

## 基于涡动相关技术的森林生态系统二氧化碳通量研究进展

龚元<sup>1,2,3</sup>, 纪小芳<sup>4</sup>, 花雨婷<sup>5</sup>, 张银龙<sup>1,2</sup>, 李楠<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 生物与环境学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 阿拉巴马大学 生物科学系, 阿拉巴马 塔斯卡卢萨 AL35487; 4. 南京林业大学 林学院, 江苏 南京 210037; 5. 南京林业大学 风景园林学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:** 森林生态系统是陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 森林对大气二氧化碳(CO<sub>2</sub>)浓度具有重要的调节作用, 开展森林生态系统碳循环研究对更好地了解生物地球化学过程和应对全球气候变化具有重要的科学意义和应用价值。涡动协方差/涡动相关技术是目前应用最广泛的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测技术。讨论了基于该技术的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究的部分代表性成果, 总结了当前森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的主要研究成果并对未来研究提出展望。目前, 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的研究主要集中于: ①森林生态系统的碳源/汇估算; ② CO<sub>2</sub> 通量观测源区/足迹的计算; ③ CO<sub>2</sub> 通量动态特征的提取及其环境影响因子; ④基于统计模型的森林生态系统物候特征参数的提取; ⑤基于机理模型的气候系统对森林生态系统碳循环的影响。主要结论为: 森林生态系统是陆地生态系统的重要碳汇, 在对森林生态系统进行 CO<sub>2</sub> 通量观测时需对其通量源区的空间代表性进行检验, 森林生态系统碳源/汇状态受到树龄、降水和土壤含水量等因素的影响, 空气温度是森林生态系统碳循环的重要影响因子。未来森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究应该集中于提高通量足迹模型计算精度, 讨论不同林分对大气 CO<sub>2</sub> 的贡献强度。结合气候系统模型和生态生理模型建立植物生理过程参数化模型、预测气候变化对森林碳交换的影响。区域-全球尺度森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究未来将关注多站点通量, 气象数据长时间序列的整合分析, 讨论 CO<sub>2</sub> 通量气候态特征与碳源/汇的空间格局, 更好地了解全球陆地生态系统碳循环机制。表 1 参 64

**关键词:** 森林生态系统; 涡动相关技术; 二氧化碳通量; 碳循环

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2020)03-0593-12

## Research progress of CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem based on eddy covariance technique: a review

GONG Yuan<sup>1,2,3</sup>, JI Xiaofang<sup>4</sup>, HUA Yuting<sup>5</sup>, ZHANG Yinlong<sup>1,2</sup>, LI Nan<sup>1</sup>

(1. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China of Jiangsu Province, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Department of Biological Sciences, University of Alabama, Tuscaloosa AL35487, Alabama, USA; 4. College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 5. College of Landscape Architecture, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

**Abstract:** Forest ecosystem is an important part of carbon cycle in terrestrial ecosystem. Forests can regulate CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere and it is of great scientific significance and application value to conduct carbon cycle research of forest ecosystem for better understanding of biogeochemical processes and coping with global climate change. The eddy covariance technique is currently the most widely used CO<sub>2</sub> flux observation technique in forest ecosystem. This paper summarizes the main achievements of CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem and discusses some representative results of CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem based on this technique. Current

收稿日期: 2019-07-09; 修回日期: 2020-02-02

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0502704); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

作者简介: 龚元, 博士研究生, 从事全球变化生态学与生态模型应用研究。E-mail: [yuangong@njfu.edu.cn](mailto:yuangong@njfu.edu.cn)。通信作者: 张银龙, 教授, 从事环境生态学研究。E-mail: [ecoenvylz@163.com](mailto:ecoenvylz@163.com)

studies on CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem mainly focus on the following 5 aspects: carbon source/sink estimation of forest ecosystem, calculation of source area/footprint of CO<sub>2</sub> flux observations, dynamic characteristics of CO<sub>2</sub> flux and its environmental impact factors, extraction of phenological parameters of forest ecosystem based on statistical model, and impact of climate system based on mechanism model on carbon cycle of forest ecosystem. The main conclusions are as follows: The forest ecosystem is an important carbon sink of terrestrial ecosystem. During CO<sub>2</sub> flux observation of forest ecosystem, the spatial representativeness of the flux source area needs to be tested. The carbon source/sink status of the forest ecosystem is affected by tree age, precipitation and soil water content. Air temperature is an important factor influencing carbon cycle of forest ecosystem. Future studies on CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem should focus on improving the accuracy of flux footprint model, discussing the contributions of different stands to CO<sub>2</sub> emissions, and establishing a parametric model of plant physiological process by combining climate system model and ecophysiological model to predict the impact of climate change on forest carbon exchange. The study of CO<sub>2</sub> flux in forest ecosystem at the regional-global scale will focus on multi-site flux and integrated analysis of long-term sequence of meteorological and flux data, and discuss the climatology characteristics of CO<sub>2</sub> flux and the spatial pattern of carbon source/sink to better understand the carbon cycle of terrestrial ecosystem.[Ch, 1 tab. 64 ref.]

**Key words:** forest ecosystem; eddy covariance technique; carbon dioxide flux; carbon cycle

18 世纪 60 年代工业革命以来, 由于全球土地利用变化、工业活动和化石燃料的使用, 大量温室气体排放至大气中<sup>[1]</sup>。甲烷 (CH<sub>4</sub>) 和二氧化碳 (CO<sub>2</sub>) 等温室气体的大量排放, 导致全球增温和气候变化, 人类开始关注陆地生态系统碳循环过程和消失的碳汇 (missing carbon sink)<sup>[1]</sup>。了解植物 (草地、森林生态系统) 对大气 CO<sub>2</sub> 吸收和排放的调节作用是人类应对全球气候变化的基础<sup>[1-2]</sup>。森林生态系统是陆地生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分, 开展不同生态尺度的森林生态系统碳循环研究对更好地了解陆地生态系统与大气间的碳交换过程, 制定全球碳排放和碳交易政策 (如欧洲碳排放交易体系等), 应对全球气候变化具有参考和服务作用<sup>[2-4]</sup>。涡动相关系统是目前应用较多的温室气体观测技术。本文主要依据涡动相关观测系统对森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测值、微气象数据等相关研究成果, 讨论森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测原理和数据预处理、CO<sub>2</sub> 通量动态特征、CO<sub>2</sub> 通量环境影响因素、CO<sub>2</sub> 通量足迹估算等方面的研究成果, 为其他森林生态系统碳循环研究提供服务和方法参考。

## 1 CO<sub>2</sub> 通量观测方法

研究森林生态系统碳循环过程就必须对其和大气间碳交换过程进行不同时间尺度/间隔的观测, 其中对森林生态系统与大气间垂直碳交换即 CO<sub>2</sub> 通量观测是研究森林生态系统碳循环过程的重要研究内容<sup>[5-6]</sup>。CO<sub>2</sub> 通量是指在一定生态尺度下单位时间单位面积内 CO<sub>2</sub> 流通的量, 一般以  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  为单位, 亦可依据不同的科学问题的需要对其质量单位、面积单位和时间单位进行换算<sup>[3]</sup>。对森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量进行观测的方式也较多, 如自下而上 (bottom-up) 的涡动协方差/涡动相关技术和自上而下 (top-down) 的参数化遥感产品等<sup>[3]</sup>。20 世纪 90 年代以来, 涡动相关系统开始广泛应用于高大植被较多的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测<sup>[7-8]</sup>。如今随着涡动相关系统的推广, 为了数据共享和数据处理标准化形成了国际通量网 (FLUXNET, <https://fluxnet.fluxdata.org/>), 中国通量网 (ChinaFLUX, <http://www.chinaflux.org/>) 等全球-区域的通量和微气象数据共享网络平台<sup>[9-10]</sup>。依据国际通量网 2017 年 2 月的统计结果, 目前在注册的站点全球共 914 个, 其中较多站点为森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测站点, 且多分布于温带地区。基于涡动相关系统森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测的研究也较多, 如森林生态系统的碳源/汇估算、CO<sub>2</sub> 通量观测源区/足迹的计算、CO<sub>2</sub> 通量动态特征的提取、CO<sub>2</sub> 通量预测/建模、地面观测值与遥感观测值的验证等<sup>[5-8,11-18]</sup>。开展基于涡动相关系统的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究, 可以为了解陆地生态系统碳循环过程, 应对全球气候变化和评估全球碳平衡提供服务 and 参考<sup>[17]</sup>。

