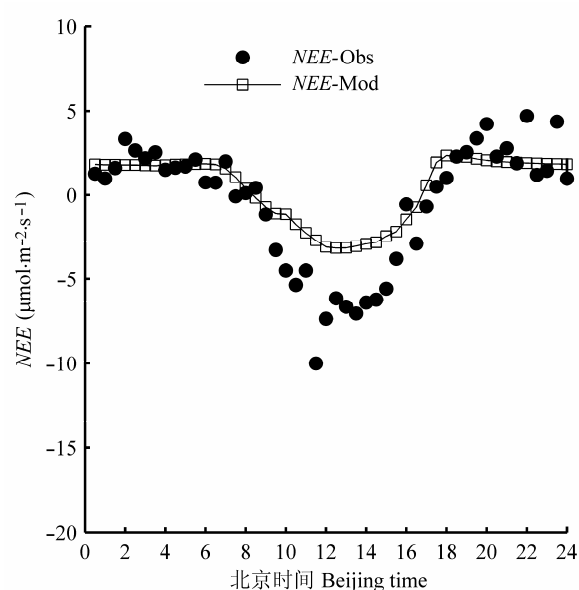


图5 干烟洲2012年非生长旺季模拟的生态系统净CO₂交换(*NEE*)与观测值的平均日变化。*NEE*-Obs, *NEE*观测值; *NEE*-Mod, 方案二得到的VPRM模拟*NEE*。

Fig. 5 A comparison between the observed and modeled mean diurnal variation of net ecosystem CO₂ exchange (*NEE*) during the non-peak growing season of 2012 at Qianyanzhou site. *NEE*-Obs, observed *NEE*; *NEE*-Mod, simulated *NEE* with optimized parameters of scheme 2.

峰值为 $-6.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 仅为生长旺季峰值的一半。而VPRM模拟的峰值为 $-3.1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 相比观测值低估了约52%。同样, 非生长旺季夜间呼吸值(平均为 $2.09 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)也明显低于生长旺季呼吸值(平均为 $3.92 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)。VPRM模拟的夜间呼吸值平均为 $1.91 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 与观测值较为接近。统计结果显示(表2), VPRM模拟非生长旺季的*NEE*的平均误差为 $0.91 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 均方根误差为 $2.15 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 即VPRM对非生长旺季的*NEE*模拟仍存在一定的低估。

3.2.3 天气条件的影响

不同天气条件如晴天和阴天, 云对到达地表的太阳辐射有着重要影响。因此有必要讨论模型在不同天气条件下对 NEE 的模拟效果。图6和图7分别为2012年7月3–9日(即DOY184–190)和6月1–7日(即DOY152–158) VPRM模拟和观测的 NEE 时间变化序列。其中DOY184–190代表晴天天气, 而DOY152–158代表阴雨天气。

如图6A所示, 2012年7月3–9日, NEE 日变化都非常一致, 白天 NEE 实测值的峰值为 $-16.06 - -20.88 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 参数优化后VPRM模拟的 NEE 峰值为 $-18.18 - -19.16 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (平均为 $-18.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 与观测值非常接近。同晴天相比, 阴雨天观测的 NEE (图7A)起伏变化大(如图中锯齿状所示), 且峰值出现时间不一致, 这主要是由于云对到达地面的太阳辐射的影响。表明阴雨天VPRM的模拟还需进一步改进。

为进一步理解VPRM在不同天气条件下对 NEE

的模拟能力, 我们分别讨论了 GEE 和 R 的模拟。图6B和图7B分别给出了晴天和阴雨天VPRM模拟的 GEE 和 R 的变化。如图6B所示, 晴天 GEE 峰值(约为 $-25 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)和 R (约为 $5.9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)的变化相对稳定, NEE 主要受 GEE 控制。即VPRM对 NEE 的模拟准确性与光合参数 λ 和 PAR_0 有着密切的关系。另外值得注意的是, 呼吸峰值出现的时间比 GEE 峰值出现的时间晚1–2 h。这是因为呼吸受温度控制而 GEE 与 PAR 密切相关。由于近地层最高气温一般出现在14:00, 而 PAR 峰值出现在正午前后。

