涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用

陈世苹^{1,2*} 游翠海^{1,2} 胡中民³ 陈 智⁴ 张雷明⁴ 王秋凤⁴

¹中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³华南师范大学地理科学学院, 广州 510631; ⁴中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101

摘 要 通量观测是定量描述土壤-植被-大气间物质循环和能量交换过程的基础。涡度相关技术作为直接测量植被冠层与大气间能量与物质交换通量的技术手段, 已经逐步发展成为国际通用的通量观测标准方法。随着涡度相关技术在全球碳水循环研究中的广泛应用, 长期连续的通量观测正在为准确评价生态系统碳固持能力、水分和能量平衡状况、生态系统对全球气候变化的反馈作用、区域和全球尺度模型的优化与验证、极端事件对生态系统结构与功能影响等方面的研究提供重要数据支撑和机制理解途径。通过站点尺度通量长期动态观测, 明确了不同气候区和植被类型生态系统碳水通量强度基线及其季节与年际变异特征。通过多站点联网观测, 在区域和全球尺度研究生态系统碳通量空间变异特征, 揭示了区域尺度上温度和降水对生态系统碳通量空间格局的生物地理学控制机制。该文概括地介绍了涡度相关技术的基本原理、假设与系统构成, 总结了涡度通量长期联网观测在陆地生态系统碳水通量研究中的主要应用, 并对通量研究发展前景进行了展望。

关键词 涡度相关技术; 碳通量; 水通量; 年际动态; 空间格局; 长期通量监测; 联网观测

陈世苹, 游翠海, 胡中民, 陈智, 张雷明, 王秋凤 (2020). 涡度相关技术及其在陆地生态系统通量研究中的应用. 植物生态学报, 44, 291–304. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0351

Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems

CHEN Shi-Ping^{1,2*}, YOU Cui-Hai^{1,2}, HU Zhong-Min³, CHEN Zhi⁴, ZHANG Lei-Ming⁴, and WANG Qiu-Feng⁴

¹State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³School of Geography, South China Normal University, Guangzhou 510631, China; and ⁴Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract

Carbon (C) and water cycles are the most critical processes in terrestrial ecosystems, which links the materials and energy flows through the pedosphere-biosphere-atmosphere integration. Most attention has been paid to the responses of C and water and their feedbacks to global climate change. Flux observation is the basic pathway to quantify the rate of material and energy exchange across soil-plant-atmosphere continuum. As an only technique can directly measure the carbon, water and energy fluxes between vegetation and atmosphere, eddy covariance (EC) technique has been considered as a standard method for flux observation internationally. With broad applications of EC technique on global C and water cycles, long-term flux observations provide scientific data on assessing ecosystem C sequestration capability, water and energy balance, and ecosystem feedback to climate change; optimizing and validating models on regional and global scales; and understanding responses of ecosystem functions to extreme events. Based on long-term flux observation in individual site, scientists have described the seasonal and inter-annual dynamics, and quantified the baseline rates of ecosystem carbon and water fluxes across different climate and vegetation types. With the development of regional and global flux networks, researchers further understood the spatial patterns of ecosystem carbon and water fluxes and their climatic control mechanisms at regional and global scales. This paper briefly introduces the basic principles, hypothesis and instrument system composition, summarizes the major applications of EC observation on C and water fluxes in terrestrial ecosystems, and finally discusses future directions of EC observation network.

收稿日期Received: 2019-12-17 接受日期Accepted: 2020-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFA0604801)和国家自然科学基金(41773084)。Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFA0604801), and the National Natural Science Foundation of China (41773084).

* E-mail: spchen@ibcas.ac.cn

Key words eddy covariance technique; carbon flux; water flux; inter-annual dynamics; spatial pattern; long-term flux observation; flux network

Chen SP, You CH, Hu ZM, Chen Z, Zhang LM, Wang QF (2020). Eddy covariance technique and its applications in flux observations of terrestrial ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 44, 291–304. DOI: 10.17521/cjpe.2019.0351

能量流动和物质循环是地圈-生物圈-大气圈相互作用关系的纽带,同时也是生态系统生态学研究的核心内容(Yu *et al.*, 2014; 于贵瑞和孙晓敏, 2017)。定量描述大气-植被-土壤间物质循环和能量交换过程是以通量测量为基础的。通量作为一个物理学概念,是指单位时间内通过某一界面单位面积所输送的动量、热量和物质等物理量(Aubinet *et al.*, 2012; 于贵瑞和孙晓敏, 2017)。在环境、气象和生态学领域,通量研究主要是针对生态系统尺度的植被-大气界面或土壤-大气界面的物质流和能量流而展开,所关注且可直接测量的通量主要有生态系统的能量输入和输出通量(包括辐射通量、显热通量和潜热通量)和气体(大量或痕量温室气体)交换通量等(于贵瑞和孙晓敏, 2017)。随着全球变化研究的广泛开展,气体通量作为反映生态系统对环境变化响应的重要指标越来越受到关注。

涡度相关技术利用微气象原理估算垂直风速与物质或能量脉动的协方差,是可以直接测量植被冠层与大气间能量与物质交换通量的重要技术,目前已经发展成为国际通用的通量观测标准方法(Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2003, 2020; 于贵瑞和孙晓敏, 2017)。与常规通量观测方法相比,涡度相关技术主要有以下几个优点:首先,涡度相关技术测得的生态系统净交换量是整个生态系统与大气物质能量交换的整合(Baldocchi *et al.*, 2001; Aubinet, 2008)。以CO₂为例,测得的净碳交换量(NEE)是光合吸收和呼吸释放的整合值。其次,在时间尺度上,此方法可以实现1天24小时,1年365天的连续测量,提供从分、小时到日、月、年以及年际等更长时间尺度的通量观测数据。第三,在空间尺度上,涡度相关法所测量的单站点通量的尺度显著增大,测量范围从数百平方米到几平方千米。

经过了近20年的发展,涡度相关技术已被广泛应用于不同生态系统碳水循环研究中,并形成了多个区域、国家乃至全球尺度的通量观测网络。全球通量观测网络联盟(FLUXNET)至今已发展为全球900多个观测站点,遍布不同的气候区和植被区系类型的通量观测网络(Baldocchi, 2020)。中国通量观

测联盟(ChinaFLUX)也已发展成拥有近80个台站的国家尺度陆地生态系统通量观测研究网络体系。通量联网观测使得研究者不但更准确地量化了生态系统碳水通量及其时间变异,同时对碳水循环过程对全球变化的响应与反馈机制有了更深入的了解(于贵瑞等, 2014; 于贵瑞和孙晓敏, 2017; Baldocchi, 2020)。本文将概括介绍涡度相关技术的基本原理、假设与系统构成,系统总结涡度相关技术在陆地生态系统碳水通量研究中的主要应用,最后对通量研究发展前景与趋势进行展望。

1 涡度相关技术的基本原理、应用假设与系统构成

1.1 涡度相关技术的基本原理与应用假设

地表湍流是近地层大气运动的一个重要物理特征,湍流输送是地面或植被与大气间进行能量与物质交换的主要方式。19世纪90年代,雷诺提出了雷诺分解法(Reynolds, 1895),成为研究湍流运动的基本方法。湍流运动中的各有关物理量(动量、风速、气温等)可以分解为两部分:有规律的平均值和不规则的脉动值。垂直通量可以通过确定两个时刻之间物质或能量的垂直方向的脉动值,也就是垂直风速和物质浓度的协方差来计算。在下垫面平坦均匀的理想状态下,基于物质和能量守恒方程,涡度相关技术可以通过测定和计算物理量(如温度、CO₂、H₂O等)的脉动与垂直风速的脉动的协方差求算湍流通量(Baldocchi *et al.*, 2001; Aubinet *et al.*, 2012; 于贵瑞和孙晓敏, 2017)。

由于涡度相关技术和测定环境的复杂性,使得该方法在实际应用中还面临着诸多挑战。基于物质守恒方程,涡度相关技术要求测量仪器应安装在通量随高度不发生变化的内边界层即常通量层内,即在通量观测的应用中需要满足如下几个基本假设(图1):大气稳态性,即空气密度脉动是可以忽略的;平均垂直风速为0;下垫面匀质,无水平方向的平流通量;下垫面有足够大的风浪区,单点的时间平均可以代替水平面积平均状况;下垫面冠层高度与仪器测量高度间的源汇为0,即随着高度的增加,通

