

DOI: 10.5846/stxb202111273349

祁亚辉, 王小丹. 陆地生态系统碳通量面临的挑战与机遇——基于涡度协方差测定. 生态学报, 2023, 43(8): 2979-2994.

Qi Y H, Wang X D. Challenges and opportunities for measuring carbon fluxes in terrestrial ecosystems by eddy covariance. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 2979-2994.

## 陆地生态系统碳通量面临的挑战与机遇 ——基于涡度协方差测定

祁亚辉<sup>1,2</sup>, 王小丹<sup>1,\*</sup>

1 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299

2 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 区域和全球涡度协方差网络提供了基于陆地-大气生态系统间最大的综合性原位碳通量观测数据集。这些数据目前已成为自下而上核算陆地生态系统碳平衡的基础, 但部分测量数据合理性问题引起通量界广泛关注。通过梳理近 40 年研究进展, 总结了涡度协方差测量原理, 系统地分析了仪器局限性和环境因素潜在影响, 讨论了不同碳通量组分填补存在的争议、生态系统冬季休眠期的净碳吸现象违背生理学知识、夜间湍流发展不充分对生态系统呼吸的低估等, 并由此产生数据偏移和测量滞后时间等。通过阐述涡度协方差测量原理和数据处理存在的缺陷与争议, 提出了适当的改进措施以限制(或降低)数据测量产生的不确定性, 旨在为后续监测精度提升和探究陆地生态系统碳循环及其对环境因子的响应提供理论支撑。

**关键词:** 涡度; 碳通量; 观测方法; 陆地生态系统

## Challenges and opportunities for measuring carbon fluxes in terrestrial ecosystems by eddy covariance

QI Yahui<sup>1,2</sup>, WANG Xiaodan<sup>1,\*</sup>

1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Regional and global eddy covariance networks provide the largest comprehensive in situ dataset on carbon fluxes between terrestrial and atmospheric ecosystems. Carbon balance in terrestrial ecosystems can be accounted for bottom-up by these flux data. However, the plausibility of some measurement data has aroused widespread concern from the flux community. This study reviews the research progress over the past four decades, summarizes the principles of eddy covariance measurement, and systematically analyzes the limitations of the instrument and the potential impact of environmental factors. Subsequently, we discuss the controversy over the filling of different carbon flux components, the net carbon uptake phenomenon of ecosystem dormancy in winter against physiological knowledge, the underestimation of ecosystem respiration by insufficient development of nighttime turbulence, and the phenomenon of data offset and measurement lag time due to the above factors. By focusing on the defects and disputes in the measurement principle of eddy covariance and data processing, appropriate improvement measures are proposed to limit (or reduce) the uncertainty of data measurement. This study aims to provide theoretical support for improving monitoring accuracy in the future as well as exploring the carbon cycle of terrestrial ecosystems and its response to environmental factors.

**基金项目:** 青藏高原第二次综合科学考察与研究项目(2019QZKK0404); 中国科学院战略性先导科技专项(A类)泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设(XDA20020401)

**收稿日期:** 2021-11-27; **网络出版日期:** 2022-12-22

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxd@imde.ac.cn

**Key Words:** Eddy covariance; carbon flux; observation method; terrestrial ecosystem

过去几十年里,核算陆地生态系统 CO<sub>2</sub> 通量及其对气候因子变化响应的工具有了很大增进。季节或年际尺度生态系统 CO<sub>2</sub> 交换特征受到广泛关注。涡度协方差( EC) 技术在不干扰土壤表面微环境的情况下提供了基于陆地-大气生态系统间 CO<sub>2</sub> 通量的最直接观测<sup>[1]</sup>, 并以高时间分辨率及长期定位观测等优点成为国际上最具代表性和发展潜力的碳通量监测手段之一。EC 系统提供了一种跨时间和空间监测局部或区域尺度 CO<sub>2</sub> 平衡的微气象学方法<sup>[2]</sup>。该技术有望基于植物生理学知识解释整个系统碳循环变化趋势<sup>[3-4]</sup>, 并已成为当前自下而上核算陆地生态系统碳平衡的基础<sup>[5]</sup>。这些测量广泛分布在草原<sup>[6-7]</sup>、湿地<sup>[8-9]</sup>、农田<sup>[10-11]</sup>、灌丛<sup>[12-13]</sup>、森林<sup>[14-15]</sup>、北极苔原<sup>[16-17]</sup> 和城市<sup>[18-19]</sup> 生态系统等, 并越来越多地用于生态系统模型校准和验证工作<sup>[20-22]</sup>。尽管 EC 技术和方法在不断改进, 但关于部分测量数据合理性问题一直存在争议。如大气稳定分层不满足仪器湍流稳态运动测量假设对真实通量造成低估<sup>[23]</sup>, 植物冬季休眠期和非光合作用植被生态系统中不合理的净 CO<sub>2</sub> 吸收现象违背生理学知识<sup>[24-26]</sup>。这些不确定(或不合理)数据是由仪器自身测量原理和环境干扰导致(如低温时期仪器自热效应或雾滴干扰等), 并引起通量界广泛关注。通过梳理 EC 系统测量局限性, 提出与其技术假设不同的观测方法进行比较或协同测量, 对降低 CO<sub>2</sub> 核算的不确定性、年度 CO<sub>2</sub> 收支和随后的全球建模工作具有重要意义。本研究主要工作在以下几个方面:(1) 综述 EC 系统陆地碳通量观测原理, (2) 分析仪器及自身原理的局限性和环境干扰造成的不确定性, (3) 提出合适的改进措施。通过原理综述、不确定性分析和改进措施以限制(或降低)数据测量产生的不确定性, 旨在为探究陆地生态系统碳循环及其对环境因子的响应提供理论支撑。

## 1 EC 系统观测原理

EC 技术通过高频(5—20 Hz) 测量指定高度生态系统和大气间物理量脉动与垂直风速脉动的协方差, 从而估算源区范围内从测量点延伸至周围几十米至数公里的湍流输送量, 也被称为湍流脉动法。湍流运动引起大气物理量垂直交换的测量可追溯至 1951 年对水汽和热量的研究工作<sup>[27]</sup>。随着理论和仪器的进步, 1960 年开创性研究中首次成功部署<sup>[28-29]</sup>, 于 1990 年出现第一台能够用于长期且连续观测生态系统尺度 CO<sub>2</sub> 交换的 EC 产品<sup>[30]</sup>。EC 系统在年际尺度的连续测量经验已有 30 余年, 提供了基于陆地-大气生态系统间最大的综合性原位观测数据集, 以试图研究和确定生态系统及气候系统功能和影响机制。这些测量得到广泛认可与普及, 促成区域性和全球性通量观测网络联盟(FLUXNET) 的建立, 包括美国通量网、亚洲通量网、欧洲通量网、中国通量网及欧洲综合碳观测系统(ICOS) 等。

EC 系统对净生态系统 CO<sub>2</sub> 交换量(NEE) 的测量本质是生态系统呼吸(RE) 和总初级生产力(GPP) 间的碳释放和吸收平衡。生长季白天, 植物通过光合作用吸收大气中的 CO<sub>2</sub>, 导致冠层下方浓度低于上方。此时自上而下运动的湍流从冠层上方携带的 CO<sub>2</sub> 分子量高于自冠层下方向上的输送量, 促使 CO<sub>2</sub> 整体向下输送, 形成陆地生态系统吸收大气 CO<sub>2</sub> 的碳汇现象。与该现象相反的是生长季夜间和非生长季全天, 陆地生态系统呼吸排放(植物与土壤) 导致下垫面植被层 CO<sub>2</sub> 浓度高于上部, 产生的湍流运动携带着 CO<sub>2</sub> 向上输送, 促使陆地向大气排放 CO<sub>2</sub>。目前广泛使用的 EC 塔主体包括三维超声风速仪、CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O 红外气体分析仪(IRGA) 和数据采集器。为便于对通量数据后处理, 需配备辐射表、土壤/空气温湿度等气象探头。EC 系统对陆地-大气生态系统间湍流物质能量输送的快速响应是量化湍流运动的核心, 但在与有限采样频率和平均长度有关的通量偏差方面存在争议。例如, 对高大的森林和低矮植被(草地或农作物等) 测量时, 前者丢失较多的低频通量, 后者则对高频通量损失更多<sup>[31]</sup>。EC 技术测量频率能够达到每秒钟 20 次, 但并不意味着越快越好, 能够在快速测量中记录更多类型涡流才是最合适的。基于对温度和压力等具有显著不稳定大气运动周期及传感器响应速度的观测经验一致表明, 10 Hz 采样频率和 30 分钟平均周期最佳。

湍流输送是陆地-大气生态系统间物质与能量传输的重要途径。近地面层(或称为常通量层) 摩擦风速几

乎不随高度变化,湍流输送携带的通量在垂直方向是定常的。EC 系统基于大气动力学发展而来,需要被安装至近地面层。通量塔架设场地需要满足 3 个基本条件<sup>[32]</sup>:(1) 稳态流动(不等同于平衡态),即被测物理量的平均值不随时间改变;(2) 下垫面需要尽可能地水平均质以及足够大的风浪区,即通过该层面的物理量和水平通量不发生改变;(3) 观测下垫面与仪器间无任何来自痕量气体间的通量交换,且一定高度内的物理量通量不随高度改变。空间某点物理量的垂直湍流输送通量( $F$ )可表示为一定时间段内平均垂直风速( $\bar{w}$ )与该时间段内某物理量平均浓度( $\bar{c}$ )间的乘积(公式 1)<sup>[33]</sup>。结合雷诺方程可进一步将湍流输送量改写为各物理量的平均值与瞬时脉动值之和(公式 2)。当仪器在完全均一、平坦下垫面测量时,雷诺分解假设没有水平方向辐合和辐散,垂直方向风速  $\bar{w}$  和空气脉动平均值  $\bar{w}'$  近似为零。因此,湍流输送的通量可仅使用垂直风速  $w$  和某物理量浓度  $c$  的协方差  $\overline{w'c'}$  表示(公式 3)。公式 3 同时也给出了典型的 10 Hz 采样频率和 30 分钟平均周期值计算方式。

$$F = \overline{wc} \quad (1)$$

$$F = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{c} + c')} = \overline{\bar{w}\bar{c} + \bar{w}c' + w'\bar{c} + w'c'} \quad (2)$$

$$F = \overline{w'c'} = \frac{1}{18000} \sum_{i=1}^{18000} (w - \bar{w})(c - \bar{c}) \quad (3)$$