与晴天相比, 阴雨天 GEE 与 R 变化起伏较大(图7B)。 GEE 最大峰值出现在DOY 158, 当天的最大 PAR 达到 $1\,649 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 而 GEE 最小峰值出现在DOY 152, 其最大 PAR 仅为 $304 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由于云的遮挡, PAR 变化较大, 导致阴雨多云天 GEE 的变化呈“锯齿状”。因此, 阴雨天模拟 NEE 的不确定性更大。另外, 由于讨论的阴雨天个例出现在6月初, 其温度比晴天个例(7月)稍低, 其生态系统呼吸小于

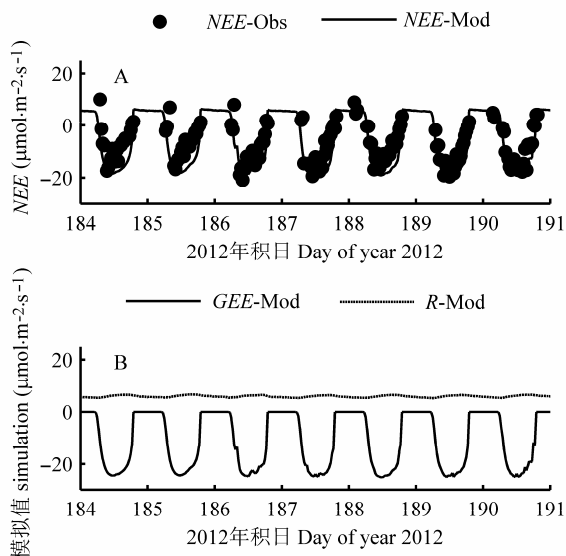


图6 千烟洲2012年DOY184–190 (晴天)的生态系统净 CO_2 交换(NEE)模拟值与观测值对比。 NEE -Obs, NEE 观测值; NEE -Mod, 方案二得到的VPRM模拟 NEE ; GEE -Mod, 方案二得到的VPRM模拟总生态系统 CO_2 交换量; R -Mod, 方案二得到的VPRM模拟生态系统呼吸。

Fig. 6 A comparison of simulated net ecosystem CO_2 exchange (NEE) with observations at Qianyanzhou site during the day 184–190 of 2012 (sunny). NEE -Obs, observed NEE ; NEE -Mod, simulated NEE with optimized parameters of scheme 2; GEE -Mod, simulated gross ecosystem CO_2 exchange with optimized parameters of scheme 2; R -Mod, simulated respiration with optimized parameters of scheme 2.

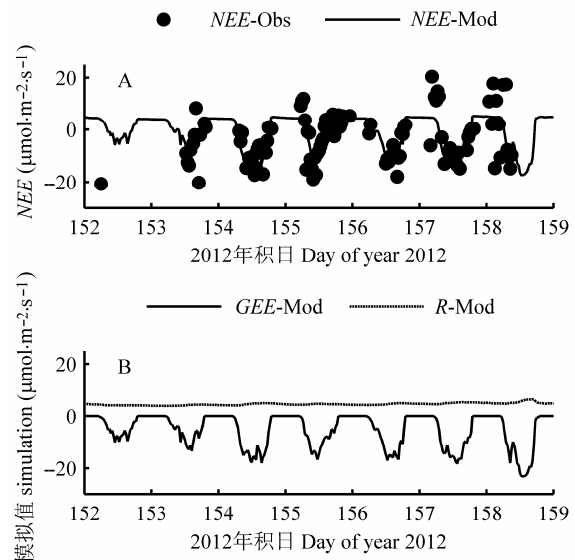


图7 千烟洲2012年DOY152–158 (阴天)的生态系统净 CO_2 交换(NEE)模拟值与观测值对比。 NEE -Obs, NEE 观测值; NEE -Mod, 方案二得到的VPRM模拟 NEE ; GEE -Mod, 方案二得到的VPRM模拟总生态系统 CO_2 交换量; R -Mod, 方案二得到的VPRM模拟生态系统呼吸。

Fig. 7 A comparison of simulated net ecosystem CO_2 exchange (NEE) with observations at Qianyanzhou site during the day 152–158 of 2012 (cloudy). NEE -Obs, observed NEE ; NEE -Mod, simulated NEE with optimized parameters of scheme 2; GEE -Mod, simulated gross ecosystem CO_2 exchange with optimized parameters of scheme 2; R -Mod, simulated respiration with optimized parameters of scheme 2.