### 1.1 涡动相关系统工作原理

大气湍流是下垫面与大气间进行物质交换和能量流动的主要方式，为记录其过程中物质和能量流通的量，涡动相关系统便因此诞生<sup>[8]</sup>。该系统一般安装在地面边界层内，在该层中通量随高度变化的影响较小，在该层开展下垫面与大气的碳交换具有较高的空间代表性<sup>[8]</sup>。涡动相关系统一般以 10~20 Hz 的采样频率来记录一定观测高度 ( $z_m$ , m) 上的微气象信息 (三维风速/风向、超声虚温等) 和某物质 ( $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  等) 流通的量，后一般取一定时间间隔内 (30 min) 的平均值来记录微气象数据和通量数据，其中已经假设垂直风速的时间平均值为  $0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ， $\text{CO}_2$  通量可依据下式计算<sup>[8]</sup>：

$$F_C = \overline{w'\rho_C'} \quad (1)$$

式 (1) 中： $F_C$  为  $\text{CO}_2$  通量 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  或  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )。  $w$  为垂直风速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )， $w'$  为垂直风速脉动量 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )，代表垂直风速瞬时值与平均值的偏差。 $\rho_C$  为  $\text{CO}_2$  密度 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )， $\rho_C'$  为  $\text{CO}_2$  密度脉动量 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )，代表  $\text{CO}_2$  密度瞬时值与平均值的偏差。公式横上线代表时间平均<sup>[8]</sup>。当  $F_C < 0$  时代表所观测的区域/下垫面为碳汇 (carbon sink)，当  $F_C > 0$  时代表所观测区域/下垫面为碳源 (carbon source)<sup>[8]</sup>。

### 1.2 通量观测源区与足迹

通量源区 (source area) 即代表涡动相关系统所测量  $\text{CO}_2$  通量的下垫面来源。因涡动相关系统的观测受到下垫面、大气边界层环境等因素的影响，观测到的  $\text{CO}_2$  通量只能代表传感器上风向一定区域内的状况，因此在使用这些  $\text{CO}_2$  通量观测值时需要对  $\text{CO}_2$  通量的观测源区的空间代表性进行评估<sup>[14]</sup>。

通量源区的足迹函数 (footprint) 代表上风向下垫面中若干个点源所形成的源区对在  $z_m$  高度上所观测  $\text{CO}_2$  通量  $F(0, 0, z_m)$  的贡献强度。可由下式计算<sup>[18]</sup>：

$$F(0, 0, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} F_0(x, y, 0) \phi(x, y, z_m) dx dy \quad (2)$$

式 (2) 中：通量观测点为原点 (0, 0)， $x$  轴指向来风方向， $F_0(x, y, 0)$  为上风向源区中某一个点源 ( $x, y$ ) 的通量贡献强度 [源强，量纲与  $F(0, 0, z_m)$  一致]。 $\phi(x, y, z_m)$  即为通量足迹函数 (flux footprint predictions, FFP)<sup>[16]</sup>，足迹函数的量纲为  $\text{m}^{-2}$ 。通量足迹函数的计算结果主要包括上风向通量足迹贡献峰值的位置 (m)，以及不同通量足迹贡献百分比 (10%~95%) 在上风向的位置 (m) 等信息<sup>[16]</sup>。由于当通量足迹贡献率为 1 时，通量源区为无限大，因此在进行通量源区的空间代表性的评估时，一般将通量足迹贡献率设定为 80%~90%<sup>[16]</sup>。近年来，随着通量足迹函数的发展，出现了较多优秀通量足迹计算模型，依据其计算模式可分为解析式模型、拉格朗日随机扩散模型、大涡模拟模型、闭合模型等，具体为 FSAM 模型<sup>[19]</sup>、KM01 模型<sup>[18]</sup>、KLJUN 模型<sup>[16]</sup> 等。KLJUN 模型是目前较新颖的基于尺度 (量纲) 的通量足迹模型，也是目前应用至森林生态系统通量足迹计算较多的模型之一<sup>[14]</sup>，KLJUN 等<sup>[16]</sup> 提供了该通量足迹计算模型的在线计算平台 (<http://footprint.kljun.net/index.php>)，并且还提供了该通量足迹计算模型在 Matlab 和 R 语言软件平台下的开源代码，可供研究人员进行下载和使用。

### 1.3 $\text{CO}_2$ 通量预处理与数据质量控制

在使用和分析涡动相关系统对森林生态系统的  $\text{CO}_2$  通量观测值时，需要对  $\text{CO}_2$  通量数据进行质量控制和数据插补。 $\text{CO}_2$  通量数据预处理过程如下表 1 所示<sup>[8]</sup>。为了方便和简化  $\text{CO}_2$  通量数据的预处理过程，美国 LI-COR 公司 (<https://www.licor.com/>) 发展了几套基于涡动相关系统的配套通量数据计算软件，包括开源式涡动相关通量处理软件 EddyPro。EddyPro 集成了包括通量数据修正、质量控制、野点去除、通量足迹计算等预处理过程，使用方便。另外较新的通量处理软件 Tovi，除了通量数据预处理功能

表 1  $\text{CO}_2$  通量数据预处理方法

Table 1  $\text{CO}_2$  flux data preprocessing method

数据类型	数据预处理方法
10~20 Hz 高频原始观测数据	频谱修正、野点去除、气体分析仪信号检验、传感器信号强度检验
30 min 时间间隔通量和微气象观测数据	坐标轴旋转 (2 次旋转和 3 次旋转)、频率响应修正、感热的超声虚温修正、WPL 密度修正
通量数据质量控制	通量数据合格率检验 (一般要求合格率大于 50%)、建立通量数据质量控制指标 (0-1-2, 1-5, 1-9)、通量足迹的空间代表性检验、依据经验值的异常通量值剔除、摩擦风速阈值的确定



之外还集成了通量源区绘制、数据插补等数据可视化功能。除了美国 LI-COR 公司之外,由德国马克斯普朗克生物地球化学研究所发展的通量数据在线预处理,插补和制图工具 (<https://www.bgc-jena.mpg.de/bgi/index.php/Main/HomePage>) 也为 CO<sub>2</sub> 通量数据和微气象数据的使用和分析提供了方便。

在 CO<sub>2</sub> 通量数据插补方面一般采用平均日变化、查表法和非线性回归法等<sup>[18]</sup>进行。其中非线性回归法是基于 CO<sub>2</sub> 通量与环境因子关系的经验模型,主要包括基于白天生态系统净交换量和光合有效辐射量对 Michaelis-Menten 光响应曲线模型和采用夜间生态系统呼吸的 Arrhenius 模型等<sup>[5-6]</sup>。一般在森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量插补时依据应所缺失通量数据的时间长度来确定插补方法,对缺失时间长度较短 ( $\leq 14$  d) 使用平均日变化法和查表法<sup>[8]</sup>,对缺失时间长度较长的 ( $>14$  d) 则使用非线性回归法,如使用基于光合有效辐射的 Landsberg 模型<sup>[20]</sup>和基于土壤温度 ( $T_s$ ) 的 Arrhenius 模型等<sup>[21]</sup>。