## 2 EC 系统观测局限性

目前超过 400 架 EC 塔正为全球综合性项目 FLUXNET 提供数据集<sup>[15, 34]</sup>,然而测量原理和数据处理存在着缺陷和争议,导致通量核算工作存在不确定性,阻碍了数据广泛应用潜力和与其它碳监测方法间的融合。例如,非生长季明显的 CO<sub>2</sub>吸收现象有悖于生理学知识,夜间湍流发展不充分造成的大气稳定分层现象低估了生态系统呼吸,水汽通道测量区的雾滴和下沉气流产生大量异常数据等。为此开发了系列软件和软件包用于对数据采集或原始(高频)通量数据去尖峰、坐标旋转、时滞校正、频谱响应校正和密度修正(即 WPL 修正)等初处理工作,如 EddySoft、EasyFlux DL、EddyPro、TK3、EdiRe、RElux、eddy4R-Docker 和 EddyUH 等。针对半小时完整时间序列通量及数据增值产品(如不同碳通量组分或通量足迹等)的获取也开发了众多软件和软件包,如 MDI Meteo gap-filling tool、REddyProc、GaFir、Fluxpart、PyFluxPro、openeddy 和 Kljun footprint model 等。尽管 EC 技术不断取得新进展和新发现,但仪器自身局限性起源、有效校正方法和数据标准化处理方式依旧悬而未解<sup>[35]</sup>。缺乏消除这些问题的实质性方法,增加了陆地 CO<sub>2</sub>通量核算工作的不确定性,同时也将影响跨站点间数据的比较和全球尺度综合性分析精度。

### 2.1 测量仪器和原理自身局限性

#### 2.1.1 不同碳通量组分填补存在争议

目前全球通量观测网未见数据完全连续(无缺失或异常)的报道,平均有效数据量只能占总数的 65%—75%<sup>[36]</sup>。EC 系统测量是连续的,并不意味着数据采集器记录的所有数据都能够代表生态系统真实通量状态。例如,每半小时一次湍流状态的平均值由于降水、仪器故障或微气象条件无法满足测量假设而被视为异常值<sup>[37–38]</sup>。考虑到自然界本身并不总是平稳发展,某些异常数据可能是对碳交换重要干扰的真实记录。如,大规模生物活动和长期干旱后突发降水导致的异常数据(图 1)。似乎没有理由排除这些数据,因为它们是实际碳循环的一部分。因此通量数据质量控制(如基于人工经验划定上/下限阈值或排除一天内超过 3 倍标准偏差的数据<sup>[11, 33, 37]</sup>)介入时需要谨慎考虑部分异常数据。为生成半小时完整序列通量及所需的数据增值产品,空缺数据填补需要通过将质量控制后留存的正常数据与常规气象参数(如辐射和温度等)建立关系。针对空缺数据填充工作开发了众多算法。如边缘分布采样(MDS)<sup>[5]</sup>,基于移动时间窗口内碳通量与微气象条件间的协变关系,并通过集成查表法(LUT)的时间通量自相关和平均昼夜变换法(MDC)生成完整通量序列。当前已有的插补方法对连续长周期缺失数据(如连续缺失窗口超过一个月)均表现不佳。均值法适用于短期

缺失数据,对连续长时间序列空缺数据填补效果极差。查表法将缺失值替换为一定时间窗格相似气象条件下的平均值,但长序列空缺数据很难在现存数据库中匹配到近似的环境变量。模型拟合法涉及的拟合参数多数情况下仅考虑光照或温度因素,生态系统的多因素协同作用导致现有模型拟合优度( $R^2$ )较差(高于 0.6 是比较理想的拟合结果)。机器学习法仅在数据间建立数学关系,一定程度上难以解释生态系统内在驱动机制。简单的数学关系式一方面可能不足以捕捉精细时间尺度中的异常碳通量,另一方面,大面积空缺数据会使其欠拟合或过拟合。 $\text{CO}_2$ 通量拟合时间步长的选取对降低数据插补不确定性也是至关重要的。拟合时间步长的选取目前并未得到明确定义,因此步长从几天到几个月不等,亦或根据一年中四个季度划分<sup>[9, 26, 39-41]</sup>,具有较强的人为主观性。拟合步长与训练样本量呈正比。训练样本越多,模型拟合效果越稳健,但  $R^2$  质量将下降;相反,较少的训练样本量导致拟合参数具有较大的随机性/变异性,此时生成的  $R^2$  质量较高。拟合时间步长的选取需要多方面尝试与比较,研究区下垫面实际状况及模型拟合效果和数据插补质量均要兼顾。



图 1 涡度协方差测量期间生物活动和极端天气扰动引起的异常测量

Fig.1 Anomalous measurements caused by biological activity and extreme weather disturbances during eddy covariance measurements

EC 系统当前只能观测生态系统  $\text{CO}_2$  源和汇的净总和(即 NEE),对于理解生态系统至关重要的光合作用碳吸收和生理呼吸排放通量必须通过后处理方式间接估算<sup>[5, 42]</sup>。因此开发了多种算法将直接测定的 NEE 数据再分配为其它通量组分(如 RE 和 GPP)<sup>[43-45]</sup>。这些通量分配方式可归为两类:一类是通过对夜间数据的建模和公式  $\text{NEE} = \text{RE} - \text{GPP}$  得到完整通量序列<sup>[4-5, 45-49]</sup>,优点是基于直接测定的 NEE 估算全天 RE 数据,缺点是白天 RE 的获取需要通过夜间数据的外推得到等;另一类是基于模型建模生成 RE 和 GPP(如借助光响应曲线得到白天 RE)<sup>[45, 48, 50-51]</sup>,优点是最大程度上减少了夜间数据的使用以避免将测量误差叠加至白天,缺点是光响应曲线可能会与其他因素如空气湿度等混淆,不同解的等价性可能引起较大的标准误,晨光熹微和夕阳斜照的弱光环境存在的通量存储现象将对 RE 估算产生干扰。目前多数研究选择第一种通量分配方式<sup>[16, 45]</sup>,即 NEE 被定义为 RE 和 GPP 差值。该主流通量分配模式的选择与 EC 技术研究中多认为的 NEE 代表生态系统有机碳累积速率有关<sup>[9, 25, 41]</sup>,与公认的自养呼吸和异养呼吸系统定义具有一致性,同时也为生态学中植被净初级生产力等提供了一套完整的概念结构。为此,下文针对这种碳通量分配方式的空缺数据填

补争议进行重点阐述,以期探寻更好的改进措施。

RE 空缺数据通常基于夜间质量控制后的正常数据以温度依赖性指数函数(Lloyd & Taylor 方程)推算<sup>[46, 52]</sup>,也有少部分研究涉及水汽压差等参数<sup>[5, 53]</sup>。温度对呼吸变化的高比例解释适用于不存在水分胁迫的环境。当土壤含水量或降水匮乏时能够干扰呼吸对温度的依赖性,水分需求将成为干旱下陆地生态系统呼吸的主要控制因素<sup>[54]</sup>,此时通过温度依赖性函数外推 RE 将存在一定争议。生态系统白天 RE 估算的不确定性,一方面源于夜间测量误差(如大气稳定分层现象);另一方面源于 RE 对昼夜温度敏感性存在差异性,过高的温度依赖性造成对其它因子作用的忽视<sup>[55]</sup>。温度依赖性模型的使用需要确保呼吸对除温度以外其他因素(如人工管理或土壤湿度等)的低依赖性,显著性拟合检验是相对便捷的判别方式之一,而基于分段式土壤水分或辐射强度等气象参数的探索可能是未来研究主流。目前对温度依赖性指数函数构建时表层土壤温度<sup>[41-42]</sup>、空气温度<sup>[56-57]</sup>或两者均被使用<sup>[25-26]</sup>。鉴于生态系统呼吸和地上植被光合作用分别以土壤温度和空气温度为主导,两种温度变化规律虽然趋同但存在滞后效应。基于土壤固相、液态水、土壤气体间传导和对流调节的综合研究认为,土壤温度峰值较空气温度严重情况下将滞后  $403 \pm 24$  分钟<sup>[58]</sup>。土壤生态系统  $\text{CO}_2$  的外排与土壤温度间因光合作用产物在土壤中的传递及土壤剖面热对流等因素也会引起不同步现象<sup>[59]</sup>。因此探究两种温度对通量数据填补产生的差异性及其起源,有助于揭示生态系统真实状态并降低数据不确定性。

NEE 数据的获取可以类似于通过将生态系统封闭于一个透明玻璃罩中直接测量氧气消耗或  $\text{CO}_2$  的昼夜变化。白天 NEE 空缺数据的插补通常借助光合有效辐射建立光响应方程(Michaelis-Menten 方程)<sup>[60-61]</sup>。鉴于上文已定义净生态系统  $\text{CO}_2$  交换量 NEE 为陆地生物通过光合作用 GPP 与生物呼吸 RE 间的差值,NEE 的测量将比其它通量组分更加可靠。GPP 和 RE 的计算依赖于呼吸在光照和黑暗中测量值相同的假说。生态系统昼夜呼吸关系似乎是可变的<sup>[62-63]</sup>,忽略光抑制对白天植物叶片呼吸的潜在影响将对 RE 和 GPP 造成高估<sup>[64-65]</sup>,并影响不同碳通量组分的季节动态规律。降低不同碳通量组分完整时间序列及数据增值产品的不确定性,需要基于更小和更大尺度上多种测量方法间的相互验证与补充。全天候温室气体分析仪(LGR)每半小时采集的 RE 高频数据与 EC 系统实际测量或模型外推得到的数据相比较(图 2),通过相同区域开展通量敏感性监测,但不基于与 EC 技术相同假设的方法进行验证可以适当限制模型引起的误差。