7月。尽管如此, 模型仍能对这些过程进行较为准确的模拟。综上所述, 通过对模型参数(λ 、 PAR_0 、 α 及 β)的优化调整, VPRM较好地模拟了千烟洲站在不同天气条件下 NEE 的变化。

4 讨论

最大光能利用率 λ 是估计 GEE 的关键因子, 一直以来它的大小存在争议。Mahadevan等(2008)认为, 对 C_3 植物而言, 其平均值为1/6。本研究利用千烟洲2010–2011年两年的通量观测资料, 采用方案二(VPRM)反演得到亚热带常绿针叶林VPRM参数 λ 值为0.203, 高于 C_3 植物的平均 λ 值20%, 说明当其他条件相同时, 亚热带常绿针叶林有更高的光能利用率。这意味着人工种植常绿针叶林有利于减缓大气中 CO_2 浓度的快速升高。其具体影响有待下一步利用三维温室气体模式进一步验证。同时我们比较了其他类似研究得到的 λ 值, 如Mahadevan等(2008)采用相同参数化方案(方案二)得到的北美亚热带常绿林DONALDSON站点(Clark *et al.*, 2004)的 λ 值为0.114。而Yuan等(2013)得到VPRM模型常绿林的 λ 值为0.27, 比我们得到的 λ 更大。Hilton等(2013)得到的常绿林的平均 λ 值为0.2, 与本研究基本一致。说明本研究得到的 λ 值处于合理范围内, 同时由于站点局地环境因子(如温度、水分等)的影响, 又存在一定的差异。

经过参数优化后, VPRM对 NEE 及其日变化能够较好地模拟, 但模拟值与观测值之间仍存在一些误差, 如对非生长旺季及夜间呼吸的模拟等。误差来源主要包括: 一是模型自身结构的不足。在VPRM中, 将呼吸过程简化为温度的线性函数, 而实际上, 生态系统呼吸过程受生物和非生物过程等多种因素的影响(张东秋等, 2005)。生物过程不仅是植物本身, 还包括土壤不同生命体的呼吸和新陈代谢; 非生物过程则包括温度、土壤水分含量, 凋落物等。目前这些因子并未考虑到VPRM中, 未来应该采用更为合适的函数来描述呼吸项与温度和其他因子之间的关系。二是通量观测数据处理方法的不完善。如何准确地将白天 NEE 拆分成 GEE 和 R , 在通量研究领域仍存在一定的争议(Falge *et al.*, 2001)。三是由卫星反演得到的植被指数的影响(Hansen *et al.*, 2003)。卫星数据本身具有一定的噪声, 如云的遮挡及较低的精度等, 这些会导致物候期的差异。

最后需指出的是, 本研究只采用千烟洲一个站点的观测资料。当有其他类似植被类型站点的观测资料时, 现有结果有待进一步验证和完善。尽管如此, 我们仍希望将本研究的结果应用到中国其他植被类型进行交叉优化, 以便进一步完善VPRM, 从而可以准确地模拟中国区域 CO_2 通量的时空分布, 进而为三维模式(如WRF-VPRM等)提供准确的生物 CO_2 源估计, 这对理解和预测由人为因素导致的大气 CO_2 浓度的增加具有重要意义。

5 结论

本文利用中国通量网千烟洲站2010–2011年通量观测资料对植被光合呼吸模型(VPRM)所需参数(λ 、 PAR_0 、 α 、 β)进行优化, 并利用2012年观测资料对其模拟结果进行评估。在拟合过程中, 比较了两种参数拟合方案, 即传统的光响应方程(方案一)和VPRM计算方程(方案二)。利用优化后的参数, VPRM模拟了全年、生长旺季和非生长旺季的 NEE , 并分析了VPRM对不同天气条件下 NEE 的模拟, 得出以下结论:

(1)传统光响应方程(方案一)拟合得到的光能利用率参数并不适用于VPRM模型。而方案二得到的参数更为合理。

(2)采用优化后的参数, VPRM能较为准确地模拟全年的 NEE 变化。对全年0.5 h NEE 模拟的平均误差为 $-0.86 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 相关系数为0.72。在生长旺季, 模型能够较好地模拟 NEE 平均日变化。但在非生长旺季, VPRM低估白天吸收峰值约52%。

(3)通过晴天及阴天个例分析, 发现VPRM能准确模拟不同天气条件下 NEE 的时间变化, 但阴雨天 NEE 的模拟存在一定的不确定性。

基金项目 国家自然科学基金(31100359和31200377)、教育部“长江学者与创新团队发展计划”(PCSIRT)和江苏省高校优势学科建设工程项目(PAPD)。

致谢 感谢中国生态系统研究网络千烟洲站点提供的数据, 感谢德国马普研究所Christoph Gerbig教授及爱荷华大学的Aditsuda Jamroensan博士对参数优化方面给予的帮助。

参考文献

Ahmadov R, Gerbig C, Kretschmer R, Koerner S, Neininger B, Dolman AJ, Sarra C (2007). Mesoscale covariance of

- transport and CO₂ fluxes: Evidence from observations and simulations using the WRF-VPRM coupled atmosphere-biosphere model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 112(D22), doi: 10.1029/2007JD008552.
- Ahmadv R, Gerbig C, Kretschmer R, Körner S, Rödenbeck C, Bousquet P, Ramonet M (2009). Comparing high resolution WRF-VPRM simulations and two global CO₂ transport models with coastal tower measurements of CO₂. *Biogeosciences*, 6, 807–817.
- Baldocchi D, Falge E, Gu LH, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Evans R, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, Paw KT, Pilegaard K, Schmid HP, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2001). Fluxnet: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 2415–2434.
- Clark KL, Gholz HL, Castro MS (2004). Carbon dynamics along a chronosequence of slash pine plantations in north Florida. *Ecological Applications*, 14, 1154–1171.
- Diao YW, Huang JP, Liu C, Cui J, Liu SD (2015). A modeling study of CO₂ flux and concentrations over Yangtze River Delta with the WRF-GHG model. *Chinese Journal of Atmosphere Sciences*. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14127. (in Chinese with English abstract) [刁一伟, 黄建平, 刘诚, 崔健, 刘寿东 (2015). 长三角地区净生态系统碳通量及大气二氧化碳浓度的数值模拟. *大气科学*, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1409.14127.]
- Falge E, Baldocchi D, Olson R, Anthoni P, Aubinet M, Bernhofer C, Burba G, Ceulemans R, Clement R, Dolman H, Granier A, Gross P, Grünwald T, Hollinger D, Jensen NO, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Lai CT, Law B, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger JW, Pilegaard K, Rannik Ü, Rebmann C, Suyker A, Tenhunen J, Tu K, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2001). Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 71–77.
- Goulden ML, Daube BC, Fan SM, Sutton DJ, Bazzaz A, Munger JW, Wofsy SC (1997). Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 102(D24), 28987–28996.