## 2 涡动相关系统在森林生态系统的应用

在完成通量数据质量控制、通量数据插补、通量源区空间代表性检验后便可开始分析和使用所观测到的局域尺度 (local-scale) 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量数据,亦可称之为森林生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换,也可将森林生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换数据拆分为生态系统呼吸和总初级生产力应用于森林生态系统碳循环过程研究。目前,涡动相关系统在森林生态系统的应用也有较多,依据国际通量网的统计结果,全球大部分涡动相关通量观测站点位于温带地区,且多为森林通量站点<sup>[14]</sup>。目前,基于涡动相关系统的森林生态系统碳循环研究的数据来源主要分 2 类,即局域测量和国际通量网的共享通量数据。基于这些通量和气象数据的分析主要包括:CO<sub>2</sub> 通量数据标准化、CO<sub>2</sub> 通量特征分析、CO<sub>2</sub> 通量建模、通量足迹分析和多站点大数据分析等<sup>[18-30]</sup>。由于树龄、地理和气候等因素的影响,不同森林生态系统的碳源/汇状态不同。一般认为,森林生态系统是陆地生态系统的重要碳汇<sup>[25]</sup>。由于通量塔架设和维护成本较高,基于涡动相关技术森林生态系统的碳循环研究多依托单个通量塔的观测数据,多站点、长时间序列的数据整合分析较少。涡动相关系统对地形、下垫面完整度、微气象环境等因素要求较高,通量数据的有效率研究依旧是重要研究内容。由于通量数据插补方法的差异,同一时间序列的通量数据会由于不同的数据插补方法对生态系统与大气间碳交换估算产生影响,即影响生态系统碳源/汇功能的判定,因此开展更多通量数据插补方法研究是通量数据质量控制和 CO<sub>2</sub> 通量研究的保障和前提。

## 3 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量动态特征及其影响因子

基于涡动相关系统对森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究包括 CO<sub>2</sub> 通量特征和通量源区的研究,其中 CO<sub>2</sub> 通量源区的计算包括足迹模型验证、足迹气候态和不同景观类型通量贡献差异等研究。CO<sub>2</sub> 通量动态特征的讨论基于不同时间尺度、植物群落类型、气候条件等背景下森林生态系统与大气间碳交换的特征。

### 3.1 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量足迹分析

涡动相关系统对 CO<sub>2</sub> 通量观测受到多种环境因素的影响,例如:观测高度、下垫面、大气稳定度、大气边界层高度等。因此,在使用 CO<sub>2</sub> 通量数据前需要对通量源区进行检验,即所观测的 CO<sub>2</sub> 通量值是否来源于感兴趣区域,即通量足迹分析<sup>[14]</sup>。

BALDOCCHI 等<sup>[29]</sup>解释了拉格朗日随机模型 (Lagrangian model) 在高大植被冠层中通量足迹的应用,认为拉格朗日随机模型可应用于森林冠层上下 2 个部分的通量足迹分析,并强调在应用拉格朗日随机模型进行高大植被林冠层通量足迹分析时需要服从高斯力作用 (Gaussian forcing)。KLJUN 等<sup>[16]</sup>基于拉格朗日随机扩散模型所发展的三维拉格朗日足迹模型是目前应用较多的参数化通量足迹模型之一,并且引入了大气边界层高度的概念,认为在当通量足迹贡献率大于 80% 时即具有空间代表性。KIM 等<sup>[14]</sup>基于 KLJUN 模型分析了美国哈佛森林多年通量足迹形态的气候态特征,认为森林景观变化直接影响了通量源区的形态和面积,且认为高大植被较多的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测源区对观测高度 ( $z_m$ ) 即通量塔视场的依赖性较大。其他通量足迹模型例如 FSAM 模型、KM 模型和 HSIEH 模型等也是应用至森林生态系统较多的模型。金莹等<sup>[30]</sup>基于 FSAM 模型分析了杨树 *Populus* 林的通量源区,认为通量源区的大小主要受到大气稳定度 ( $z_m/L$ ,  $L$  为莫宁-奥布霍夫长度) 影响,当大气处于稳定状态时通量源区面积大于当大气处于不稳定状态下的通量源区面积,且生长季的通量源区面积大于非生长季的通量源区面积。龚

笑飞等<sup>[31]</sup>基于 FSAM 模型对安吉毛竹 *Phyllostachys edulis* 林通量源区的分析与金莹等<sup>[30]</sup>的分析结果类似。NEFTel 等<sup>[18]</sup>基于 KM01 模型所开发的 ART footprint tool 首次增加了通量源区的区域选取功能,即可完成对多个感兴趣区域通量足迹贡献率的计算,首次应用至农田和草地生态系统,并且认为该通量足迹计算工具可应用至下垫面较均一的环境中的其他生态系统(如森林生态系统)的通量足迹检验和 CO<sub>2</sub> 通量数据质量检验。OGUNJEMIYO 等<sup>[32]</sup>在对黑云杉 *Picea mariana* 和短叶松 *Pinus banksiana* 混交林进行通量足迹分析时结合卫星和航空器观测数据对下垫面不同景观结构的 CO<sub>2</sub> 通量源区与通量观测值的预测。张慧<sup>[33]</sup>基于 FSAM 模型、KM01 模型和 HSIEH 模型共 3 个通量足迹模型分析了千烟洲中亚热带红壤丘陵区人工林的 CO<sub>2</sub> 通量足迹,认为参数化方式和建模方式的不同导致了 3 个通量足迹模型计算结果的差异,且同样认为通量源区的大小对观测高度的依赖性较大。这一结论与 KIM 等<sup>[14]</sup>的研究结果一致。

通量源区/足迹分析是检验 CO<sub>2</sub> 通量数据来源的重要方法,是 CO<sub>2</sub> 通量数据预处理的必要过程之一<sup>[8]</sup>。通常在搭建通量塔前需要对局域尺度的上风向风区和通量源区进行估算,以及下垫面冠层高度的计算后再确定通量塔位置和传感器架设高度<sup>[8]</sup>。通量数据处理软件 EddyPro 也集成了相关的通量足迹计算功能,包括 10%~90% 通量足迹最远点在上风向的距离,通量足迹贡献峰值在上风向的距离等<sup>[16]</sup>。研究人员可依据下垫面实际情况使用相关的软件或者平台,对局域尺度的 CO<sub>2</sub> 通量源区进行估算,亦可配合 CO<sub>2</sub> 通量观测值分析下垫面中不同森林景观类型对大气 CO<sub>2</sub> 的贡献强度。

### 3.2 森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量时间动态变化特征

由于森林生态系统受到光照、气温、降水等环境控制因素的影响,且由于自身光合作用和呼吸作用,一般局域尺度森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的日变化特征呈现“U”形特征。即一般在当地时间的正午时分(12:00–14:00)达到碳汇的最大强度,夜间由于生态系统呼吸作用,CO<sub>2</sub> 通量观测值达到最大值。白天由于植物光合作用吸收大气 CO<sub>2</sub>,导致涡动相关系统 CO<sub>2</sub> 通量 30 min 观测值( $R_e$ )为负值。夜间整个生态系统进入呼吸作用,导致涡动相关系统 CO<sub>2</sub> 通量 30 min 观测值为正值,且夜间 CO<sub>2</sub> 通量变化较平稳<sup>[3]</sup>。

局域尺度的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测一般依托于通量观测塔(tower-based)<sup>[34–39]</sup>,进行自下而上的森林下垫面与大气间 CO<sub>2</sub> 交换观测。单个森林通量观测站点会搭配 1 套涡动相关系统、1 套微气象梯度观测系统以及 1 个数据采集器。部分通量观测站点会在通量塔不同高度搭载多套红外气体分析仪和三维超声风速温度测量仪器,以满足在不同大气条件下(稳定、中性和不稳定)对感兴趣区域进行均一性观测<sup>[25]</sup>。