### 2.1.2 摩擦风速阈值难以界定

EC 技术的设计主要考虑白天湍流强对流条件,当微气象条件满足假设时测量数据是完全可靠的。大量研究表明,行星边界层夜间经常出现的稳定分层现象会抑制湍流运动,此时多种微气象参数不满足测量假设产生叠加效应,导致测量系统响应不足和夜间通量偏低<sup>[45, 66-67]</sup>。为识别间歇性湍流不满足观测假设的数据,目前将空气摩擦风速( $U^*$ )作为判断湍流交换强弱的标准( $U^*$  阈值过滤标准)<sup>[33, 68-69]</sup>。当  $U^*$  大于某个阈值时该时间段内的观测数据才被认定是有效的,否则将被剔除。基于  $U^*$  与  $\text{CO}_2$  通量间的关系创建了多种阈值检测方法,如移动点检验法(MPT)<sup>[67, 70]</sup>、变点检验法(CPD)<sup>[71-72]</sup>和基于中国通量观测研究网络(ChinaFLUX)数据特点创建的平均值检验法(AVT)<sup>[73-74]</sup>。阈值的界定需要对夜间数据在质和量上做到统一,但目前就合适的检验方法未形成标准,阈值大小多介于 0.1—0.2 m/s。为保证有效数据足够多, $U^*$  阈值需要尽可能的小,否则将影响通量后处理中的建模质量;为保证数据质量, $U^*$  阈值应尽可能的大,否则可能将虚假数据归为真实数据<sup>[73]</sup>。夜间 NEE(此时的 NEE 等同于 RE)与空气的湍流强度在本质上应当是无关的,但仪器测量原理的局限性造成了弱湍流时期的通量并不能反应下垫面真实状态。有研究报道称低  $U^*$  大气条件使夜间 70% 的数据被拒绝<sup>[15]</sup>,阈值质量控制工作能够极大的改变每日或更长时间尺度 NEE 变化特征<sup>[75]</sup>;相反的研究认为  $U^*$  阈值的增大或减小并不影响任何碳通量组分及季节变化趋势<sup>[76]</sup>,水平风速较强的区域无需启用  $U^*$  阈值筛选工作<sup>[7]</sup>。因此究竟是否使用  $U^*$  阈值对夜间数据质量控制存在一定争议<sup>[31, 45]</sup>。通量数据是基于对发展充分和稳态流动下的湍流进行的测量<sup>[37, 77]</sup>,当研究区下垫面为低矮植被时(如青藏高原高寒草甸)一定程度上可不启用  $U^*$  阈值质量控制工作。因为这些区域的冠层与上方空气团可能不存在解耦现象<sup>[78]</sup>。基于 EC 系统足迹区内设置箱法实验以抽样或交叉验证数据可靠性,是目前判别是否需要设置

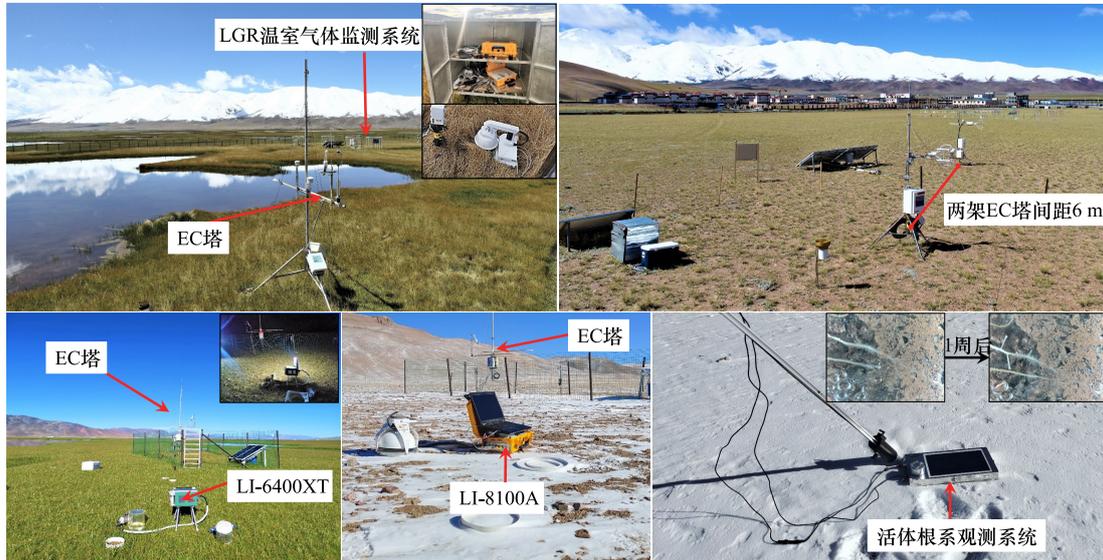


图2 通过对相同区域通量敏感性监测,但不基于与涡度协方差技术相同假设的方法对数据相互验证与补充

Fig.2 The data are mutually validated and supplemented by methods that monitor flux sensitivity over the same areas but are not based on the same assumptions as eddy covariance technique

EC: 涡度协方差; LGR: 温室气体分析仪

$U^*$  阈值及阈值大小的最直接方式之一(图2)。关键挑战在于如何确定箱法测定结果的时间与空间代表性,即如何对时间-空间差异性数据进行匹配与协调。

### 2.1.3 单塔测量无法捕获二级环流

EC 技术基于微气象学发展而来,依靠大气湍流运动携带的物质和能量进行测量,但这种通过体积平均法对植被冠层湍流的测定技术通常忽略了弥散通量<sup>[79]</sup>。弥散通量是由二级环流(或次级环流)发展而来,它们在冠层上方携带的地表和大气间的动量和标量没有被 EC 系统捕获。二级环流被定义为边界层湍流摩擦作用产生的强迫环流,本质上是基本环流(风场与气压处于某种平衡关系时的环流)为保持自身平衡关系而不断调整的产物,通过叠加于基本环流之上成为边界层与自由大气间物理量交换的主要途径。通量数据和边界层的研究一致认为二级环流通常发展于白天且大气湍流不稳定时期<sup>[80]</sup>,但基本不会产生于湍流接近中性或稳定分层时期<sup>[81]</sup>。二级环流不能被单架 EC 塔捕获,一定程度上对白天通量造成低估<sup>[78]</sup>。EC 系统目前普遍以独立的单塔架设方式为主,为保证数据可信度并降低不确定性,已有研究开展重复测量工作(图2)<sup>[82-83]</sup>。

### 2.1.4 通量测量存在滞后效应

EC 系统目前使用最广泛的 IRGA 分析仪分为闭路式和开路式。两者间最大的区别在于闭路式系统样本池(用于分析气体浓度的光学路径)封闭于仪器内部,通过抽气方式将气体抽入样本池测量,开路式样品池则被直接暴露在空气中测量<sup>[84]</sup>。两种类型的分析仪各有优势,需要根据站点环境与测量需求权衡。闭路式在降水较多的区域具有明显优势;开路式后期维护相对简单,在水汽通量和蒸散发研究工作中则表现出更多优势( $H_2O$  作为极性分子具有粘性,易吸附于闭路式采样管管壁)。EC 系统通量测量存在滞后效应主要源于两方面:首先是电子设备间通讯的异步性使测量时间错位,造成数据记录器时钟漂移;其次是仪器核心部件三维超声风速仪和 IRGA 分析仪空间分离,导致对同一个气团的非同步测量<sup>[11, 85]</sup>。闭路式系统在上述两项主要滞后效应基础上,长管路对气体输送将额外造成样品的延时测量。上述滞后效应在气体通量较低时期更易显现,因为低信噪比(即较大的随机误差)使移动时间窗口内协方差峰值产生偏差<sup>[86-87]</sup>。如果不优化这些不切实际的滞后时间,生成的通量将呈镜像模式,即通量在相似幅度的正负值间切换<sup>[88]</sup>。滞后时间可以基于垂直风速与气体浓度间最大互协方差法确定<sup>[89-90]</sup>。目前被广泛接受的数据初处理软件如 EddyPro 可以对部分滞

后时间效应补偿。闭路式系统虽然也已根据管路长度、直径和综合流速等校正了气体的延时测量,但由于管路运输中热辐射和压力等并不是稳定不变的,因此有研究认为严重情况下该系统依旧可产生 9 秒钟的时滞<sup>[19]</sup>。基于 ChinaFLUX 构建的平台多使用开路式测量系统<sup>[31]</sup>,一定程度上考虑了滞后效应和后期相关维护工作。测量延迟引起的滞后时间,短期内并不会产生特别明显效果,但将降低基于长期数据累积对碳通量驱动因素(如光和热量等)快速响应研究的准确性。因此当前有研究将常规非色散红外气体分析仪改造为量子级联激光器,尝试扩大通量检测极限并提高灵敏度以优化滞后效应<sup>[11]</sup>。