量是恒定的; 下垫面的湍流运动足够充分, 尽可能被仪器完全测定(Aubinet *et al.*, 2012)。但是在自然环境下, 以上基本假设是很难完全满足的, 导致涡度相关技术在实际应用中存在诸多不确定性(温学发等, 2004; 于贵瑞和孙晓敏, 2017)。因此在通量数据处理过程中, 通常利用密度校正(WPL校正)消除水汽和温度对CO₂密度脉动的影响(Webb *et al.*, 1980; Leuning, 2007); 利用坐标旋转校正使得平均垂直风速为0 (Finnigan *et al.*, 2003); 利用摩擦风速(u^*)校正解决夜间湍流运动不充分所造成的测量误差(Falge *et al.*, 2001); 利用源区分析获得地面非匀质下垫面的贡献(Finnigan, 2004); 通过量化平流通量和冠层存储减少由于下垫面不平坦或高郁闭度植被层碳存储所造成的通量测定误差(Aubinet *et al.*, 2005)。

1.2 涡度相关技术的不确定性与解决方案

利用涡度相关技术的实际观测中, 由于仪器设备限制、复杂的大气和下垫面条件, 上文提到的基本假设所需条件很难得到满足, 导致通量测量存在一定程度的不确定性。针对这些可能存在的测量误差, 在通量数据使用之前必须对测量数据进行相应的数据校正(图1)。

1.2.1 观测仪器系统误差的影响

涡度相关系统是一个多类型仪器的整合系统, 仪器的时间响应特征、功率谱特征、各分量的时间同步性等的差异都可能成为测量结果偏差的原因(Wilson *et al.*, 2002)。通常采用谱分析、频率响应校正等方法评估仪器对高频信号的响应能力(Aubinet *et al.*, 2012)。此外, 涡度测定需要满足垂直风速为0的假设条件, 但是由于仪器安装以及下垫面不平坦等实际情况, 导致其很难实现, 因此数据处理时会利用坐标旋转校正使得平均垂直风速为0 (Finnigan *et al.*, 2003)。目前应用比较广泛的是二次坐标旋转, 以及应对复杂地形的平面拟合坐标旋转(Wilczak *et al.*, 2001; Finnigan *et al.*, 2003; Göckede *et al.*, 2008)。

1.2.2 复杂气象条件的影响

现实中的大气条件并非稳态, 需要考虑因热量或水汽通量的输送所引起的气体密度变化。通常采用WPL校正消除水汽和温度对CO₂密度脉动的影响(Webb *et al.*, 1980; Leuning, 2007)。涡度相关系统的测定, 需要下垫面的湍流运动比较剧烈, 但是大气边界层一般比较稳定, 有时还会有逆温层, 尤其是在夜间, 这就使得CO₂滞留在植被冠层内, 导致通

图1 涡度相关技术通量观测示意图(以CO₂通量观测为例)。左图为理想状态下大气及植被边界层状况, 右图为实际情况下的夜间与白天的大气及植被边界层情况。图中显示了涡度相关系统在实际观测中, 由于仪器设备限制、复杂的大气和下垫面条件, 使得理想状态基本假设所需条件很难满足, 针对实际状况下可能存在的不确定性来源, 在通量数据使用之前需要采用相应的校正方法对测量数据进行校正。左图中 F 为CO₂通量, ω 为垂直风速, ρ 为大气CO₂密度, T 为时间。

Fig. 1 Flux measurement based on eddy covariance technique (for example CO₂ flux measurement). The left part shows the boundary layer of canopy and atmosphere in an ideal state, and the right part shows those in a real state. The basic hypotheses of eddy covariance observation in the ideal state cannot be met due to the limitations of instruments, complex atmospheric and canopy terrains in a natural ecosystem. Proper data correction approaches need to be conducted to eliminate the uncertainty of flux data. F is CO₂ flux, ω is the vertical wind speed, ρ is CO₂ density and T is time.

量观测值低于真实值。对于夜间通量低估的问题,一般采用 u^* 校正,剔除临界值(0.15–0.30)以下的数
据并进行插补(Falge *et al.*, 2001; Aubinet, 2008)。对于森林等高大植被生态系统,可以通过测定林下
CO₂和能量储量来减小复杂下垫面通量测量的误差
(Aubinet *et al.*, 2005; Yao *et al.*, 2012)。

1.2.3 复杂下垫面地形条件的影响

涡度系统测定要求下垫面平坦、匀质,但实际上很多观测站都建在地形复杂的非匀质下垫面条件
下,包含多种不同的地形或植被类型,这就需要计算湍流通量的贡献源区来评估不同下垫面类型的贡
献(Baldocchi *et al.*, 2000; Finnigan, 2004; Foken & Leclerc, 2004)。同时,复杂下垫面也很难满足平流
通量为0的理想状态假设,如在山地或坡地生态系
统中,平流通量导致大量CO₂泄流,这就需要通过
量化平流通量减少通量测定误差(Aubinet *et al.*,
2005)。

1.2.4 数据处理(插补和拆分)方法的影响

通量数据很多误差来自于涡度通量观测时间序
列中的缺失值。缺失值越多,插补数据的不确定性
越大,长时间数据的缺失,会对年累积值的计算造
成较大的误差(Falge *et al.*, 2001)。此外,不同的插补
和净碳通量拆分方法都会对通量的估算造成很大不
确定性,如对比研究表明不同的碳通量拆分方法会
造成年尺度生产力估算10%左右的变差(Desai *et al.*,
2008; Lasslop *et al.*, 2010)。

以上这些针对涡度相关技术测量不确定性的数
据处理和校正方法都已经被引入涡度通量数据的处
理程序中(Aubinet *et al.*, 2012)。随着区域和全球通
量联网观测的发展,数据处理过程的标准化变得更
为重要和迫切,这一需求也催生仪器供应商开发出
了通量数据在线处理软件系统(如目前常用的
Eddypro)。这些商业化的软件涵盖了以上通量数据
的校正方法,并提供针对不同类型生态系统的数
据处理解决方案,方便研究者更便捷准确地处理和使
用通量数据(Burba, 2013)。

1.3 涡度相关技术观测系统构成与设立

虽然早在100多年前雷诺就提出了涡度相关技
术的理论基础,但由于缺乏快速响应的观测仪器,
制约了涡度相关技术的发展和应。直到20世纪80
年代,随着计算机和观测仪器技术的极大进步,涡
度相关技术才得以普遍应用(Baldocchi *et al.*, 2001;

于贵瑞和孙晓敏, 2017)。通量站的配置除了目标观
测通量外,还应根据研究目的配以相应解释变量的
观测。在野外实际观测中,涡度相关系统主要由通
量观测系统、气象要素观测系统、植被和土壤观测
系统等部分组成。

通量观测系统因所使用的气体分析仪类型不同
而被分为开路系统和闭路系统两种类型。由于具有
便于安装调试、不需要观测人员过多的现场维护和
标定等优点,目前开放式通量观测系统被更广泛地
使用。开放式通量观测系统由开放式气体分析仪、
三维超声风速仪和数据采集系统组成,可以高频
(10–20 Hz)测定并记录大气CO₂和H₂O等气体浓度
以及三维超声风速,长期监测冠层-大气界面的动
量通量、显热通量、潜热通量和CO₂等温室气体通
量等湍流过程(Aubinet *et al.*, 2012)。选择不同的气
体分析仪,可对不同的温室气体进行监测,CO₂和
H₂O的分析仪性能目前已比较成熟稳定,CH₄和N₂O
等温室气体分析仪也在不断地研发和改进中(Burba,
2013)。在通量观测同时,气象要素观测系统测定并
记录太阳辐射、降水量、大气温湿度、土壤温湿度
等气象观测指标。此外,为了更好地了解并解释生
态系统碳水等通量的季节和年际变化特征,在生长
季还需对通量观测范围内的植被和土壤相关指标进
行定期的观测,主要包括植被生产力、物种组成、
碳水交换生理特征参数、土壤理化性质、养分含量
等指标(生态系统固碳项目技术规范编写组, 2015)。

涡度相关技术的迅速发展与仪器设备的改进与
研发是密不可分的。目前,改进的开放式高频红外
分析仪已经解决了原有型号由于仪器表面自加热效
应而导致的CO₂“假吸收”现象(Burba *et al.*, 2008),
大大降低了开路系统在北方寒冷生态系统的测量误
差(Burba, 2013)。自动数据采集和物联网技术的发
展使得研究人员可以实时了解仪器的运行状况和数
据质量。

2 涡度相关技术在陆地生态系统通量研究 中的主要应用

随着涡度相关技术在全球碳水循环研究中的广
泛应用,研究者希望通过长期、连续的通量观测获
得对生态系统碳、水循环的基本过程及其环境反馈
机制更深入的理解,准确评价生态系统碳源汇强度,
水分平衡和能量平衡状况,理解生态系统与大气间