森林植被高度决定通量观测塔架设高度。森林生态系统的通量观测塔架设高度一般高于城市、湿地和草地等陆地生态系统<sup>[35]</sup>。目前,已知较高的森林通量塔安装在美国威斯康星州,观测高度为距离地面 447.0 m<sup>[35]</sup>。位于北京市八达岭林场的通量塔架设高度较低(11.7 m),其原因是该地区下垫面树种的平均高度较低(约 4.0 m),其较低的下垫面冠层高度决定了通量塔高度<sup>[34]</sup>。不同森林生态系统由于地理位置和环境差异,导致其 CO<sub>2</sub> 通量特征有一定空间分异性,其中主要表现为热带地区森林生态系统的碳汇峰值最强( $-1.32 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),且热带地区的 CO<sub>2</sub> 通量最大值也高于其他温带森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量峰值( $0.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )<sup>[38]</sup>。森林通量站点中 CO<sub>2</sub> 通量极值一般出现于当地的生长季,其原因可能是下垫面中的绿色植物在生长季产生了较强的光合作用,但在夜晚植物自身生长也增加了生态系统呼吸作用。目前,对森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量动态特征的相关研究也已经比较成熟,一般认为,在日尺度下森林生态系统在白天由于光合作用形成碳汇,夜间由于呼吸作用形成碳源,在更长的时间尺度例如多年局域尺度,森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量估算中热带雨林表现为较稳定的碳汇,但是在生长季/雨季中会表现为碳源。如张一平等<sup>[38]</sup>研究的森林生态系统,由于阴雨天气较多导致光合有效辐射降低,地上凋落物增加也增强了土壤呼吸,使局域森林生态系统在生长季/雨季表现为碳源,但在全年尺度上依然表现为微弱的碳汇。在温带森林生态系统中,唐祥等<sup>[34]</sup>认为:成熟林因为较高的叶面积指数比新造林具有更强的碳汇潜力,且其研究的中国北京市八达岭林场 CO<sub>2</sub> 通量特征表现为 7 月的日 CO<sub>2</sub> 吸收值最大。在亚热带森林生态系统中,纪小芳等<sup>[27]</sup>研究的浙江凤阳山混交林生态系统在全年角度表现为碳汇,在 7 月净 CO<sub>2</sub> 交换水平达到最低,碳汇强度达到最大。

开展基于涡动相关系统在森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测,可以为长时间序列森林生态系统碳交易(carbon budget)、碳平衡(carbon balance)进行评估,森林通量观测站点长时间序列 CO<sub>2</sub> 通量数据积累可



以帮助我们更好地理解森林生态系统对大气  $\text{CO}_2$  的调节,即碳源和碳汇状态转换的时空特征。BRACHO 等<sup>[25]</sup>基于涡动相关系统观测的美国东南部种植的湿地松 *Pinus elliottii* 林 1998–2008 年的  $\text{CO}_2$  通量数据,分析了多年尺度湿地松林的碳平衡状态,结果表明:相对年轻的湿地松林分在 1998–2001 年表现为碳汇,年碳交易分别为  $-12.68$ 、 $-8.85$ 、 $-5.28$ 、 $-2.37 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,而相对老龄的林分表现为碳源。研究结果显示:年平均叶面积指数为  $1 \sim 2 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$  时,年轻的林分表现为较强的碳汇。随着年平均叶面积指数的上升,林分渐渐转换为碳源。相对老龄林分的年叶面积指数为  $6 \sim 8 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$ ,且在年尺度上均表现为碳源,年碳交易为  $4.91 \sim 8.18 \text{ Mg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,该局域尺度生长季降水是影响湿地松林生态系统年碳交易的主要因素。PITA 等<sup>[23]</sup>分析了 4 类不同树种林分  $\text{CO}_2$  通量的差异和季节分异,认为在长时间序列下桉树 *Eucalyptus* 有效的叶片气孔控制可以应对地中海气候下饱和和水汽压差的变化,适宜在地中海地区种植。杨树 *Populus* 在干旱期间的主要表现为叶面积指数下降。由于温带地区的苏格兰松 *Pinus sylvestris* 林有地下水位的补给导致受到水分胁迫的压力较小,且长时间序列的总初级生产力受气候变化的影响较小,但是 4 类林分中月均尺度总初级生产力最大值出现在 5 月的洛克里斯蒂的苏格兰松林,为  $7.9 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,表现为较强吸收  $\text{CO}_2$  的能力。王春林等<sup>[28]</sup>所研究的鼎湖山常绿针阔叶混交林碳交易表明:在 2003 和 2004 年该局域尺度森林生态系统表现为碳汇,年碳交易分别为  $-563.0$ 、 $-441.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ,这与欧洲通量网的大部分森林站点的结果一致,且认为在夜间大气稳定度高的状态下土壤和森林冠层呼吸作用所产生的  $\text{CO}_2$  不能被传感器有效观测到,可能会对  $\text{CO}_2$  通量观测值产生影响。由于涡动相关系统对夜间生态系统呼吸的低估可能会导致高估该生态系统年尺度下的碳汇能力,其他中国通量网的注册站点,例如:LIU 等<sup>[39]</sup>基于涡动相关系统研究千烟洲常绿针叶林碳交易,在 2003 年同样表现为碳汇;张一平等<sup>[38]</sup>研究的西双版纳热带季雨林在 2003 和 2004 年也表现为微弱碳汇。

### 3.3 森林生态系统 $\text{CO}_2$ 通量影响因素

森林生态系统碳循环受到环境以及气候变化的影响较大。基于涡动相关系统  $\text{CO}_2$  通量观测可结合梯度微气象观测系统的气象观测值如气温、降水、土壤温度、水汽压差和光量子通量密度 ( $D_{\text{PPF}}$ ) 等环境因子与  $\text{CO}_2$  通量进行关系分析,研究环境控制因子中对森林生态系统碳循环影响和森林下垫面对气候变化的响应<sup>[8]</sup>。目前,研究环境因子与  $\text{CO}_2$  通量关系一般通过  $\text{CO}_2$  通量 30 min 观测值 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $\text{CO}_2$  通量日累积值 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 和  $\text{CO}_2$  通量月累积值 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{月}^{-1}$ ) 与环境控制因子进行回归分析建立线性或者非线性的关系模型。这里的环境因子包括不同时间尺度的空气温平均值 ( $^{\circ}\text{C}$ )、降水量累积值 (mm)、光合有效辐射平均值 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 等<sup>[3]</sup>。

不同森林生态系统对以上环境因子变化的响应不同。目前,一般认为气温是森林生态系统碳循环的主要影响因素<sup>[3]</sup>,降水会影响光合有效辐射后对森林生态系统与大气间  $\text{CO}_2$  交换造成影响<sup>[38]</sup>,其他环境因子对森林生态系统碳循环的影响包括生态系统呼吸、净  $\text{CO}_2$  交换量、总初级生产力、净初级生产力等<sup>[3]</sup>。

叶面积指数、增强植被指数、归一化植被指数等<sup>[40]</sup>植被指数产品 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>) 也开始被应用于森林生态系统碳循环的辅助测量,配合地面通量塔的观测数据,可研究植被生长状况对局域尺度生态系统  $\text{CO}_2$  通量的影响,以及研究植被生理活动对气候变化的响应。

## 4 森林生态系统 $\text{CO}_2$ 通量模型研究

涡动相关系统  $\text{CO}_2$  通量观测值除了用于分析  $\text{CO}_2$  通量动态变化的现象特征外,亦可将观测数据用于建立生态过程模型(统计模型/机理模型),以及将  $\text{CO}_2$  通量观测值作为地面参考数据(ground reference data)拆分出总初级生产力、净初级生产力等通量数据与遥感观测数据,进行交叉验证,推动全球森林生态系统碳循环的整合分析,完成从局域尺度  $\text{CO}_2$  通量测量到全球生态系统碳循环研究的尺度上推。

### 4.1 基于统计模型的森林生态系统 $\text{CO}_2$ 通量研究

基于涡动相关系统  $\text{CO}_2$  通量观测使用统计模型,即非线性/线性逻辑模型等方法进行生态过程建模,主要包括植物群落光合作用模型、威布尔累积分布函数、参数化逻辑函数和人工神经网络模型等<sup>[24]</sup>,其函数功能主要包括下垫面植物生理/物候过程的提取、 $\text{CO}_2$  通量值预测、 $\text{CO}_2$  通量观测值与遥感数据的交叉验证等。RICHARDSON 等<sup>[41]</sup>使用国际通量网多站点森林  $\text{CO}_2$  通量(GEP/NEP),基于物候模型分析了温带森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量对全球气候变化的响应,认为全球增温会延长温带森林生态系统生