- Hansen MC, DeFries RS, Townshend JRG, Carroll M, Dimiceli C, Sohlberg RA (2003). Global percent tree cover at a spatial resolution of 500 meters: First results of the MODIS vegetation continuous fields algorithm. *Earth Interactions*, 7(10), 1–15.
- Hilton TW, Davis KJ, Keller K, Urban NM (2013). Improving North American terrestrial CO₂ flux diagnosis using spatial structure in land surface model residuals. *Biogeosciences*, 10, 4607–4625.
- Hollinger DY, Goltz SM, Davidson EA, Lee JT, Tu K, Valentine HT (1999). Seasonal patterns and environmental control of carbon dioxide and water vapour exchange in an ecotonal boreal forest. *Global Change Biology*, 5, 891–902.
- Huete AR, Liu HQ, Batchily K, Van Leeuwen W (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440–451.
- IPCC (2007). Climate change 2007: The physical science basis. In: *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- King DA, Turner DP, Ritts WD (2011). Parameterization of a diagnostic carbon cycle model for continental scale application. *Remote Sensing of Environment*, 115, 1653–1664.
- Law BE, Falge E, Gu L, Baldocchi DD, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman AJ, Falk M, Fuentes JD, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens IA, Jarvis P, Jensen NO, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Meyers T, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw UKT, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wofsy S (2002). Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 97–120.
- Li HG, Wu J (2006). Uncertainty analysis in ecological studies: An overview. In: Wu J, Jones KB, Li H, Loucks OL eds. *Scaling and Uncertainty Analysis in Ecology: Methods and Applications*. Springer, Dordrecht, The Netherlands. 45–66.
- Liu YF, Yu GR, Wen XF, Wang YH, Song X, Li J, Sun XM, Yang FT, Chen YR, Liu QJ (2006). Seasonal dynamics of CO₂ fluxes from subtropical plantation coniferous ecosystem. *Science in China Series D: Earth Science*, 49, 99–109. [刘允芬, 于贵瑞, 温学发, 王迎红, 宋霞, 李菊, 孙晓敏, 杨风亭, 陈永瑞, 刘琪璟 (2006). 千烟洲中亚热带人工林生态系统CO₂通量的季节变异特征. *中国科学D辑: 地球科学*, 36, 91–102.]
- Mahadevan P, Wofsy SC, Matross DM, Xiao XM, Dunn AL, Lin JC, Gerbig C, Munger JW, Chow VY, Gottlieb EW (2008). A satellite-based biosphere parameterization for net ecosystem CO₂ exchange: Vegetation Photosynthesis and Respiration Model (VPRM). *Global Biogeochemical Cycles*, 22, GB2005, doi: 10.1029/2006GB002735.
- Mi N, Yu GR, Wang PX, Wen XF, Sun XM, Zhang LM, Song X, Wang SS (2007). Modeling seasonal variation of CO₂ flux in a subtropical coniferous forest using the EALCO model. *Journal of Plant Ecology (in Chinese)*, 31, 1119–1131. (in Chinese with English abstract) [米娜, 于贵瑞, 王盘兴, 温学发, 孙晓敏, 张雷明, 宋霞, 王树森 (2007). 基于EALCO模型对中亚热带人工针叶林CO₂通量季节变异的模拟. *植物生态学报*, 31, 1119–1131.]