的物质和能量交换特征以及两者之间的相互作用等。通量观测数据目前主要应用于以下几个方面研究。

2.1 站点尺度长期观测对通量时间动态的研究

涡度相关技术对特定生态系统的长期定位连续观测可以用来估算从小时到日、月、年、年际甚至更长时间尺度的生态系统总初级生产力(*GPP*)、生态系统呼吸(*ER*)、生态系统净初级生产力(*NEP*)、生态系统蒸散(*ET*)和能量通量,揭示生态系统各通量的动态变化特征与环境调控机制(Vargas *et al.*, 2010; Ma *et al.*, 2016, 2017)。例如,在全球碳循环研究中,由于缺乏直接观测数据,我们对生态系统年碳通量的大小、年际变异及其长期变化趋势的研究仍存在很大不确定性(Fu *et al.*, 2017; Niu *et al.*, 2017; Baldocchi *et al.*, 2018; Baldocchi, 2020)。通过设立在全球各种植被类型的涡度观测站点的碳通量数据,可以准确地定量区域和全球陆地生态系统年固碳量的大小和变化范围。Hao等(2013)对内蒙古和青藏高原草原通量的长期观测,表明我国高寒草原和北方温带草原生态系统大多处于碳平衡状态,其年净碳交换因受降水的影响有较大的年际间波动,在湿润的年份是弱的碳汇,而在干旱年份极易转变为碳源。Baldocchi等(2018)通过分析全球59个站点544个站年的碳通量数据,发现全球陆地生态系统平均*GPP*、*ER*和*NEP*分别为($1\,294 \pm 684$)、($1\,117 \pm 578$)和(-153 ± 289) $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (负值代表碳吸收)。这些已发表的通量观测数据特别是通量观测系统建立初期的数据,提供了不同气候区和植被类型生态系统碳通量强度的大小与变化范围。

生态系统年固碳量的长期变化趋势是目前碳循环对全球变化响应研究中非常令人关注的问题。长期通量观测数据,使研究者可以进一步了解碳通量是否随着时间发生变化?如果是,变化的速度有多快?Liu等(2019)通过长达19年的通量观测,发现加拿大黑云杉(*Picea mariana*)林*GEP*和*ER*均呈现显著增加的趋势,并使得生态系统的净碳吸收量逐年提高,而春季温度升高是碳通量提高的主要驱动因素。Baldocchi (2020)通过对比1990–2007和2008–2018两个时期全球近2 000个站年的通量数据,发现这两个时期的年净碳通量并没有显著差异。而此前通过卫星和大气 CO_2 浓度观测数据的反演研究的结果均表明近几十年来全球生态系统生产力发生了显著的变

化,出现了明显的“绿化”趋势,即初级生产力显著增加(Park *et al.*, 2016)。最新的研究表明,全球植被“绿化”趋势是多因素共同调控的,除了 CO_2 浓度升高和氮沉降等因素外,这种趋势与人类活动所导致的农田扩增密切相关(Huang *et al.*, 2018)。由于遥感观测和模型拟合方法在生产力估算中较大的不确定性,长期通量观测数据已被很多研究用来验证这些结果(Niu *et al.*, 2017; Baldocchi, 2020)。

2.2 多站点联网观测对碳水通量空间格局的研究

建立在不同气候区和生态系统类型站点的联网观测,为明晰陆地生态系统碳水收支平衡的空间地理分布格局提供了直接的观测数据。在区域和全球观测网络的快速发展和数据共享机制完善的基础上,目前通量观测数据在生态系统碳水循环的应用已经从单个或几个站点通量季节和年际变化分析,发展到区域生态系统碳水收支评价、生态系统碳通量空间格局及其生物地理生态学机制等方面的研究(Xia *et al.*, 2015; Biederman *et al.*, 2017)。

通过整合我国19个森林生态系统的碳通量数据,Chen等(2019)发现中国森林平均*GPP*、*ER*和*NEP*分别为($1\,541 \pm 92$)、($1\,155 \pm 91$)和(382 ± 37) $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,年平均气温解释了不同森林生态系统碳通量变异的40%–54%,与热带雨林和北方森林相比,亚热带和温带森林具有更高的碳固持能力。通过对比全球不同区域的森林生态系统长期通量数据,Yu等(2014)发现我国及东亚地区亚热带森林的平均年固碳量显著高于相同纬度的北美和欧洲森林,贡献了全球森林年碳固持量的8%左右,这与该区域较低的林龄、高的氮沉降输入以及较丰沛的降水和热量资源条件有密切的关系。中国区域52个观测站、亚洲和北半球182个观测站的通量数据整合分析,发现生态系统*GPP*、*ER*和*NEP*存在显著的纬向和经向地带性分布规律,温度和降水共同决定了碳通量的空间格局(Chen *et al.*, 2013, 2015; Xiao *et al.*, 2013)。对全球22个内陆湿地和21个海岸湿地的对比研究表明,湿地生态系统碳通量的强度同样受温度和降水的控制,但由于人类活动干扰,内陆湿地的*GPP*和*ER*显著低于海岸湿地,平均的*NEP*也显著降低(Lu *et al.*, 2017)。另一项全球尺度的通量数据整合研究也证实,生态系统碳通量的空间变化格局主要受到水分和温度的共同调控(Jung *et al.*, 2017)。通过分析建立在北美温带荒漠的6个站点32个站年的

通量数据, 研究者发现冬季降水对荒漠生态系统碳平衡是至关重要的, 近30年冬季降水的减少使得北美荒漠固碳量降低了 $6.8 \text{ Tg C} \cdot \text{a}^{-1}$ (Biederman *et al.*, 2018)。以上这些研究通过跨区域乃至全球尺度多站点的集成分析, 重新论证了气候因素决定生态系统碳吸收和排放通量格局生物地理生态学基本规律, 加强了对空间格局形成机制的认知(于贵瑞等, 2014; Chen *et al.*, 2015)。

2.3 碳水循环模型的验证与优化

模型估算是研究生态系统碳水平衡时空格局与变异规律, 并预测其对全球变化的响应的一种重要研究手段。随着对生态系统结构、功能和生态系统过程认识的不断深入以及遥感、地理信息系统和计算机技术的发展, 陆地生态系统碳水循环模型研究迅速发展, 产生了一大批不同类型和适合不同时空尺度的模型。但是, 模型的不确定和不同模型预测结果间的巨大差异一直是困扰模型应用的难题。因此急切需要与模型时空尺度相匹配的实测数据对模型的预测结果进行评估, 而长期连续的生态系统尺度通量观测数据为模型验证提供了可能, 同时也为模型参数的进一步优化提供了数据基础(Medlyn *et al.*, 2005; Richardson *et al.*, 2010; Melaas *et al.*, 2013)。在区域尺度碳循环模型中, 目前应用较为广泛的是将生态系统碳循环模型(如CEVSA2、Biome-BGC等)与遥感技术相结合的碳过程-遥感模型(Turner *et al.*, 2006; 顾峰雪等, 2010; Gao *et al.*, 2014)。Yuan等(2007)利用来自北美和欧洲通量网的28个站点的通量数据, 构建了日尺度的光利用效率模型(EC-LUE model), 并结合遥感和气象数据对区域尺度GPP进行了模拟。利用ChinaFlux和FLUXNET通量数据对中国和全球GPP拟和结果进行了验证(Yuan *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2013)。

基于Shuttleworth-Wallace (S-W)模型(Shuttleworth & Wallace, 1985), Hu等(2009, 2013)利用通量数据开发了SWH双源蒸散模型, 并利用通量观测数据计算出模型中两个关键参数(土壤表面阻抗和冠层阻抗), 实现了该模型在区域尺度的应用。SWH模型在日尺度与年尺度以及站点、区域尺度的蒸散估算和验证中都取得了较好的模拟效果(Hu *et al.*, 2017)。其中, 基于全球63个FLUXNET通量站点数据验证, 模型模拟值与实测值相关性达到80%以上(Hu *et al.*, 2017)。利用该模型不仅可以估算日尺度

和年尺度生态系统水汽通量, 同时还可对其进行组分拆分, 将蒸散拆分为植被蒸腾和土壤蒸发两个部分(Hu *et al.*, 2009, 2013), 这为进一步阐明水分对群落光合生理的调控作用以及水-碳循环耦合机理提供了重要的数据支撑(Stoy *et al.*, 2019)。利用FLUXNET水汽通量数据, Yuan等(2010)验证了通过改进的PM水循环模型对全球蒸散的拟合结果。

通过结合遥感模型、机器学习等空间尺度扩展方法, 通量联网研究可以评估从生态系统到区域乃至全球尺度的碳水交换量, 为认识大尺度生态系统与大气相互作用提供观测数据和模型验证(Xiao *et al.*, 2010; Yu *et al.*, 2013)。近年来, 通过整合通量、遥感和气象等多源数据, 研究者们陆续发布了多个区域及全球尺度的生态系统碳水通量数据产品(Yang *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2009, 2011; Ueyama *et al.*, 2013; Ichii *et al.*, 2017; Bodesheim *et al.*, 2018)。