长季长度。GU 等<sup>[24]</sup>开发了植物群落光合作用物候模型 (phenology model)。该模型主要基于单日总初级生产力 30 min 观测最大值, 提取其动态变化的关键时间点, 来划分局域尺度生态系统的物候阶段。其物候阶段主要分为: 准备阶段 (pre-phase)、恢复阶段 (recovery phase)、稳定阶段 (stable phase)、衰落阶段 (senescence phase)、终止阶段 (termination phase), 以及计算生长季长度、生长季中点、生长季开始和结束点等物候特征参数。NIU 等<sup>[42]</sup>使用国际通量网 CO<sub>2</sub> 通量数据, 基于物候模型, 分析了北半球生态系统 CO<sub>2</sub> 通量对年均气温变化的响应, 认为所分析的森林通量站点的物候特征均对年均气温变化的敏感性较高。GONSAMO 等<sup>[43]</sup>使用国际通量网数据, 基于一个非线性逻辑函数 (double logistic function) 分析了北美温带森林生态系统物候特征, 并且基于遥感数据 (NDVI/NDII) 开发了一个新的物候指数 (PI), 在将该物候指数与通量数据的交叉验证中, 遥感数据与涡动通量数据显示了较好的一致性, 均较好地体现了下垫面森林景观的物候过程。基于逻辑算法的下垫面物候特征参数提取还有很多其他的函数可用, 例如: 非对称高斯函数、D-L 拟合和 S-G 滤波法等<sup>[44]</sup>。在人工神经网络模型的应用方面, MANCUSO 等<sup>[45]</sup>讨论了人工神经网络在橄榄树 *Olea europaea* 物候过程建模的潜力, 通过训练反向传播神经网络并对其进行了测试, 预测了下垫面中橄榄树生物事件的时间节点, 并且结合了微气象数据预测橄榄树物候对未来气候变化的响应。PAPALE 等<sup>[46]</sup>使用 EUROFLUX 等通量数据来训练神经网络模拟器 (neural network simulator), 讨论了欧洲范围内森林碳通量的空间 (1 km×1 km) 和时间 (周) 格局, 认为在欧洲南部的生长季更长 (约 32 周)。HE 等<sup>[47]</sup>使用人工神经网络技术, 基于中国通量网中 3 个不同生态系统 (森林、草地和农田) 的 CO<sub>2</sub> 通量和微气象数据, 来训练人工神经网络并预测 CO<sub>2</sub> 通量, 结果表明: 该技术可以成功地预测生态系统 CO<sub>2</sub> 通量, 相关系数为 0.75~0.86。上述模型和方法均可应用于森林生态系统物候特征参数提取的研究, 一般统计模型多基于 1 个或者多个非线性逻辑函数对 CO<sub>2</sub> 通量观测数据进行拟合分析, 并且依据拟合后的 CO<sub>2</sub> 通量变化斜率的计算划分不同的物候阶段。这些方法对温带、亚热带 (暖季) 植被的拟合效果较好。由于热带地区常绿植物较多, 物候特征不明显, 上述物候模型在热带地区的应用效果差于温带和亚热带地区。GU 等<sup>[24]</sup>开发的物候模型集成了 CO<sub>2</sub> 通量增长率计算的功能, 并且针对植物群落生物事件划分了多个关键物候阶段, 是具有代表性的统计模型之一。近年来, 随着遥感技术的发展, MODIS 遥感产品为科研工作者提供了总初级生产力和净初级生产力等遥感植被产品, 其中总初级生产力的产品周期为 8 d, 净初级生产力的产品周期为 1 a<sup>[48-49]</sup>。基于遥感数据与地面观测数据的交叉验证也较多, 且较多集中于总初级生产力产品的扩展应用<sup>[48]</sup>。杜启勇等<sup>[49]</sup>同样基于遥感和地面通量数据进行了验证分析, 认为在森林生态系统总初级生产力估算值和实测值在年碳交易尺度上误差较小, 但低估了其他生态系统的总初级生产力。刘啸添等<sup>[50]</sup>基于遥感数据和地面通量观测数据提取了局域尺度的温带针阔混交林的物候特征, 认为叶绿素荧光与地面观测总初级生产力值的物候特征一致性较高, 较真实地反应了地面植被的生长/生理过程。遥感数据与地面观测数据的交叉验证, 可以为提高遥感数据观测精度提供参考, 也方便了局域尺度 CO<sub>2</sub> 通量观测的尺度上推<sup>[51-52]</sup>。

## 4.2 基于机理模型的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究

基于植物生理/机理的 CO<sub>2</sub> 通量模型研究多集中于净 CO<sub>2</sub> 交换数据拆分、CO<sub>2</sub> 通量预测、CO<sub>2</sub> 通量数据插补方法等研究。目前应用较多的植物生理模型主要包括 CANVEG 模型、CANOAK 模型、CHANGE 模型和 BKPF 模型等<sup>[53-55]</sup>。唐欢等<sup>[48]</sup>基于 FLUXNET 和中国通量网的涡动相关通量观测数据和遥感总初级生产力产品进行了交叉验证, 认为在生长季中期出现了遥感产品与地面数据不一致的情况, 主要原因可能是模型输入参数对环境变量的敏感度差异。LAI 等<sup>[53]</sup>基于 CANVEG 模型对美国北卡罗来纳州的杜克森林的 CO<sub>2</sub> 通量分布进行预测和模拟。MEDLYN 等<sup>[54]</sup>基于涡动相关系统 CO<sub>2</sub> 通量观测数据评估了一套生态系统碳交换模型, 认为其中的总初级生产力模型 (sun-shade GPP model) 表现较好, 2 套生态系统呼吸模型 (RE model 1/2) 即基于土壤温度的呼吸模型和基质回收模型, 由于受到局域尺度云杉 *Picea asperata* 林的环境差异限制不能完全表现真实的生态系统呼吸情况。BALDOCCHI 等<sup>[55]</sup>基于生物物理模型 CANOAK, 对一个温带落叶林生态系统和大气之间的 CO<sub>2</sub> 交换进行了不同时间尺度的模拟, 认为生长季长度会影响森林生态系统与大气间碳交易估算, 主要表现为生长季节长度每增加 1 d 会使生态系统的净 CO<sub>2</sub> 交换量减少 5.9 g·m<sup>-2</sup>。PARK 等<sup>[56]</sup>使用生物地球化学模型 (CHANGE) 模拟了



1998–2006年期间西伯利亚东部的落叶松 *Larix cajanderi* 林生态系统与大气间  $\text{CO}_2$  交换, 以了解该生态系统对气候变化的响应及其控制因素, 研究结果表明: 生态系统净  $\text{CO}_2$  交换变化与净初级生产力密切相关, 且土壤含水量是影响该落叶松林生态系统中  $\text{CO}_2$  通量的决定因素。XIE 等<sup>[57]</sup> 使用通量塔观测数据结合 CLM 模型, 讨论了干旱对亚热带森林生态系统的影响, 研究结果表明: 由于长时间的干旱, 生态系统总初级生产净值下降了 76%, 水分条件影响了该生态系统的碳固存能力。CHEN 等<sup>[58]</sup> 使用 BKPF 模型预测了中国东北寒带和温带森林交界处的森林生态系统与大气间  $\text{CO}_2$  交换, 讨论了在大气  $\text{CO}_2$  浓度上升的背景下, 不同林分叶面积指数和生物量的差异。SHI 等<sup>[59]</sup> 使用多层气孔导度耦合模型模拟了温带混交林生态系统  $\text{CO}_2$  通量, 研究结果表明: 在 2003 年 5 月至 2007 年 9 月, 通量模拟值与  $\text{CO}_2$  通量观测值有较好的相关性 ( $R^2 = 0.734$ )。李雪建等<sup>[60]</sup> 基于 2 个竹林生态系统通量观测站点 2014–2015 年的通量观测数据和遥感数据, 使用 BEPS 模型预测 2 种竹林生态系统总初级生产力、净  $\text{CO}_2$  交换和生态系统呼吸等碳循环数据, 结果表明: 使用 BEPS 模型的模拟结果较好地体现了下垫面碳循环过程。陈晨等<sup>[61]</sup> 使用 2011 年帽儿山生态站  $\text{CO}_2$  通量数据, 基于卡尔曼滤波的顺序同化技术, 对 BEPS 模型的关键参数进行优化, 结果表明: 该方法明显改善了模型模拟碳水通量的能力。杨延征等<sup>[62]</sup> 利用集成生物圈 IBIS 模型模拟分析了 1960–2006 年中国陆地生态系统碳收支时空变异特征和趋势, 认为大兴安岭、小兴安岭和长白山等地区的森林生态系统是较强的碳汇。王萍<sup>[63]</sup> 使用 IBIS 模型对 2004–2005 年大小兴安岭的植被净初级生产力进行了定量估算, 结果表明: 大小兴安岭森林植被的年均净初级生产力为  $494.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ , 热量条件是其影响因子。王培娟等<sup>[64]</sup> 使用 BEPS 模型分析了在长白山自然保护区森林植被净初级生产力, 认为叶面积指数是影响森林净初级生产力的重要影响因子。以上关于  $\text{CO}_2$  通量的建模在局域尺度的运用多有限制, 不同生理模型对叶面积指数、气温和降水等环境因素的敏感性不同, 且影响机制复杂。当需要对局域尺度  $\text{CO}_2$  通量进行预测时, 应该准确评估当地的实际环境情况, 考虑水文、生理、生化和生态因素与气象条件之间的相互作用<sup>[56]</sup>, 选择合适的  $\text{CO}_2$  通量模型, 亦可选择统计模型和机制模型交叉验证的方式进行森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量预测。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