- Monteith JL (1972). Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747–766.
- Pillai D, Gerbig C, Ahmadov R, Rödenbeck C, Kretschmer R, Koch T, Thompson R, Neininger B, Lavrié JV (2011). High-resolution simulations of atmospheric CO₂ over complex terrain-representing the Ochsenkopf mountain tall tower. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 7445–7464.
- Potter CS, Klooster SA (1998). Interannual variability in soil trace gas (CO₂, N₂O, NO) fluxes and analysis of controllers on regional to global scales. *Global Biogeochemical Cycles*, 12, 621–635.
- Potter CS, Randerson JT, Field CB, Matson PA, Vitousek PM, Mooney HA, Klooster SA (1993). Terrestrial ecosystem production: a process model based on global satellite and surface data. *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 811–841.
- Turner DP, Ritts WD, Styles JM, Yang Z, Cohen WB, Law BE, Thornton PE (2006). A diagnostic carbon flux model to monitor the effects of disturbance and interannual variation in climate on regional NEP. *Tellus B*, 58, 476–490.
- Veroustraete F, Sabbe H, Eerens H (2002). Estimation of carbon mass fluxes over Europe using the C-Fix model and Euroflux data. *Remote Sensing of Environment*, 83, 376–399.
- Wofsy SC, Harriss RC (2002). The North American Carbon Program (NACP). Report of the NACP Committee of the US Interagency Carbon Cycle Science Program. US Global Change Research Program, Washington, DC.
- Xiao XM, Boles S, Liu JY, Zhang DF, Liu ML (2002). Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 335–348.
- Xiao XM, Hollinger D, Aber J, Goltz M, Davidson EA, Zhang QY, Moore B (2004b). Satellite-based modeling of gross primary production in an evergreen needleleaf forest. *Remote Sensing of Environment*, 89, 519–534.
- Xiao XM, Zhang QY, Braswell B, Urbanski S, Boles S, Wofsy S, Moore B, Ojima D (2004a). Modeling gross primary production of temperate deciduous broadleaf forest using satellite images and climate data. *Remote Sensing of Environment*, 91, 256–270.
- Xiao XM, Zhang QY, Hollinger D, Aber J, Moore B (2005a). Modeling gross primary production of an evergreen needleleaf forest using MODIS and climate data. *Ecological Applications*, 15, 954–969.
- Xiao XM, Zhang QY, Saleska S, Hutrya L, de Camargo P, Wofsy S, Frolking S, Boles S, Keller M, Moore B (2005b). Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest. *Remote Sensing of Environment*, 94, 105–122.
- Yuan W, Liu S, Cai W, Dong W, Chen J, Arain A, Blanken PD, Cescatti A, Wohlfahrt G, Georgiadis T, Genesio L, Gianelle D, Grelle A, Kiely G, Knohl A, Liu D, Marek M, Merbold L, Montagnani L, Panferov O, Peltoniemi M, Rambal S, Raschi A, Varlagin A, Xia J (2013). Are vegetation-specific model parameters required for estimating gross primary production? *Geoscientific Model Development Discussions*, 6, 5475–5488.
- Yuan WP, Cai WW, Xia JZ, Liu SG, Dong WJ, Merbold L, Law B, Arain A, Beringer J, Bernhofer C, Black A, Blanken PD, Cescatti A, Chen Y, Francois L, Gianelle D, Janssens IA, Jung M, Kato T, Kiely G, Liu D, Marcolla B, Montagnani L, Raschi A, Rouspard O, Varlagin A, Wohlfahrt G (2014). Global comparison of light use efficiency models for simulating terrestrial vegetation gross primary production based on the LaThuile database. *Agricultural and Forest Meteorology*, 192–193, 108–120.
- Yuan WP, Liu SG, Yu GR, Bonnefond JM, Chen JQ, Davis K, Desai AR, Goldstein AH, Gianelle D, Rossi F, Suyker AE, Verma SB (2010). Global estimates of evapotranspiration and gross primary production based on MODIS and global meteorology data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 1416–1431.
- Yuan WP, Liu SG, Zhou GS, Zhou GY, Tieszen LL, Baldocchi D, Bernhofer C, Gholz H, Goldstein AH, Goulden ML, Hollinger DY, Hu YM, Law BE, Stoy PC, Vesala T, Wofsy SC, other AmeriFlux collaborators (2007). Deriving a light use efficiency model from eddy covariance flux data for predicting daily gross primary production across biomes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 143, 189–207.
- Zhang DQ, Shi PL, Zhang XZ (2005). Some advance in the main factors controlling soil respiration. *Advances in Earth Science*, 20, 778–785. (in Chinese with English abstract) [张东秋, 石培礼, 张宪洲 (2005). 土壤呼吸主要影响因素的研究进展. 地球科学进展, 20, 778–785.]
- Zhang L, Yu GR, Luo YQ, He HL, Zhang LM (2009). Carbon cycle modeling of a broad-leaved Korean pine forest in Changbai mountain of China using the model-data fusion approach. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 33, 1044–1055. (in Chinese with English abstract) [张黎, 于贵瑞, Luo YQ, 何洪林, 张雷明 (2009). 基于模型数据融合的长白山阔叶红松林碳循环模拟. 植物生态学报, 33, 1044–1055.]
- Zhang LM, Yu GR, Sun XM, Wen XF, Ren CY, Song X, Liu YF, Guan DX, Yan JH, Zhang YP (2006). Seasonal variation of carbon exchange of typical forest ecosystems along the eastern forest transect in China. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 49(2), 47–62.
- Zhu WQ, Chen YH, Xu D, Li J (2005). Advances in terrestrial net primary productivity (NPP) estimation models. *Chinese Journal of Ecology*, 24, 296–300. (in Chinese with English abstract) [朱文泉, 陈云浩, 徐丹, 李京 (2005). 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 24, 296–300.]

责任编辑: 刘玲莉 责任编辑: 李 敏