### 2.1.5 测量数据存在偏移现象

自 EC 系统起源发展至今已有 40 余年,关于植物冬季休眠期和非光合作用植被生态系统违背生理学的 CO<sub>2</sub> 吸收现象一直存在争议<sup>[24-26, 91]</sup>。这种争议在与其它技术(如箱法)并行测量时表现出较小幅度的正通量(碳排放)和较大幅度的负通量(碳吸收)<sup>[35, 92-93]</sup>。最近一项荟萃分析表明 FLUXNET 多数站点在植物休眠的寒冷时期均存在 CO<sub>2</sub> 吸收数据<sup>[94]</sup>,海洋通量界的相关研究也发现了类似现象(固定于海冰上的 EC 系统 CO<sub>2</sub> 净吸收量高出基于箱法测量的 25 倍)<sup>[95]</sup>。当前关于测量数据偏移现象的报道主要集中于寒冷环境(如环境温度低于 -5℃<sup>[53]</sup>),这些环境下记录了明显不合理的 CO<sub>2</sub> 吸收数据且因量级过大而无法忽略<sup>[7, 96]</sup>。有研究认为该现象与基于 WPL 校正的热量、水汽或静压驱动的空气密度波动有关<sup>[97-98]</sup>。也有研究认为是由其他因素造成的:例如,仪器开放式采样路径周围不同部件对太阳辐射吸收差异导致框架的差异性热膨胀和收缩。系统内部电子设备遇低温时为维持正常工作温度启动的自加热效应扰乱了传感器周围湍流状态,测量路径中发生的传导-对流和辐射热交换,光学元件的污染/老化,仪器校准系数,零点或跨度漂移,能量平衡不闭合,寒冷时期的低温或弱湍流导致大气稳定分层以及水滴或局部下沉气流等<sup>[24, 31, 99-100]</sup>。以 EC 系统漂移校准为例,为了让分析仪实际响应与出厂时的效果成线性关系,需要对零点和跨度进行调整。校准系数在野外监测环境非特别恶劣环境下可几年内保持相对稳定。分析仪零点偏移受控于环境温度和内部化学药品状态,温度变化导致 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 测量偏差分别为 0.0001‰°C<sup>-1</sup>—0.0002‰°C<sup>-1</sup> 和 0.01 mmol mol<sup>-1</sup>°C<sup>-1</sup>。虽然 EC 系统安装前均被执行标准化校准工作,程序也会进行自动补偿运算,但野外恶劣环境导致这些操作无法纠正偏移效应。EC 系统超高速斩波器工作温度模式可以设置为夏季(温度设置为 30℃)或冬季(温度设置为 5℃),合适的工作温度范围将有助于降低电力消耗和光路的热扩散影响。一些偏远且难以抵达的监测点限制了仪器维护频率(如藏北羌塘无人区),且两种模式每次切换时均需要考虑零点和跨度标定问题,因此目前实际操作中普遍将全年工作模式默认为夏季。有研究认为对于 2010 年之前型号如 LI-7500(LI-7500A 和 LI-7500RS 等)或具备夏季设置功能但在寒冷环境中使用的仪器,测量偏移现象尤为明显<sup>[101]</sup>。基于中国科学院申扎高寒草原与湿地观测试验站的 LI-7500A 和 LI-7500DS 两台仪器(图 2),尝试使用 Burba 等<sup>[24]</sup>介绍的自加热校正功能以期对冬季向下通量实现校正,但效果并不理想。这种无法校正现象也已被多次报道<sup>[25, 102]</sup>。低温自热效应在测量偏移中应当被重点考虑<sup>[24]</sup>,因为很多时候由于噪声大和不切实际的通量值,导致测量结果存在偏差且无法在真正意义上实现纠正。寒冷环境且处于休眠状态的生态系统 CO<sub>2</sub> 通量不随温度而变化,两者间的斜率理论上应当趋于零。当前 ChinaFLUX 对这些数据处理的惯用操作是剔除非生长季时期的 CO<sub>2</sub> 吸收数据,随后基于温度依赖性指数方程对这些空缺数据填补。最近一项基于开路式系统对水体-大气生态系统持续 4 年的观测表明,青藏高原青海湖冬季表现出巨大的 CO<sub>2</sub> 吸收潜力<sup>[103]</sup>。如果生态系统冬季休眠期确实存在 CO<sub>2</sub> 吸收现象,意味着目前直接删除该时期向下通量将是一项极端操作并高估 CO<sub>2</sub> 排放量。建议偏移数据的剔除标准(尤其是寒冷时期)需要进一步评估其合理性。另外,三维超声风速仪背部风向及塔体等也会使通量数据产生偏移<sup>[104]</sup>,并可能形成“烟囱效应”。较低的环境温度、强风或沙尘暴,即使倾斜 IRGA 分析仪(一般相对于三维超声风速仪倾斜约 15°,以减少水滴和粒子在光学表面的滞留<sup>[35]</sup>),仪器表面可能依旧附着冰雪沙粒等沉积物并引起数据偏移(图 1)。这些单一因素造成的偏差对数据波动幅度贡献极低,但当多种偏移因素共同累加至长期数据整合时将形成放大效应。数据偏移现象当前已被普遍报道,箱法测量以验证或约束 EC 系统是一项必要工作(图 2)。

## 2.2 环境干扰

### 2.2.1 景观异质性影响测量代表性

EC 塔通常架设在具有代表性或感兴趣的生态系统中,捕获的数据作为地球观测系统基础,并用于全球陆地植被监测<sup>[105]</sup>。EC 系统基于仪器架设高度、风向风速、湍流摩擦速度、大气稳定性和横流风分量,在景观尺度提供了空间加权值。通量足迹被用于解释测量值、描述下垫面源区位置和大小以及确定被动标量源对测量通量的相对贡献<sup>[106]</sup>。足迹区半径一般是 EC 系统安装高度的 60—70 倍,测量高度、大气稳定性和表面粗糙度等均强烈影响着通量足迹方向和面积的估算<sup>[107—108]</sup>。EC 系统微气象测量要求包括对所需的风向和大气稳定度的充分获取,并应集中在下垫面景观和结构均匀植被冠层顺风侧或下风侧,但这些在实践中通常难以实现<sup>[84]</sup>。通常基于足迹区和目标区域内土地覆盖类型两者间所能达到的相同率为标准,评判被测生态系统是否具有代表性<sup>[108—109]</sup>。当两个区域的土地覆盖组成相同率超过 80%且无显著性差异( $p$  值界定为 0.05)、相同率在 50%—80%且无显著性差异及相同率低于 50%且存在显著性差异,可分别代表被测生态系统对下垫面目标区域具有较高的代表性、中等程度代表性和较低代表性。EC 系统测量的湍流通量半径并不是固定的,而是对贡献且不断变化的上风向通量的测量。因此昼夜尺度、季节尺度和年际尺度的足迹区并非稳定不变。足迹区的时空动态对下垫面数据分析起着重要作用,尤其是景观异质性较强的生态系统。当前多数 EC 塔测量站点下垫面均存在着不同程度的异质性景观,导致基于固定范围目标区域表征大尺度陆地表面特征存在着一定的困难<sup>[109]</sup>。足迹区通常不会从塔体延伸超过 1 公里,实际监测范围可能会更小<sup>[110—111]</sup>。最近一项研究认为<sup>[112]</sup>,当前北极陆地地区虽然拥有近 120 架 EC 塔,考虑监测到的足迹区面积与陆地总面积相比,通量塔有限的空间覆盖和代表性远不足以表征整个区域,这种测量本质上是不能简单地在在大区域尺度进行放大或外推。仅通过提高塔高以加大足迹区范围的操作并不能解决这个问题。因为塔的足迹区大小与下垫面景观异质性存在正相关性,扩大塔体足迹区将更难以捕获下垫面异质性。生态系统景观格局斑块呈现出多样化与复杂性,例如北方森林生态系统下垫面显示出惊人的异质性<sup>[113]</sup>,北极苔原部分区域表现出多边形形状<sup>[114]</sup>。下垫面的复杂性随着研究尺度的增大而增加。不建议将 EC 塔架设于具有较强异质性或复杂地形中,因为已有很多研究认为这些区域的测量数据表现出的现象难以解释<sup>[105, 115]</sup>。鉴于这些复杂下垫面很难基于单架 EC 塔对整个区域量化,需要针对每个 EC 系统开展足迹分析,以增进区域乃至全球规模生态系统特征的准确表征和量化工作。塔的准确位置以及气体分析仪和三维超声风速仪的高度和方位均需要基于现有的区域气候特征确定。建议塔体位置选择时建立足迹区意识,基于对当地或附近的气象数据分析(如主风向和降水量等)开展预选点工作,以便构建适合测量的仪器类型和具有代表性的感兴趣足迹区。

### 2.2.2 能量平衡不闭合

根据热力学第一定律(能量守恒),能量闭合(地表净辐射-地表热通量=感热通量+潜热通量)应当是 100%,但基于 EC 系统对地表可用能量(即地表净辐射和地表热通量间的差值)进行验证时发现,湍流携带的感热通量和潜热通量的总和经常被低估 10%—30%<sup>[78]</sup>。全球大多数研究表明<sup>[116—118]</sup>,能量闭合率集中于 0.53—0.99,平均值约 0.79; FLUXNET 站点能量闭合率在 0.34—1.69<sup>[118]</sup>; ChinaFLUX 站点能量闭合率在 0.58—1.00<sup>[119]</sup>。EC 系统的观测基于空气脉动,通常反映较大空间范围内(几十米至数公里)生态系统的加权平均状况。能量平衡不闭合问题源于浅层土壤蓄热的计算、大气稳定度(如夜间稳定或白天强对流天气)、下垫面摩擦风速和非均匀性、非自然生态系统能量介入的干扰、以及单架 EC 塔对大尺度湍流通量低频信号的测量损失等。EC 系统对能量闭合的研究基于将净辐射划分为用于加热大气的感热通量、从植物和土壤中蒸发水分的潜热通量以及加热土壤并形成热量存储的土壤热通量,因此能量闭合依赖于对有效能量通量(即感热通量和潜热通量)、净辐射和土壤热通量的准确测定。EC 系统对净辐射及地表热通量(包括土壤热通量和冠层/空气蓄热量)的测定基于单点探头,当塔体上方存在云的局部遮挡(此时净辐射趋于零)以及热通量板测量点的斑块效应,将造成与基于空气湍流脉动得到的能量通量间的不匹配现象。有研究报道称,生物量较小、植被高度较低的生态系统冠层/空气蓄热量可以忽略不计<sup>[120]</sup>,而 ChinaFLUX 的很多数据分析中也未考虑

表层土壤温度的蓄热量<sup>[31]</sup>。由此可见,能量闭合回归分析时可以尝试不纳入单点测量数据(土壤热通量板测得的表层土壤热通量)。该建议的提出主要源于两方面:一方面考虑到热通量板的点尺度监测究竟安装多少才足以代表整个足迹区状况;另一方面,热通量板数据在转换为土壤蓄热量时存在转换误差。地表能量平衡分量的比例是生物地球化学循环和干扰、气候系统之间复杂和长期相互作用、以及植物生理和大气边界层动力学短期相互作用的共同叠加效应<sup>[121-122]</sup>。EC 系统测量的生态系统能量不闭合现象一直悬而未解<sup>[123]</sup>。将 EC 系统与足迹区内的蒸渗仪或大孔径闪烁仪等测定的通量数据相互比较与验证,并将剩余通量重新分配是当前解决能量不闭合问题的主流操作<sup>[78, 124]</sup>。鉴于当前 EC 系统的高成本和复杂性,限制了同一个测量点架设多套仪器进行数据间验证的可能性。为补偿这种系统偏差也出现了其它能量分配方式,如将剩余的可用能量分配至感热通量<sup>[125]</sup>、潜热通量<sup>[126]</sup>或利用波文比分配<sup>[66, 127]</sup>。