2.4 生态系统对气候极端事件的响应研究

全球变化所导致的干旱、热浪、霜冻、降水、风暴等极端气候事件正在增加, 这些极端事件对陆地生态系统结构和功能产生深刻的影响, 进而影响生态系统碳水循环及其对全球气候变化的反馈(Frank *et al.*, 2015; Piao *et al.*, 2019)。在自然条件下, 长期连续的通量观测可以捕捉到生态系统碳水交换对这些难以预测的极端事件的响应, 比如为了研究厄尔尼诺或拉尼娜事件所导致的干旱和极端降水对生态系统的影响, 通常需要至少7年以上的观测数据(Chen *et al.*, 2009)。而生态系统在遭受极端事件影响后的恢复过程也是缓慢的, 通常是以年尺度为单位的观测才能较为全面地了解这一恢复过程, 同时由于不同生态系统功能过程对极端事件的恢复程度和时间存在很大差别, 这将极大地影响我们对极端事件所造成影响的评估(Keenan *et al.*, 2019)。全球各类生态系统的涡度相关系统所监测的长期通量数据, 无疑为研究生态系统结构和功能对极端事件的响应与恢复过程提供了最直接的观测证据(Piao *et al.*, 2019)。

对全球过去30年的气候极端事件的研究表明, 极端气候事件对生态系统碳交换过程的影响存在显著时空差异, 7%的极端事件解释了全球GPP年际变异的78%, 而这些事件中降水极端事件对GPP的影响最大(Zscheischler *et al.*, 2014)。von Buttlar等(2018)

通过对全球102个站点通量数据的分析, 对比了极端高温和干旱对生态系统不同碳交换过程的影响, 结果发现高温促进了生态系统呼吸并抑制了光合作用, 造成生态系统净碳通量的显著下降; 而干旱对各碳通量组分的影响与高温相似, 只是影响的程度要弱一些; 当干旱伴随着高温事件同时发生时, *GPP*通量出现了大幅下降, 而呼吸通量没有显著变化, 从而导致生态系统净碳固持显著降低。此外, 极端气候事件对碳通量的影响, 不仅与事件的强度有关, 还与极端事件的发生时间和持续时间密切相关(Sippel *et al.*, 2016; von Buttlar *et al.*, 2018)。

3 涡度相关技术在通量研究中的发展前景与展望

3.1 从碳水通量观测扩展到多种痕量气体通量集成研究

除 CO_2 外, CH_4 和 N_2O 作为主要的温室气体越来越受到研究者关注。近10年, 随着 CH_4 和 NO_2 高频测量气体分析仪的出现, 涡度相关技术也被广泛应用于 CH_4 和 N_2O 通量的研究, 特别是在湿地等 CH_4 和 N_2O 排放量大的生态系统中。目前中国通量网和国际多个长期观测网络(如美国的NEON和欧洲的ICOS), 也都将 CH_4 和 N_2O 通量观测列入了涡度相关观测指标体系中(Falge *et al.*, 2001; Sabbatini *et al.*, 2018)。北美通量网将2019年设立为 CH_4 通量观测年, 并由北美通量网和欧洲通量网牵头建立了全球 CH_4 通路观测网络(FLUXNET- CH_4), 着力推动全球 CH_4 通量研究。虽然 CH_4 通量研究起步较晚, 但目前全球已有200个通量站点同时进行 CH_4 通量的观测, 并初步建立全球 CH_4 通量数据库(Knox *et al.*, 2019)。ChinaFlux目前也已从现有的 CO_2 、 H_2O 和能量通量观测逐步向 CO_2 、 H_2O 、 CH_4 、 NO 、 NO_2 、 N_2O 、 NH_3 、 HNO_3 等多目标碳氮水痕量气体通量的综合观测体系发展(于贵瑞等, 2014)。

随着激光光谱技术在稳定同位素和痕量气体测量中的应用, 实现了多种痕量气体中 ^2H 、 ^{13}C 、 ^{15}N 和 ^{18}O 等同位素组成的连续监测(庞家平和温学发, 2018; Xiao *et al.*, 2018)。发挥稳定同位素技术在示踪和溯源方面的优势, 并将其与通量观测结合, 已经为研究大气-植被-土壤碳氮水传输过程与途径、通量组分区分提供了可能(Wingate *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2018)。根据生态系统不同库间碳氮水同位素

组成的差异, 研究者可以建立并量化各库之间的联系, 明确生态系统碳氮水的生物地球化学循环过程及其控制机制(Bowling *et al.*, 2008; Wingate *et al.*, 2010; Xiao *et al.*, 2018)。例如, 通过植物叶片、枝条和土壤呼吸碳通量及其稳定碳同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)的观测, 已深入开展了植物光合作用新合成碳的迁移转化过程研究(Bowling *et al.*, 2008; Wingate *et al.*, 2010; Kuptz *et al.*, 2011)。通过测定生态系统水汽通量和氢同位素比值, 确定生态系统蒸发散以及露水凝结水不同水分来源(Wang & Yakir, 2000; Wen *et al.*, 2012)。近年来, ChinaFLUX已经在千烟洲、禹城等多个通量研究站点构建了生态系统碳-氮-水通量与同位素通量整合的综合观测系统, 提升了对碳氮水通量长期变异驱动机制的研究(Wen *et al.*, 2013; Huang & Wen, 2014; 于贵瑞等, 2014)。

3.2 从单一尺度通量观测扩展到多尺度多源数据整合研究

涡度相关技术作为生态系统水平通量过程的主要观测手段, 其在空间尺度上仍具有局限性, 只能反映有限空间范围的生态系统过程。为了实现区域甚至更大尺度生态系统结构、过程和功能观测研究, 需要将大尺度的大气过程与中小尺度的植被土壤生态过程结合, 建立多尺度大气-植被-土壤生态过程的长期观测体系(于贵瑞等, 2014)。在水循环研究方面, 通过整合不同观测技术包括蒸渗仪(米级)-涡度相关技术(百米级)-闪烁仪(千米级), 研究者在黑河流域建立了全流域跨尺度水文生态过程监测系统, 不仅研究气候变化对陆面水文、生态的影响, 同时探讨了陆面小尺度过程对大气的反馈机理, 探索流域尺度的水循环过程和驱动机理(Liu *et al.*, 2018b)。近年来, ChinaFLUX通过整合通量观测站点和全球变化陆地样带, 构建了站点-样带-区域生态系统通量的多尺度综合观测技术体系(于贵瑞等, 2014), 已初步形成了国家尺度通量观测网络的框架。这一观测体系的构建, 极大地推动了区域和国家尺度碳氮水循环过程和驱动机制的研究(Chen *et al.*, 2013, 2015; Yu *et al.*, 2013, 2019; Zhu *et al.*, 2014, 2015a, 2015b)。

植物性状作为植物对全球变化响应的敏感性指标已备受关注(Wright *et al.*, 2004; Ma *et al.*, 2018)。随着全球植物叶片和根系性状数据库的建立与完善, 植物性状研究也从器官和物种水平发展到生态系统

水平(Wright *et al.*, 2004; Díaz *et al.*, 2015; 何念鹏等, 2018; Ma *et al.*, 2018; He *et al.*, 2019)。何念鹏等提出生态系统性状(ecosystem traits)的概念, 采用以物种组成和群落结构为基础的尺度上推方法建立了我国东部森林多尺度性状数据库(何念鹏等, 2018; He *et al.*, 2019)。Liu等(2018a)进一步尝试将生态系统水平气孔性状与涡度通量测量的水分利用效率进行整合分析, 发现随着干旱程度的增加, 森林植被通过降低气孔密度, 提高水分利用效率。多尺度植物性状概念的提出与应用将有助于研究者更深入地理解通量长期变异和空间格局调控机理及其对环境变化的响应与适应能力(He *et al.*, 2019; Keenan *et al.*, 2019)。