涡动相关通量观测系统是目前应用最广泛的森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量观测技术, 该系统可以直接观测森林冠层与大气间的碳交换, 但是在应用该系统观测森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量时, 需要对局域尺度的通量源区和上风风区延伸度进行估算。此后对  $\text{CO}_2$  通量观测结果需进行必要的修正和通量数据质量控制, 对不合格或者缺失的数据需依据实际情况进行插补。

森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量源区受观测高度的影响较大, 下垫面森林景观的更迭会直接影响通量源区的形态和长度。 $\text{CO}_2$  通量动态特征具有较明显的日、月和季节分异, 具体表现在日尺度上 30 min 的  $\text{CO}_2$  通量观测值多呈现“U”形特征, 且森林生态系统在白天由于光合作用多表现为碳汇, 夜间由于呼吸作用变为碳源。亚热带和温带森林系统的  $\text{CO}_2$  通量月累积值约在当地时间夏季达到最低, 即碳汇能力最强。热带森林生态系统较之其他气候带的森林生态系统表现为更强的碳汇。森林生态系统长时间序列碳交易受到叶面积指数、树龄、降水等多种因素的影响, 年轻林分是更强的碳汇。

森林生态系统  $\text{CO}_2$  通量数据的建模主要集中于  $\text{CO}_2$  通量数值预测和下垫面物候特征的提取, 植被生长曲线和通量值模拟主要通过统计模型和机制模型 2 种模式进行。基于  $\text{CO}_2$  通量通过建立统计模型提取其物候特征是  $\text{CO}_2$  通量建模的重要方向, 统计模型所提取的物候特征参数主要包括: 生长季长度、生长季中点、生长季开始和结束日期、 $\text{CO}_2$  通量增长率等。基于机理模型的  $\text{CO}_2$  通量数值预测/模拟受气候背景的影响较大, 不同局域尺度的  $\text{CO}_2$  通量预测需准确评估当地微气象环境情况和植被生长状况, 其中空气温度、土壤含水量是主要环境控制因子。

基于遥感技术的辅助测量是森林生态系统碳循环研究的重要手段, 针对遥感数据和地面观测数据的建模和验证主要集中在遥感总初级生产力和地面观测数据的线性相关性分析, 其他例如叶面积指数、增强植被指数和归一化植被指数等遥感植被产品对辅助研究森林生长状态对其  $\text{CO}_2$  通量的影响也是重要的碳循环研究内容。



## 5.2 研究展望

基于涡动相关技术的森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量观测研究为森林生态系统碳循环研究提供了观测手法,是目前使用最广泛且科学的温室气体观测的技术手段。基于该技术的 CO<sub>2</sub> 通量观测和研究分析是现在和未来全球变化生态学的研究热点。但由于受观测设备故障、恶劣天气事件和人为活动等因素的影响,CO<sub>2</sub> 通量数据的质量检验和数据插补依然是未来 CO<sub>2</sub> 通量研究的前提之一。

森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量动态特征的现象讨论趋于成熟,未来局域尺度森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究应该集中于提高 CO<sub>2</sub> 通量足迹模型计算精度和讨论局域森林生态系统中不同林分对大气 CO<sub>2</sub> 的贡献强度,结合通量和微气象观测数据建立植物生理过程参数化模型和设计控制实验,提取其物候特征并且预测气候和景观格局变化对森林碳交换的影响。由于国际通量网和其他区域通量共享系统提供了数据平台,区域-全球尺度森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究未来将关注多站点通量,气象数据长时间序列的整合分析,主要讨论 CO<sub>2</sub> 通量气候特征与碳源/汇的空间格局。为了解未来气候变化背景下全球植被生理活动过程和其温室气体排放动态,使用 CO<sub>2</sub> 通量数据与区域大气模型、生态生理模型等地球系统模型结合,讨论气象/气候系统、能量传输、生物圈对森林生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换影响,亦可使用该过程对生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换进行预测是未来重要的研究方向。

在中国生态文明建设的背景下,未来森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量研究可结合社会经济、土地利用等数据,讨论城市化过程对森林生态系统碳循环的影响,完善森林生态系统服务功能体系,评估局域自然-社会系统碳平衡,为合理森林布局、保护生态环境和社会可持续发展提供理论依据和参考。

## 6 参考文献

- [1] FIELD C B. Plant physiology of the “missing” carbon sink [J]. *Plant Physiol*, 2001, **125**(1): 25 – 28.
- [2] XU Sixiao, ZHAO Xinqun, FU Yuling, *et al.* Characterizing CO<sub>2</sub> fluxes for growing and non-growing seasons in a shrub ecosystem on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Sci China Ser D-Earth Sci*, 2005, **48**(suppl I): 133 – 140.
- [3] RUI MY A, JARVIS P G, BALDOCCHI D D, *et al.* CO<sub>2</sub> fluxes over plant canopies and solar radiation: a review [J]. *Adv Ecol Res*, 1995, **26**: 1 – 68.
- [4] CHEVALLIER J. Carbon futures and macroeconomic risk factors: a view from the EUETS [J]. *Energy Econ*, 2009, **31**(4): 614 – 625.
- [5] 徐小军, 周国模, 杜华强, 等. 缺失数据插补方法及其参数估计窗口大小对毛竹林 CO<sub>2</sub> 通量估算的影响[J]. *林业科学*, 2015, **51**(9): 141 – 149.  
XU Xiaojun, ZHOU Guomo, DU Huaqiang, *et al.* Effects of interpolation and window sizes in *Phyllostachys edulis* forest for parameter estimation on calculation of CO<sub>2</sub> flux [J]. *Sci Silv Sin*, 2015, **51**(9): 141 – 149.
- [6] 徐小军, 周国模, 莫路锋, 等. 一种面向下垫面不均一的森林碳通量监测方法[J]. *中国科学: 信息科学*, 2013, **43**(10): 1342 – 1352.  
XU Xiaojun, ZHOU Guomo, MO Lufeng, *et al.* Study on carbon flux measurement using wireless sensor network under inhomogeneous surface condition [J]. *Sci Sin Inf*, 2013, **43**(10): 1342 – 1352.
- [7] NOORMETS A, CHEN Jiqun, GU Lianhong, *et al.* The phenology of gross ecosystem productivity and ecosystem respiration in temperate hardwood and conifer chronosequences[M]//NOORMETS A. *Phenology of Ecosystem Processes*, New York: Springer, 2009: 59 – 85.
- [8] AUBINET M, VESALA T, PAPAIE D. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*[M]. [s. l.]: Springer Science & Business Media, 2012.
- [9] 龚元, 赵敏, 姚鑫, 等. 城市生态系统复合下垫面碳通量特征: 以上海市奉贤大学城为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2017, **26**(1): 91 – 99.  
GONG Yuan, ZHAO Min, YAO Xin, *et al.* Study on carbon flux characteristics of the underlying surface of urban ecosystem: a case study of Shanghai Fengxian University City [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2017, **26**(1): 91 – 99.
- [10] 龚元, 郭智娟, 张凯迪, 等. 植被对亚热带城市生态系统 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(2): 530 – 541.  
GONG Yuan, GUO Zhijuan, ZHANG Kaidi, *et al.* Impact of vegetation on CO<sub>2</sub> flux of a subtropical urban ecosystem [J]. *Acta Ecol Sin*, 2019, **39**(2): 530 – 541.