### 2.2.3 生长季与非生长季及昼夜划分标准不明确

EC 系统空缺数据填补时需要界定生长季与非生长季及白天与夜间的时间区间,因为不同时间区间空缺数据的填补模型存在差异性。生长季白天植物光合作用数据需要与太阳辐射信息(如光合有效辐射等)建立光响应模型,生长季夜间和非生长季期间的数据则需要通过温度依赖性指数函数建立填补模型。目前准确划分生长季区间存在一定困难,因为降水和热量等气象参数的波动都将不同程度的影响植物物候(返青/枯黄)。当前 EC 系统自身测量原理局限性导致植物休眠期间也存在碳吸收现象,因此无法基于测量数据判别植被返青和生长结束日。常用手段如基于遥感物候学观测体系无法识别到立枯遮盖下的绿叶,人工观察法对较大区域核查存在一定挑战且绿叶数量也不能作为判别生态系统净 CO<sub>2</sub> 吸收依据。生长季时长的准确界定关乎生态系统碳吸收起止时间,一定程度上可能对 CO<sub>2</sub> 源/汇性质产生影响。通过植物地下根系物候监测,并基于透明箱法在关键时间节点测定群落尺度净 CO<sub>2</sub> 通量,将局部碳吸收时间标定至 EC 系统是匹配生长季与非生长季较为合适的方式之一(图 2)。目前研究中昼夜划分标准普遍依赖于净辐射<sup>[41]</sup>、光合有效辐射<sup>[128]</sup>、太阳总辐射<sup>[25]</sup>和基于研究点经纬度提供的太阳日<sup>[45]</sup>等,这些划分标准关乎通量数据插补模型的使用和数据增值产品精度。例如,基于净辐射划分昼夜,早晨和晚上的部分时间可能会被包含在夜间。昼夜温差较大的研究区发现了低温冷制约碳吸收现象<sup>[26]</sup>,当温度不满足光合作用临界需求时,即使太阳直接照射在地表但低温限制也可能导致生态系统依旧是碳排放过程。如果把这部分时间划分至白天,所用的拟合公式或符号将是相反的。基于现场观测发现,野外监测设备存在雾滴、风沙和冰雪覆盖干扰(图 1)。因此当前昼夜划分标准均存在误判的可能性,对生态系统碳吸收与排放时间的准确界定和填补公式的正确使用产生影响。基于异常事件,可以借助监控类设备以抽样核查方式降低数据填补不确定性。最恰当的昼夜界定标准,不能仅依靠太阳高度角或辐射表信息,还需要权衡通量数据整体表现及站点气象信息。

## 3 EC 系统观测展望

区域和全球 EC 系统网络提供了基于陆地-大气生态系统间碳、水、热与动量通量最大的综合性原位观测数据集<sup>[109]</sup>。当前 EC 数据处理中,数据质量控制标准以及根据特定研究点适用的空缺数据填充方式均存在较大差异,导致世界各站点间尚未达成标准化处理方式。标准化障碍可能源于世界各站点下垫面高度异质性、复杂地形、降水、冰雪、潮湿和较寒冷区域等不适宜 EC 塔测量。鉴于目前 EC 技术的适用性,标准化处理方式可能难以实现,因此每位研究人员可能需要开发一种最适合现场实际情况的方法。从根本上解决这些问题,需要通过对相同区域通量敏感性监测但不基于与 EC 技术相同假设的方法对数据相互验证与补充,还需要在多尺度观测实验、尺度转换理论和方法方面取得进一步的突破,尤其是理论基础方面。

基于 EC 技术原理和测量局限性的阐述,提出不同于 EC 测量假设且具有发展潜力和适于推广的测量方案,如箱法、遥感和机械性约束技术有助于将测量数据从景观尺度推广至区域乃至全球尺度的评估工作。首先是基于箱法群落尺度测量,该方法不仅可以在 EC 塔足迹区内匹配到相似的测量环境,还可以明确通量来源以提供不同植被类型的空间异质性信息,将测量结果放大至足迹区尺度。Myklebust 等<sup>[129]</sup>建议 EC 系统核

算生态系统 CO<sub>2</sub> 通量时与箱法进行配合测量,以增进数据的可信度。Wang 等<sup>[130]</sup>在棉花和麦田中的测量结果也证明了两套数据间的一致性,并提出箱法是 EC 技术的合适替代方案且能够弥补空缺数据。箱法在呼吸组分或光合机理方面的研究具有强大优势,而 EC 技术对景观尺度的高时间分辨率监测是其他测量手段所难实现的。因此,箱法测量一定程度上可以通过使用合适的系数或趋势扩大至全球 EC 系统的应用范围<sup>[131]</sup>。两者协同观测与融合是目前乃至未来一段时间内的重要互补手段。卫星遥感技术提供了有关陆地表面和大气特征多时间和空间分辨率信息,能够有效模拟或提高地面 EC 通量至更大的空间和更长的时间尺度,进而成为对地面 EC 系统进行建模和/或放大的有效方案<sup>[132-134]</sup>。Jung 等<sup>[135]</sup>最近的报道认为,基于卫星遥感和气象数据将 EC 塔测量数据从区域尺度升级至全球可用的预测变量是一种可行方案。这些大气强迫数据首先用于建立区域站点级别感兴趣通量的经验模型,然后通过所有植被网格单元上应用这些模型,进而估算全球网格化通量。EC 技术可以直接测量 NEE,但其它通量组分如 GPP 和 RE 则需要通过间接估算得到<sup>[136]</sup>。鉴于 GPP 和 RE 两种通量受到不同的生物和非生物过程控制,目前出现了两套较可靠的机械性约束技术。首先是太阳诱导叶绿素荧光(SIF),该技术是植被叶绿体吸收光合有效辐射发射出一种波长位于 650—800 nm 的荧光,通过直接量化平衡光和碳反应的实际电子传输速率以推断光合作用产物 GPP<sup>[137]</sup>。另外一套约束技术是碳酰硫(COS)。COS 是一种含硫的 CO<sub>2</sub> 类似物,CO<sub>2</sub> 被植物叶片光合作用吸收的同时,两者共同扩散至细胞且不会相互作用<sup>[138]</sup>。无论是 SIF 还是 COS 技术,其目的在于与 GPP 测量协调为一定比例,进而核算光合作用产量。独特的机械约束机制,为解决全球生态学中长期悬而未解的问题带来巨大希望。

**致谢:**中国科学院成都山地所魏达研究员帮助选题并提供涡度塔照片,北京力高泰科技有限公司洪明和北京康宝智信测量技术有限公司李彦磊两位工程师对涡度技术细节给予帮助,特此致谢。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] Dugas W A. Micrometeorological and chamber measurements of CO<sub>2</sub> flux from bare soil. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1993, 67(1/2): 115-128.
- [ 2 ] Baldocchi D D, Hincks B B, Meyers T P. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology*, 1988, 69(5): 1331-1340.
- [ 3 ] Amthor J S, Goulden M L, Munger J W, Wofsy S C. Testing a mechanistic model of forest-canopy mass and energy exchange using eddy correlation: carbon dioxide and ozone uptake by a mixed oak-maple stand. *Functional Plant Biology*, 1994, 21(5): 623.
- [ 4 ] Hollinger D Y, Kelliher F M, Byers J N, Hunt J E, McSeveny T M, Weir P L. Carbon dioxide exchange between an undisturbed old-growth temperate forest and the atmosphere. *Ecology*, 1994, 75(1): 134-150.
- [ 5 ] Reichstein M, Falge E, Baldocchi D, Papale D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Gilmanov T, Granier A, Grunwald T, Havrankova K, Ilvesniemi H, Janous D, Knohl A, Laurila T, Lohila A, Loustau D, Matteucci G, Meyers T, Miglietta F, Ourcival J M, Pumpanen J, Rambal S, Rotenberg E, Sanz M, Tenhunen J, Seufert G, Vaccari F, Vesala T, Yakir D, Valentini R. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 2005, 11(9): 1424-1439.
- [ 6 ] Yun H B, Tang J, D'Imperio L, Wang X B, Qu Y, Liu L C, Zhuang Q L, Zhang W X, Wu Q B, Chen A P, Zhu Q, Chen D L, Elberling B. Warming and increased respiration have transformed an alpine steppe ecosystem on the Tibetan Plateau from a carbon dioxide sink into a source. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2022, 127(1): e2021JG006406.
- [ 7 ] Nieberding F, Wille C, Fratini G, Asmussen M O, Wang Y Y, Ma Y M, Sachs T. A long-term (2005-2019) eddy covariance data set of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O fluxes from the Tibetan alpine steppe. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 2705-2724.
- [ 8 ] Lu W Z, Xiao J F, Liu F, Zhang Y, Liu C A, Lin G H. Contrasting ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes of inland and coastal wetlands: a meta-analysis of eddy covariance data. *Global Change Biology*, 2017, 23(3): 1180-1198.
- [ 9 ] Liu X W, Zhu D, Zhan W, Chen H, Zhu Q A, Hao Y B, Liu W J, He Y X. Five-year measurements of net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange at a Fen in the zoige peatlands on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(22): 11803-11818.
- [ 10 ] 徐昔保, 杨桂山, 孙小祥. 太湖流域典型稻麦轮作农田生态系统碳交换及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(20): 6655-6665.
- [ 11 ] Wang D, Wang K, Zheng X H, Butterbach-Bahl K, Díaz-Pinés E, Chen H. Applicability of a gas analyzer with dual quantum cascade lasers for simultaneous measurements of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes from cropland using the eddy covariance technique. *Science of the Total Environment*,