随着仪器设备、物联网和计算机技术的迅猛发展, 物候、叶绿素荧光等与生态系统碳水循环相关的功能指标也实现了高频(分钟至小时尺度)联网观测。最典型的一个跨网络合作的范例就是北美通量网与最近发展迅速的物候观测网(PhenoCam)之间的合作。目前PhenoCam已在北美通量站点的涡度塔上架设了400余台数码相机, 为物候观测提供实时图像信息和相关指标(Richardson *et al.*, 2018; Keenan *et al.*, 2019)。物候与通量观测的紧密结合使得物候数据不仅可以用于研究物候对气候变化的响应, 还为研究者更好地理解物候变化对生态系统碳水循环季节与年际变异的影响提供了直接的证据(Bowling *et al.*, 2018)。与常用植被遥感参数(归一化植被指数(NDVI)和增强植被指数(EVI))相比, 叶绿素荧光作为对“实际光合作用”更敏感的植被参数在碳循环研究中得到了广泛应用(Zhang *et al.*, 2019)。涡度通量数据与物候、叶绿素荧光、卫星遥感等多源数据的结合, 将会大大提升研究者对区域和全球尺度碳循环的研究精度, 并有助于碳模型的验证与优化(Guanter *et al.*, 2014)。

3.3 区域和全球通量监测联网研究进一步加强

建立区域与全球通量观测网络的主要目标是获取长期生态系统能量、CO₂和水汽通量数据, 定量评估生态系统能量、CO₂和水汽通量强度及其时空变异, 明晰调控生态系统通量季节和年际变异的主要气候因子, 理解植被类型、物候和土地利用变化等因素在影响生态系统碳水通量的时空变异中的作用, 明确生态系统水平碳源汇关系和区域及全球尺度碳水平衡, 为碳模型预测提供数据验证与支持

(Baldocchi *et al.*, 2001; Baldocchi, 2003, 2020)。为了更好地实现这些目标, 数据共享是最关键的一步。在全球通量研究者的努力下, FLUXNET分别在2000、2007和2015年发布了3版全球通量数据集。这些数据的发布极大地促进了区域和全球尺度通量研究, 以目前使用最为广泛的FLUXNET2007 La Tuile数据集来说, 在Web of Science检索到的使用该数据集的跨区域集成性研究论文已达数百篇。最新发布FLUXNET2015数据集包括了来自全球212个站点超过1 500个站年的0.5 h通量数据, 同时这一数据集在数据质量控制上做了较大的改进, 不仅提高了单个站点的数据质量, 而且增加了站点间数据的可比性。此外, 数据集中还增加了能量平衡闭合校正以及关键数据处理步骤的不确定性分析, 这对模型验证以及模型不确定性分析是非常有帮助的。相信这一新版数据集的发布, 会对区域及全球通量研究起到重要的推动作用(Pastorello *et al.*, 2017)。

综上所述, 基于涡度相关技术的陆地生态系统联网观测已经成为作为研究全球变化与陆地生态系统相互关系的一种重要手段。随着对生态系统通量过程认识的加强, 我们愈加强烈地认识到生态系统的时间变化、空间分异和长期性所决定的生态系统结构功能的复杂性和不可预测性, 要求人们在认识生态系统变化特征与过程机制时必须依靠多尺度、长期的和跨区域的联网观测研究。在观测体系建立上要注重顶层设计, 构建多尺度、多目标、多过程的长期观测技术体系; 加强与国内外通量观测站点的合作与联网研究, 注重已有数据的集成与挖掘工作; 通过在景观、区域和全球尺度上分析和模拟生态系统格局与过程的变化, 回答全球变化与碳循环所面临的区域和全球尺度科学问题(于贵瑞等, 2014)。

参考文献

- Aubinet M (2008). Eddy covariance CO₂ flux measurements in nocturnal conditions: an analysis of the problem. *Ecological Applications*, 18, 1368–1378.
- Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Cescatti A, Feigenwinter C, Granier A, Grunwald T, Havrankova K, Heinesch B, Longdoz B, Marcolla B, Montagnani L, Sedlak P (2005). Comparing CO₂ storage and advection conditions at night at different Carboeuroflux sites. *Boundary-Layer Meteorology*, 116, 63–93.
- Aubinet M, Vesala T, Papale D (2012). *Eddy Covariance: a*

- Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Springer, Dordrech, Netherlands.
- Baldocchi D (2003). Assessing ecosystem carbon balance: problems and prospects of the eddy covariance technique. *Global Change Biology*, 9, 478–492.
- Baldocchi D (2020). How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of global change biology. *Global Change Biology*, 26, 242–260.
- Baldocchi D, Chu HS, Reichstein M (2018). Inter-annual variability of net and gross ecosystem carbon fluxes: a review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 520–533.
- Baldocchi D, Falge E, Gu LH, Olson R, Hollinger D, Running S, Anthoni P, Bernhofer C, Davis K, Fuentes J, Goldstein A, Katul G, Law B, Lee X, Malhi Y, Meyers T, Munger W, Oechel W, 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.
- Baldocchi D, Finnigan J, Wilson K, Paw UKT, Falge E (2000). On measuring net ecosystem carbon exchange over tall vegetation on complex terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 96, 257–291.
- Biederman JA, Scott RL, Arnone JA, Jasoni RL, Litvak ME, Moreo MT, Papuga SA, Ponce-Campos GE, Schreiner-McGraw AP, Vivoni ER (2018). Shrubland carbon sink depends upon winter water availability in the warm deserts of North America. *Agricultural and Forest Meteorology*, 249, 407–419.
- Biederman JA, Scott RL, Bell TW, Bowling DR, Dore S, Garatuza-Payan J, Kolb TE, Krishnan P, Krofcheck DJ, Litvak ME, Maurer GE, Meyers TP, Oechel WC, Papuga SA, Ponce-Campos GE, Rodriguez JC, Smith WK, Vargas R, Watts CJ, Yezzer EA, Goulden ML (2017). CO₂ exchange and evapotranspiration across dryland ecosystems of southwestern North America. *Global Change Biology*, 23, 4204–4221.
- Bodesheim P, Jung M, Gans F, Mahecha MD, Reichstein M (2018). Upscaled diurnal cycles of land-atmosphere fluxes: a new global half-hourly data product. *Earth System Science Data*, 10, 1327–1365.
- Bowling DR, Logan BA, Hufkens K, Aubrecht DM, Richardson AD, Burns SP, Anderegg WRL, Blanken PD, Eiriks-son DP (2018). Limitations to winter and spring photosynthesis of a Rocky Mountain subalpine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 252, 241–255.
- Bowling DR, Pataki DE, Randerson JT (2008). Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO₂ fluxes. *New Phytologist*, 178, 24–40.
- Burba G (2013). *Eddy Covariance Method for Scientific, Industrial, Agricultural, and Regulatory Applications: a Field Book on Measuring Ecosystem Gas Exchange and Areal Emission Rates*. LI-COR Biosciences, Lincoln, USA.
- Burba GG, McDermitt DK, Grelle A, Anderson DJ, Xu LK (2008). Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO₂ flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology*, 14, 1854–1876.
- Chen BZ, Black TA, Coops NC, Krishnan P, Jassal R, Brümmer C, Nesic Z (2009). Seasonal controls on interannual variability in carbon dioxide exchange of a near-end-of rotation Douglas-fir stand in the Pacific Northwest, 1997–2006. *Global Change Biology*, 15, 1962–1981.
- Chen Z, Yu GR, Ge JP, Sun XM, Hirano T, Saigusa N, Wang QF, Zhu XJ, Zhang YP, Zhang JH, Yan JH, Wang HM, Zhao L, Wang YF, Shi PL, Zhao FH (2013). Temperature and precipitation control of the spatial variation of terrestrial ecosystem carbon exchange in the Asian region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 266–276.
- Chen Z, Yu GR, Ge JP, Wang QF, Zhu XJ, Xu ZW (2015). Roles of climate, vegetation and soil in regulating the spatial variations in ecosystem carbon dioxide fluxes in the Northern Hemisphere. *PLOS ONE*, 10, e0125265. DOI: 10.1371/journal.pone.0125265.
- Chen Z, Yu GR, Wang QF (2019). Magnitude, pattern and controls of carbon flux and carbon use efficiency in China's typical forests. *Global and Planetary Change*, 172, 464–473.
- Desai AR, Richardson AD, Moffat AM, Kattge J, Hollinger DY, Barr A, Falge E, Noormets A, Papale D, Reichstein M, Stauch VJ (2008). Cross-site evaluation of eddy covariance GPP and RE decomposition techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148, 821–838.
- Díaz S, Kattge J, Cornelissen JHC, Wright IJ, Lavorel S, Dray S, Reu B, Kleyer M, Wirth C, Colin Prentice I, Garnier E, Bönsch G, Westoby M, Poorter H, Reich PB, Moles AT, Dickie J, Gillison AN, Zanne AE, Chave J, Joseph Wright S, Sheremet'ev SN, Jactel H, Baraloto C, Cerabolini B, Pierce S, Shipley B, Kirkup D, Casanoves F, Joswig JS, Günther A, Falczuk V, Rüger N, Mahecha MD, Gorné LD (2016). The global spectrum of plant form and function. *Nature*, 529, 167–171.
- 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 BE, Meyers T, Moncrieff J, Moors E, Munger J, 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 defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 107, 43–69.