- [11] ZHANG Kun, LIU Naiwen, CHEN Yue, *et al.* Comparison of different machine learning method for GPP estimation using remote sensing data[C]// IOP. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. [s. l.]: IOP Publishing, 2019, **490**(6): 062010. doi: [10.1088/1757-899X/490/6/062010](https://doi.org/10.1088/1757-899X/490/6/062010).
- [12] NEY P, GRAF A, BOGENA H, *et al.* CO<sub>2</sub> fluxes before and after partial deforestation of a central European spruce forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2019, **274**: 61 – 74.
- [13] PILLAI N D, NANDY S, PATEL N R, *et al.* Integration of eddy covariance and process-based model for the intra-annual variability of carbon fluxes in an Indian tropical forest [J]. *Biodiversity Conserv*, 2019, **28**(6): 1 – 19.
- [14] KIM J H, HWANG T, SCHAAF C L, *et al.* Seasonal variation of source contributions to eddy-covariance CO<sub>2</sub> measurements in a mixed hardwood-conifer forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2018, **253/254**: 71 – 83.
- [15] JOINER J, YOSHIDA Y, ZHANG Y, *et al.* Estimation of terrestrial global gross primary production (GPP) with satellite data-driven models and eddy covariance flux data [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(9): 1346.
- [16] KLJUN N, CALANCA P, ROTACH M W, *et al.* A simple two-dimensional parameterisation for flux footprint prediction (FFP) [J]. *Geoscientif Mod Dev*, 2015, **8**(11): 3695 – 3713.
- [17] WOFSY S C, GOULDEN M L, MUNGER J W, *et al.* Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest [J]. *Science*, 1993, **260**(5112): 1314 – 1317.
- [18] NEFTEL A, SPIRIG C, AMMANN C. Application and test of a simple tool for operational footprint evaluations [J]. *Environ Pollut*, 2008, **152**(3): 644 – 652.
- [19] SCHMID H P. Source areas for scalars and scalar fluxes [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1994, **67**(3): 293 – 318.
- [20] LANDSBERG J J, WARING R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning [J]. *For Ecol Manage*, 1997, **95**(3): 209 – 228.
- [21] LLOYD J, TAYLOR J A. On the temperature dependence of soil respiration [J]. *Funct Ecol*, 1994, **8**(3): 315 – 323.
- [22] PILEGAARD K, HUMMELSHØJ P, JENSEN N O, *et al.* Two years of continuous CO<sub>2</sub> eddy-flux measurements over a Danish beech forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, **107**(1): 29 – 41.
- [23] PITA G, GIELEN B, ZONA D, *et al.* Carbon and water vapor fluxes over four forests in two contrasting climatic zones [J]. *Agric For Meteorol*, 2013, **180**: 211 – 224.
- [24] GU Lianhong, POST W M, BALDOCCHI D D, *et al.* Characterizing the seasonal dynamics of plant community photosynthesis across a range of vegetation types[M]//NOORMETS A. *Phenology of Ecosystem Processes*. New York: Springer, 2009: 35 – 58.
- [25] BRACHO R, STARR G, GHOLZ H L, *et al.* Controls on carbon dynamics by ecosystem structure and climate for southeastern U.S. slash pine plantations [J]. *Ecol Monogr*, 2012, **82**(1): 101 – 128.
- [26] BESNARD S, CARVALHAIS N, ARAIN M A, *et al.* Memory effects of climate and vegetation affecting net ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes in global forests[J]. *PLoS One*, 2019, **14**(2): e0211510. doi: [10.1371/journal.pone.0211510](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211510).
- [27] 纪小芳, 鲁建兵, 杨军, 等. 凤阳山针阔混交林碳通量变化特征及其影响因子[J]. 东北林业大学学报, 2019, **47**(3): 49 – 55.
- JI Xiaofang, LU Jianbing, YANG Jun, *et al.* Carbon flux variation characteristics and its influencing factors in coniferous and broad-leaved mixed forest in Fengyang Mountain [J]. *J Northeast For Univ*, 2019, **47**(3): 49 – 55.
- [28] 王春林, 于贵瑞, 周国逸, 等. 鼎湖山常绿针阔叶混交林 CO<sub>2</sub> 通量估算[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, **36**(suppl 1): 119 – 129.
- WANG Chunlin, YU Guirui, ZHOU Guoyi, *et al.* CO<sub>2</sub> flux evaluation over the evergreen coniferous and broad-leaved mixed forest in Dinghushan, China [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, **36**(suppl 1): 119 – 129.
- [29] BALDOCCHI D. Flux footprints within and over forest canopies [J]. *Bound-Lay Meteorol*, 1997, **85**(2): 273 – 292.
- [30] 金莹, 张志强, 方显瑞, 等. 杨树人工林生态系统通量贡献区分析[J]. 生态学报, 2012, **32**(12): 3966 – 3974.
- JIN Ying, ZHANG Zhiqiang, FANG Xianrui, *et al.* Footprint analysis of turbulent flux over a poplar plantation in Northern China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(12): 3966 – 3974.
- [31] 龚笑飞, 陈丽萍, 莫路锋. 基于 FSAM 模型的毛竹林碳通量贡献区研究[J]. 西南林业大学学报, 2015, **35**(6): 37 – 44.
- GONG Xiaofei, CHEN Liping, MO Lufeng. Research of flux footprint of anji bamboo forest ecosystems based on the