- 2020, 729: 138784.
- [12] Guevara-Escobar A, González-Sosa E, Cervantes-Jiménez M, Suzán-Azpíri H, Queijeiro-Bolaños M E, Carrillo-Ángeles I, Cambrón-Sandoval V H. Machine learning estimates of eddy covariance carbon flux in a scrub in the Mexican highland. *Biogeosciences*, 2021, 18(2): 367-392.
- [13] Zhao L, Li Y N, Xu S X, Zhou H K, Gu S, Yu G R, Zhao X Q. Diurnal, seasonal and annual variation in net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of an alpine shrubland on Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2006, 12(10): 1940-1953.
- [14] Krejza J, Haeni M, Darenova E, Foltynová L, Fajstavr M, Jan Světlík, Nezval O, Bednář P, Šigut L, Horáček P, Zweifel R. Disentangling carbon uptake and allocation in the stems of a spruce forest. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 196: 104787.
- [15] Zhu S Y, Clement R, McCalmont J, Davies C A, Hill T. Stable gap-filling for longer eddy covariance data gaps: a globally validated machine-learning approach for carbon dioxide, water, and energy fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2022, 314: 108777.
- [16] Virkkala A M, Natali S M, Rogers B M, Watts J D, Savage K, Connon S J, Mauritz M, Schuur E A G, Peter D, Minions C, Nojeim J, Commanc R, Emmerton C A, Goeckede M, Helbig M, Holl D, Iwata H, Kobayashi H, Kolari P, López-Blanco E, Marushchak M E, Mastepanov M, Merbold L, Parmentier F J W, Peichl M, Sachs T, Sonntag O, Ueyama M, Voigt C, Aurela M, Boike J, Celis G, Chae N, Christensen T R, Bret-Harte M S, Dengel S, Dolman H, Edgar C W, Elberling B, Euskirchen E, Grelle A, Hatakka J, Humphreys E, Järveoja J, Kotani A, Kutzbach L, Laurila T, Lohila A, Mammarella I, Matsuura Y, Meyer G, Nilsson M B, Oberbauer S F, Park S J, Petrov R, Prokushkin A S, Schulze C, St Louis V L, Tuittila E S, Tuovinen J P, Quinton W, Varlagin A, Zona D, Zyrjanov V I. The ABCflux database: Arctic-boreal CO<sub>2</sub> flux observations and ancillary information aggregated to monthly time steps across terrestrial ecosystems. *Earth System Science Data*, 2022, 14(1): 179-208.
- [17] Hashemi J, Zona D, Arndt K A, Kalhori A, Oechel W C. Seasonality buffers carbon budget variability across heterogeneous landscapes in Alaskan Arctic Tundra. *Environmental Research Letters*, 2021, 16(3): 035008 (13pp).
- [18] Bellucco V, Marras S, Grimmond C S B, Järvi L, Sirca C, Spano D. Modelling the biogenic CO<sub>2</sub> exchange in urban and non-urban ecosystems through the assessment of light-response curve parameters. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 236: 113-122.
- [19] Menzer O, McFadden J. Statistical partitioning of a three-year time series of direct urban net CO<sub>2</sub> flux measurements into biogenic and anthropogenic components. *Atmospheric Environment*, 2017, 170: 319-333.
- [20] Baldocchi D. Measuring and modelling carbon dioxide and water vapour exchange over a temperate broad-leaved forest during the 1995 summer drought. *Plant, Cell and Environment*, 1997, 20(9): 1108-1122.
- [21] Wei D, Qi Y H, Ma Y M, Wang X F, Ma W Q, Gao T G, Huang L, Zhao H, Zhang J X, Wang X D. Plant uptake of CO<sub>2</sub> outpaces losses from permafrost and plant respiration on the Tibetan Plateau. *PNAS*, 2021, 118(33): e2015283118.
- [22] Reichstein M. Inverse modeling of seasonal drought effects on canopy CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O exchange in three Mediterranean ecosystems. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D23): 4726.
- [23] Schaller C, Gockede M, Foken T. Flux calculation of short turbulent events-comparison of three methods. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2017, 10(3): 869-880.
- [24] Burba G G, McDermitt D K, Grelle A, Anderson D J, Xu L K. Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO<sub>2</sub> flux from open-path gas analyzers. *Global Change Biology*, 2008, 14(8): 1854-1876.
- [25] Cao S K, Cao G C, Feng Q, Han G Z, Lin Y Y, Yuan J, Wu F T, Cheng S Y. Alpine wetland ecosystem carbon sink and its controls at the Qinghai Lake. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(5): 1-15.
- [26] Qi Y H, Wei D, ZHAO H, Xiaodan X D. Carbon sink of a very high marshland on the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2021: e2020JG006235.
- [27] Swinbank W C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. *Journal of Meteorology*, 1951, 8(3): 135-145.
- [28] Baldocchi D. A brief history on eddy covariance flux measurements: a personal perspective. 2013
- [29] Skinner R H, Wagner-Riddle C. Micrometeorological methods for assessing greenhouse gas flux. *Managing Agricultural Greenhouse Gases*. Amsterdam: Elsevier, 2012: 367-383.
- [30] Wofsy S C, Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Bakwin P S, Daube B C, Bassow S L, Bazzaz F A. Net exchange of CO<sub>2</sub> in a mid-latitude forest. *Science*, 1993, 260(5112): 1314-1317.
- [31] Yu G R, Wen X F, Sun X M, Tanner B D, Lee X H, Chen J Y. Overview of ChinaFLUX and evaluation of its eddy covariance measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 125-137.
- [32] Moncrieff J B, Malhi Y, Leuning R. The propagation of errors in long-term measurements of land-atmosphere fluxes of carbon and water. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 231-240.
- [33] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future.

- Global Change Biology, 2003, 9(4): 479-492.
- [34] Baldocchi D. Measuring fluxes of trace gases and energy between ecosystems and the atmosphere—the state and future of the eddy covariance method. *Global change biology*, 2014, 20(12): 3600-3609.
- [35] Deventer M J, Roman T, Bogoev I, Kolka R K, Erickson M, Lee X H, Baker J M, Millet D B, Griffis T J. Biases in open-path carbon dioxide flux measurements: roles of instrument surface heat exchange and analyzer temperature sensitivity. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 296: 108216.
- [36] Pattey E, Strachan I B, Desjardins R L, Massheder J. Measuring nighttime CO<sub>2</sub> flux over terrestrial ecosystems using eddy covariance and nocturnal boundary layer methods. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 145-158.
- [37] Foken T, Wichura B. Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 78(1/2): 83-105.
- [38] Göckede M, Rebmann C, Foken T. A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 127(3/4): 175-188.
- [39] Kato T, Tang Y H, Gu S, Hirota M, Du M Y, Li Y N, Zhao X Q. Temperature and biomass influences on interannual changes in CO<sub>2</sub> exchange in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1285-1298.
- [40] Shi P L, Sun X M, Xu L L, Zhang X Z, He Y T, Zhang D Q, Yu G R. Net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange and controlling factors in a steppe—Kobresia meadow on the Tibetan Plateau. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(2): 207-218.
- [41] Niu B, He Y T, Zhang X Z, Du M Y, Shi P L, Sun W, Zhang L M. CO<sub>2</sub> exchange in an alpine swamp meadow on the central Tibetan Plateau. *Wetlands*, 2017, 37(3): 525-543.
- [42] Lasslop G, Reichstein M, Papale D, Richardson A D, Arneeth A, Barr A, Stoy P, Wohlfahrt G. Separation of net ecosystem exchange into assimilation and respiration using a light response curve approach: critical issues and global evaluation. *Global Change Biology*, 2010, 16(1): 187-208.
- [43] Vickers D, Thomas C K, Martin J G, Law B. Self-correlation between assimilation and respiration resulting from flux partitioning of eddy-covariance CO<sub>2</sub> fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1552-1555.
- [44] Vickers D, Thomas C K, Martin J G, Law B. Self-correlation between assimilation and respiration resulting from flux partitioning of eddy-covariance CO<sub>2</sub> fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(9): 1552-1555.
- [45] Wutzler T, Lucas-Moffat A, Migliavacca M, Knauer J, Sickel K, Šigut L, Menzer O, Reichstein M. Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 2018, 15(16): 5015-5030.
- [46] Reichstein M, Tenhunen J D, Rouspard O, Ourcival J M, Rambal S, Dore S, Valentini R. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 2002, 16(1): 27-39.
- [47] Rambal S, Ourcival J M, Joffre R, Mouillot F, Nouvellon Y, Reichstein M, Rocheteau A. Drought controls over conductance and assimilation of a Mediterranean evergreen ecosystem: scaling from leaf to canopy. *Global Change Biology*, 2003, 9(12): 1813-1824.
- [48] Falge E, Baldocchi D, Tenhunen J, Aubinet M, Bakwin P, Berbigier P, Bernhofer C, Burba G, Clement R, Davis K J, Elbers J A, Goldstein A H, Grelle A, Granier A, Guðmundsson J, Hollinger D, Kowalski A S, Katul G, Wofsy S. Seasonality of ecosystem respiration and gross primary production as derived from FLUXNET measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 53-74.
- [49] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I A, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Wofsy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 97-120.
- [50] Gilmanov T G, Verma S B, Sims P L, Meyers T P, Bradford J A, Burba G G, Suyker A E. Gross primary production and light response parameters of four Southern Plains ecosystems estimated using long-term CO<sub>2</sub>-flux tower measurements. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 1071-1088.
- [51] Papale D, Valentini R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 525-535.
- [52] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Functional Ecology*, 1994, 8(3): 315.
- [53] Shao C L, Chen J Q, Chu H S, Laforteza R, Dong G, Abraha M, Batkhishig O, John R, Ouyang Z T, Zhang Y Q, Qi J G. Grassland productivity and carbon sequestration in Mongolian grasslands: the underlying mechanisms and nomadic implications. *Environmental Research*, 2017, 159: 124-134.
- [54] Niu B, Zhang X Z, Piao S L, Janssens I A, Fu G, He Y T, Zhang Y J, Shi P L, Dai E F, Yu C Q, Zhang J, Yu G R, Xu M, Wu J S, Zhu L P, Desai A R, Chen J Q, Bohrer G, Gough C M, Mammarella I, Varlagin A, Fares S, Zhao X Q, Li Y N, Wang H M, Ouyang Z. Warming homogenizes apparent temperature sensitivity of ecosystem respiration. *Science Advances*, 2021, 7(15): eabc7358.