- Finnigan J (2004). The footprint concept in complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127, 117–129.
- Finnigan JJ, Clement R, Malhi Y, Leuning R, Cleugh HA (2003). A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation. *Boundary-Layer Meteorology*, 107, 1–48.
- Foken T, Leclerc MY (2004). Methods and limitations in validation of footprint models. *Agricultural and Forest Meteorology*, 127, 223–234.
- Frank D, Reichstein M, Bahn M, Thonicke K, Frank D, Mahecha MD, Smith P, van der Velde M, Vicca S, Babst F, Beer C, Buchmann N, Canadell JG, Ciais P, Cramer W, Ibrom A, Miglietta F, Poulter B, Rammig A, Seneviratne SI, Walz A, Wattenbach M, Zavala MA, Zscheischler J (2015). Effects of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: concepts, processes and potential future impacts. *Global Change Biology*, 21, 2861–2880.
- Fu Z, Dong JW, Zhou YK, Stoy PC, Niu SL (2017). Long term trend and interannual variability of land carbon uptake—The attribution and processes. *Environmental Research Letters*, 12, 014018. DOI: 10.1088/1748-9326/aa5685.
- Gao YN, Yu GR, Yan HM, Zhu XJ, Li SG, Wang QF, Zhang JH, Wang YF, Li YN, Zhao L, Shi PL (2014). A MODIS-based Photosynthetic Capacity Model to estimate gross primary production in Northern China and the Tibetan Plateau. *Remote Sensing of Environment*, 148, 108–118.
- Göckede M, Foken T, Aubinet M, Aurela M, Banza J, Bernhofer C, Bonnefond JM, Brunet Y, Carrara A, Clement R, Dellwik E, Elbers J, Eugster W, Fuhrer J, Granier A, Grünwald T, Heinesch B, Janssens IA, Knohl A, Koeble R, Laurila T, Longdoz B, Manca G, Marek M, Markkanen T, Mateus J, Matteucci G, Mauder M, Migliavacca M, Minerbi S, Moncrieff J, Montagnani L, Moors E, Ourcival JM, Papale D, Pereira J, Pilegaard K, Pita G, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Rotenberg E, Sanz MJ, Sedlak P, Seufert G, Siebicke L, Soussana JF, Valentini R, Vesala T, Verbeeck H, Yakir D (2008). Quality control of CarboEurope flux data—Part 1: Coupling footprint analyses with flux data quality assessment to evaluate sites in forest ecosystems. *Biogeosciences*, 5, 433–450.
- Gu FX, Tao B, Wen XF, Yu GR, Li KR (2010). Modeling long-term changes in carbon fluxes and storage in a subtropical coniferous plantation based on CEVSA2 model. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 6598–6605. [顾峰雪, 陶波, 温学发, 于贵瑞, 李克让 (2010). 基于CEVSA2模型的亚热带人工针叶林长期碳通量及碳储量模拟. *生态学报*, 30, 6598–6605.]
- Guanter L, Zhang Y, Jung M, Joiner J, Voigt M, Berry JA, Frankenberg C, Huete AR, Zarco-Tejada P, Lee JE, Moran MS, Ponce-Campos G, Beer C, Camps-Valls G, Buchmann N, Gianelle D, Klumpp K, Cescatti A, Baker JM, Griffis TJ (2014). Global and time-resolved monitoring of crop photosynthesis with chlorophyll fluorescence. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 1327–1333.
- Hao YB, Kang XM, Wu X, Cui XY, Liu WJ, Zhang H, Li Y, Wang YF, Xu ZH, Zhao HT (2013). Is frequency or amount of precipitation more important in controlling CO₂ fluxes in the 30-year-old fenced and the moderately grazed temperate steppe? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 171, 63–71.
- He NP, Liu CC, Piao SL, Sack L, Xu L, Luo YQ, He JS, Han XG, Zhou GS, Zhou XH, Lin Y, Yu Q, Liu SR, Sun W, Niu SL, Li SG, Zhang JH, Yu GR (2019). Ecosystem traits linking functional traits to macroecology. *Trends in Ecology & Evolution*, 34, 200–210.
- He NP, Liu CC, Zhang JH, Xu L, Yu GR (2018). Perspectives and challenges in plant traits: from organs to communities. *Acta Ecologica Sinica*, 38, 6787–6796. [何念鹏, 刘聪聪, 张佳慧, 徐丽, 于贵瑞 (2018). 植物性状研究的机遇与挑战: 从器官到群落. *生态学报*, 38, 6787–6796.]
- Hu ZM, Li SG, Yu GR, Sun XM, Zhang LM, Han SJ, Li YN (2013). Modeling evapotranspiration by combining a two-source model, a leaf stomatal model, and a light-use efficiency model. *Journal of Hydrology*, 501, 186–192.
- Hu ZM, Wu GN, Zhang LX, Li SG, Zhu XJ, Zheng H, Zhang LM, Sun XM, Yu GR (2017). Modeling and partitioning of regional evapotranspiration using a satellite-driven water-carbon coupling model. *Remote Sensing*, 9, 54. DOI: 10.3390/rs9010054.
- Hu ZM, Yu GR, Zhou YL, Sun XM, Li YN, Shi PL, Wang YF, Song X, Zheng ZM, Zhang L, Li SG (2009). Partitioning of evapotranspiration and its controls in four grassland ecosystems: application of a two-source model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1410–1420.
- Huang K, Xia JY, Wang YP, Ahlström A, Chen JQ, Cook RB, Cui EQ, Fang YY, Fisher JB, Huntzinger DN, Li Z, Michalak AM, Qiao Y, Schaefer K, Schwalm C, Wang J, Wei YX, Xu XN, Yan LM, Bian CY, Luo YQ (2018). Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms. *Nature Ecology & Evolution*, 2, 1897–1905.
- Huang L, Wen XF (2014). Temporal variations of atmospheric water vapor δD and $\delta^{18}O$ above an arid artificial oasis cropland in the Heihe River Basin. *Journal of Geophysical Research*, 119, 11456–11476.
- Ichii K, Ueyama M, Kondo M, Saigusa N, Kim J, Alberto MC, Ardö J, Euskirchen ES, Kang M, Hirano T, Joiner J, Kobayashi H, Marchesini LB, Merbold L, Miyata A, Saitoh TM, Takagi K, Varlagin A, Bret-Harte MS, Kitamura K, Kosugi Y, Kotani A, Kumar K, Li SG, MacHimura T, Matsuura Y, Mizoguchi Y, Ohta T, Mukherjee S, Yanagi Y, Yasuda Y, Zhang YP, Zhao FH (2017). New data-driven estimation of terrestrial CO₂ fluxes in Asia using a