- FSAM model [J]. *J Southwest For Univ*, 2015, **35**(6): 37 – 44.
- [32] OGUNJEMIYO S O, KAHARABATA S K, SCHUEPP P H, *et al.* Methods of estimating CO<sub>2</sub>, latent heat and sensible heat fluxes from estimates of land cover fractions in the flux footprint [J]. *Agric For Meteorol*, 2003, **117**(3/4): 125 – 144.
- [33] 张慧. 中亚热带人工林碳通量贡献区的评价研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.  
ZHANG Hui. *The Study of Flux Footprint in Typical Subtropical Monsoon Man-Planted Forest*[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2012.
- [34] 唐祥, 陈文婧, 李春义, 等. 北京八达岭林场人工林净碳交换及其环境影响因子[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(11): 3057 – 3064.  
TANG Xiang, CHEN Wenjing, LI Chunyi, *et al.* Net carbon exchange and its environmental affecting factors in a forest plantation in Badaling, Beijing of China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(11): 3057 – 3064.
- [35] WANG Weiguo, DAVIS K J. A numerical study of the influence of a clearcut on eddy-covariance fluxes of CO<sub>2</sub> measured above a forest [J]. *Agric For Meteorol*, 2008, **148**(10): 1488 – 1500.
- [36] 李小梅, 张秋良. 兴安落叶松林生长季碳通量特征及其影响因素[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, **43**(6): 121 – 128.  
LI Xiaomei, ZHANG Qiuliang. Carbon flux and its impact factors of *Larix gmelinii* forest ecosystem during growing season [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2015, **43**(6): 121 – 128.
- [37] 牛晓栋, 江洪, 张金梦, 等. 浙江天目山老龄森林生态系统 CO<sub>2</sub> 通量特征[J]. 应用生态学报, 2016, **27**(1): 1 – 8.  
NIU Xiaodong, JIANG Hong, ZHANG Jinmeng, *et al.* Characteristics of CO<sub>2</sub> flux in an old growth mixed forest in Tianmu Mountain, Zhejiang, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(1): 1 – 8.
- [38] 张一平, 沙丽清, 于贵瑞, 等. 热带季节雨林碳通量年变化特征及影响因子初探[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2006, **36**(suppl 1): 139 – 152.  
ZHANG Yiping, SHA Liqing, YU Guirui, *et al.* Annual variation of carbon flux and impact factors in the tropical seasonal rain forest of Xishuangbanna, SW China [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, **36**(suppl 1): 139 – 152.
- [39] LIU Yunfen, SONG Xia, YU Guirui, *et al.* Seasonal variation of CO<sub>2</sub> flux and its environmental factors in evergreen coniferous plantation [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2005, **48**(suppl 1): 123 – 132.
- [40] TUCKER C J, PINZON J E, BROWN M E, *et al.* An extended AVHRR 8 - km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data [J]. *Int J Remote Sens*, 2005, **26**(20): 4485 – 4498.
- [41] RICHARDSON A D, BLACK T A, CIAIS P, *et al.* Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity [J]. *Philos Trans Roy Soc B Biol Sci*, 2010, **365**(1555): 3227 – 3246.
- [42] NIU Shuli, FU Yuling, GU Lianhong, *et al.* Temperature sensitivity of canopy photosynthesis phenology in northern ecosystems[C]//SCHWARTZ M. *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Dordrecht: Springer, 2013: 503 – 519.
- [43] GONSAMO A, CHEN J M, PRICE D T, *et al.* Land surface phenology from optical satellite measurement and CO<sub>2</sub> eddy covariance technique [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2012, **117**(G3): 1 – 18.
- [44] LIPOVETSKY S. Double logistic curve in regression modeling [J]. *J Appl Statist*, 2010, **37**(11): 1785 – 1793.
- [45] MANCUSO S, PASQUALI G, FIORINO P. Phenology modelling and forecasting in olive (*Olea europaea* L.) using artificial neural networks [J]. *Adv Horti Sci*, 2002, **16**(3): 155 – 164.
- [46] PAPAIE D, VALENTINI R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization [J]. *Global Change Biol*, 2003, **9**(4): 525 – 535.
- [47] HE Honglin, YU Guirui, ZHANG Leiming, *et al.* Simulating CO<sub>2</sub> flux of three different ecosystems in China FLUX based on artificial neural networks [J]. *Sci China Ser D Earth Sci*, 2006, **49**(2): 252 – 261.
- [48] 唐欢, 李振旺, 丁蕾, 等. 基于地面涡度数据的中国草原区 GPP 遥感产品验证[J]. 草业科学, 2018, **35**(11): 2568 – 2583.  
TANG Huan, LI Zhenwang, DING Lei, *et al.* Validation of GPP remote sensing products using eddy covariance flux observations in the grassland area of China [J]. *Pratac Sci*, 2018, **35**(11): 2568 – 2583.
- [49] 杜启勇, 林爱文, 付醒. 基于遥感和美国碳通量观测数据的 GPP 模型比较研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, **41**(2): 138 – 141, 146.  
DU Qiyong, LIN Aiwen, FU Xing. Comparison of multiple GPP models using remote sensing and American carbon flux



- data [J]. *Geomat Spat Inf Technol*, 2018, **41**(2): 138 – 141, 146.
- [50] 刘啸添, 周蕾, 石浩, 等. 基于多种遥感植被指数、叶绿素荧光与 CO<sub>2</sub> 通量数据的温带针阔混交林物候特征对比分析[J]. *生态学报*, 2018, **38**(10): 3482 – 3494.
- LIU Xiaotian, ZHOU Lei, SHI Hao, *et al.* Phenological characteristics of temperate coniferous and broad-leaved mixed forests based on multiple remote sensing vegetation indices, chlorophyll fluorescence and CO<sub>2</sub> flux data [J]. *Acta Ecol Sin*, 2018, **38**(10): 3482 – 3494.
- [51] 史桂芬, 贺伟光. 涡度相关技术在农田生态系统通量研究中的应用[J]. *现代农业科技*, 2019(6): 141 – 143.
- SHI Guifen, HE Weiguang. Application of eddy covariance technology in flux research of farmland ecosystem [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2019(6): 141 – 143.
- [52] 同小娟, 张劲松, 孟平. 基于涡度相关法的森林生态系统碳交换及其控制机制[J]. *温带林业研究*, 2018, **1**(2): 1 – 9, 14.
- TONG Xiaojuan, ZHANG Jinsong, MENG Ping. Carbon exchange between forest ecosystems and the atmosphere and its control mechanisms based on the eddy covariance method [J]. *J Temp For Res*, 2018, **1**(2): 1 – 9, 14.
- [53] LAI Chunta, KATUL G, OREN R, *et al.* Modeling CO<sub>2</sub> and water vapor turbulent flux distributions within a forest canopy [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2000, **105**(D21): 26333 – 26351.
- [54] MEDLYN B E, ROBINSON A P, CLEMENT R, *et al.* On the validation of models of forest CO<sub>2</sub> exchange using eddy covariance data: some perils and pitfalls [J]. *Tree Physiol*, 2005, **25**(7): 839 – 857.
- [55] BALDOCCHI D D, WILSON K B. Modeling CO<sub>2</sub> and water vapor exchange of a temperate broadleaved forest across hourly to decadal time scales [J]. *Ecol Mod*, 2001, **142**(1/2): 155 – 184.
- [56] PARK H, IJIMA Y, YABUKI H, *et al.* The application of a coupled hydrological and biogeochemical model (CHANGE) for modeling of energy, water, and CO<sub>2</sub> exchanges over a larch forest in eastern Siberia [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2011, **116**: D15102.
- [57] XIE Zhenghui, WANG Linying, JIA Binghao, *et al.* Measuring and modeling the impact of a severe drought on terrestrial ecosystem CO<sub>2</sub> and water fluxes in a subtropical forest [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2016, **121**(10): 2576 – 2587.
- [58] CHEN Xiongwen. Modeling the effects of global climatic change at the ecotone of boreal larch forest and temperate forest in northeast China [J]. *Clim Change*, 2002, **55**(1/2): 77 – 97.
- [59] SHI Tingting, GUAN Dexin, WANG Anzhi, *et al.* Modeling canopy CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O exchange of a temperate mixed forest [J]. *J Geophys Res Atmos*, 2010, **115**(D7): D17117.
- [60] 李雪建, 毛方杰, 杜华强, 等. 双集合卡尔曼滤波 LAI 同化结合 BEPS 模型的竹林生态系统碳通量模拟[J]. *应用生态学报*, 2016, **27**(12): 3797 – 3806.
- LI Xuejian, MAO Fangjie, DU Huaqiang, *et al.* Simulating of carbon fluxes in bamboo forest ecosystem using BEPS model based on the LAI assimilated with Dual Ensemble Kalman Filter [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2016, **27**(12): 3797 – 3806.
- [61] 陈晨, 沃文伟, 范文义. 森林生态系统碳循环模型参数优化[J]. *东北林业大学学报*, 2016, **44**(5): 15 – 19.
- CHEN Chen, WO Wenwei, FAN Wenyi. Optimization of ecosystem carbon cycle model parameters [J]. *J Northeast For Univ*, 2016, **44**(5): 15 – 19.
- [62] 杨延征, 马元丹, 江洪, 等. 基于 IBIS 模型的 1960–2006 年中国陆地生态系统碳收支格局研究[J]. *生态学报*, 2016, **36**(13): 3911 – 3922.
- YANG Yanzheng, MA Yuandan, JIANG Hong, *et al.* Evaluating the carbon budget pattern of Chinese terrestrial ecosystem from 1960 to 2006 using Integrated Biosphere Simulator [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36**(13): 3911 – 3922.
- [63] 王萍. 基于 IBIS 模型的东北森林净第一性生产力模拟[J]. *生态学报*, 2008, **29**(6): 3213 – 3220.
- WANG Ping. Simulation of forest net primary productivity in northeastern China with IBIS [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **29**(6): 3213 – 3220.
- [64] 王培娟, 谢东辉, 张佳华, 等. 长白山森林植被 NPP 主要影响因子的敏感性分析[J]. *地理研究*, 2008, **27**(2): 323 – 331.
- WANG Peijuan, XIE Donghui, ZHANG Jiahua, *et al.* Sensitivity analysis for primary factors of the forest net primary productivity in Changbaishan Natural Reserve based on process model [J]. *Geogr Res*, 2008, **27**(2): 323 – 331.