- [55] Arroyo G D, Wood T E. Significant diel variation of soil respiration suggests above - and belowground controls in a tropical moist forest in Puerto Rico. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2020; e2019JG005353.
- [56] Puche, Senapati, Flechard, Klumpp, Kirschbaum, Chabbi. Modeling carbon and water fluxes of managed grasslands: comparing flux variability and net carbon budgets between grazed and mowed systems. *Agronomy*, 2019, 9(4): 183.
- [57] Saigusa N, Li S G, Kwon H, Takagi K, Zhang L M, Ide R, Ueyama M, Asanuma J, Choi Y J, Chun J H, Han S J, Hirano T, Hirata R, Kang M, Kato T, Kim J, Li Y N, Maeda T, Miyata A, Mizoguchi Y, Murayama S, Nakai Y, Ohta T, Saitoh T M, Wang H M, Yu G R, Zhang Y P, Zhao F H. Dataset of CarboEastAsia and uncertainties in the CO<sub>2</sub> budget evaluation caused by different data processing. *Journal of Forest Research*, 2013, 18(1): 41-48.
- [58] Zhang W X, Yu C D, Shen Z F, Liu S, Li S L, Shao Y H, Fu S L. An ignored key link in greenhouse effect: soil and soil CO<sub>2</sub> slow heat loss. *Soil Ecology Letters*, 2020, 2(4): 308-316.
- [59] Dusza Y, Sanchez-Cañete E P, Galliard J L, Ferrière R, Chollet S, Massol F, Hansart A, Juarez S, Dontsova K, Haren J V, Troch P, Pavao-Zuckerman M A, Hamerlynck E, Barron-Gafford G A. Biotic soil-plant interaction processes explain most of hysteric soil CO<sub>2</sub> efflux response to temperature in cross-factorial mesocosm experiment. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 905.
- [60] 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 N O, Katul G, Keronen P, Kowalski A, Wofsy S. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(1): 43-69.
- [61] Michaelis L, Menten M L. Die kinetik der invertinwirkung. *Biochem*, 1913, 49(352): 333-369.
- [62] Chapin F S, Woodwell G M, Randerson J T, Rastetter E B, Lovett G M, Baldocchi D D, Clark D A, Harmon M E, Schimel D S, Valentini R, Wirth C, Aber J D, Cole J J, Goulden M L, Harden J W, Heimann M, Howarth R W, Matson P A, McGuire A D, Melillo J M, Mooney H A, Neff J C, Houghton R A, Pace M L, Ryan M G, Running S W, Sala O E, Schlesinger W H, Schulze E D. Reconciling carbon-cycle concepts, terminology, and methods. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1041-1050.
- [63] Roberts B J, Owens T G, Ostrom N E, Howarth R W. Aquatic ecosystem respiration rates are not constant over diel cycles: direct quantification using dissolved oxygen concentration and isotopic composition in experimental ponds. *Limnol Oceanogr*. Forthcoming.
- [64] Wehr R, Munger J W, McManus J B, Nelson D D, Zahniser M S, Davidson E A, Wofsy S C, Saleska S R. Seasonality of temperate forest photosynthesis and daytime respiration. *Nature*, 2016, 534(7609): 680-683.
- [65] Wohlfahrt G, Bahn M, Haslwanter A, Newesely C, Cernusca A. Estimation of daytime ecosystem respiration to determine gross primary production of a mountain meadow. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 130(1/2): 13-25.
- [66] Twine T E, Kustas W P, Norman J M, Cook D R, Houser P R, Meyers T P, Prueger J H, Starks P J, Wesely M L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 103(3): 279-300.
- [67] Gu L H, Falge E M, Boden T, Baldocchi D D, Black T A, Saleska S R, Suni T, Verma S B, Vesala T, Wofsy S C, Xu L K. Objective threshold determination for nighttime eddy flux filtering. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128(3/4): 179-197.
- [68] Goulden M L, Munger J W, Fan S M, Daube B C, Wofsy S C. Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: methods and a critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology*, 1996, 2(3): 169-182.
- [69] Aubinet M, Feigenwinter C, Heinesch B, Papale D. Nighttime flux correction. In: *eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis series*. Springer Atmospheric Sciences, 2021.
- [70] Papale D, Reichstein M, Aubinet M, Canfora E, Bernhofer C, Kutsch W, Longdoz B, Rambal S, Valentini R, Vesala T, Yakir D. Towards a standardized processing of Net Ecosystem Exchange measured with eddy covariance technique: algorithms and uncertainty estimation. *Biogeosciences*, 2006, 3(4): 571-583.
- [71] Solow A R. Testing for climate change: an application of the two-phase regression model. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1987, 26(10): 1401-1405.
- [72] Lund R, Reeves J. Detection of undocumented change-points: a revision of the two-phase regression model. *Journal of Climate*, 2002, 15(17): 2547-2554.
- [73] Zhu Z L, Sun X M, Wen X F, Zhou Y L, Tian J, Yuan G F. Study on the processing method of nighttime CO<sub>2</sub> eddy covariance flux data in ChinaFLUX. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(S2): 36-46.
- [74] Jia B H, Xie Z H, Zeng Y J, Wang L Y, Wang Y Y, Xie J B, Xie Z P. Diurnal and seasonal variations of CO<sub>2</sub> fluxes and their climate controlling factors for a subtropical forest in Ningxiang. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(4): 553-564.
- [75] Guan D X, Wu J B, Zhao X S, Han S J, Yu G R, Sun X M, Jin C J. CO<sub>2</sub> fluxes over an old, temperate mixed forest in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4): 138-149.
- [76] Botía S, Komiya S, Marshall J, Koch T, Gałkowski M, Lavric J, Gomes-Alves E, Walter D, Fisch G, Pinho D M, Nelson B W, Martins G,

- Luijkx I T, Koren G, Florentie L, Carioca de Araújo A, Su M, Andreae M O, Heimann M, Peters W, Gerbig C. The CO<sub>2</sub> record at the Amazon Tall Tower Observatory: a new opportunity to study processes on seasonal and inter-annual scales. *Global Change Biology*, 2022, 28(2): 588-611.
- [77] Foken T, Goeckede M, Mauder M, Mahrt L, Amiro B D, Munger J, Lee X, Massman W, Law B. *Handbook of Micrometeorology: A Guide for Surface Flux Measurement and Analysis*, 2004, 29: 181-208.
- [78] Mauder M, Ibrom A, Wanner L, de Roo F, Bruggen P, Kiese R, Pilegaard K. Options to correct local turbulent flux measurements for large-scale fluxes using an approach based on large-eddy simulation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2021, 14(12): 7835-7850.
- [79] Bakhom M, Gallego B C, Mackenrodt M O, Surblyte-Namaviciene G. *Personal data in competition, consumer protection and intellectual property law*. Berlin: Springer, 2018.
- [80] Salesky S T, Chamecki M, Bou-Zeid E. On the nature of the transition between roll and cellular organization in the convective boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 2017, 163(1): 41-68.
- [81] Jayaraman B, Brasseur J G. Transition in atmospheric boundary layer turbulence structure from neutral to convective, and large-scale rolls. *Journal of Fluid Mechanics*, 2021, 913: A42.
- [82] Davis P A, Brown J C, Saunders M, Lanigan G, Wright E, Fortune T, Burke J, Connolly J, Jones M B, Osborne B. Assessing the effects of agricultural management practices on carbon fluxes: spatial variation and the need for replicated estimates of Net Ecosystem Exchange. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(4): 564-574.
- [83] Hollinger D Y, Richardson A D. Uncertainty in eddy covariance measurements and its application to physiological models. *Tree Physiology*, 2005, 25(7): 873-885.
- [84] Munger J W, Loescher H W, Luo H. *Measurement, tower, and site design considerations. Eddy Covariance*. Springer, Dordrecht, 2012: 21-58.
- [85] Xie Y H, Zhang M, Xiao W, Zhao J Y, Huang W J, Zhang Z, Hu Y B, Qin Z H, Jia L, Pu Y N, Chu H R, Wang J, Shi J, Liu S D, Lee X H. Nitrous oxide flux observed with tall-tower eddy covariance over a heterogeneous rice cultivation landscape. *The Science of the Total Environment*, 2022, 810: 152210.
- [86] Prajapati P, Santos E A. Measurements of methane emissions from a beef cattle feedlot using the eddy covariance technique. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 232: 349-358.
- [87] Detto M, Verfaillie J, Anderson F, Xu L K, Baldocchi D. Comparing laser-based open- and closed-path gas analyzers to measure methane fluxes using the eddy covariance method. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(10): 1312-1324.
- [88] Langford B, Acton W, Ammann C, Valach A, Nemitz E. Eddy-covariance data with low signal-to-noise ratio: time-lag determination, uncertainties and limit of detection. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8(10): 4197-4213.
- [89] McMillen R T. An eddy correlation technique with extended applicability to non-simple terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 1988, 43(3): 231-245.
- [90] Rybchak O, Toit J D, Delorme J P, Judt J K, Muskawshi K, Thau C, Feig G, Bieri M, Bruemmer C, Brummer C. Multi-year CO<sub>2</sub> budgets in South African semi-arid Karoo ecosystems under different grazing intensities. *Biogeosciences Discussions*, 2020: 1-37.
- [91] Broecker W S, Ledwell J R, Takahashi T, Weiss R, Merlivat L, Memery L, Peng T H, Jahne B, Munnich K O. Isotopic versus micrometeorologic ocean CO<sub>2</sub> fluxes: a serious conflict. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91(C9): 10517.
- [92] Holl D, Wille C, Sachs T, Schreiber P, Runkle B R, Beckebanze L, Langer L, Boike J, Pfeiffer E, Fedorova I, Bolshianov D Y, Grigoriev M K, Kutzbach L A long-term (2002 to 2017) record of closed-path and open-path eddy covariance CO<sub>2</sub> net ecosystem exchange fluxes from the Siberian Arctic. *Earth System Science Data Discussions*, 2018:1-26.
- [93] Kittler F, Eugster W, Foken T, Heimann M, Kolle O, Gockede M. High-quality eddy-covariance CO<sub>2</sub> budgets under cold climate conditions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, 122(8): 2064-2084.
- [94] Wang L M, Lee X H, Wang W, Wang X F, Wei Z W, Fu C S, Gao Y Q, Lu L, Song W M, Su P X, Lin G H. A meta-analysis of open-path eddy covariance observations of apparent CO<sub>2</sub> flux in cold conditions in FLUXNET. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(11): 2475-2487.
- [95] Butterworth B J, Else B G T. Dried, closed-path eddy covariance method for measuring carbon dioxide flux over sea ice. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, 11(11): 6075-6090.
- [96] Wang W, Xu J P, Gao Y Q, Bogoev I, Cui J, Deng L C, Hu C, Liu C, Liu S D, Shen J, Sun X M, Xiao W, Yuan G F, Lee X H. Performance evaluation of an integrated open-path eddy covariance system in a cold desert environment. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2016, 33(11): 2385-2399.
- [97] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447): 85-100.
- [98] Lee X H, Massman W J. A perspective on thirty years of the Webb, pearman and leuning density corrections. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011,