- standardized database of eddy covariance measurements, remote sensing data, and support vector regression. *Journal of Geophysical Research*, 122, 767–795.
- Jung M, Reichstein M, Bondeau A (2009). Towards global empirical upscaling of FLUXNET eddy covariance observations: validation of a model tree ensemble approach using a biosphere model. *Biogeosciences*, 6, 2001–2013.
- Jung M, Reichstein M, Margolis HA, Cescatti A, Richardson AD, Arain MA, Arneth A, Bernhofer C, Bonal D, Chen JQ, Gianelle D, Gobron N, Kiely G, Kutsch W, Lasslop G, Law BE, Lindroth A, Merbold L, Montagnani L, Moors EJ, Papale D, Sottocornola M, Vaccari F, Williams C (2011). Global patterns of land-atmosphere fluxes of carbon dioxide, latent heat, and sensible heat derived from eddy covariance, satellite, and meteorological observations. *Journal of Geophysical Research*, 116, G00J07. DOI: 10.1029/2010JG001566.
- Jung M, Reichstein M, Schwalm CR, Huntingford C, Sitch S, Ahlström A, Arneth A, Camps-Valls G, Ciais P, Friedlingstein P, Gans F, Ichii K, Jain AK, Kato E, Papale D, Poulter B, Raduly B, Rödenbeck C, Tramontana G, Viovy N, Wang YP, Weber U, Zaehle S, Zeng N (2017). Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature. *Nature*, 541, 516–520.
- Keenan TF, Moore DJP, Desai A (2019). Growth and opportunities in networked synthesis through AmeriFlux. *New Phytologist*, 222, 1685–1687.
- Knox S, Jackson R, Poulter B, McNicol G, Fluet-Chouinard E, Zhang Z, Hugelius G, Bousquet P, Canadell J, Saunio M, Papale D, Chu H, Keenan T, Baldocchi D, Torn M, Mammarella I, Trotta C, Aurela M, Bohrer G, Zona D (2019). FLUXNET-CH₄ synthesis activity: objectives, observations, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100, 2607–2632.
- Kuptz D, Fleischmann F, Matyssek R, Grams TEE (2011). Seasonal patterns of carbon allocation to respiratory pools in 60-yr-old deciduous (*Fagus sylvatica*) and evergreen (*Picea abies*) trees assessed via whole-tree stable carbon isotope labeling. *New Phytologist*, 191, 160–172.
- Lasslop G, Reichstein M, Papale D, Richardson AD, Arneth A, Barr A, Stoy P, Wohlfahrt G (2010). Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 16, 187–208.
- Leuning R (2007). The correct form of the Webb, Pearman and Leuning equation for eddy fluxes of trace gases in steady and non-steady state, horizontally homogeneous flows. *Boundary-Layer Meteorology*, 123, 263–267.
- Li XL, Liang SL, Yu GR, Yuan WP, Cheng X, Xia JZ, Zhao TB, Feng JM, Ma ZG, Ma MG, Liu SM, Chen JQ, Shao CL, Li SG, Zhang XD, Zhang ZQ, Chen SP, Ohta T, Varlagin A, Miyata A, Takagi K, Saiqusa N, Kato T (2013). Estimation of gross primary production over the terrestrial ecosystems in China. *Ecological Modelling*, 261–262, 80–92.
- Liu CC, He NP, Zhang JH, Li Y, Wang QF, Sack L, Yu GR (2018a). Variation of stomatal traits from cold temperate to tropical forests and association with water use efficiency. *Functional Ecology*, 32, 20–28.
- Liu SM, Li X, Xu ZW, Che T, Xiao Q, Ma MG, Liu QH, Jin R, Guo JW, Wang LX, Wang WZ, Qi Y, Li HY, Xu TR, Ran YH, Hu XL, Shi SJ, Zhu ZL, Tan JL, Zhang Y, Ren ZG (2018b). The Heihe integrated observatory network: a basin-scale land surface processes observatory in China. *Vadose Zone Journal*, 17, 180072. DOI: 10.2136/vzj2018.04.0072.
- Liu P, Black TA, Jassal RS, Zha TS, Nesic Z, Barr AG, Helgason WD, Jia X, Tian Y, Stephens JJ, Ma JY (2019). Divergent long-term trends and interannual variation in ecosystem resource use efficiencies of a southern boreal old black spruce forest 1999–2017. *Global Change Biology*, 25, 3056–3069.
- Lu WZ, Xiao JF, Liu F, Zhang Y, Liu CA, Lin GH (2017). Contrasting ecosystem CO₂ fluxes of inland and coastal wetlands: a meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 23, 1180–1198.
- Ma SY, Baldocchi D, Wolf S, Verfaillie J (2016). Slow ecosystem responses conditionally regulate annual carbon balance over 15 years in Californian oak-grass savanna. *Agricultural and Forest Meteorology*, 228–229, 252–264.
- Ma SY, Osuna JL, Verfaillie J, Baldocchi DD (2017). Photosynthetic responses to temperature across leaf-canopy-ecosystem scales: a 15-year study in a Californian oak-grass savanna. *Photosynthesis Research*, 132, 277–291.
- Ma ZQ, Guo DL, Xu XL, Lu MZ, Bardgett RD, Eissenstat DM, McCormack ML, Hedin LO (2018). Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature*, 555, 94–97.
- Medlyn BE, Robinson AP, Clement R, McMurtrie RE (2005). On the validation of models of forest CO₂ exchange using eddy covariance data: some perils and pitfalls. *Tree Physiology*, 25, 839–857.
- Melaas EK, Richardson AD, Friedl MA, Dragoni D, Gough CM, Herbst M, Montagnani L, Moors E (2013). Using FLUXNET data to improve models of springtime vegetation activity onset in forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 171–172, 46–56.
- Niu SL, Fu Z, Luo YQ, Stoy PC, Keenan TF, Poulter B, Zhang LM, Piao SL, Zhou XH, Zheng H, Han JY, Wang QF, Yu GR (2017). Interannual variability of ecosystem carbon exchange: from observation to prediction. *Global Ecology and Biogeography*, 26, 1225–1237.
- Pang JP, Wen XF (2018). A review of the calibration methods for measuring the carbon and oxygen isotopes in CO₂

- based on isotope ratio infrared spectroscopy. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 143–152. [庞家平, 温学发 (2018). 稳定同位素红外光谱技术测定CO₂同位素校正方法的研究进展. 植物生态学报, 42, 143–152.]
- Park T, Ganguly S, Tømmervik H, Euskirchen ES, Høgda KA, Karlsen SR, Brovkin V, Nemani RR, Myneni RB (2016). Changes in growing season duration and productivity of northern vegetation inferred from long-term remote sensing data. *Environmental Research Letters*, 11, 084001. DOI: 10.1088/1748-9326/11/8/084001.
- Pastorello G, Papale D, Chu H, Trotta C, Agarwal D, Canfora E, Baldocchi D, Torn M (2017). A new data set to keep a sharper eye on land-air exchanges. *Eos*, 98. DOI: 10.1029/2017eo071597.
- Piao SL, Zhang XP, Chen AP, Liu Q, Lian X, Wang XH, Peng SS, Wu XC (2019). The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: a review. *Science China Earth Sciences*, 62, 1551–1563.
- Reynolds O (1895). On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of criterion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London (A)*, 186, 123–164.
- Richardson AD, Hufkens K, Milliman T, Aubrecht DM, Chen M, Gray JM, Johnston MR, Keenan TF, Klosterman ST, Kosmala M, Melaas EK, Friedl MA, Frohling S (2018). Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data*, 5, 180028. DOI: 10.1038/sdata.2018.28.
- Richardson AD, Williams M, Hollinger DY, Moore DJP, Dail DB, Davidson EA, Scott NA, Evans RS, Hughes H, Lee JT, Rodrigues C, Savage K (2010). Estimating parameters of a forest ecosystem C model with measurements of stocks and fluxes as joint constraints. *Oecologia*, 164, 25–40.
- Sabbatini S, Mammarella I, Arriga N, Fratini G, Graf A, Hörtnagl L, Ibrom A, Longdoz B, Mauder M, Merbold L, Metzger S, Montagnani L, Pitacco A, Rebmann C, Sedláč P, Šigut L, Vitale D, Papale D (2018). Eddy covariance raw data processing for CO₂ and energy fluxes calculation at ICOS ecosystem stations. *International Agrophysics*, 32, 495–515.
- Shuttleworth WJ, Wallace JS (1985). Evaporation from sparse crops—An energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, 839–855.
- Sippel S, Zscheischler J, Reichstein M (2016). Ecosystem impacts of climate extremes crucially depend on the timing. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113, 5768–5770.
- Stoy PC, El-Madany TS, Fisher JB, Gentile P, Gerken T, Good SP, Klosterhalfen A, Liu SG, Miralles DG, Perez-Priego O, Rigden AJ, Skaggs TH, Wohlfahrt G, Anderson RG, Coenders-Gerrits AMJ, Jung M, Maes WH, Mammarella I, Mauder M, Wolf S (2019). Reviews and syntheses: turning the challenges of partitioning ecosystem evaporation and transpiration into opportunities. *BiogeoSciences*, 16, 3747–3775.
- Technical Manual Writing Group of Ecosystem Carbon Sequestration Project (2015). *Observation and Investigation for Carbon Sequestration in Terrestrial Ecosystems*. Science Press, Beijing. 219–225. [生态系统固碳项目技术规范编写组 (2015). 生态系统固碳观测与调查技术规范. 科学出版社, 北京. 219–225.]
- Turner DP, Ritts WD, Cohen WB, Gower ST, Running SW, Zhao MS, Costa MH, Kirschbaum AA, Ham JM, Saleska SR, Ahl DE (2006). Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. *Remote Sensing of Environment*, 102, 282–292.
- Ueyama M, Ichii K, Iwata H, Euskirchen ES, Zona D, Rocha AV, Harazono Y, Iwama C, Nakai T, Oechel WC (2013). Upscaling terrestrial carbon dioxide fluxes in Alaska with satellite remote sensing and support vector regression. *Journal of Geophysical Research*, 118, 1266–1281.
- Vargas R, Detto M, Baldocchi DD, Allen MF (2010). Multiscale analysis of temporal variability of soil CO₂ production as influenced by weather and vegetation. *Global Change Biology*, 16, 1589–1605.
- von Buttlar J, Zscheischler J, Rammig A, Sippel S, Reichstein M, Knohl A, Jung M, Menzer O, Arain MA, Buchmann N, Cescatti A, Gianelle D, Kiely G, Law BE, Magliulo V, Margolis H, McCaughey H, Merbold L, Migliavacca M, Montagnani L, Oechel W, Pavelka M, Peichl M, Rambal S, Raschi A, Scott RL, Vaccari FP, van Gorsel E, Varlagin A, Wohlfahrt G, Mahecha MD (2018). Impacts of droughts and extreme-temperature events on gross primary production and ecosystem respiration: a systematic assessment across ecosystems and climate zones. *BiogeoSciences*, 15, 1293–1318.
- Wang XF, Yakir D (2000). Using stable isotopes of water in evapotranspiration studies. *Hydrological Processes*, 14, 1407–1421.
- Webb EK, Pearman GI, Leuning R (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 85–100.
- Wen XF, Lee X, Sun XM, Wang JL, Hu ZM, Li SG, Yu GR (2012). Dew water isotopic ratios and their relationships to ecosystem water pools and fluxes in a cropland and a grassland in China. *Oecologia*, 168, 549–561.
- Wen XF, Meng Y, Zhang XY, Sun XM, Lee X (2013). Evaluating calibration strategies for isotope ratio infrared spectroscopy for atmospheric ¹³CO₂/¹²CO₂ measurement. *Atmospheric Measurement Techniques*, 6, 1491–1501.
- Wen XF, Yu GR, Sun XM (2004). Uncertainties in long-term studies of net ecosystem CO₂ exchange with the

- atmosphere based on eddy covariance technique. *Advance in Earth Sciences*, 19, 658–663. [温学发, 于贵瑞, 孙晓敏(2004). 基于涡度相关技术估算植被/大气间净CO₂交换量中的不确定性. 地球科学进展, 19, 658–663.]
- Wilczak JM, Oncley SP, Stage SA (2001). Sonic anemometer tilt correction algorithms. *Boundary-Layer Meteorology*, 99, 127–150.
- Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law BE, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S (2002). Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 113, 223–243.
- Wingate L, Ogée J, Burlett R, Bosc A, Devaux M, Grace J, Loustau D, Gessler A (2010). Photosynthetic carbon isotope discrimination and its relationship to the carbon isotope signals of stem, soil and ecosystem respiration. *New Phytologist*, 188, 576–589.
- Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Cavender-Bares J, Chapin T, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gulias J, Hikosaka K, Lamont BB, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley JJ, Navas ML, Niinemets Ü, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov VI, Roumet C, Thomas SC, Tjoelker MG, Veneklaas EJ, Villar R (2004). The worldwide leaf economics spectrum. *Nature*, 428, 821–827.
- Xia JY, Niu SL, Ciais P, Janssens IA, Chen JQ, Ammann C, Arain A, Blanken PD, Cescatti A, Bonal D, Buchmann N, Curtis PS, Chen SP, Dong JW, Flanagan LB, Frankenberg C, Georgiadis T, Gough CM, Hui DF, Kiely G, Li JW, Lund M, Magliulo V, Marcolla B, Merbold L, Montagnani L, Moors EJ, Olesen JE, Piao SL, Raschi A, Roupsard O, Suyker AE, Urbaniak M, Vaccari FP, Varlagin A, Vesala T, Wilkinson M, Weng ES, Wohlfahrt G, Yan LM, Luo YQ (2015). Joint control of terrestrial gross primary productivity by plant phenology and physiology. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112, 2788–2793.
- Xiao J, Zhuang Q, Law BE, Chen J, Baldocchi DD, Cook DR, Oren R, Richardson AD, Wharton S, Ma S, Martin TA, Verma SB, Suyker AE, Scott RL, Monson RK, Litvak M, Hollinger DY, Sun G, Davis KJ, Bolstad PV, Burns SP, Curtis PS, Drake BG, Falk M, Fischer ML, Foster DR, Gu L, Hadley JL, Katul GG, Matamala R, McNulty S, Meyers TP, Munger JW, Noormets A, Oechel WC, Paw UKT, Schmid HP, Starr G, Torn MS, Wofsy SC (2010). A continuous measure of gross primary production for the conterminous United States derived from MODIS and AmeriFlux data. *Remote Sensing of Environment*, 114, 576–591.
- Xiao JF, Sun G, Chen JQ, Chen H, Chen SP, Dong G, Gao SH, Guo HQ, Guo JX, Han SJ, Kato T, Li YL, Lin GH, Lu WZ, Ma MG, McNulty S, Shao CL, Wang XF, Xie X, Zhang XD, Zhang ZQ, Zhao B, Zhou GS, Zhou J (2013). Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 182–183, 76–90.
- Xiao W, Wei ZW, Wen XF (2018). Evapotranspiration partitioning at the ecosystem scale using the stable isotope method—A review. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 346–361.
- Yang FH, Ichii K, White MA, Hashimoto H, Michaelis AR, Votava P, Zhu A, Huete A, Running SW, Nemani RR (2007). Developing a continental-scale measure of gross primary production by combining MODIS and AmeriFlux data through Support Vector Machine approach. *Remote Sensing of Environment*, 110, 109–122.
- Yao YG, Zhang YP, Liang NS, Tan ZH, Yu GR, Sha LQ, Song QH (2012). Pooling of CO₂ within a small valley in a tropical seasonal rain forest. *Journal of Forest Research*, 17, 241–252.
- Yu GR, Chen Z, Piao SL, Peng CH, Ciais P, Wang QF, Li XR, Zhu XJ (2014). High carbon dioxide uptake by subtropical forest ecosystems in the East Asian monsoon region. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111, 4910–4915.
- Yu GR, Jia YL, He NP, Zhu JX, Chen Z, Wang QF, Piao SL, Liu XJ, He HL, Guo XB, Wen Z, Li P, Ding GA, Goulding K (2019). Stabilization of atmospheric nitrogen deposition in China over the past decade. *Nature Geoscience*, 12, 424–429.
- Yu GR, Sun XM (2017). *Principles of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystems*. 2nd ed. Higher Education Press, Beijing. [于贵瑞, 孙晓敏 (2017). 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 2版. 高等教育出版社, 北京.]
- Yu GR, Zhang LM, Sun XM (2014). Progresses and prospects of Chinese terrestrial ecosystem flux observation and research network (ChinaFLUX). *Progress in Geography*, 33, 903–917. [于贵瑞, 张雷明, 孙晓敏 (2014). 中国陆地生态系统通量观测研究网络(ChinaFLUX)的主要进展及发展展望. 地理科学进展, 33, 903–917.]
- Yu GR, Zhu XJ, Fu YL, He HL, Wang QF, Wen XF, Li XR, Zhang LM, Zhang L, Su W, Li SG, Sun XM, Zhang YP, Zhang JH, Yan JH, Wang HM, Zhou GS, Jia BR, Xiang WH, Tong CL (2013). Spatial patterns and climate drivers of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China. *Global Change Biology*, 19, 798–810.
- 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 Y, Law BE, Stoy PC, Vesala T, Wofsy SC (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 Z, Wang S, Qiu B, Song L, Zhang Y (2019). Retrieval of sun-induced chlorophyll fluorescence and advancements in carbon cycle application. *Journal of Remote Sensing*, 23, 37–52.
- Zhu JX, He NP, Wang QF, Yuan GF, Wen D, Yu GR, Jia YL (2015a). The composition, spatial patterns, and influencing factors of atmospheric wet nitrogen deposition in Chinese terrestrial ecosystems. *Science of the Total Environment*, 511, 777–785.
- Zhu XJ, Yu GR, He HL, Wang QF, Chen Z, Gao YN, Zhang YP, Zhang JH, Yan JH, Wang HM, Zhou GS, Jia BR, Xiang WH, Li YN, Zhao L, Wang YF, Shi PL, Chen SP, Xin XP, Zhao FH, Wang YY, Tong CL, Fu YL, Wen XF, Liu YC, Zhang LM, Zhang L, Su W, Li SG, Sun XM (2014). Geographical statistical assessments of carbon fluxes in terrestrial ecosystems of China: results from up-scaling network observations. *Global and Planetary Change*, 118, 52–61.
- Zhu XJ, Yu GR, Wang QF, Hu ZM, Zheng H, Li SG, Sun XM, Zhang YP, Yan JH, Wang HM, Zhao FH, Zhang JH, Shi PL, Li YN, Zhao L, Zhang FW, Hao YB (2015b). Spatial variability of water use efficiency in China's terrestrial ecosystems. *Global and Planetary Change*, 129, 37–44.
- Zscheischler J, Mahecha MD, von Buttlar J, Harmeling S, Jung M, Rammig A, Randerson JT, Schölkopf B, Seneviratne SI, Tomelleri E, Zaehle S, Reichstein M (2014). A few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production. *Environmental Research Letters*, 9, 035001. DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/035001.

特邀编委: 温学发 责任编辑: 李 敏