- 139(1): 37-59.
- [99] Serrano-Ortiz P, Kowalski A S, Domingo F, Ruiz B, Alados-Arboledas L. Consequences of uncertainties in CO<sub>2</sub> density for estimating net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange by open-path eddy covariance. *Boundary-Layer Meteorology*, 2008, 126(2): 209-218.
- [100] Fratini G, McDermitt D K, Papale D. Eddy-covariance flux errors due to biases in gas concentration measurements: origins, quantification and correction. *Biogeosciences*, 2014, 11(4): 1037-1051.
- [101] Oechel W C, Laskowski C A, Burba G, Gioli B, Kalhori A A M. Annual patterns and budget of CO<sub>2</sub> flux in an Arctic tussock tundra ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(3): 323-339.
- [102] Yang F L, Zhou G S, Hunt J E, Zhang F. Biophysical regulation of net ecosystem carbon dioxide exchange over a temperate desert steppe in Inner Mongolia, China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 142(3/4): 318-328.
- [103] Li X Y, Shi F Z, Ma Y J, Zhao S J, Wei J Q. Significant winter CO<sub>2</sub> uptake by saline lakes on the Qinghai-Tibet Plateau. *Global Change Biology*, 2022, 28(6): 2041-2052.
- [104] Shao C, Chen J, Li L, Dong G, Han J, Abraha M, John R. Grazing effects on surface energy fluxes in a desert steppe on the Mongolian Plateau. *Ecol Appl*, 2017, 27(2): 485-502.
- [105] Running S W, Baldocchi D D, Turner D P, Gower S T, Bakwin P S, Hibbard K A. A global terrestrial monitoring network integrating tower fluxes, flask sampling, ecosystem modeling and EOS satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 70(1): 108-127.
- [106] Kljun N, Calanca P, Rotach M W, Schmid H P. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geoscientific Model Development*, 2015, 8(11): 3695-3713.
- [107] Nassar A, Torres-Rua A, Kustas W, Nieto H, McKee M, Hipps L, Alfieri J, Prueger J, Alsina M M, McKee L, Coopmans C, Sanchez L, Dokoozlian N. To what extent does the Eddy Covariance footprint cutoff influence the estimation of surface energy fluxes using two source energy balance model and high-resolution imagery in commercial vineyards? SPIE Defense+Commercial Sensing. Proc SPIE 11414, Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V, Online Only. 2020, 11414: 98-108.
- [108] 张慧, 申双和, 温学发, 孙晓敏, 米娜. 陆地生态系统碳通量贡献区评价综述. *生态学报*, 2012, 32(23): 7622-7633.
- [109] Chu H S, Luo X Z, Ouyang Z T, Chan W S, Dengel S, Biraud S C, Torn M S, Metzger S, Kumar J, Arain M A, Arkebauer T J, Baldocchi D, Bernacchi C, Billesbach D, Black T A, Blanken P D, Bohrer G, Bracho R, Zona D. Representativeness of Eddy-Covariance flux footprints for areas surrounding AmeriFlux sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2021, 301/302: 108350.
- [110] Leclerc M Y, Thurtell G W. Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology*, 1990, 52(3): 247-258.
- [111] Vesala T, Kljun N, Rannik U, Rinne J, Sogachev A, Markkanen T, Sabelfeld K, Foken T, Leclerc M Y. Flux and concentration footprint modelling: state of the art. *Environmental Pollution: Barking, Essex*; 1987, 2008, 152(3): 653-666.
- [112] Pallandt M M T A, Kumar J, Mauritz M, Schuur E A G, Virkkala A M, Celis G, Hoffman F M, Göckede M. Representativeness assessment of the pan-Arctic eddy covariance site network and optimized future enhancements. *Biogeosciences*, 2022, 19(3): 559-583.
- [113] Ylläsjärvi I, Kuuluvainen T. How homogeneous is the boreal forest? characteristics and variability of old-growth forest on aHylacomium—MyrtillusSite type in the Pallas-yllästunturi National Park, northern Finland. *Annales Botanici Fennici*, 2009, 46(4): 263-279.
- [114] Virtanen T, Ek M. The fragmented nature of tundra landscape. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, 27: 4-12.
- [115] Wagle P, Gowda P H, Neel J P S, Northup B K, Zhou Y T. Integrating eddy fluxes and remote sensing products in a rotational grazing native tallgrass prairie pasture. *The Science of the Total Environment*, 2020, 712: 136407.
- [116] Wilson K B, Baldocchi D D, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Dolman H, Falge E, Field C, Goldstein A, Granier A, Grelle A, Halldor T, Hollinger D, Katul G, Law B E, Lindroth A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wofsy S. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 30-1.
- [117] Foken T. The energy balance closure problem: an overview. *Ecological Applications: a Publication of the Ecological Society of America*, 2008, 18(6): 1351-1367.
- [118] 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 B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Verma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 223-243.
- [119] Chen N N, Guan D X, Jin C J, Wang A Z, Wu J B, Yuan F H. Influences of snow event on energy balance over temperate meadow in dormant season based on eddy covariance measurements. *Journal of Hydrology*, 2011, 399(1/2): 100-107.
- [120] Chen J Y, Shao C L, Jiang S C, Qu L P, Zhao F Y, Dong G. Effects of changes in precipitation on energy and water balance in a Eurasian

- meadow steppe. *Ecological Processes*, 2019, 8(1): 1-15.
- [121] Sun G, Noormets A, Gavazzi M J, McNulty S G, Chen J, Domec J C, King J S, Amaty D M, Skaggs R W. Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1299-1310.
- [122] Shao C, Chen J, Li L, Zhang L. Ecosystem responses to mowing manipulations in an arid Inner Mongolia steppe: an energy perspective. *Journal of Arid Environments*, 2012, 82: 1-10.
- [123] Kang M, Cho S. Progress in water and energy flux studies in Asia: a review focused on eddy covariance measurements. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2021, 77(1): 2-23.
- [124] Kang M, Cho S. Progress in water and energy flux studies in Asia: a review focused on eddy covariance measurements. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2021, 77(1): 2-23.
- [125] Charuchittipan D, Babel W, Mauder M, Leps J P, Foken T. Extension of the averaging time in eddy-covariance measurements and its effect on the energy balance closure. *Boundary-Layer Meteorology*, 2014, 152(3): 303-327.
- [126] Wohlfahrt G, Irschick C, Thalinger B, Hörtnagl L, Obojes N, Hammerle A. Insights from independent evapotranspiration estimates for closing the energy balance: a grassland case study. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(4): 1025-1033.
- [127] Mauder M, Cuntz M, Drüe C, Graf A, Rebmann C, Schmid H P, Schmidt M, Steinbrecher R. A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 169: 122-135.
- [128] Zhou L, Zhou G S, Jia Q Y. Annual cycle of CO<sub>2</sub> exchange over a reed (*Phragmites australis*) wetland in Northeast China. *Aquatic Botany*, 2009, 91(2): 91-98.
- [129] Myklebust M C, Hippias L E, Ryel R J. Comparison of eddy covariance, chamber, and gradient methods of measuring soil CO<sub>2</sub> efflux in an annual semi-arid grass, *Bromus tectorum*. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, 148(11): 1894-1907.
- [130] Wang K, Liu C, Zheng X, Pihlatie M, Li B, Haapanala S, Vesala T, Liu H, Wang Y, Liu G, Hu F. Comparison between eddy covariance and automatic chamber techniques for measuring net ecosystem exchange of carbon dioxide in cotton and wheat fields. *Biogeosciences*, 2013, 10(11): 6865-6877.
- [131] Lucas-Moffat A M, Huth V, Augustin J, Brümmer C, Herbst M, Kutsch W L. Towards pairing plot and field scale measurements in managed ecosystems: using eddy covariance to cross-validate CO<sub>2</sub> fluxes modeled from manual chamber campaigns. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, 256/257: 362-378.
- [132] Lees K J, Quaife T, Artz R R E, Khomik M, Clark J M. Potential for using remote sensing to estimate carbon fluxes across northern peatlands: A review. *Science of the Total Environment*, 2018, 615: 857-874.
- [133] Wagle P, Gowda P H, Xiao X M, Kc A. Parameterizing ecosystem light use efficiency and water use efficiency to estimate maize gross primary production and evapotranspiration using MODIS EVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 222: 87-97.
- [134] 王绍强, 陈蝶聪, 周蕾, 何洪林, 石浩, 闫慧敏, 苏文. 中国陆地生态系统通量观测站点空间代表性. *生态学报*, 2013, 33(24): 7715-7728.
- [135] Jung M, Schwalm C, Migliavacca M, Walther S, Camps-Valls G, Koirala S, Anthoni P, Besnard S, Bodesheim P, Carvalhais N, Chevallier F, Gans F, Goll D S, Haverd V, Köhler P, Ichii K, Jain A K, Liu J Z, Lombardozzi D, Nabel J E M S, Nelson J A, O'Sullivan M, Pallandt M, Papale D, Peters W, Pongratz J, Rödenbeck C, Sitch S, Tramontana G, Walker A, Weber U, Reichstein M. Anthoni P Scaling carbon fluxes from eddy covariance sites to globe: synthesis and evaluation of the FLUXCOM approach. *Biogeosciences*, 2020, 17(5): 1343-1365.
- [136] Kira O, Y-Y Chang C, Gu L, Wen J, Hong Z, Sun Y. Partitioning net ecosystem exchange (NEE) of CO<sub>2</sub> using solar-induced chlorophyll fluorescence (SIF). *Geophysical Research Letters*, 2021, 48(4): e2020GL091247.
- [137] Gu L, Wood J D, Chang C Y Y, Sun Y, Riggs J S. Advancing terrestrial ecosystem science with a novel automated measurement system for Sun-induced chlorophyll fluorescence for integration with eddy covariance flux networks. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(1): 127-146.
- [138] Asaf D, Rotenberg E, Tatarinov F, Dicken U, Montzka S A, Yakir D. Ecosystem photosynthesis inferred from measurements of carbonyl sulphide flux. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 186-190.